

---

# NOTE

SUR

## L'ÉLECTRIFICATION des RÉSEAUX de CHEMINS de FER FRANÇAIS

TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANT CONTINU HAUTE TENSION

---

CHOIX DE LA TENSION A ADOPTER

Par M. A. FERRAND,

INGÉNIEUR PRINCIPAL A L'OFFICE CENTRAL D'ÉTUDES DE MATÉRIEL DE CHEMINS DE FER

---

### PREMIÈRE PARTIE. — INTRODUCTION.

Lorsque la disette de charbon commença à se manifester en France, au cours de cette dernière guerre, et qu'il parut évident que, pendant longtemps, la situation à ce point de vue resterait défavorable, le gouvernement français demanda à ses services compétents d'étudier les moyens par lesquels la consommation de charbon pourrait être diminuée, afin de réduire au minimum des importations fort onéreuses.

Dans ce but, il était tout à fait intéressant de chercher à utiliser, aussi complètement que possible, l'énergie offerte par les chutes d'eau aménagées ou non, si nombreuses en France, et il paraissait tout indiqué que les réseaux des chemins de fer, tout au moins ceux desservant les régions favorisées par la nature et riches en énergie hydraulique, fussent les premiers à concourir à la réalisation des économies de combustible par l'électrification de leurs lignes.

Dès 1918, un Comité d'études pour l'électrification des réseaux de chemins de fer fut constitué par le Ministère des Travaux Publics.

Ce Comité établit un programme d'études, dans la partie technique duquel figurait le choix du système de traction électrique à adopter.

Ce choix était de très grande importance, car il s'agissait de la détermination d'un système tel que le matériel roulant de l'un quelconque des réseaux intéressés puisse être utilisé, le cas échéant, sur les lignes des autres réseaux français.

Aussi, avant de prendre une décision, le Comité ainsi que les Compagnies de Chemins de fer résolurent de se documenter et confièrent à des missions le soin d'étudier très à fond la question, en se rendant dans les divers pays où la traction électrique sur des lignes d'intérêt général était déjà en service.

Ces missions, composées de délégués du gouvernement et d'Ingénieurs des Compagnies,



visitèrent successivement les installations de traction électrique existantes en Suisse, Italie, Amérique et en Angleterre.

Elles eurent des conférences non seulement avec les exploitants de ces installations mais encore avec les constructeurs et les Ingénieurs Conseils les plus compétents de ces divers pays.

Il était difficile d'avoir une opinion nette et précise avant d'avoir recueilli sur place les documents et renseignements utiles, car la lecture des publications spéciales ou des correspondances particulières ne donnait qu'une idée tout à fait insuffisante des conditions économiques et techniques de ces installations. Un certain trouble existait dans les esprits, il était provoqué par la constatation que les Compagnies de Chemins de fer, à l'étranger, entraient dans la voie de l'électrification avec des idées très différentes les unes des autres et avec des procédés non moins différents ; chacune d'elles paraissant d'ailleurs convaincue d'adopter la meilleure solution.

En Suisse, après les essais vraiment industriels réalisés sur la ligne du Loetschberg, les chemins de fer fédéraux envisageaient l'extension du système de traction par courant monophasé, 16 périodes, c'est ainsi que l'électrification de la ligne du Gothard était déjà en période d'exécution.

Les Ingénieurs des Chemins de fer italiens, avec une longue expérience de la traction par courants triphasés qu'ils ont mis au point d'une façon remarquable, paraissaient persister dans l'emploi de ces courants pour l'électrification de leurs lignes.

En Amérique, des installations modernes et très importantes retenaient l'attention, l'une présentait l'essai d'un système, nouveau venu, désigné sous le nom de monotriphasé, les autres étaient à courant continu haute tension, tandis que les installations les plus anciennes étaient réalisées en courant monophasé 25 périodes ou en courant continu basse tension.

L'Angleterre paraissait s'orienter vers le système à courant continu 1200 volts.

Que conclure de ces divergences d'opinions ? Les visites effectuées par les diverses missions furent des plus utiles puisque, après terminaison de leurs études, la conclusion en ce qui concerne le choix du système fut adoptée à l'unanimité par tous les membres de ces missions.

Cette conclusion fut que le système à courant continu haute tension devait être choisi pour l'électrification des réseaux de chemins de fer français d'intérêt général, et que c'était le système qui pouvait permettre une réalisation assez rapide de cette électrification en présentant le minimum de difficultés à surmonter, cela bien entendu dans l'état actuel de la technique.

**Observations générales relatives aux systèmes de traction par courants alternatifs et par courant continu.** — Indépendamment des objections particulières, plus ou moins sérieuses, qui peuvent être présentées relativement à chacun des systèmes à courants alternatifs, monophasés, triphasés, monotriphasés, actuellement en exploitation, les deux reproches exposés ci-après peuvent être formulés d'une manière générale contre tous ces systèmes.

1° Ils exercent des influences nuisibles et dangereuses sur les lignes télégraphiques ou téléphoniques qui sont situées à proximité des lignes de prise de courant.

Les recherches, les essais effectués, pour remédier à cet état de choses, ont certainement abouti à une diminution de l'importance de ces influences, mais il n'a pas encore été possible de les annuler complètement. Le remède auquel ces recherches ont conduit consiste à



rapprocher les sous-stations alimentant la ligne de prise de courant et à admettre entre elles des distances si réduites que l'emploi de la haute tension en perd son principal avantage.

Pour les lignes des réseaux français d'intérêt général, dont les plate-formes sont presque toujours empruntées par les lignes télégraphiques et téléphoniques interurbaines, l'objection est capitale, car une protection efficace de ces lignes entraînerait à des dépenses considérables et à des difficultés réelles d'exécution.

Avec le courant continu, les perturbations causées sur les lignes télégraphiques et téléphoniques, par le voisinage des lignes de prise de courant, sont négligeables, ou du moins peuvent, par des moyens peu compliqués, être rendues sensiblement inoffensives, les expériences faites sur la ligne électrifiée, en courant continu 3000 volts, du Chicago-Milwaukee-St-Paul, en présence des membres de la mission envoyée en Amérique (1), sont assez concluantes à cet égard et il est possible, avec des courants de cette nature, de conserver entre les sous-stations les distances répondant aux conditions les plus économiques.

2° Le bon fonctionnement des moteurs de traction à courant alternatif exige une très faible fréquence, 16 périodes environ, et cette basse fréquence est prohibitive pour d'autres usages industriels.

C'est pour cela que les réseaux de distribution générale sont toujours alimentés avec des courants alternatifs dont le nombre de périodes est égal ou supérieur à 25 périodes. Il résulte de ce qui précède, que pour alimenter directement à basse fréquence, au moyen de simples transformateurs statiques, une ligne de contact destinée à la traction par courant alternatif, il faut disposer les usines génératrices avec un matériel spécial, à basse fréquence, lourd et coûteux, et il faut établir des lignes de transports de force également spéciales pour la traction.

Le rendement d'une semblable usine ne peut pas être bon en raison du faible coefficient d'utilisation, en général inférieur à 30 %, du matériel générateur ; d'autre part, dans une région considérée, la puissance nécessaire aux installations de traction ne représente qu'une fraction de celle utilisée par l'industrie ; il y a donc un réel avantage à demander aux réseaux de distribution générale l'énergie nécessaire à la traction électrique, ou tout au moins à s'assurer par eux le secours indispensable à la sécurité d'un service d'intérêt public.

Si l'on veut, au lieu de construire des usines spéciales, recourir à un réseau, il faut disposer, entre le réseau et la ligne de contact, des appareils rotatifs transformateurs de fréquence ; dans ce cas, l'emploi du courant alternatif, qui en principe ne devrait exiger que des transformateurs statiques, perd son avantage principal par rapport au courant continu haute tension. Ce dernier exigera aussi des sous-stations avec groupes rotatifs, mais ces sous-stations seront en plus petit nombre, en raison de ce qui a été dit précédemment au sujet des perturbations exercées par les lignes à courants alternatifs sur les fils télégraphiques ou téléphoniques voisins.

Si l'on tient compte de ces faits, au point de vue dépenses d'installations, les diverses solutions, avec courant continu ou courant alternatif, présentent peu de différence, elles seront plutôt

---

(1) Voir le rapport de M. Mauduit, Professeur à la Faculté de Nancy et rapporteur du Comité d'électrification des réseaux de chemin de fer français (*Revue Générale de l'Électricité*, 30 Août, 20 et 27 Décembre 1919 (le rapport de M. l'Ingénieur en Chef Pomey (*Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones*, Décembre 1919) et le compte rendu de la conférence faite par M. Le Corbeiller, Ingénieur des Télégraphes (Société Française des Électriciens, Bulletin 3<sup>e</sup> série, tome X à 86, 1920).



moins élevées avec le courant continu, en raison des dépenses spéciales à engager pour réduire à un minimum, et de façon incomplète, les influences exercées par les lignes de prise de courants alternatifs sur les lignes à courants faibles.

Au point de vue dépenses d'exploitation, il faudrait, pour pouvoir établir une comparaison assez précise, posséder les données relatives à des installations semblables et équipées soit avec courants alternatifs basse fréquence, soit avec courant continu HT, mais les seuls exemples de traction par courant continu HT, que nous puissions actuellement retenir, sont ceux du Chicago-Milwaukee-St-Paul (3.000 volts) et du Butte Anaconda (2.400 volts) dont les services d'exploitation sont très différents de ceux en vigueur sur les lignes européennes électrifiées avec courants alternatifs à basse fréquence.

Cependant les visites des installations américaines laissent une excellente impression. La bonne tenue des moteurs à courant continu à haute tension, 1.500 ou 1.200 volts, leur grande souplesse, en font d'excellents engins de traction dont les dépenses d'entretien sont certainement moindres que celles correspondantes des moteurs à courants alternatifs monophasés.

La tension relativement peu élevée, sur la ligne de distribution, donne au système de traction par courant continu plus de garanties de bon fonctionnement et de sécurité dans le service que la tension adoptée avec les systèmes à courants alternatifs, car cette dernière tension est généralement beaucoup plus élevée.

**Considérations relatives au choix de la tension.** — Après l'étude très approfondie des caractéristiques de toutes les installations visitées, les membres des diverses missions, ainsi que nous l'avons déjà dit, fixèrent leur choix sur le système à courant continu haute tension, mais il fallait préciser la ou les tensions à adopter pour les lignes de prises de courant.

En Amérique, la tension a été progressivement élevée de 600 volts à 3.000 volts, en passant par les tensions intermédiaires de 1.200 et 2.400 volts ; l'installation la plus moderne et la plus importante, celle du Chicago-Milwaukee-St-Paul, est à 3.000 volts, les extensions, en cours de réalisation sur cette ligne, sont également à cette tension ; il semblait donc assez indiqué de l'adopter aussi pour les réseaux d'intérêt général français, car, à première vue, elle paraissait devoir donner les conditions les plus économiques.

Cependant, les Ingénieurs américains les plus compétents se montrent nettement partisans d'une tension beaucoup plus basse, 1.500 volts, pour l'électrification des réseaux français. (La justification de cette opinion sera donnée à la fin de cette étude).

En Angleterre, le " Lancashire and Yorkshire ", après des essais à échelle réduite, entre Bury et Holcomb-Brook, avec courant continu 3.600 volts, ramena cette tension à 1.200 volts pour l'équipement des lignes de la banlieue de Manchester.

Enfin, des renseignements fournis de toutes parts, il résulte que la tension de 1.500 volts paraît être actuellement une tension à ne pas dépasser avec une prise de courant par 3<sup>e</sup> rail, or ce mode de distribution de courant a beaucoup de partisans.

Le Comité d'électrification demanda aux réseaux français intéressés d'examiner la question, et de préciser la ou les tensions à adopter ; ces réseaux chargèrent l'Office Central d'Études de Matériel de Chemins de Fer de procéder à cet examen.

C'est la méthode employée pour cette étude, ses résultats, ainsi que les conclusions qui peuvent en être déduites, que nous allons exposer ci-après.

Pour être suffisamment concluante, cette étude devait être assez générale, or le temps accordé



pour son exécution était très court, il fut vite reconnu que l'examen de nombreux cas particuliers, pour lesquels les divers réseaux auraient fourni les renseignements indispensables, aurait nécessité des délais beaucoup plus longs que ceux accordés.

L'Office décida donc de n'envisager, tout d'abord, que des cas théoriques répondant aux conditions d'exploitation des lignes françaises et pour lesquels les caractéristiques pouvaient être précisées de suite, les calculs étaient ainsi très simplifiés et l'étude pouvait être entreprise d'une manière assez large pour englober les divers cas rencontrés sur les réseaux de chemins de fer français.

L'Office se réservait d'ailleurs d'examiner ensuite les cas particuliers pour lesquels les réseaux l'avaient interrogé.

---

## DEUXIÈME PARTIE. — ÉTUDE THÉORIQUE

**Préliminaires.** — Un programme d'études, une liste de coefficients de bases, furent établis.

Les hypothèses d'ordre général suivantes furent admises pour servir de bases fondamentales à ces diverses études théoriques.

### 1° Hypothèses indépendantes de la tension adoptée pour la ligne de distribution.

La ligne de distribution fut supposée alimentée par des sous-stations situées le long de la voie, à proximité de celle-ci, alimentées à leur tour par une canalisation haute tension (courants triphasés, 60.000 volts, 50 périodes, située en dehors des emprises des chemins de fer, et constituée par des câbles en cuivre portés par des poteaux métalliques. Il fut admis que le courant venant des usines génératrices du réseau de distribution serait fourni en des points de livraison de nombre et de position indéterminés.

Il n'a pas été tenu compte, dans les études comparatives, ni des usines génératrices, ni des feeders reliant ces usines aux points de livraison, ni des postes de livraison, eux-mêmes.

Enfin il n'a pas été tenu compte de la récupération pour les lignes à fortes déclivités.

### 2° Hypothèses particulières relatives à chacune des tensions adoptées pour la ligne de distribution.

Il fut décidé que la comparaison serait établie en prenant comme bases les deux tensions de 1.500 volts et de 2.400 volts.

La tension de 1.500 volts fut choisie parce qu'elle fut reconnue comme étant actuellement le maximum de la tension à admettre pour un conducteur de prise de courant du type dit à 3<sup>e</sup> rail.

La tension de 2.400 volts, qui a donné de très bons résultats depuis plusieurs années sur la ligne du Butte Anaconda, fut préférée, pour cette première étude, à celle plus élevée de 3.000 volts d'usage encore très récent.

a) Tension de 1.500 volts. — Il fut admis que :

Les sous-stations seraient équipées avec groupes transformateurs rotatifs comprenant



chacun deux commutatrices, à 750 volts, dont les collecteurs seraient montés en série pour fournir au total 1.500 volts à la ligne de distribution.

La ligne de prise de courant serait du type dit à 3<sup>e</sup> rail protégé aux points spéciaux et non protégé en voie courante, toutefois l'équipement des voies de service serait en ligne simple catenaire ; les feeders du courant continu, quand ils seraient nécessaires, seraient portés par des poteaux métalliques situés sur l'emprise du chemin de fer, le long de la voie.

b) Tension de 2.400 volts. — Il fut admis que :

En raison de la fréquence de 50 périodes adoptée pour les lignes de transport haute tension les sous-stations seraient équipées avec groupes transformateurs rotatifs, moteurs-générateurs, comprenant chacun :

Un moteur synchrone commandant deux génératrices fournissant chacune du courant continu à 1.200 volts, ces deux génératrices, montées en série, donneraient le courant continu à 2.400 volts à la ligne de distribution.

La ligne de prise de courant serait du type de celle utilisée sur le réseau du Chicago Milwaukee-St-Paul, et constituée par deux fils de cuivre rainurés, ayant chacun 100 mm<sup>2</sup> de section, suspendus à une catenaire unique portée par des poteaux métalliques espacés de 45 mètres (1).

**Observations relatives à ces hypothèses.** — Dans les projets à la tension de 1.500 volts, les sous-stations ont été supposées équipées avec des commutatrices à 750 volts, parce que ces appareils, très avantageux au point de vue prix et rendement, sont de construction courante à la fréquence de 50 périodes ; dans les projets à la tension de 2.400 volts, les sous-stations ont été supposées équipées avec des groupes moteurs-générateurs, parce que les commutatrices à 1.200 volts 50 périodes n'existent pas encore, ou tout au moins n'ont pas été utilisées jusqu'ici pour un service de traction.

Dans cette étude comparative, il n'a été tenu compte que des faits acquis actuellement et il n'a pas été fait état de l'emploi d'appareils nouveaux, tels que les soupapes à vapeur de mercure qui n'ont pas encore fait leurs preuves au point de vue de la traction électrique sur les lignes d'intérêt général.

Dans les projets à la tension à 1.500 volts, la ligne de prise de courant a été supposée équipée avec le 3<sup>e</sup> rail, parce que ce système présente des avantages pour la traction électrique sur les lignes d'intérêt général, nous aurons d'ailleurs l'occasion d'insister sur ces avantages au cours de cette note.

Le 3<sup>e</sup> rail ne pouvait pas être pris en considération pour équiper les lignes de prise de courant à la tension de 2.400 volts parce que, comme il a été déjà dit, la tension de 1.500 volts est considérée actuellement comme un maximum qu'il est préférable de ne pas dépasser pour un rail isolé ; cette tension de 1.500 volts permet d'écarter les sous-stations à des distances de 20 à 30 kilomètres, l'adoption pour le 3<sup>e</sup> rail de tensions plus élevées ne pourrait être prise en considération que dans le but d'écarter encore plus ces sous-stations, or

---

(1) Ce faible écartement des supports de la ligne catenaire est motivé par la nature du mode de suspension de la ligne de contact : de courtes portées de la ligne catenaire sont nécessaires pour assurer à la ligne de contact la souplesse suffisante.



l'expérience (1) a démontré que, pour les grands intervalles entre sous-stations, le 3<sup>e</sup> rail présentait des inconvénients sérieux, l'impédance du rail pouvant occasionner des surtensions excessives.

**Méthode suivie au cours de l'Etude théorique.** — Quelle que soit la tension adoptée pour la ligne de prise de courant, les paramètres les plus caractéristiques d'un projet de traction électrique sont au nombre de 4, et chacun d'eux a une importance capitale pour l'étude du projet.

Ce sont : le profil de la ligne, la puissance des locomoteurs, l'écartement kilométrique minimum entre les trains aux heures de la journée où le service est le plus intensif et enfin le trafic annuel par kilomètre de ligne.

Le profil de la ligne intervient dans la détermination de l'écartement à admettre entre les sous-stations, pour le calcul des sections à donner aux feeders et pour l'établissement des caractéristiques des locomoteurs.

La puissance des locomoteurs intervient aussi dans la détermination de l'écartement à admettre entre les sous-stations, dans le calcul de la section des feeders et dans l'évaluation des dépenses d'installation et d'exploitation relatives au matériel roulant automoteur.

L'écartement minimum entre les trains aux heures où le service est le plus intensif a une influence considérable sur l'écartement entre les sous-stations, sur la section des feeders, sur les dépenses d'installation et d'exploitation relatives aux sous-stations, tandis que, avec la traction à vapeur, cet écartement minimum ne joue pas un rôle économique.

Enfin le trafic annuel détermine le nombre de trains à prévoir et par suite sert à calculer les dépenses d'installation et d'exploitation relatives aux locomoteurs, ainsi que les dépenses d'énergie.

Il était impossible, dans ces études théoriques, d'envisager les variations simultanées de tous ces paramètres ; en réalité un seul, le trafic, a été conservé comme variable indépendante, et de nombreuses hypothèses ont été faites relativement aux autres paramètres, de façon à donner à l'étude un caractère suffisamment général.

Ces hypothèses ont permis de diviser l'étude.

Celles relatives au profil fournirent trois divisions principales. savoir :

A. — Lignes à profil facile, ne présentant pas de déclivité supérieure à 5 mm par mètre, et dont la rampe moyenne est nulle.

B. — Lignes de profil moyen, présentant des déclivités de l'ordre de 5 à 15 mm par mètre rampe moyenne 10 mm par mètre.

C. — Lignes à profil difficile, présentant des déclivités de l'ordre de 20 à 30 mm par mètre, rampe moyenne 25 mm par mètre.

Pour chacune de ces études principales une puissance de locomotive a été choisie, aussi appropriée que possible au profil correspondant. Il eut été sans doute intéressant de faire varier le paramètre puissance des locomotives, afin de préciser son influence dans les évaluations comparatives, mais les délais accordés n'ont pas permis de pousser plus loin les recherches dans cette voie.

---

(1) Un 3<sup>e</sup> rail à 2.400 volts avait été installé en Amérique sur la ligne du Michigan Central avec des sous-stations écartées de 80 km. Des surtensions à 6.000 volts ont été constatées sur cette ligne, du fait de l'écartement excessif des sous-stations ; l'installation a été transformée pour 1.200 volts par l'adjonction de sous-stations intermédiaires.



Nous avons ainsi admis :

Pour les études A : Locomotives de 1500 HP produisant en moyenne 800 HP, avec charge moyenne de 500 tonnes, vitesse moyenne de marche 70 km, vitesse commerciale 40 km à l'heure.

Pour les études B : Locomotives de 2000 HP produisant en moyenne 1500 HP, avec charge moyenne remorquée de 480 tonnes, vitesse moyenne de marche 45 km, vitesse commerciale 30 km à l'heure.

Pour les études C : Locomotives de 2000 HP produisant en moyenne 1500 HP, avec charge moyenne remorquée de 530 tonnes, en double traction, vitesse moyenne de marche 35 km, vitesse commerciale 25 km à l'heure.

Chaque étude principale A B et C a été divisée en un certain nombre d'études secondaires, en fixant pour chacune d'elles un écartement minimum entre les trains aux heures de service intensif. C'est ainsi que l'étude principale A comprend 4 projets avec les écartements respectifs des trains suivants : 5 km, 10 km, 20 km, 40 km (intervalles de temps correspondants : environ 4 m, 9 m, 17 m, 34 m) (1).

L'étude principale B comprend les études B<sub>1</sub> (ligne à double voie) et B<sub>2</sub> (ligne à voie unique) divisées comme suit :

B<sub>1</sub> en 3 projets avec écartement minimum entre les trains de 10 km, 20 km, 40 km (1) (intervalles de temps correspondants : 13 m, 26 m, 53 m).

B<sub>2</sub> en 2 projets avec écartement minimum entre les trains de 10 km, 20 km (1) (intervalles de temps correspondants : 13 m et 26 m).

L'étude principale C comprend les études C<sub>1</sub> (ligne à double voie) et C<sub>2</sub> (ligne à voie unique) divisées comme suit :

C<sub>1</sub> en 2 projets avec écartement minimum entre les trains de 10 km, 20 km (intervalles de temps correspondants : 17 m, 34 m) (1).

C<sub>2</sub> en 2 projets avec écartement minimum entre les trains de 10 km, 20 km (intervalles de temps correspondants : 17 m, 34 m) (1).

Il ne restait donc plus, dans chaque cas, qu'un seul paramètre indéterminé : le trafic.

Ces études constituant chacune un véritable petit projet ont été traitées de la même manière.

Les dépenses d'installation ainsi que celles d'exploitation ont été évaluées en admettant successivement les tensions de 1500 volts et de 2400 volts et en tablant sur les prix (matières et main-d'œuvre) de 1914 d'une part et sur les prix correspondants de 1920 d'autre part.

La ligne a été supposée de longueur indéfinie et les diverses dépenses classées par catégories, comme il est indiqué ci-après, ont été rapportées au kilomètre de ligne.

**Dépenses d'installation.** — Elles ont été classées en trois catégories *a*, *b* et *c*.

(*a*) Dépenses pouvant être considérées comme indépendantes du profil, de la puissance des locomotives, de l'écartement minimum entre les trains, de l'écartement entre les sous-stations et du trafic. { Lignes à haute tension alternative.  
Ligne de distribution de l'énergie aux locomotives.

---

(1) Certains écartements minima des trains sont peut-être en dehors des limites de la pratique courante ; ils ont été choisis soit parce qu'ils constituent des cas extrêmes permettant, avec ceux qui les suivent, une interpolation des résultats, soit pour faciliter les calculs, en étant semblables à ceux choisis dans une étude précédente.



(b) Dépenses qui dépendent du profil, de la puissance des locomotives, de l'écartement minimum entre les trains consécutifs et de l'écartement entre les sous-stations, mais qui sont indépendantes du trafic.

Sous-stations.

Feeders pour le courant continu.

(c) Dépenses ne dépendant que de la puissance des locomotives et du trafic.

Matériel roulant locomoteurs.

**Dépenses d'exploitation.** — Elles ont été classées en quatre catégories.

(a) Dépenses pouvant être considérées comme indépendantes du profil, de la puissance des locomotives, de l'écartement minimum entre les trains, de l'écartement entre les sous-stations et du trafic.

Intérêt, amortissement et entretien des lignes à haute tension alternative et des lignes de distribution de l'énergie aux véhicules automoteurs.

(b) Dépenses qui dépendent du profil, de la puissance des locomotives, de l'écartement minimum entre les trains consécutifs et de l'écartement entre les sous-stations, mais qui sont indépendantes du trafic.

Intérêt, amortissement, entretien et conduite des sous-stations.

Intérêt, amortissement, entretien des feeders pour le courant continu.

(c) Dépenses ne dépendant que de la puissance des locomoteurs et du trafic.

Intérêt, amortissement, entretien et conduite du matériel roulant automoteur.

Energie utilisée à la jante des véhicules moteurs.

Pertes d'énergie dans les locomoteurs.

(d) Dépenses qui dépendent de tous les paramètres

Pertes d'énergie dans les diverses parties de l'installation autres que les locomoteurs.

Ainsi que le montrent les spécifications de dépenses ci-dessus, un certain nombre d'entre elles sont fonction non seulement des paramètres de bases que nous avons déjà précisés, mais encore de l'écartement entre les sous-stations consécutives.

Afin de déterminer le meilleur intervalle à adopter entre ces sous-stations dans chacun des cas considérés, nous avons tracé les courbes des dépenses, par kilomètre de ligne, en fonction de cet intervalle.

Ces courbes, annexées à cette note, ont une forme en V, elles montrent que les dépenses commencent à diminuer, au fur et à mesure que l'écartement entre les sous-stations augmente, pour croître ensuite aussitôt que cet écartement est devenu suffisant pour nécessiter l'adjonction de feeders à la ligne de distribution.

Elles ont permis de déterminer l'écartement correspondant au minimum de dépenses d'exploitation dans chacun des cas examinés; c'est cette distance, correspondant aux conditions les plus économiques, qui a été conservée pour terminer l'étude, c'est-à-dire pour tracer les courbes des dépenses d'installation et d'exploitation en fonction du trafic évalué en million de tonnes par kilomètre de ligne et par an.

Ces courbes de dépenses en fonction du trafic, établies, comme il a été dit, en supposant des tensions de 2400 volts et 1500 volts sur les lignes de prise de courant, suffiraient à elles seules



pour fournir la comparaison économique recherchée ; toutefois, afin de mettre plus en évidence le prix de revient de la traction électrique, elles ont été complétées par d'autres courbes donnant le prix de revient ou dépenses d'exploitation pour 100 tonnes kilomètres, en fonction du trafic kilométrique annuel.

Enfin, pour montrer comment la méthode d'exploitation employée avec la traction électrique peut influencer les conditions économiques d'une installation, quelques courbes ont été tracées en combinant les résultats obtenus dans divers cas ne différant entre eux que par l'écartement minimum prévu, entre les trains consécutifs aux heures de fortes charges ; ces courbes montrent les variations des dépenses d'installation ou d'exploitation en fonction de cet écartement minimum, pour un même trafic annuel, un même profil et des locomotives de même puissance.

#### **Observations relatives aux diverses parties de ces études théoriques.**

— Les calculs relatifs à ces études ont été effectués en partant des coefficients de bases établis par l'Office. Ces coefficients sont très nombreux et des modifications, apportées à certains d'entre eux, peuvent évidemment changer des résultats qui, en raison même de ce grand nombre de coefficients, ne peuvent pas présenter une précision mathématique, mais qui donnent néanmoins une idée suffisante de l'ordre de grandeur des conditions économiques qui sont à comparer.

**Conditions d'installation et de fonctionnement.** — Le tableau N° I indique les principales conditions d'installation et de fonctionnement, telles qu'elles peuvent être déduites des courbes établies ou des calculs effectués.

Dans les colonnes 1, 2, 3, se trouvent résumées les hypothèses de bases caractérisant le projet considéré : profil, puissance des locomoteurs, espacement minimum entre les trains aux heures les plus chargées.

Dans la colonne n° 4 sont inscrits les écartements admis entre les sous-stations, tels qu'ils ont été déterminés par les courbes donnant les dépenses d'exploitation en fonction de ces écartements ; une certaine latitude existe dans la détermination de cet écartement et il est possible de faire varier sa valeur de près de 10 %, en plus ou en moins, soit 20 % au total, sans changer sensiblement les conditions économiques d'exploitation.

La colonne n° 5 contient les puissances unitaires des sous-stations, réserve comprise (1). Ces puissances ont été déterminées en prenant pour la puissance moyenne utilisée celle qui résulterait de deux heures de marche au régime le plus chargé et en vérifiant dans chaque cas que les puissances de pointes représentent moins de 200 % de surcharge (2).

---

(1) En pratique, la courbe donnant les variations des dépenses d'installation relatives aux sous-stations, en fonction de leur puissance, est discontinue, en raison des limites restreintes dans lesquelles doit rester le choix de la puissance du groupe unité ; mais, afin d'obtenir dans notre étude des courbes continues, nous avons adopté la courbe moyenne de cette courbe discontinue, et cela aussi bien pour les sous-stations à 1.500 volts que pour celles à 2.400 volts.

(2) Sur la ligne du Chicago-Milwaukee-Saint-Paul, les groupes des sous-stations sont capables de fonctionner à pleine charge d'une façon continue sans élévation de température supérieure à 35° C ; avec 50 % de surcharge pendant deux heures, sans élévation de température supérieure à 60° C ; avec 200 % de surcharge pendant cinq minutes sans dommages.



TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANT CONTINU HAUTE TENSION, 1500 et 2400 V.

**TABLEAU COMPARATIF N° I — Conditions d'installation et de fonctionnement pour divers cas**

DÉSIGNATION des PROJETS	Espace- ment minimum des trains	Trafic annuel en millions de tonnes par kilomètre	Ecartement des sous-stations correspondant au minimum de dépenses d'exploitation		Puissance unitaire des sous-stations (réserve comprise)		Coefficient moyen d'utilisation des sous-stations		Rendement moyen des sous-stations		Rendement moyen total (lignes, sous-stations, locomoteurs)		Nombre de watt-heures par tonne-kilomètre, remorquée		Section des feeders					
			4		5		6		7		8		9		10					
			1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>	1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>	1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>	1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>	1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>	1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>	1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>	1.500 <sup>v</sup>	2.400 <sup>v</sup>		
<b>A</b> Rampe moyenne : 0 mm. Locomotives de 1500 HP Vitesse moyenne de marche : 70 <sup>km</sup> Vitesse commerciale : 40 <sup>km</sup> Poids moyen remorqué : 500 <sup>T</sup>	Voie double	km.	environ		kw	kw									environ					
			5	5	17 <sup>km</sup>	24 <sup>km</sup>	7.500	11.200	0,038	0,037	0,53	0,39	0,41	0,31	41,3	54,4	380	380		
				15	d°	d°	d°	d°	0,114	0,112	0,74	0,60	0,585	0,48	29	35,5	d°	d°		
				25	d°	d°	d°	d°	0,191	0,198	0,815	0,69	0,65	0,545	26	31,1	d°	d°		
			10	5	19	29	4.400	6.700	0,076	0,076	0,64	0,49	0,50	0,385	34	44	0	180		
				15	d°	d°	d°	d°	0,230	0,230	0,825	0,72	0,645	0,565	26,3	30	d°	d°		
				25	d°	d°	d°	d°	0,385	0,385	0,88	0,795	0,68	0,62	24,9	27,5	d°	d°		
			20	5	22	37	2.500	4.400	0,156	0,146	0,76	0,625	0,595	0,485	28,5	34,9	0	0		
				10	d°	d°	d°	d°	0,312	0,298	0,85	0,745	0,66	0,58	25,6	29,3	d°	d°		
				15	d°	d°	d°	d°	0,467	0,437	0,88	0,80	0,69	0,615	24,7	27,5	d°	d°		
			40	3	25	45	2.250	2.500	0,149	0,189	0,70	0,65	0,545	0,505	31,1	33,5	100	130		
				5	d°	d°	d°	d°	0,198	0,316	0,79	0,74	0,615	0,575	27,6	29,5	d°	d°		
7	d°	d°		d°	d°	0,279	0,442	0,83	0,79	0,65	0,615	26,1	27,6	d°	d°					
<b>B<sup>1</sup></b> Rampe moyenne : 40 mm. Locomotives de 2000 HP Vitesse moyenne de marche : 45 <sup>km</sup> Vitesse commer- ciale : 30 <sup>km</sup> Poids moyen remorqué : 480 <sup>T</sup>	Voie double	km.	1	23	33	5.150	7.650	0,024	0,023	0,43	0,26	0,33	0,20	76,9	128	0	0			
			10	5	d°	d°	d°	d°	0,121	0,116	0,74	0,58	0,565	0,44	41,9	57,3	d°	d°		
				10	d°	d°	d°	d°	0,243	0,235	0,835	0,72	0,635	0,55	39,9	46,2	d°	d°		
				15	d°	d°	d°	d°	0,366	0,356	0,87	0,78	0,66	0,59	38,5	43,2	d°	d°		
			20	1	32	45	3.600	5.150	0,049	0,048	0,525	0,405	0,39	0,305	65	83,4	0	60		
				5	d°	d°	d°	d°	0,247	0,240	0,825	0,725	0,61	0,545	41,5	46,6	d°	d°		
				10	d°	d°	d°	d°	0,497	0,486	0,89	0,815	0,66	0,605	38,5	41,8	d°	d°		
			40	1	41	55	2.400	3.200	0,097	0,097	0,67	0,52	0,485	0,38	52,5	67	0	0		
				3	d°	d°	d°	d°	0,293	0,292	0,84	0,74	0,61	0,54	41,8	47	d°	d°		
				5	d°	d°	d°	d°	0,488	0,486	0,88	0,81	0,635	0,59	40	43,1	d°	d°		
			<b>C<sup>1</sup></b> Rampe moyenne : 25 mm. Locomot. de 2000 HP (double traction) Vitesse moyenne de marche : 35 km. Vit. commerc. : 25 km. Poids moyen remorqué : 530 T.	Voie double	km.	5	17	23	7.900	10.500	0,14	0,14	0,77	0,64	0,57	0,48	105	123	0	0
						10	10	d°	d°	d°	d°	0,28	0,28	0,86	0,76	0,63	0,57	94	104	d°
15	d°	d°					d°	d°	0,42	0,42	0,89	0,81	0,65	0,60	91	98	d°	d°		
1	22	34					5.200	8.600	0,058	0,056	0,59	0,43	0,43	0,31	140	192	0	0		
20	5	d°				d°	d°	d°	0,29	0,28	0,85	0,75	0,61	0,54	97	110	d°	d°		
	10	d°				d°	d°	d°	0,58	0,57	0,90	0,83	0,65	0,595	92	100	d°	d°		
	1	23	33	5.550	7.900	0,023	—	0,44	—	0,33	—	78	—	480	480					
10	5	d°	d°	d°	d°	0,115	0,11	0,74	0,58	0,54	0,44	46	58,5	d°	d°					
	10	d°	d°	d°	d°	0,23	0,23	0,83	0,71	0,61	0,54	41	47	d°	d°					
	15	d°	d°	d°	d°	0,35	0,34	0,87	0,77	0,64	0,57	40	44	d°	d°					
20	1	26	40	3.400	4.850	0,048	0,046	0,52	0,37	0,38	0,27	67	94	350	350					
	5	d°	d°	d°	d°	0,24	0,23	0,82	0,71	0,59	0,52	43	45	d°	d°					
	10	d°	d°	d°	d°	0,48	0,46	0,88	0,81	0,63	0,58	40	43,5	d°	d°					
<b>C<sup>2</sup></b> Rampe moyenne : 25 mm. Locomot. de 2000 HP (double traction) Vitesse moyenne de marche : 35 km. Vit. commerc. : 25 km. Poids moyen remorqué : 530 T.	Voie unique	km.	5	17	23	8.000	11.000	0,14	0,13	0,77	0,62	0,56	0,46	106	130	600	500			
			10	10	d°	d°	d°	d°	0,28	0,27	0,86	0,74	0,62	0,55	96	112	d°	d°		
				15	d°	d°	d°	d°	0,42	0,41	0,89	0,80	0,64	0,585	93	104	d°	d°		
				1	22	34	5.200	8.200	0,057	0,056	0,56	0,43	0,40	0,31	148	193	800	600		
			20	5	d°	d°	d°	d°	0,29	0,28	0,84	0,76	0,60	0,55	99	109	d°	d°		
				10	d°	d°	d°	d°	0,57	0,56	0,90	0,84	0,64	0,60	93	99	d°	d°		

(1) En pratique, la courbe donnant les variations de la puissance installée (réserve comprise) en fonction de la puissance nécessaire trouvée par le calcul est une courbe discontinue, en raison des limites restreintes dans lesquelles doit rester le choix de la puissance du groupe unité, mais afin d'obtenir, dans notre étude, des courbes continues, nous avons adopté la courbe moyenne de cette courbe discontinue et cela, aussi bien pour les sous-stations à 1500 volts que pour celles à 2400 volts.

Observation. — Certains écartements minima des trains sont peut-être en dehors des limites de la pratique courante ; ils ont été choisis soit parce qu'ils constituent des cas extrêmes permettant, avec ceux qui les suivent, une interpolation des résultats, soit pour faciliter les calculs, en étant semblables à ceux choisis dans une étude précédente.



La colonne n° 6 donne le coefficient moyen d'utilisation des groupes des sous-stations (non compris les groupes de réserve). Les chiffres correspondants montrent combien ces coefficients sont faibles, c'est-à-dire combien le matériel fixe est mal utilisé, spécialement lorsque les sous-stations doivent être très rapprochées les unes des autres, par suite des faibles écartements prévus entre les trains aux heures de forte charge; ces mauvais coefficients d'utilisation ont une répercussion directe sur les chiffres qui figurent dans les colonnes 7, 8 et 9 suivantes qui donnent respectivement : le rendement moyen des sous-stations, déduit de la charge moyenne et des courbes de rendements des groupes transformateurs, le rendement moyen total, ou rapport de l'énergie à la jante des locomoteurs à l'énergie fournie aux points de livraison, et enfin le nombre de wattheures par tonne-kilomètre remorquée.

Dans une dernière colonne n° 10 se trouvent les sections des feeders disposés en parallèle avec la ligne de prise de courant. Ces sections ont été calculées de façon à ce que la chute de tension dans la ligne de prise de courant et les feeders n'excède pas 40 % de la tension totale de distribution, dans les cas les plus défavorables pouvant accidentellement se produire.

Il est à remarquer que, pour les lignes à double voie, la recherche des conditions les plus économiques a conduit à donner aux feeders une section très faible, sinon nulle, sauf lorsque l'écartement minimum entre les trains devient de l'ordre de 5 kilomètres, c'est-à-dire de l'ordre de la distance comprise entre 2 blocs consécutifs.

Pour les lignes à voie unique, dont la rampe moyenne est supérieure à 5 mm, la section des feeders est importante, parce que les sections des conducteurs de la ligne de prise de courant seront réduites de moitié comparativement à celles des lignes de même profil mais à double voie, car, pour ces lignes à forte déclivité, les trains montants seuls absorbent de l'énergie et, dans le cas de la double voie, l'ensemble des conducteurs de prise de courant des voies paire et impaire est utilisé pour alimenter les locomotives de ces trains montants.

**Dépenses d'installation.** (Voir figures 1 à 4, 9 à 13 et 14 à 16). Nous rappelons que ces dépenses sont relatives :

- à la ligne haute tension située parallèlement à la voie ;
- aux sous-stations ;
- à la ligne de prise de courant, y compris les feeders ;
- au matériel roulant automoteur.

Elles ne comprennent pas les dépenses relatives :

- aux usines génératrices, ainsi qu'aux canalisations réunissant ces usines aux postes de livraison ;
- à la voie de roulement, sauf l'éclissage électrique des rails ;
- à la construction et l'aménagement des ateliers de réparations et des remises pour locomoteurs ;
- au matériel roulant non automoteur.

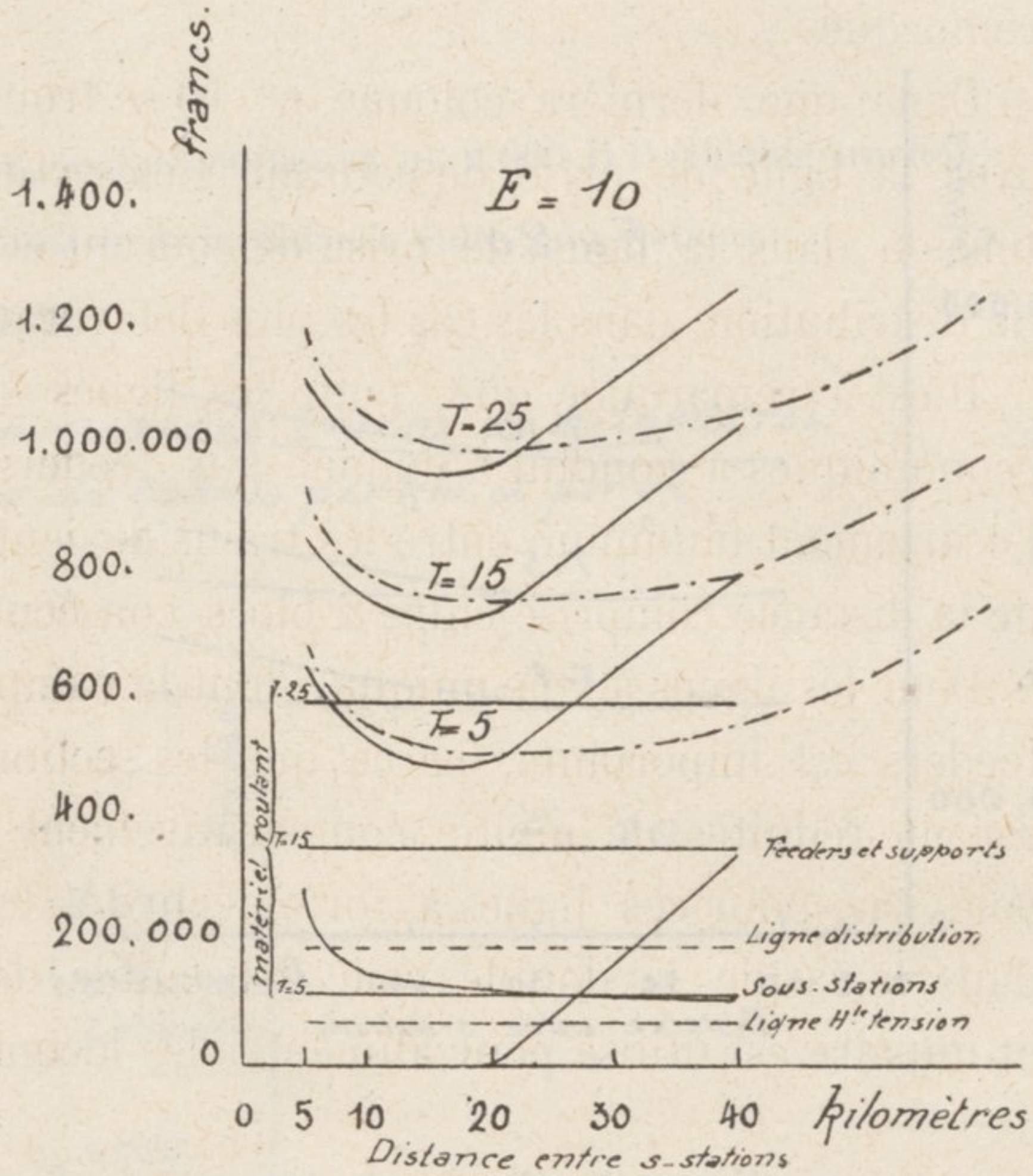
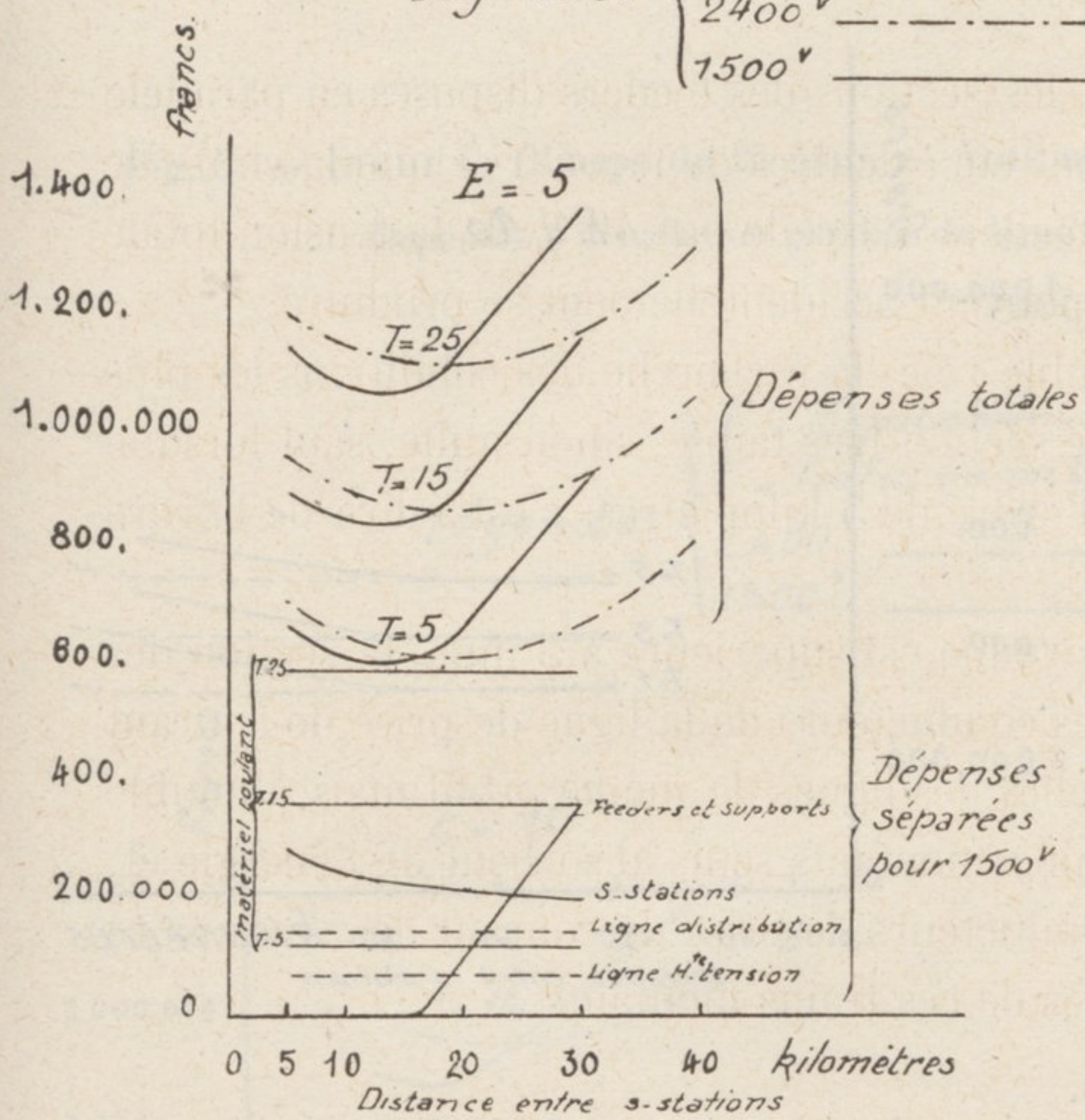
Pour un même profil de ligne, une même puissance des locomotives, une même tension et un



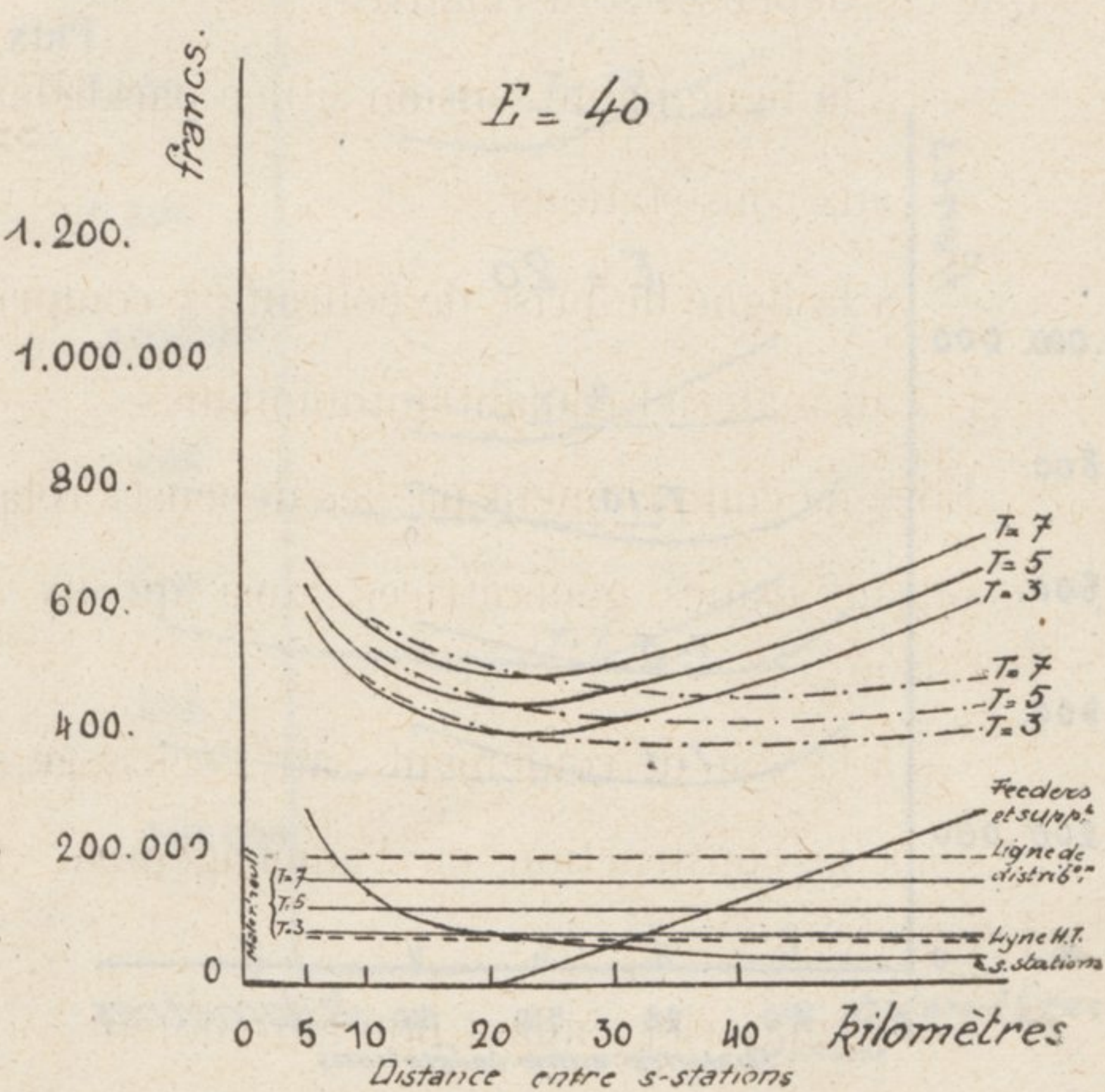
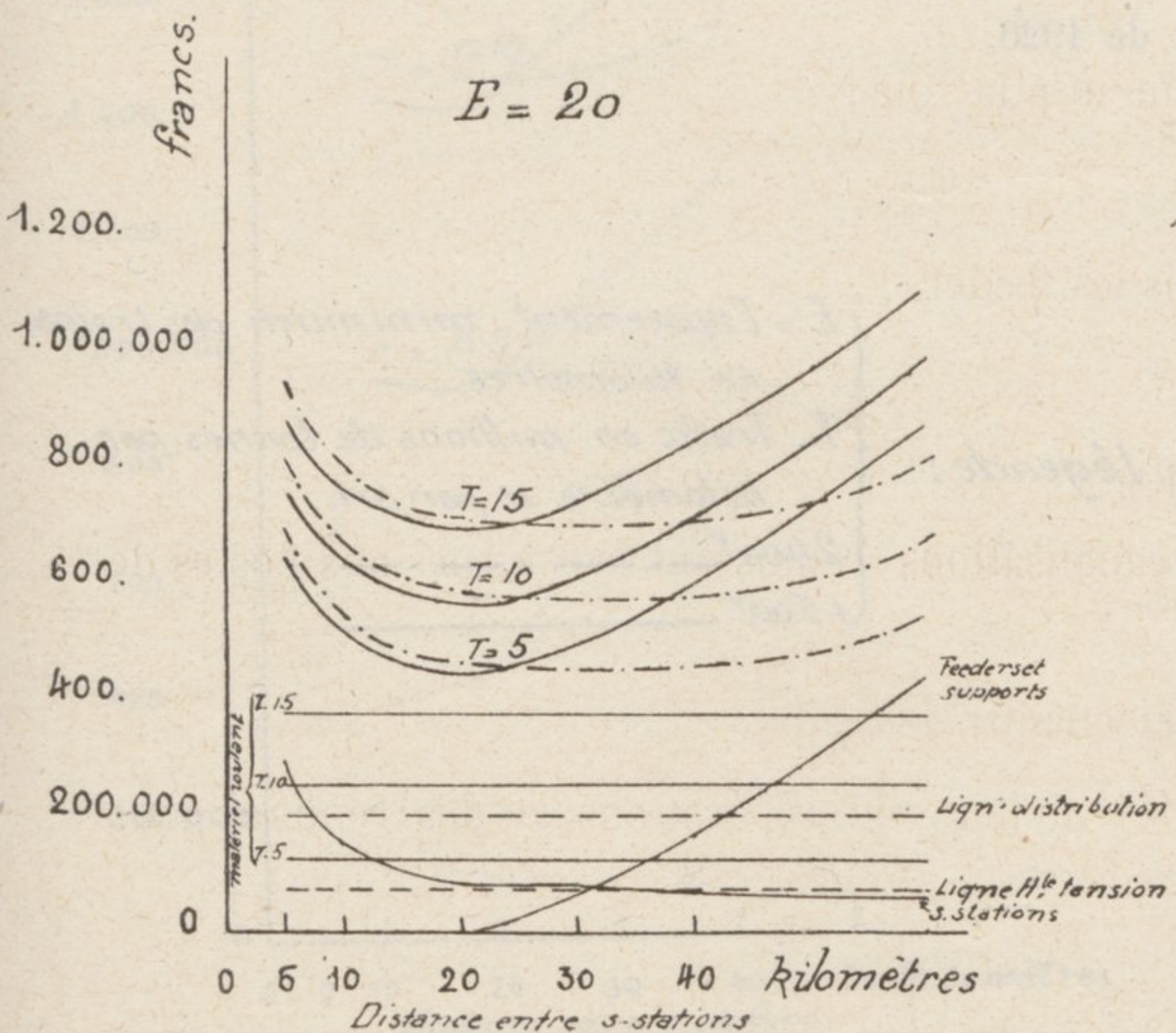
même écartement minimum entre les trains, aux heures les plus chargées, la courbe donnant les dépenses d'installation par kilomètre de ligne, en fonction du trafic kilométrique annuel, est une droite dont l'ordonnée à l'origine dépend de l'écartement minimum entre les trains

Fig. 1. — ETUDE A (Palier). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 1.500 HP.  
Dépenses d'installation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
PRIX de 1920.

Légende:  $E =$  Espacement minimum des trains en kilomètres.  
 $T =$  Trafic en millions de tonnes par km. et par an.  
2400<sup>v</sup> ————  
1500<sup>v</sup> ————



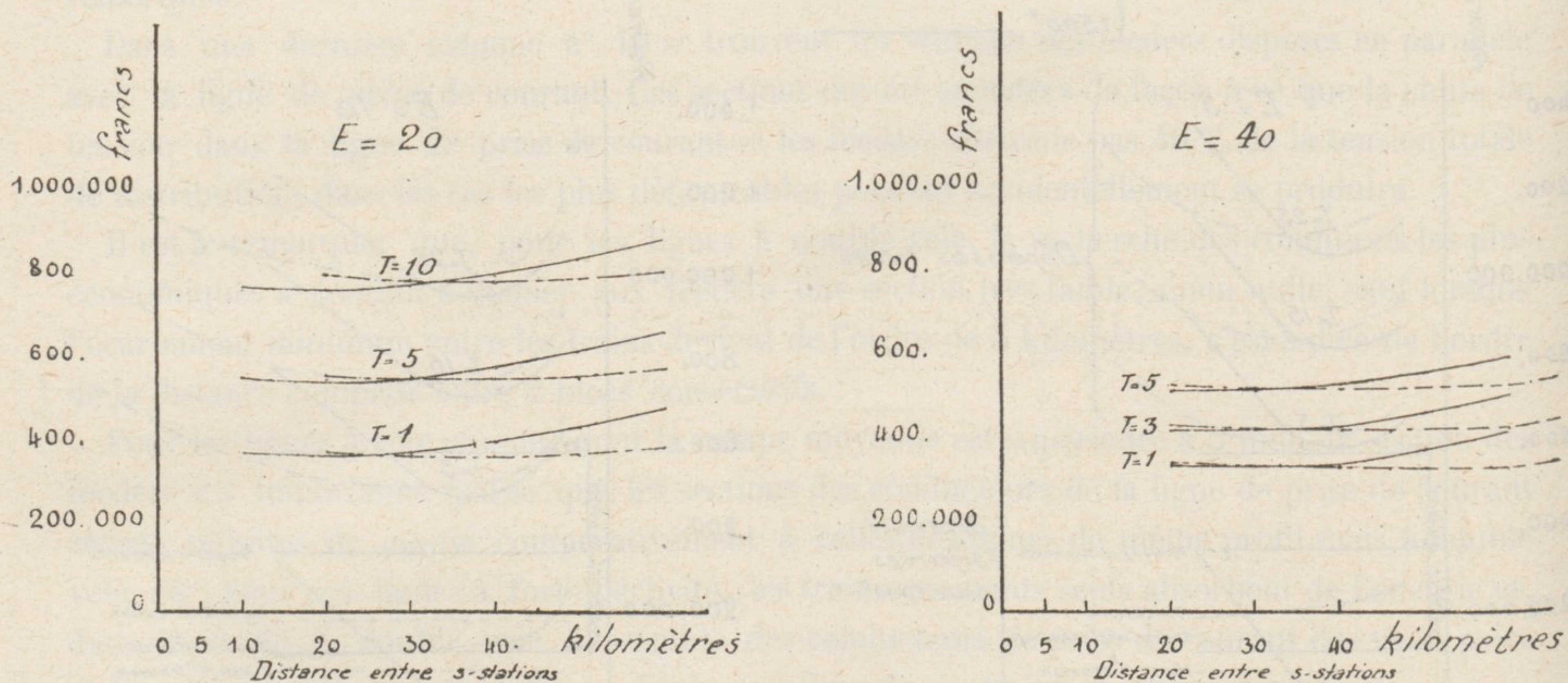
Nota: Les dépenses séparées figurées dans chaque cas se rapportent au projet à 1500<sup>v</sup>



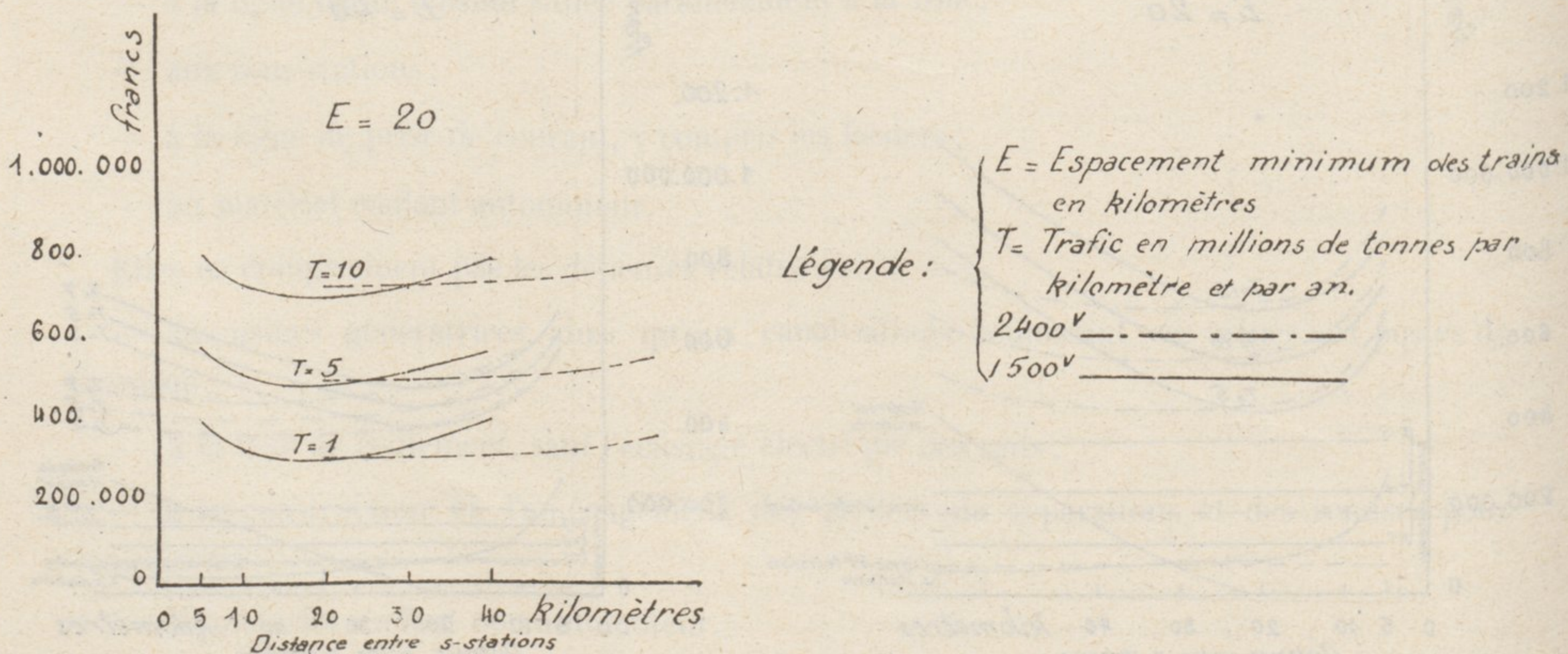


consécutifs. Faisant varier cet écartement minimum, on a une série de droites ayant le même coefficient angulaire, en sorte que ces dépenses d'installation peuvent être calculées par une formule  $d = a t + b$ , dans laquelle  $d$  est la dépense d'installation en francs rapportée au kilomètre de ligne et comprenant la ligne haute tension à courant alternatif parallèle à la voie, les sous-stations, la ligne de prise de courant, les feeders et le matériel roulant automoteur ;  $t$  est

Fig. 2. — ETUDE B<sub>1</sub> (Rampe de 10 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P.  
Dépenses d'installation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
PRIX de 1920.



ETUDE B<sub>2</sub> (Rampe de 10 mm). — VOIE UNIQUE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P.  
Dépenses d'installation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
PRIX de 1920.





le tonnage, en millions de tonnes, remorqué annuellement par kilomètre de ligne ;  $a$ , un coefficient dépendant du profil de la ligne et de la puissance des locomoteurs ; et  $b$ , un coefficient variant avec l'écartement minimum prévu entre les trains consécutifs.

Il ne faut pas perdre de vue que les dépenses ainsi calculées comprennent celles relatives au matériel roulant automoteur et que, dans un examen comparatif avec la traction à vapeur, il faudrait tenir compte des locomotives à vapeur rendues disponibles ou à commander pour réaliser un même service, soit électriquement, soit avec la traction à vapeur.

Dans le tableau N° II, quelques évaluations de dépenses d'installation par kilomètre de ligne sont données, à titre d'exemple, pour quelques-uns des cas envisagés dans l'étude théorique.

Fig. 3. — ETUDE C<sub>1</sub> (Rampe de 25 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 HP (Double traction).  
Dépenses d'installation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
PRIX de 1920.

Légende:  $\begin{cases} E = \text{Espace ment minimum des trains en kilomètres.} \\ T = \text{Trafic en millions de tonnes par km. et par an.} \\ 2.400^v \text{ ---} \\ 1.500^v \text{ ---} \end{cases}$

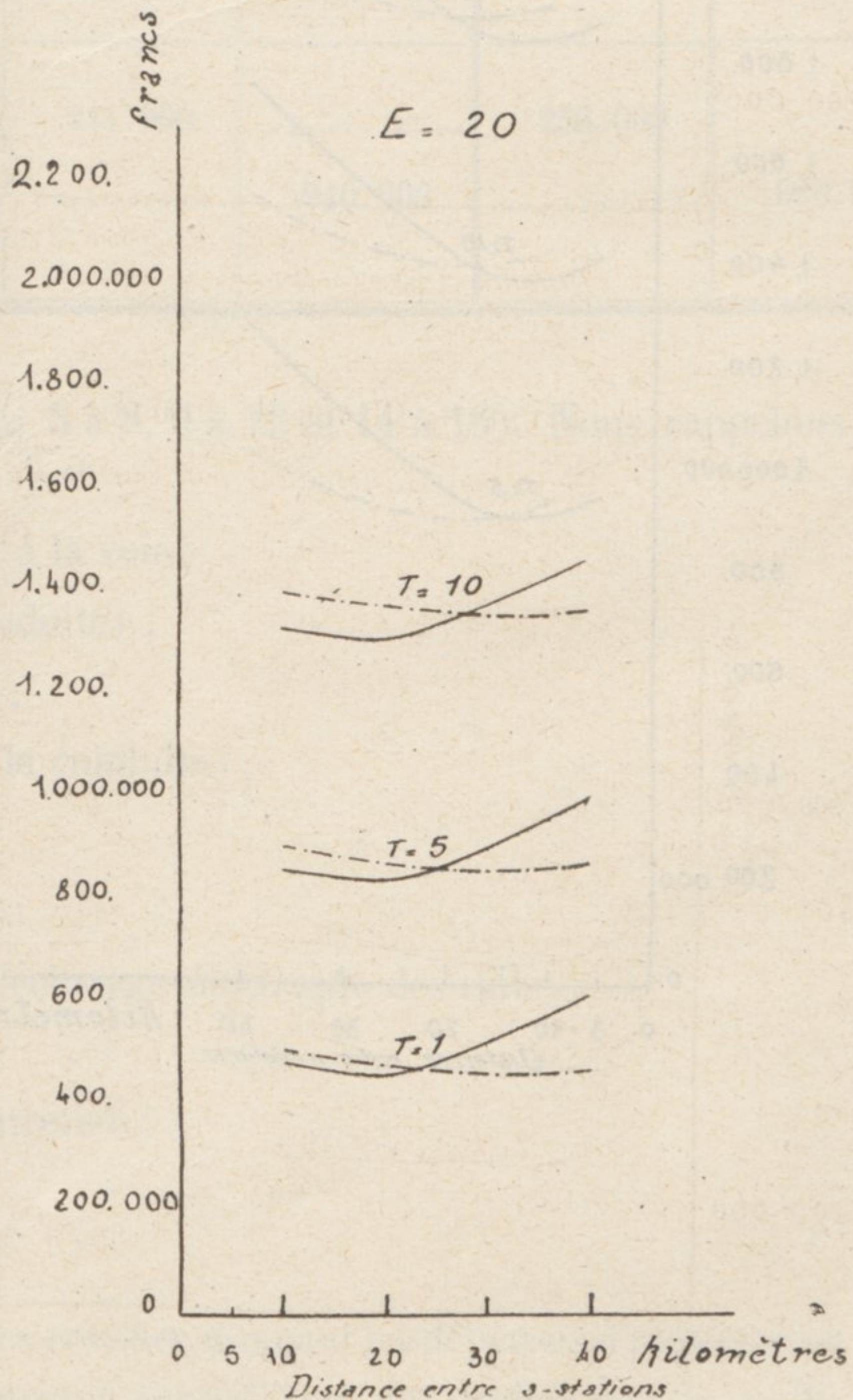
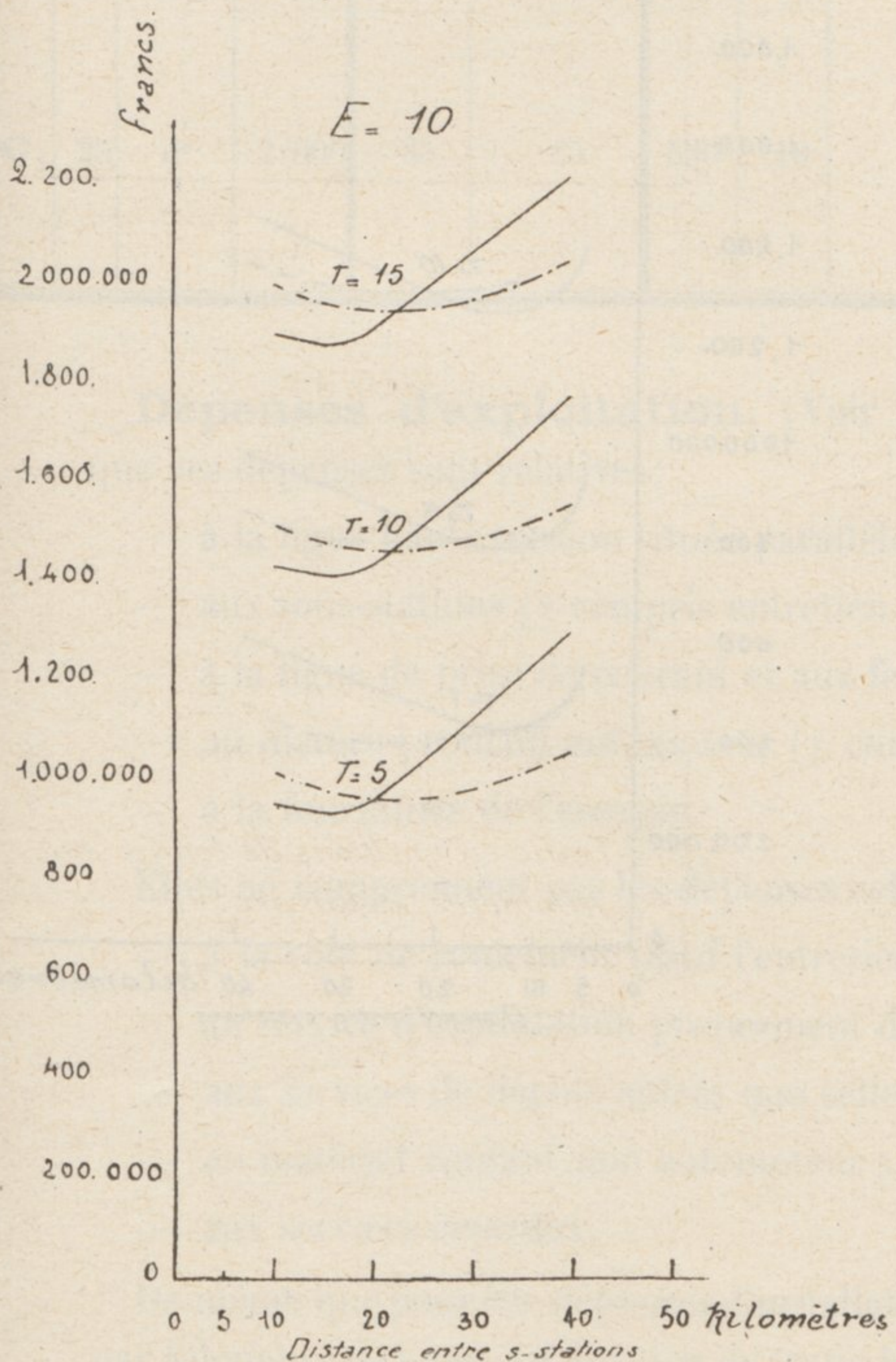
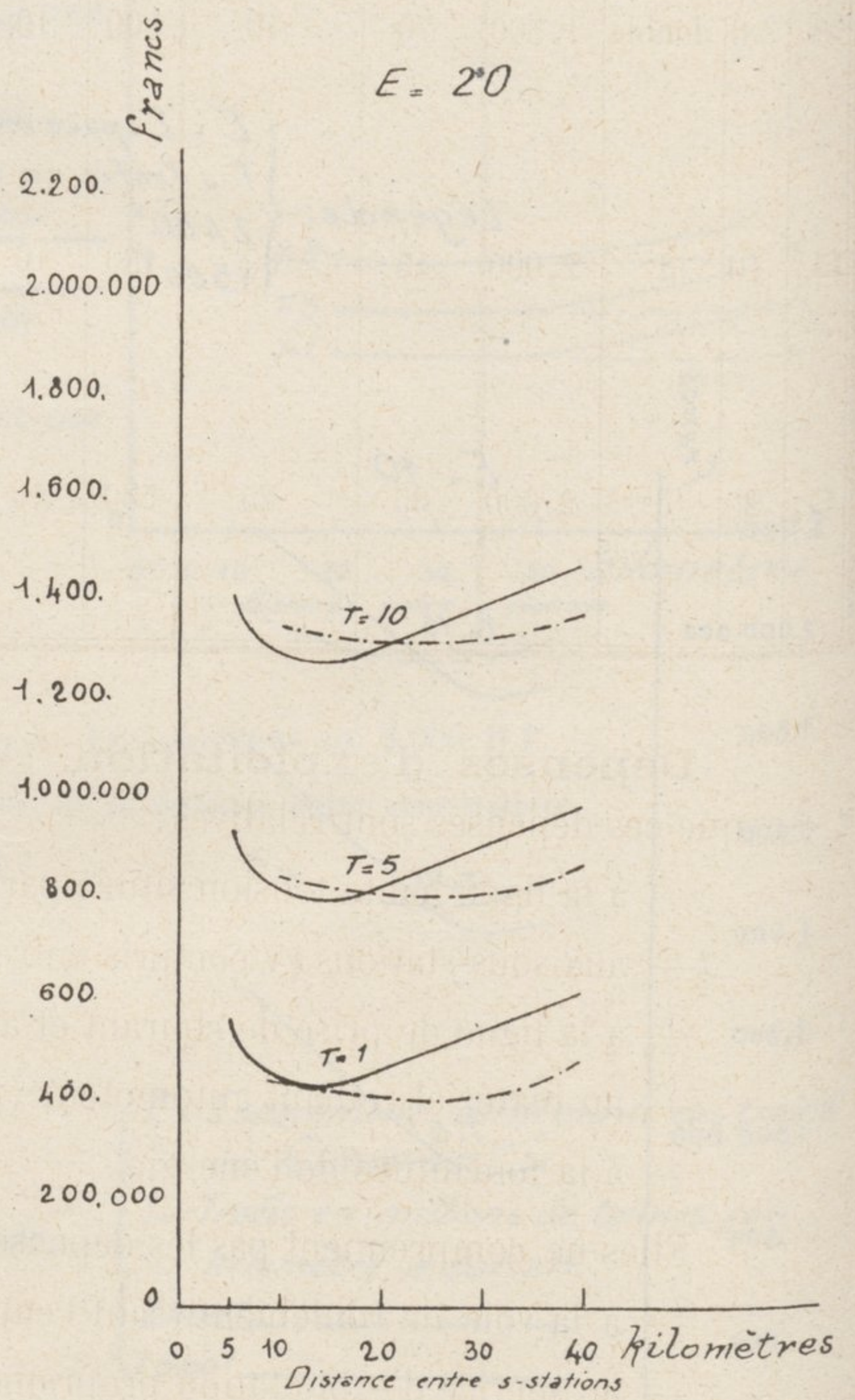
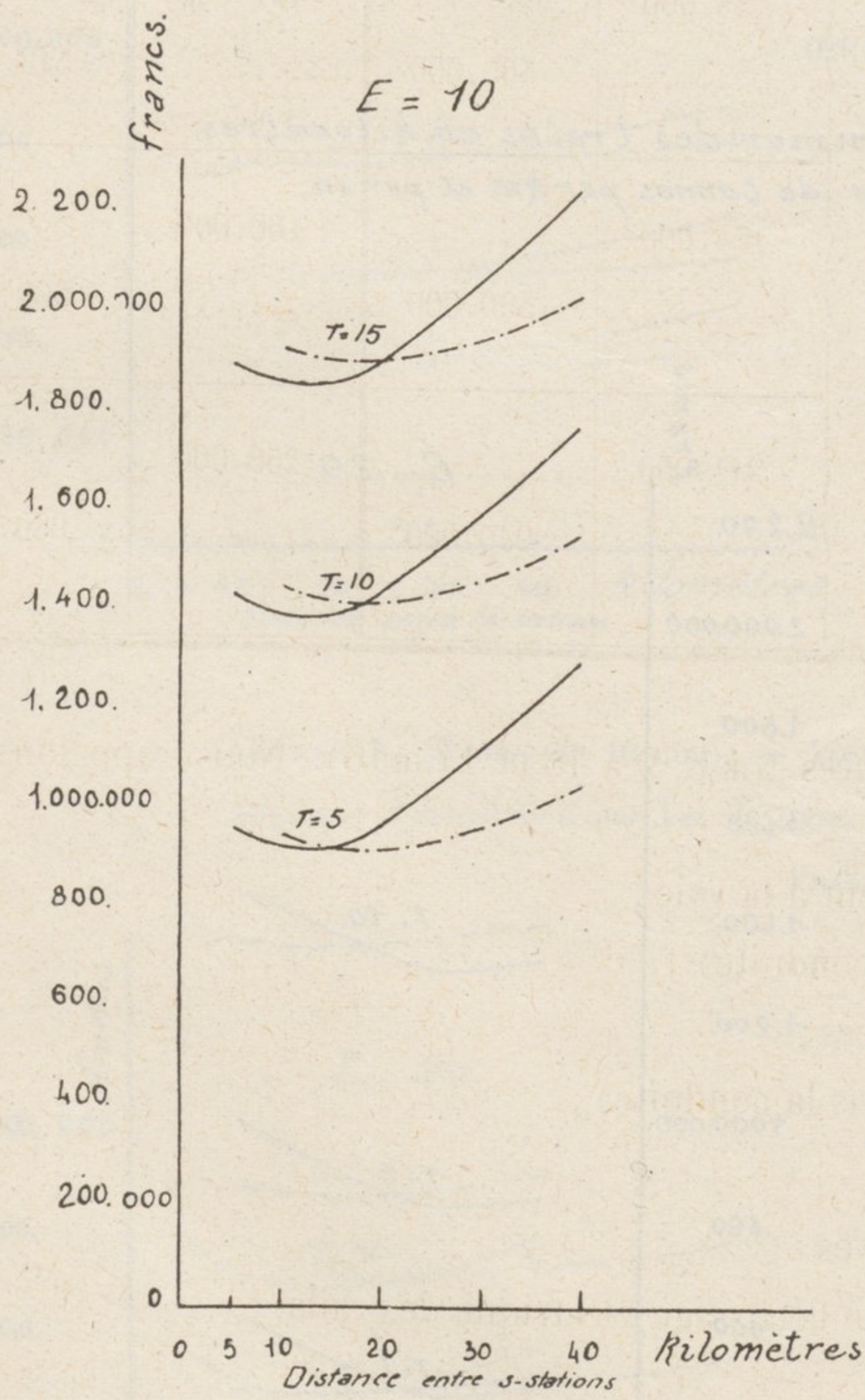




Fig. 4. — ÉTUDE C<sub>1</sub> (Rampe de 25 mm). — VOIE UNIQUE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P (Double traction)  
 Dépenses d'installation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
 PRIX de 1920.

Légende:  $\left\{ \begin{array}{l} E = \text{Espacement minimum des trains en kilometres.} \\ T = \text{Trafic en millions de tonnes par km. et par an.} \\ 2400^v \text{ ---} \\ 1500^v \text{ =} \end{array} \right.$





TRACTION ÉLECTRIQUE PAR COURANT CONTINU HAUTE TENSION 1500 et 2400 v.

TABLEAU COMPARATIF N° II. — Dépenses d'installation pour quelques cas particuliers

CARACTÉRISTIQUES DES PROJETS									DÉPENSES D'INSTALLATION PAR KILOMÈTRE DE LIGNE			
Désignation	Rampe moyenne	VOIE	Puissance des locomotives	VITESSES		POIDS MOYEN remorqué	Espace minimum des trains	Trafic annuel (millions de tonnes par kilomètre)	PROJETS A 1.500 V.		PROJETS A 2.400 V.	
				de marche	commerciale				Prix de 1914	Prix de 1920	Prix de 1914	Prix de 1920
			H.P.	Kmh.	Kmh.	T.	Km.		francs	francs	francs	francs
<b>A</b>	0	double	1.500	70	40	500	10	5	135.000	.....	141.000	.....
									.....	505.000	.....	513.000
<b>B<sub>1</sub></b>	10	d°	2.000	45	30	480	10	5	154.000	.....	160.000	.....
									.....	590.000	.....	608.000
<b>C<sub>1</sub></b>	25	d°	2.000	35	25	530	10	5	241.000	.....	256.000	.....
									.....	940.000	.....	980.000

**Dépenses d'exploitation.** (Voir figures 5 à 8, 9 à 13 et 14 à 16). Nous rappelons que ces dépenses sont relatives :

- à la ligne haute tension située parallèlement à la voie ;
- aux sous-stations (y compris entretien et conduite) ;
- à la ligne de prise de courant et aux feeders ;
- au matériel roulant automoteur (y compris la conduite) ;
- à la fourniture de l'énergie.

Elles ne comprennent pas les dépenses relatives :

- à la voie de roulement (sauf l'entretien de l'éclissage électrique des rails) ;
- au service d'exploitation proprement dit ;
- aux services de dépôts autres que celles d'entretien ;
- au matériel roulant non automoteur ;
- aux services centraux.

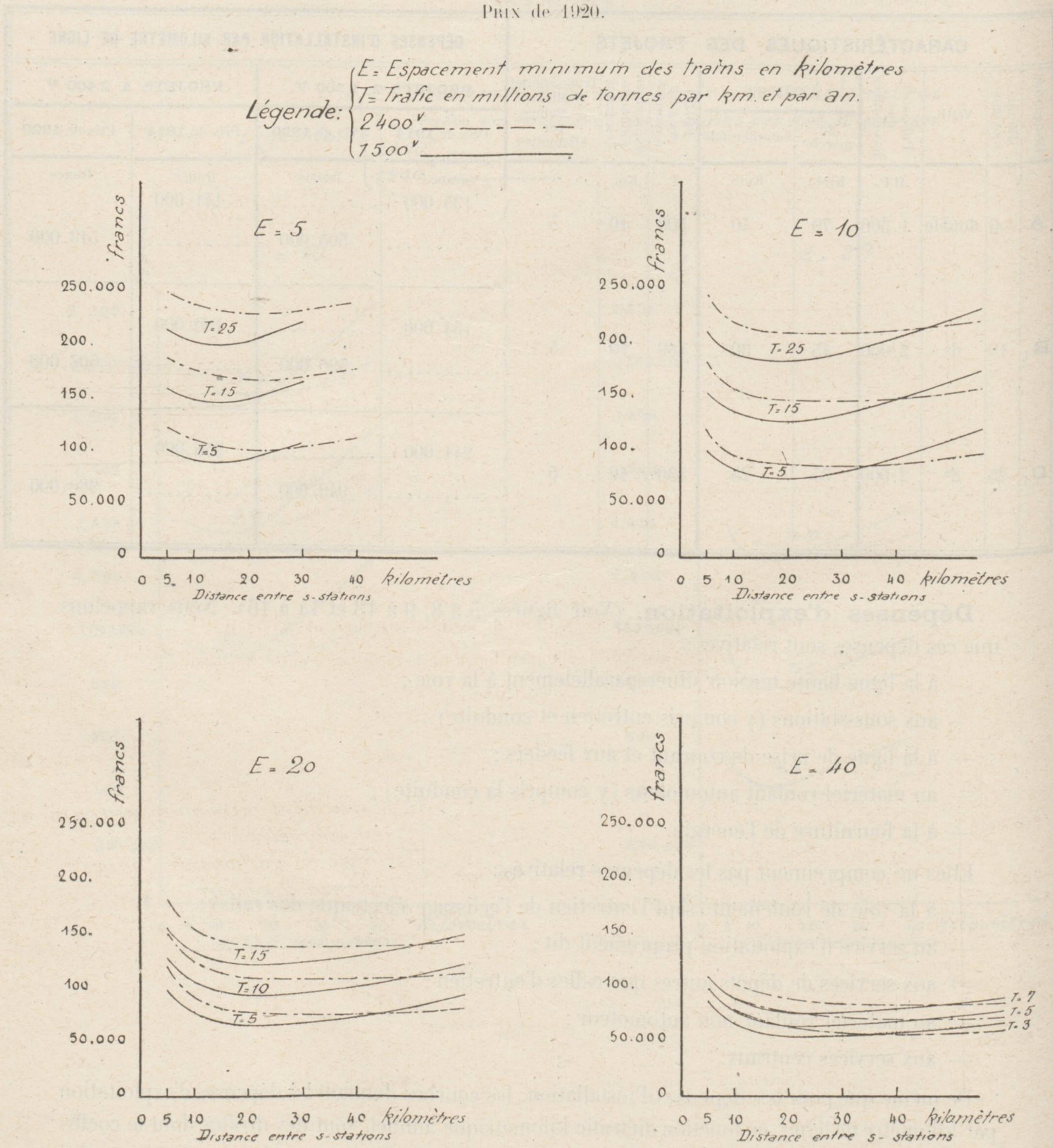
De même que pour les dépenses d'installation, les courbes donnant les dépenses d'exploitation par kilomètre de ligne, en fonction du trafic kilométrique annuel, sont des droites dont le coefficient angulaire reste sensiblement constant pour un profil de ligne, une puissance de locomotive



et un prix de l'énergie donnés, mais dont l'ordonnée à l'origine varie suivant l'écartement minimum prévu entre les trains consécutifs aux heures de forte charge.

Ces dépenses peuvent encore être calculées par une formule  $d_1 = a_1 t + b_1$ .

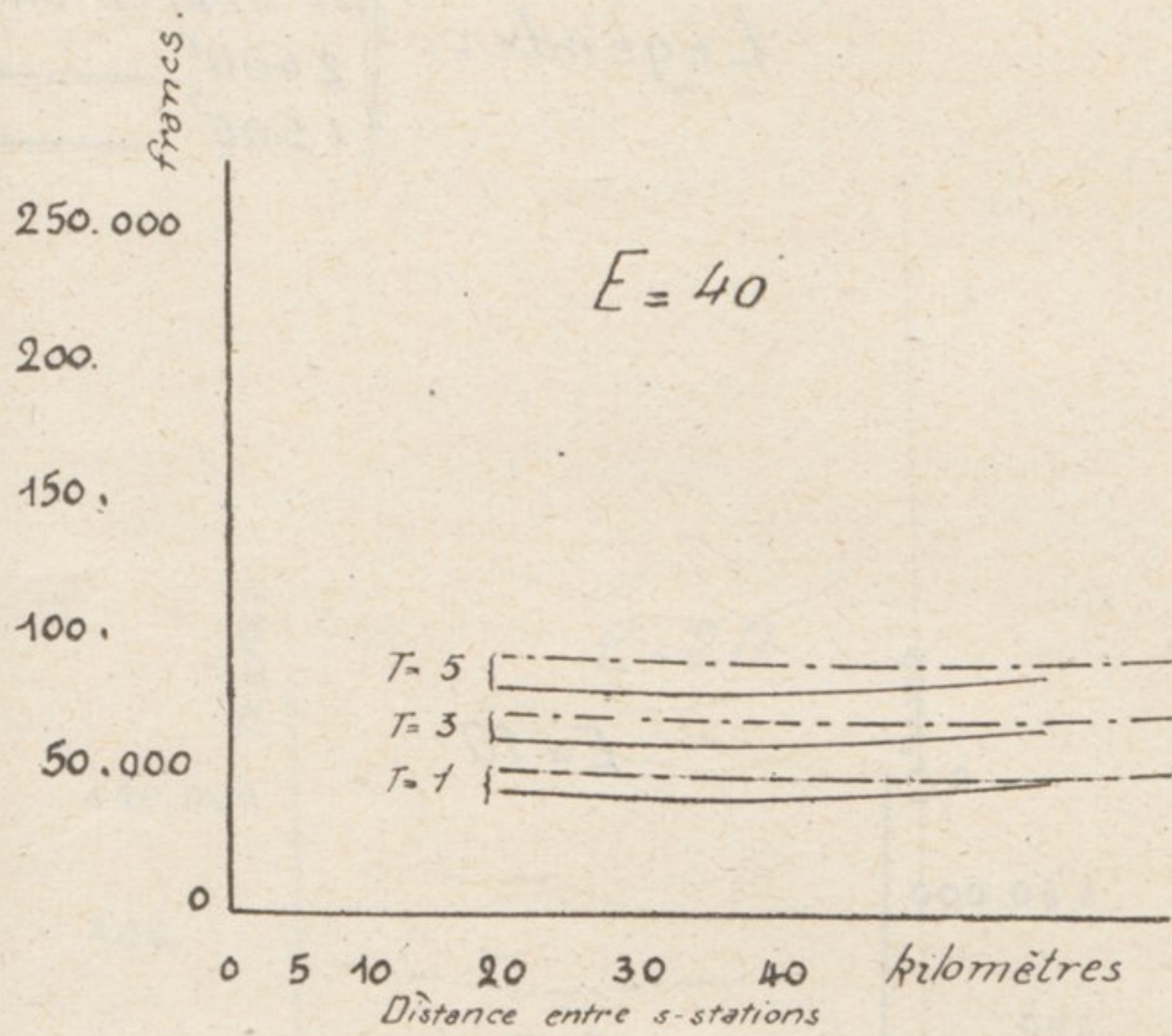
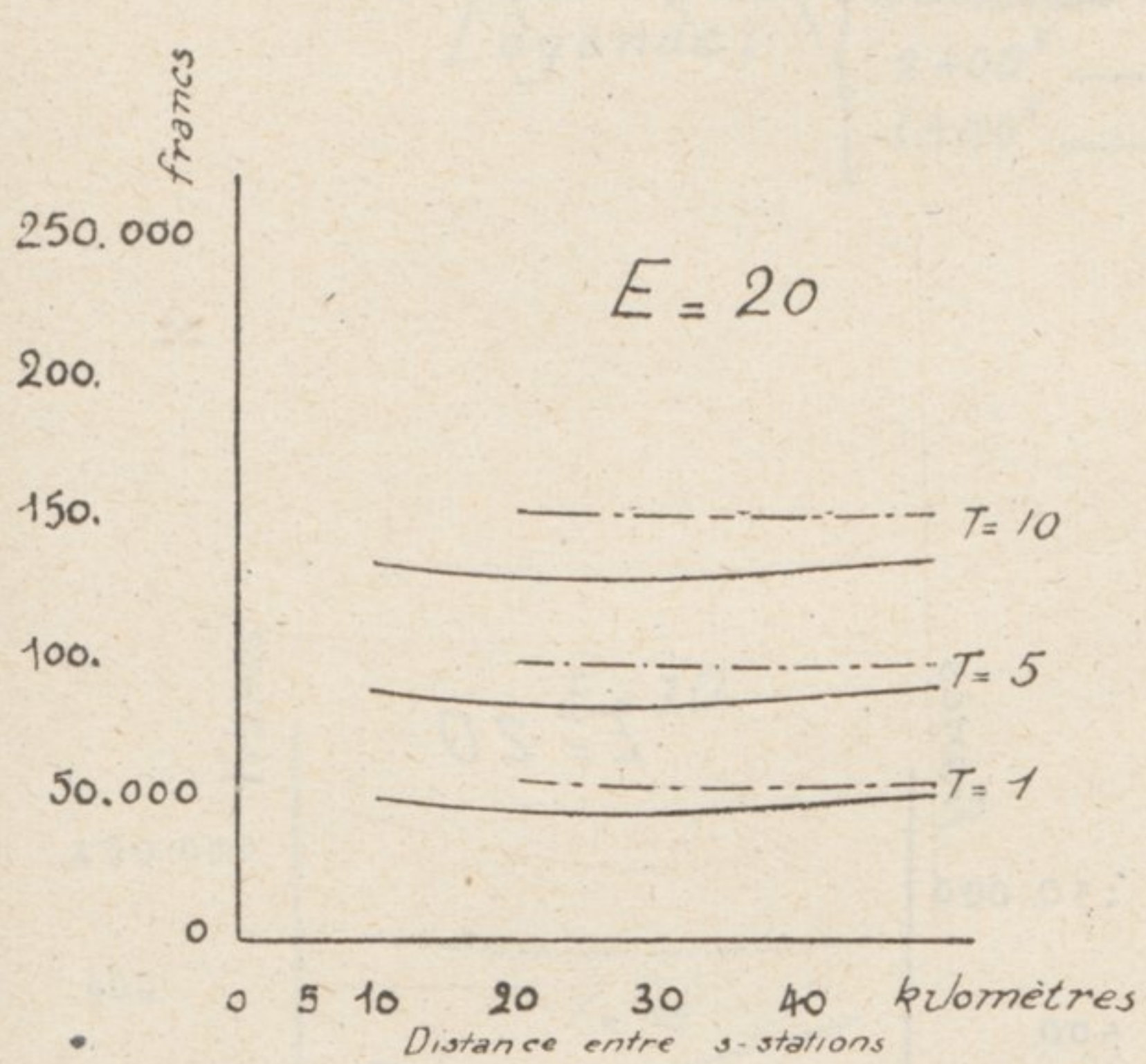
Fig. 5. — ETUDE A (Palier). VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 4.500 H P.  
Dépenses annuelles d'exploitation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
PRIX de 1920.



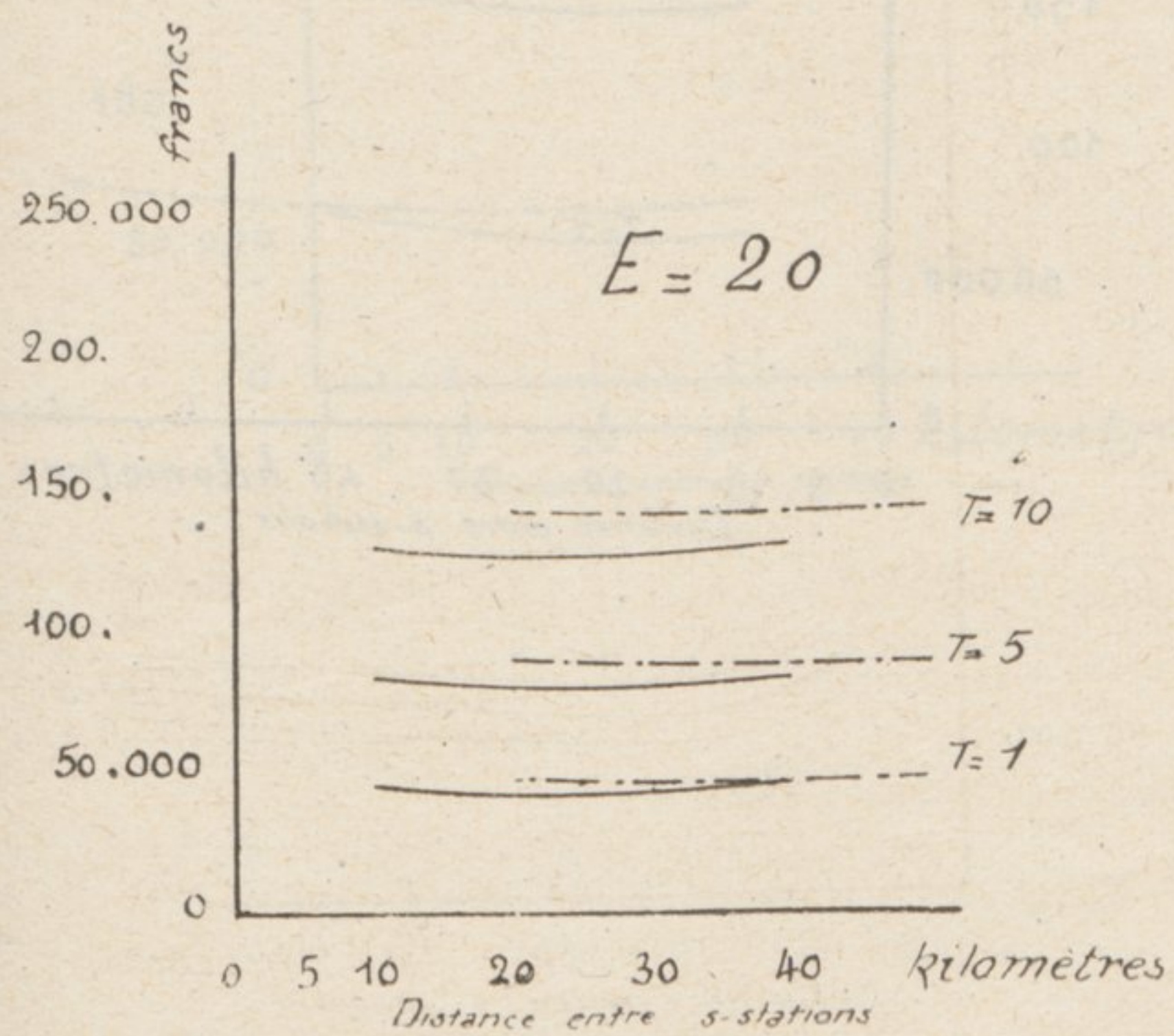


Le coefficient  $a_1$  est fonction du prix de l'énergie, il dépend donc essentiellement des conditions locales et il doit être déterminé pour chaque cas particulier.

Fig. 6. — ETUDE B<sub>1</sub> (Rampe de 10 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P.  
Dépenses annuelles d'exploitation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
PRIX de 1920.



ETUDE B<sub>2</sub> (Rampe de 10 mm). — VOIE UNIQUE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P.  
Dépenses annuelles d'exploitation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
PRIX de 1920.



Légende:  $E =$  Espacement minimum des trains en kilomètres.  
 $T =$  Trafic en millions de tonnes par km et par an  
2400<sup>v</sup> ————  
1500<sup>v</sup> ————



Fig. 7. — ETUDE C<sub>1</sub> (Rampe de 25 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P (Double traction)  
 Dépenses annuelles d'exploitation de km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations.  
 PRIX de 1920.

Légende:  $\left\{ \begin{array}{l} E = \text{Espacement minimum des trains en kilomètres} \\ T = \text{Trafic en millions de tonnes par km. et par an} \\ 2400^y \text{ ————} \\ 1500^y \text{ —————} \end{array} \right.$

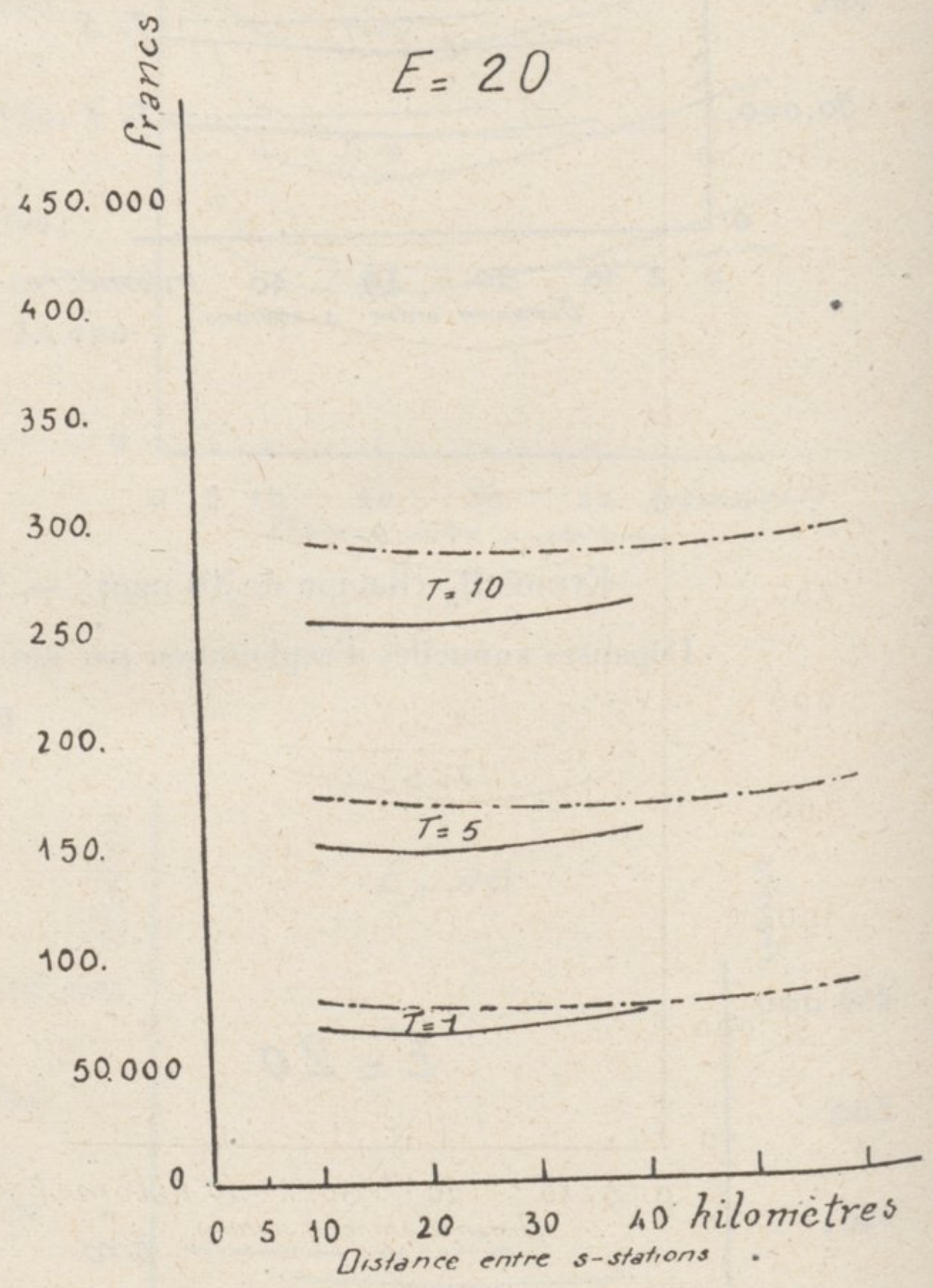
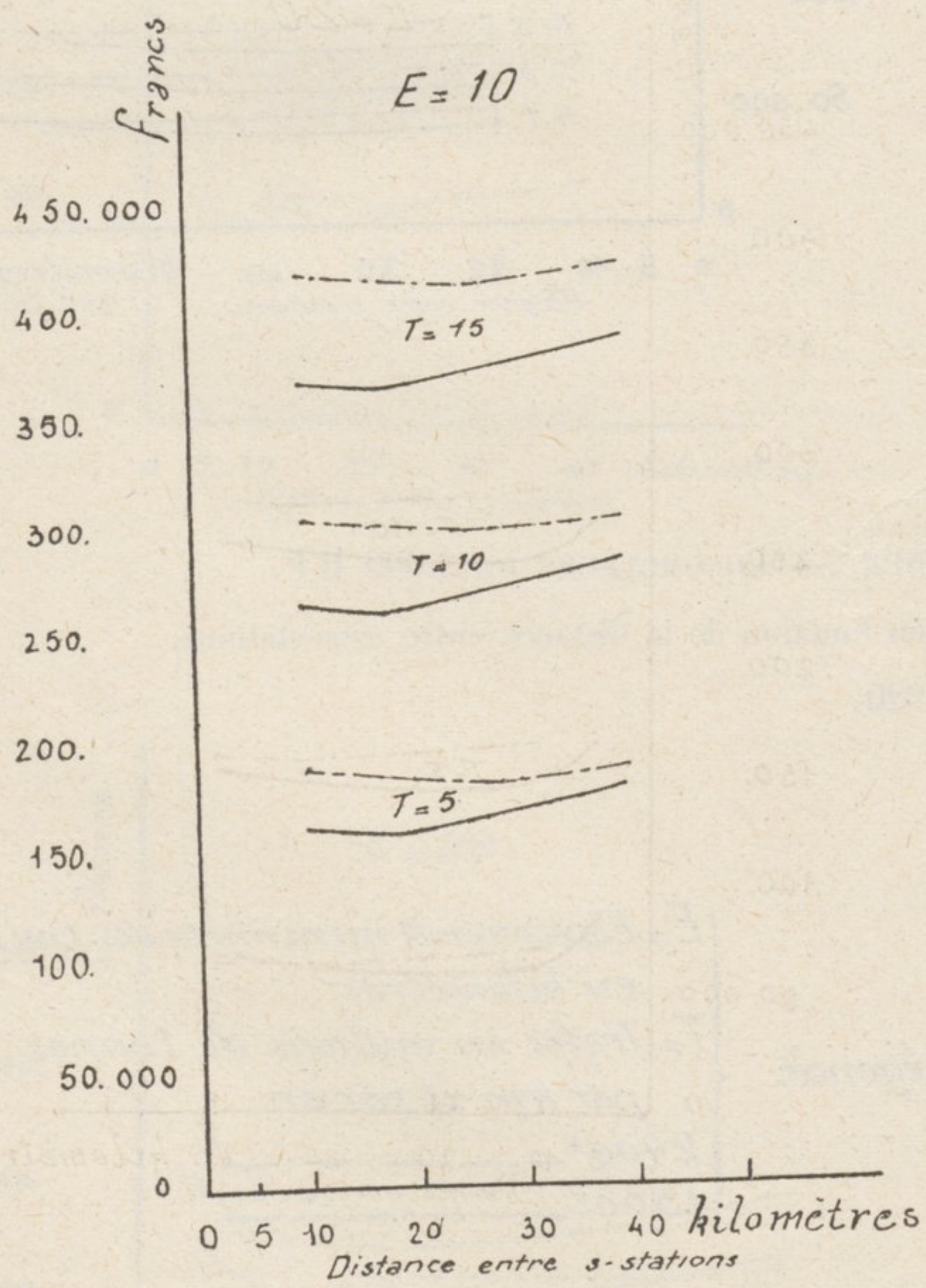
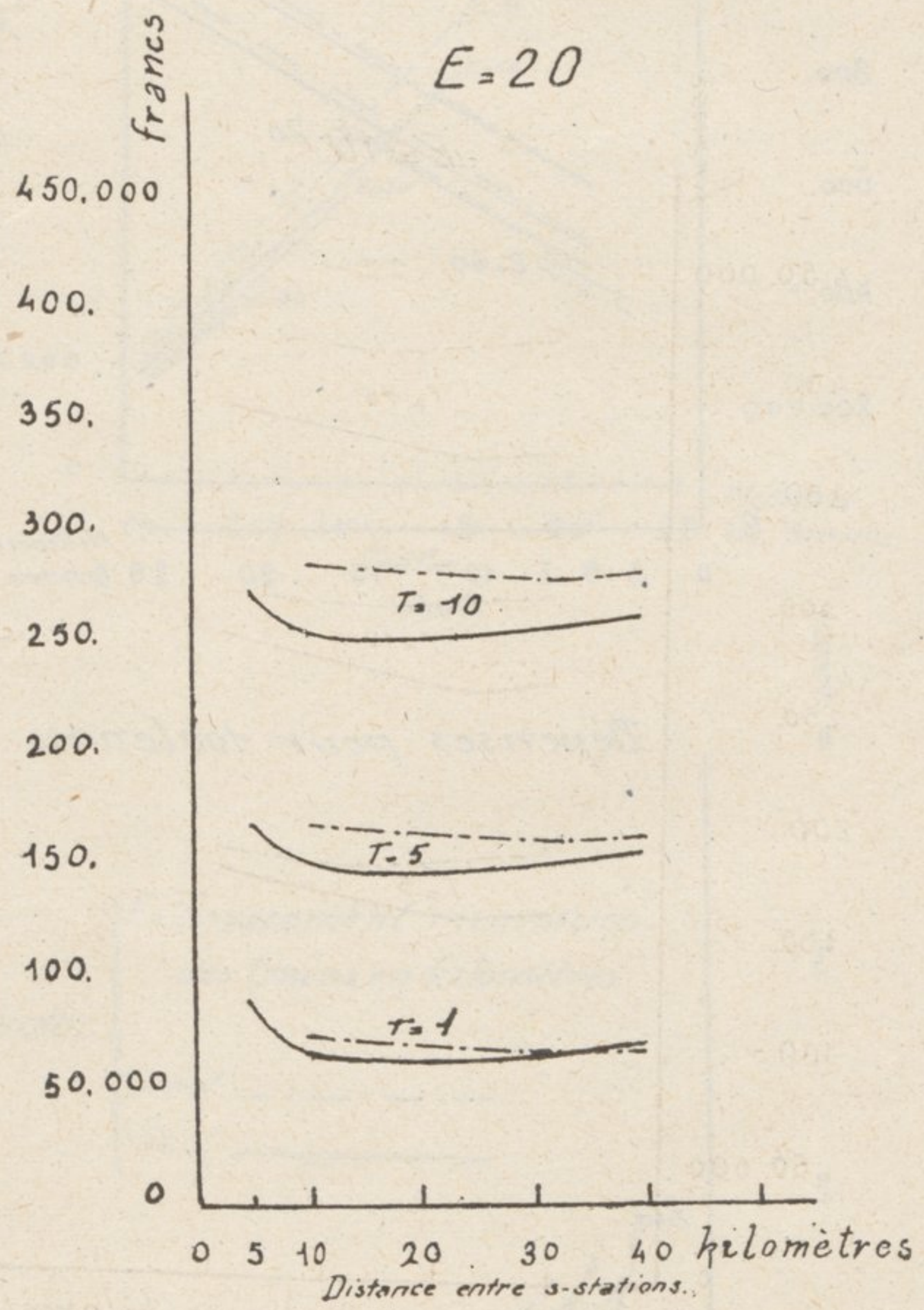
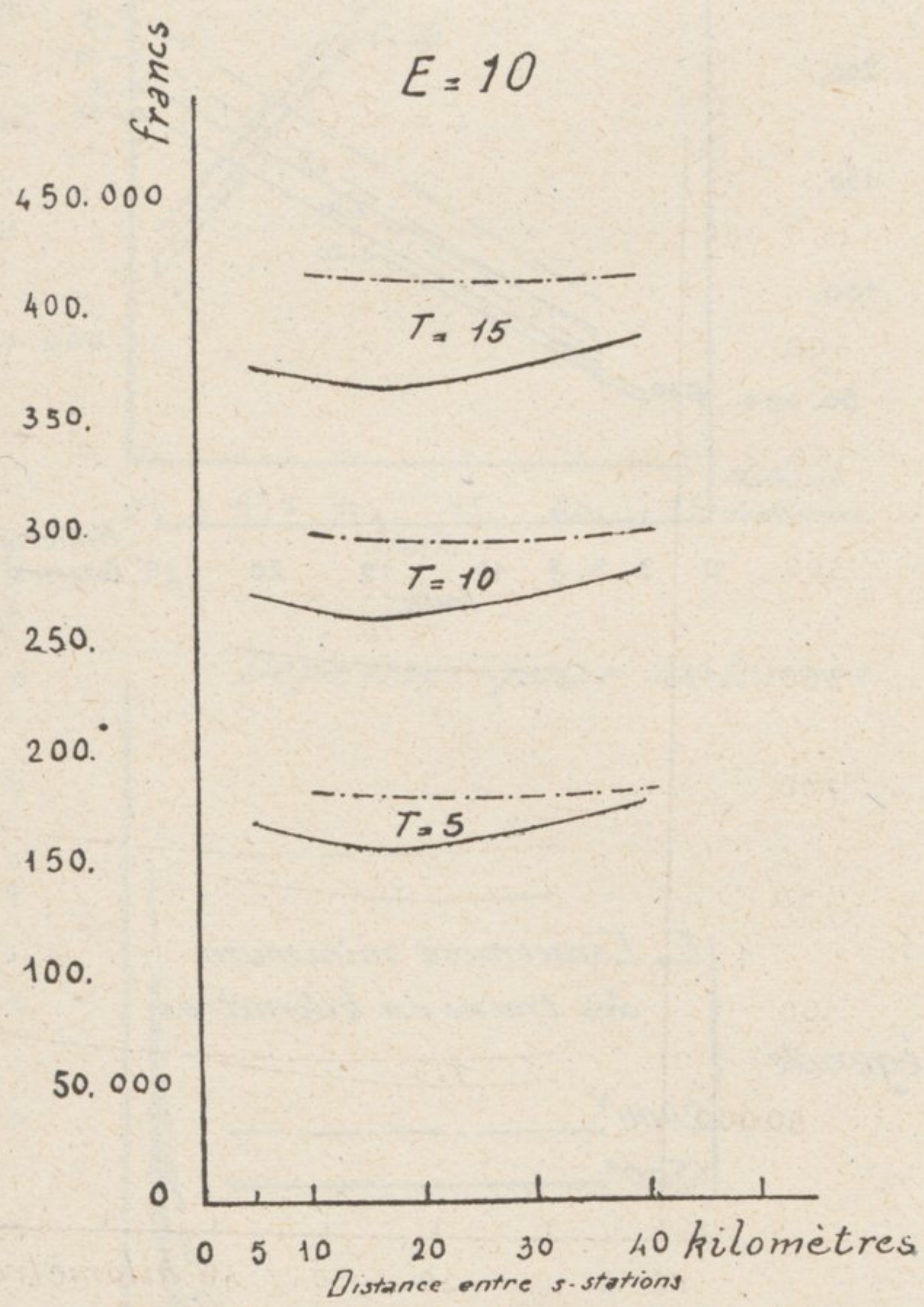




Fig. 8. — ETUDE C<sub>2</sub> (Rampe de 25 mm). — VOIE UNIQUE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P (Double traction)  
 Dépenses annuelles d'exploitation par km de ligne en fonction de la distance entre sous-stations  
 PRIX de 1920.

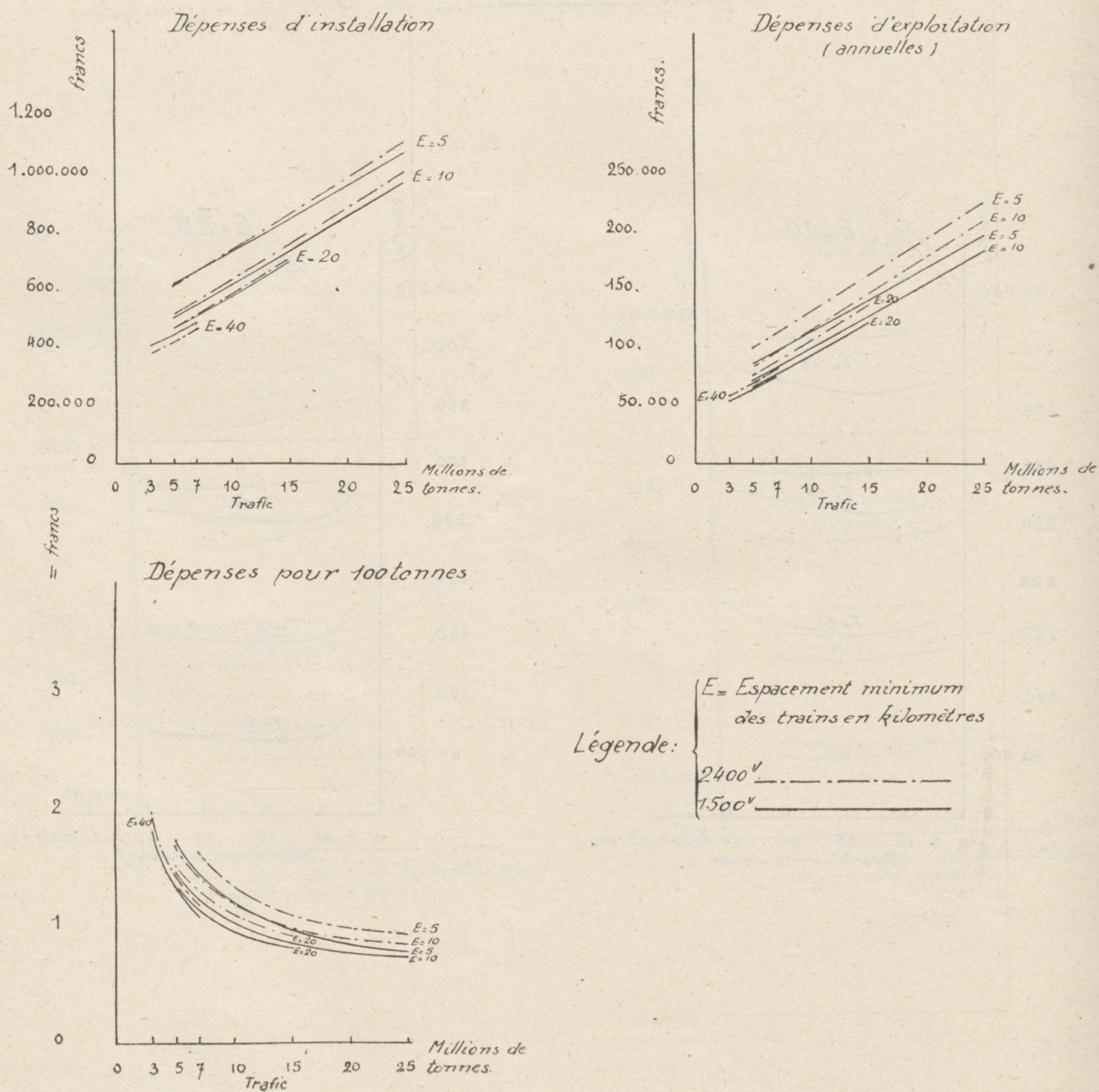
Légende:  $\left\{ \begin{array}{l} E = \text{Espacement minimum des trains en kilomètres.} \\ T = \text{Trafic en millions de tonnes par km et par an.} \\ 2400^{\text{v}} \text{ ————} \\ 1500^{\text{v}} \text{ —————} \end{array} \right.$





**Prix de revient.** (Voir figures 9 à 13). — Les courbes donnant les dépenses d'exploitation par 100 tonnes-kilomètres en fonction du trafic annuel kilométrique donnent, pour chaque cas envisagé, une idée du coût de la traction électrique ; il ne faut pas perdre de vue que les dépenses dont il s'agit ne comprennent que celles mentionnées ci-dessus.

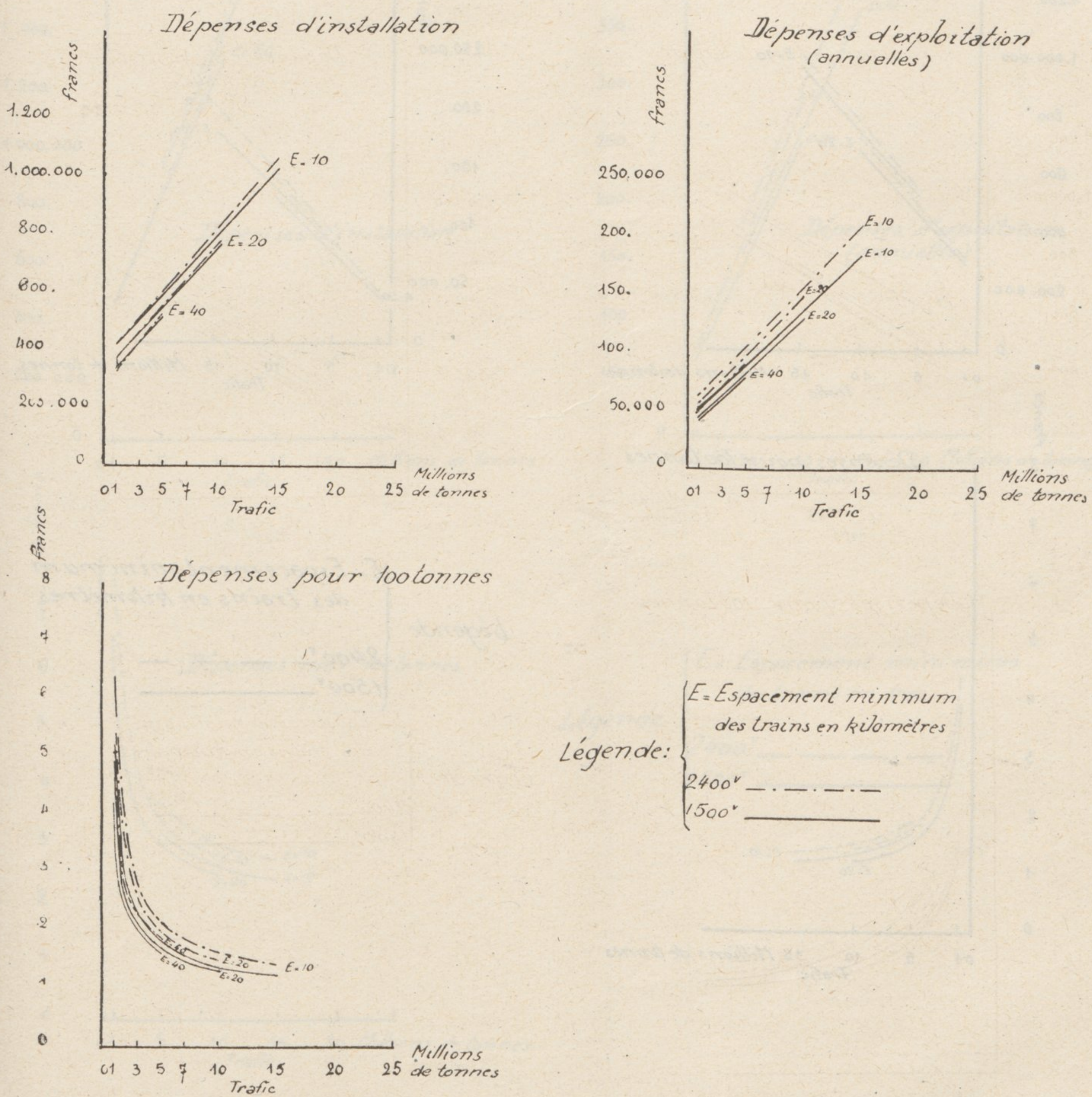
Fig. 9. — ETUDE A (Palier). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 1.500 H P.  
Dépenses par km de ligne en fonction du trafic évalué en millions de tonnes par km et par an.  
PRIX de 1920.





Ces courbes des prix de revient en fonction du trafic ont une forme nettement hyperbolique ; le prix de revient, d'abord très élevé pour les faibles trafics, décroît lorsque le trafic augmente pour devenir sensiblement constant pour les trafics très élevés, supérieurs à 10.000.000 de tonnes par kilomètre et par an.

Fig. 10. — ETUDE B<sub>1</sub> (Rampe de 10 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P.  
Dépenses par km de ligne en fonction du trafic évalué en millions de tonnes par km et par an.  
PRIX de 1920.





Ces courbes montrent qu'il faut atteindre un trafic annuel kilométrique de 4.000.000 de tonnes environ pour que l'électrification puisse donner des résultats économiques de même ordre de grandeur que ceux obtenus avec la traction à vapeur.

Fig. 11. — ETUDE B<sub>2</sub> (Rampe de 10 mm). — VOIE UNIQUE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P.  
Dépenses par km de ligne en fonction du trafic évalué en millions de tonnes par km et par an.  
PRIX de 1920.

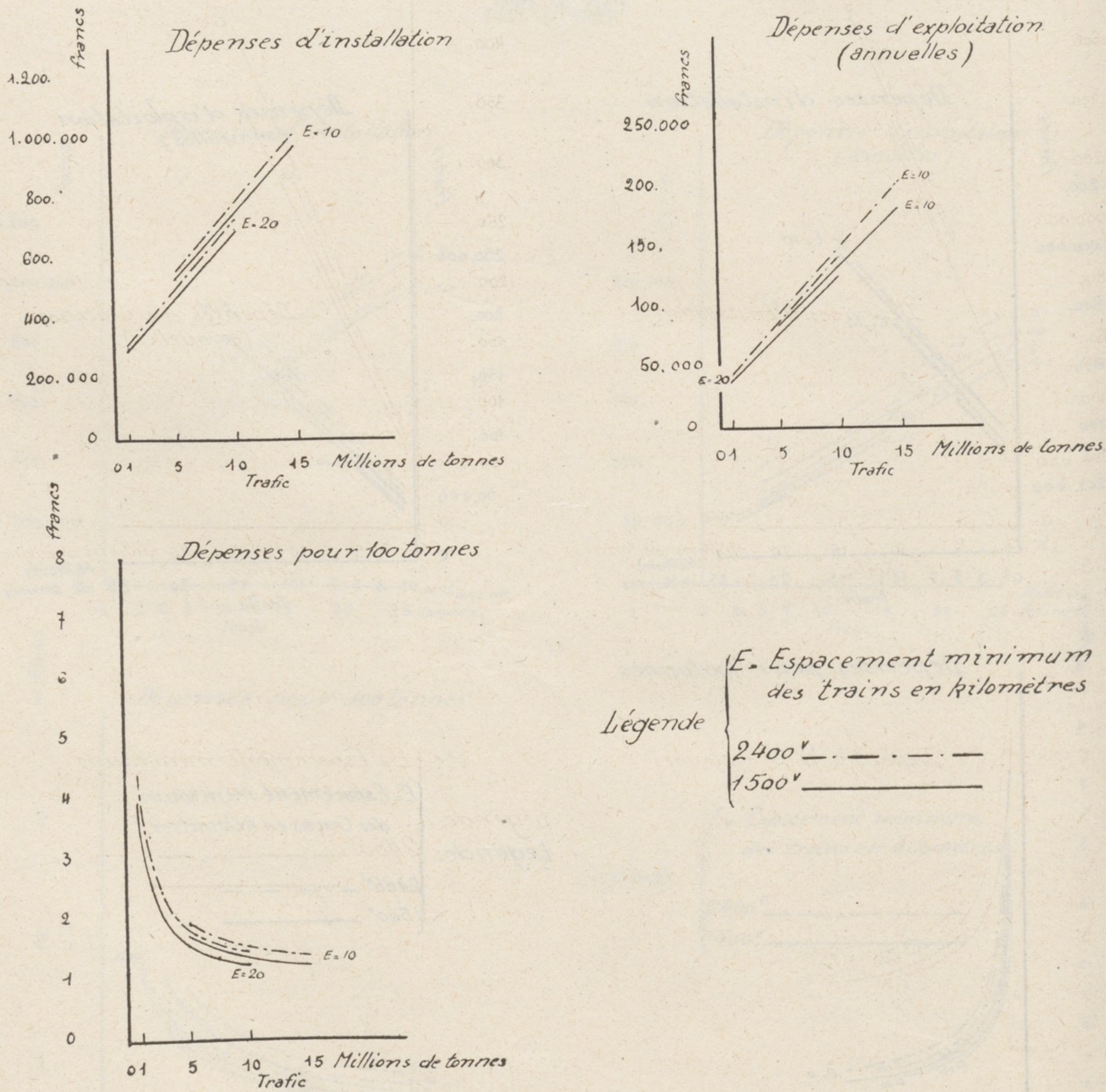
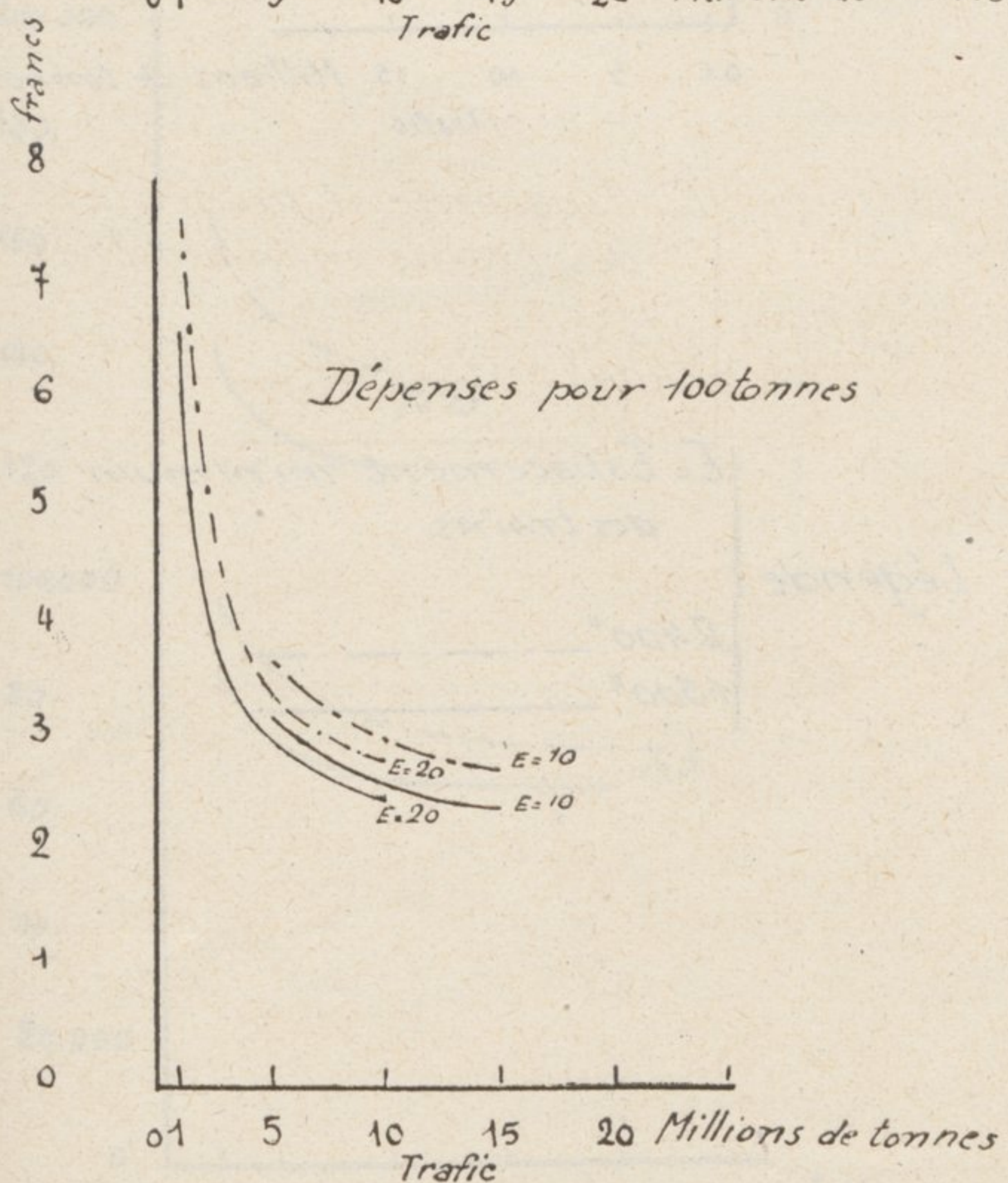
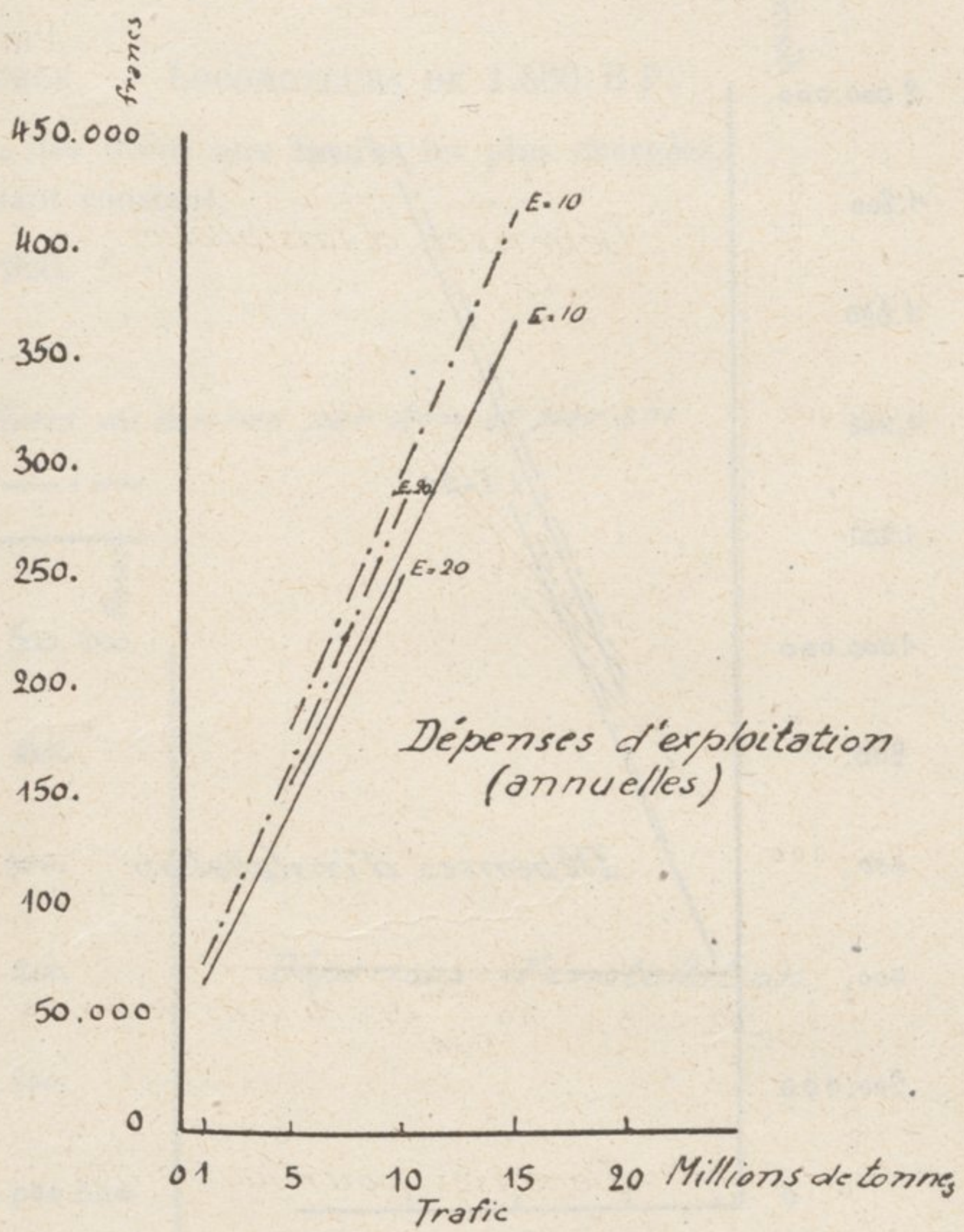
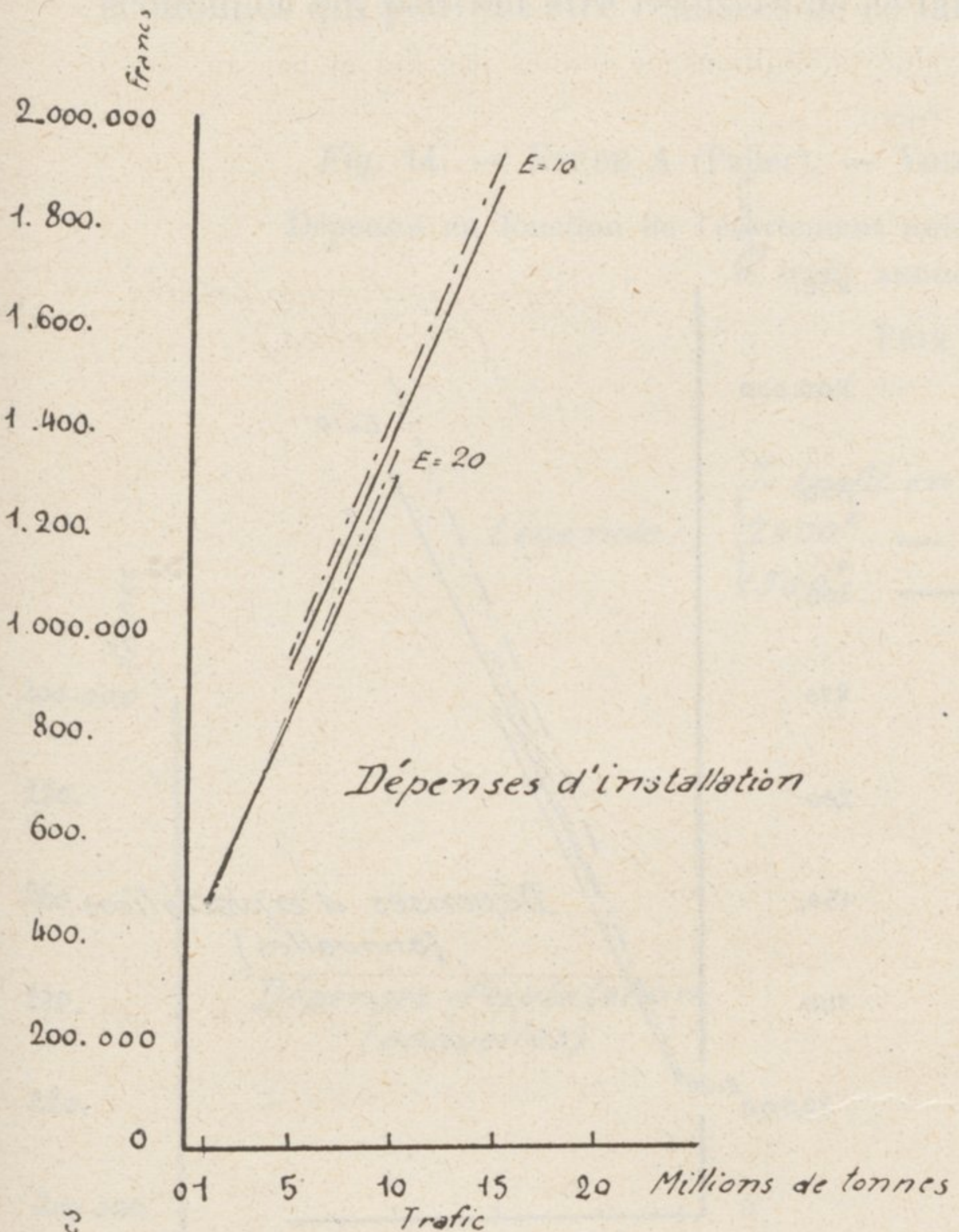




Fig. 12. — ETUDE C<sub>1</sub> (Rampe de 25 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P (Double traction).  
Dépenses par km de ligne en fonction du trafic évalué en millions de tonnes par km et par an.

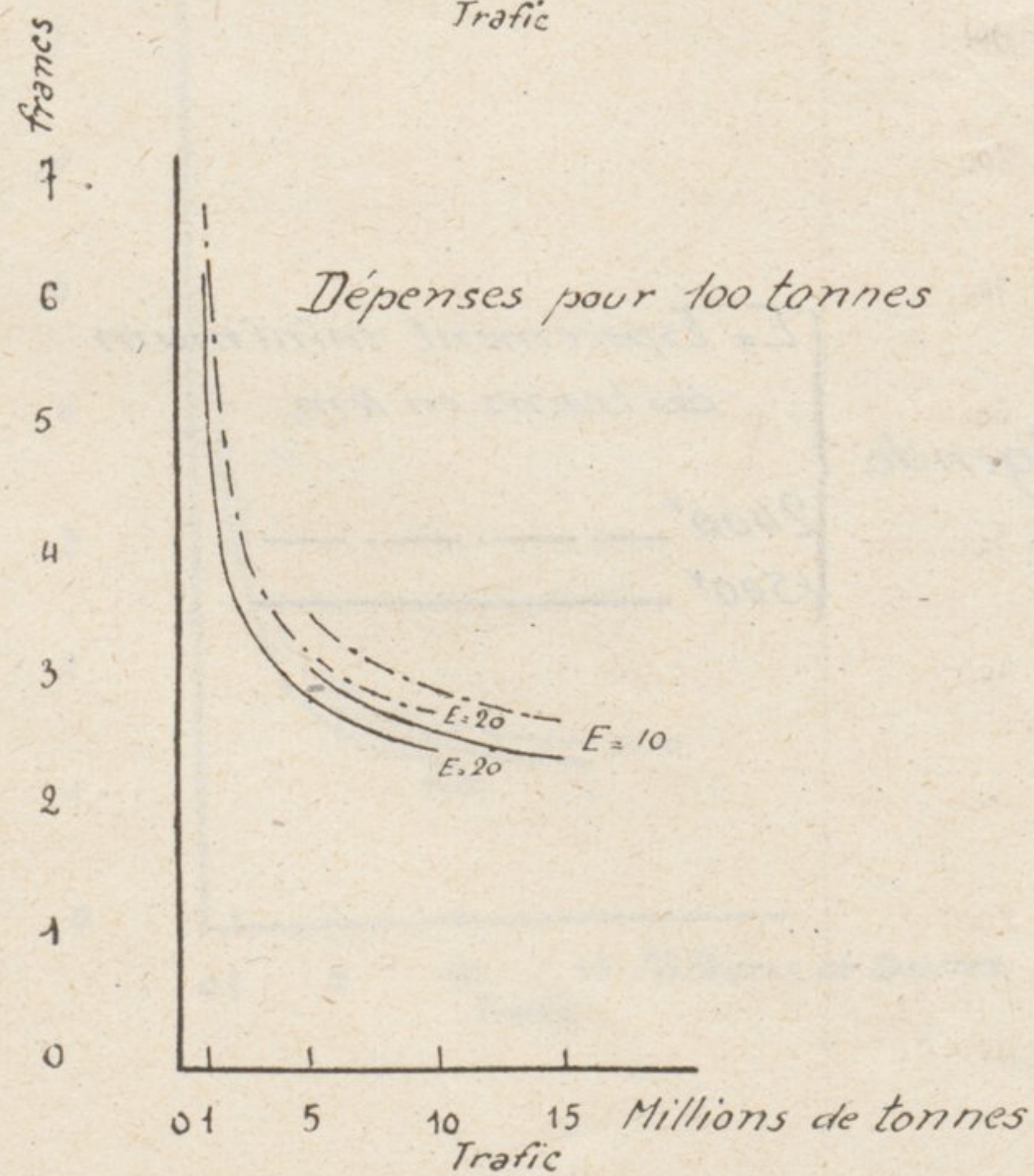
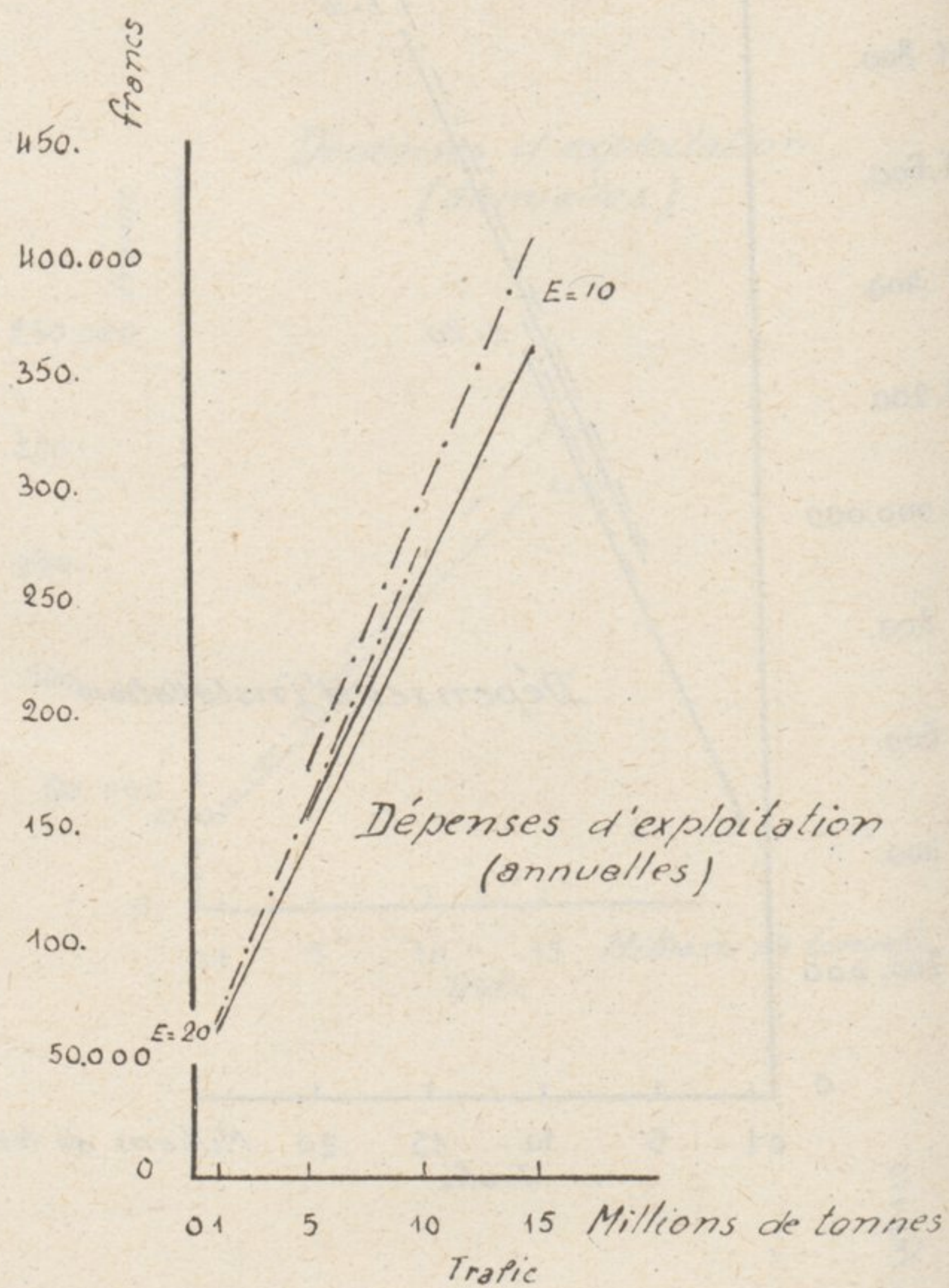
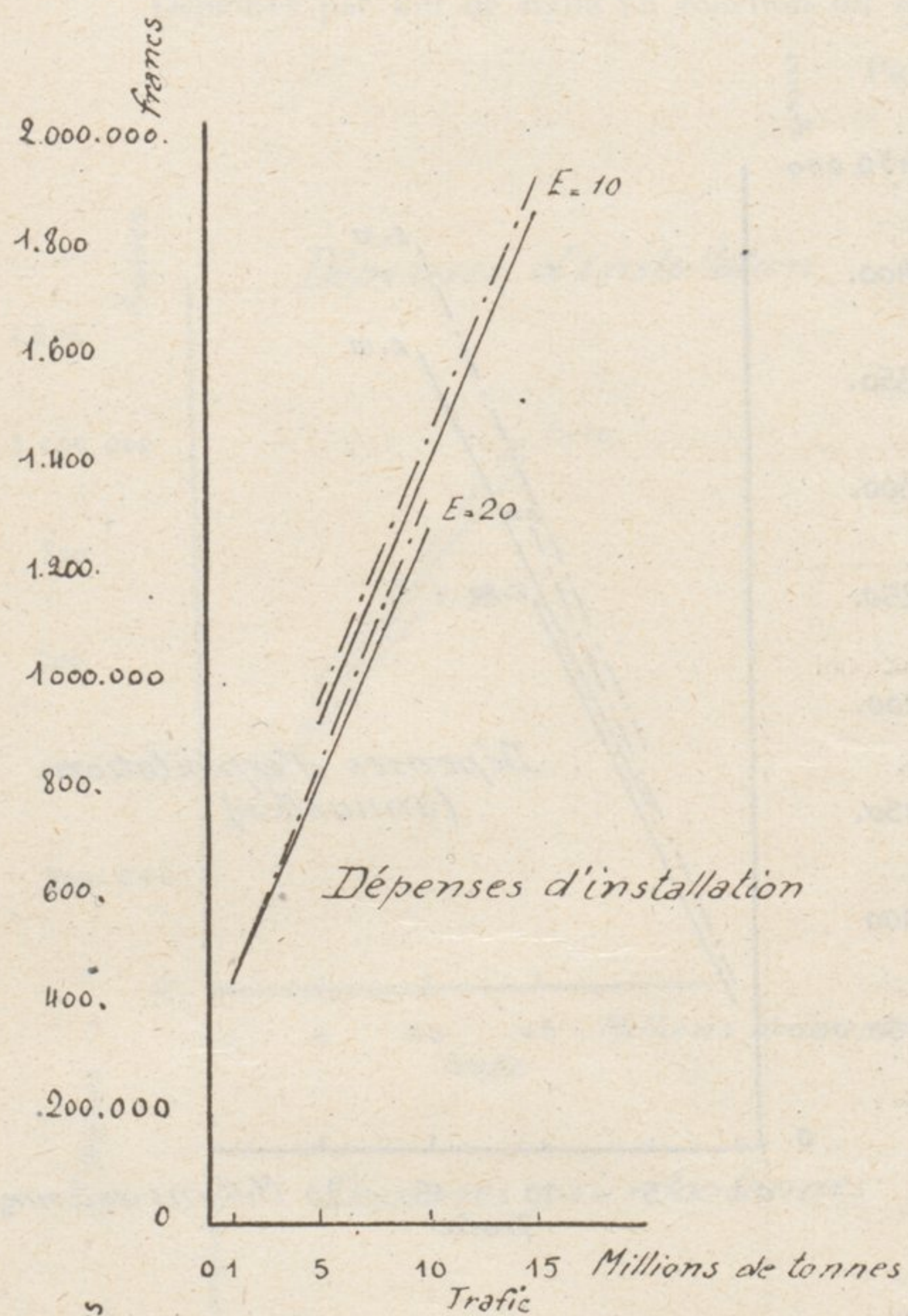
PRIX de 1920.



Légende { E = Espacement minimum des trains en Km.  
2400<sup>v</sup> — — — — —  
1500<sup>v</sup> — — — — —



Fig. 13. — ETUDE C<sub>2</sub> (Rampe de 25 mm). — VOIE UNIQUE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P (Double traction).  
 Dépenses par km de ligne en fonction du trafic évalué en millions de tonnes par km et par an.  
 PRIX de 1920.



Légende { E = Espacement minimum des trains.  
 2400' ————  
 1500' ————



**Influence de l'écartement minimum entre les trains sur les dépenses d'installation et d'exploitation.** (Voir figures 14 à 16). — Les courbes annexées montrent qu'il y a un réel intérêt à admettre pour cet écartement minimum la valeur maximum compatible avec le trafic et avec les nécessités du Service Exploitation, les économies qui peuvent être réalisées de ce fait sont intéressantes.

Fig. 14. — ÉTUDE A (Palier). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 1.500 H P.  
Dépenses en fonction de l'écartement minimum des trains aux heures les plus chargées, le trafic annuel restant constant.

PRIX de 1920.

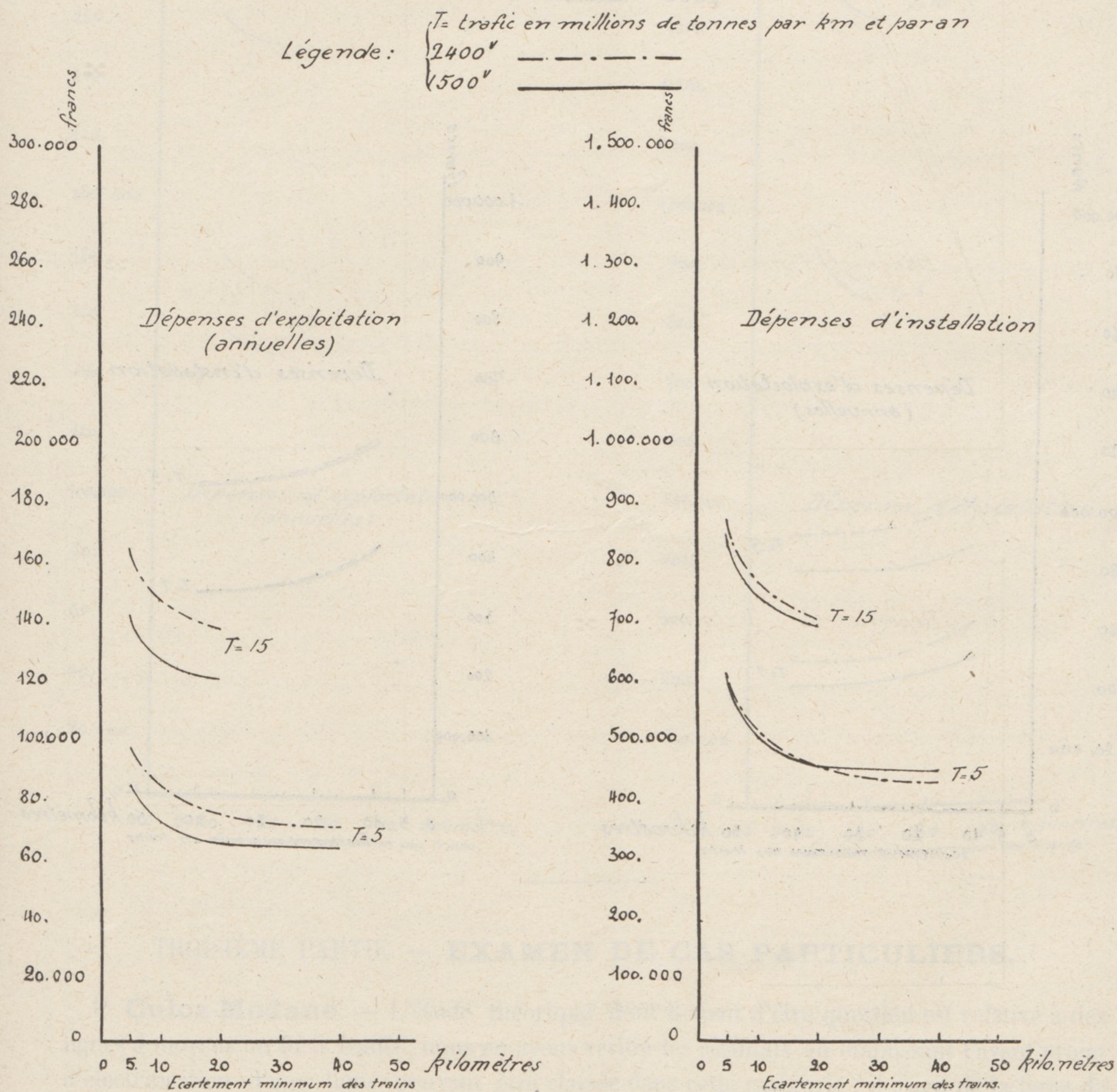




Fig. 15. — ETUDE B<sub>1</sub> (Rampe de 10 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P.

Dépenses en fonction de l'écartement minimum des trains aux heures les plus chargées,  
le trafic annuel restant constant.

PRIX de 1920.

Légende:  $T =$  trafic en millions de tonnes par km. et par an.  
2400' ————  
1500' —————

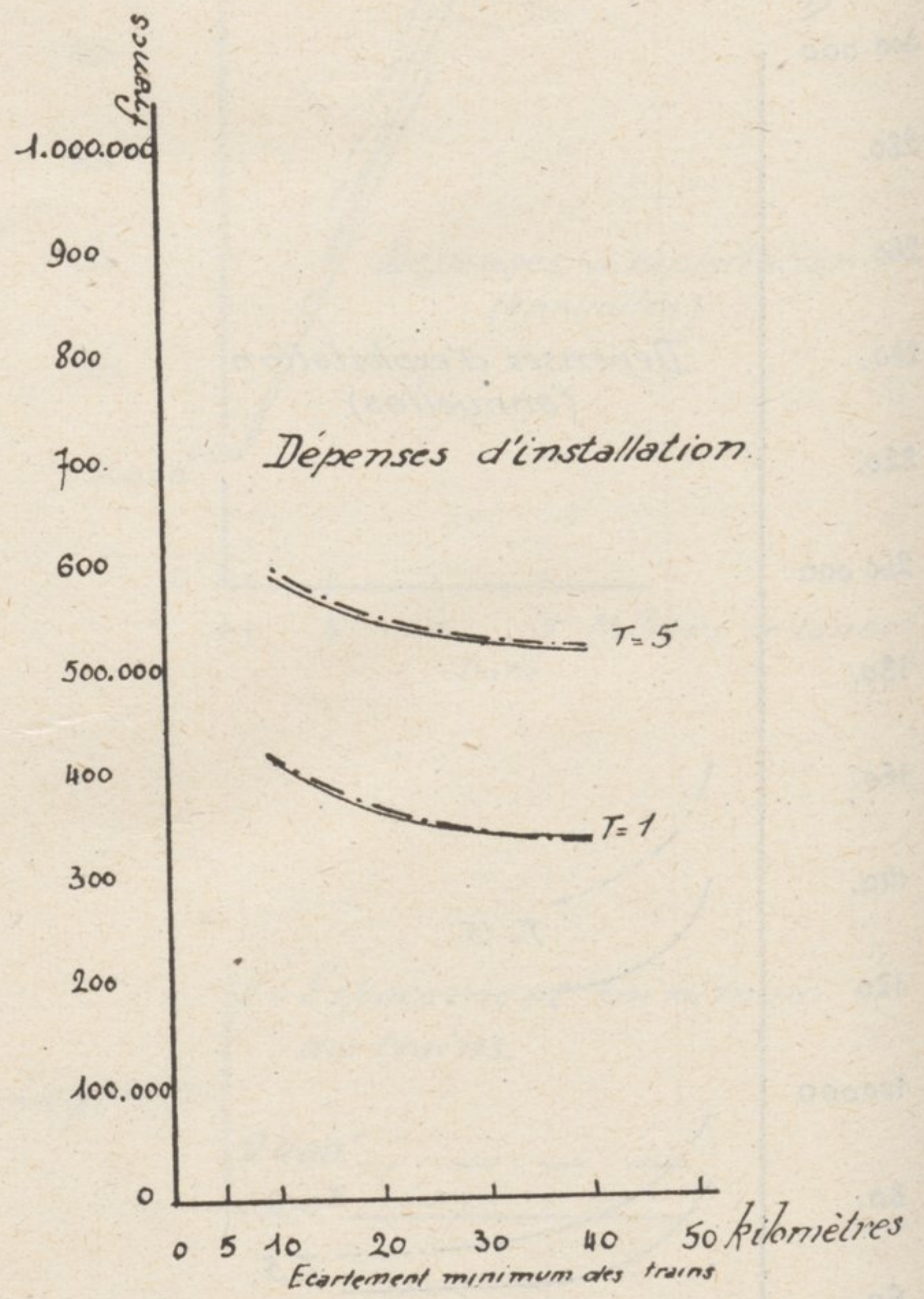
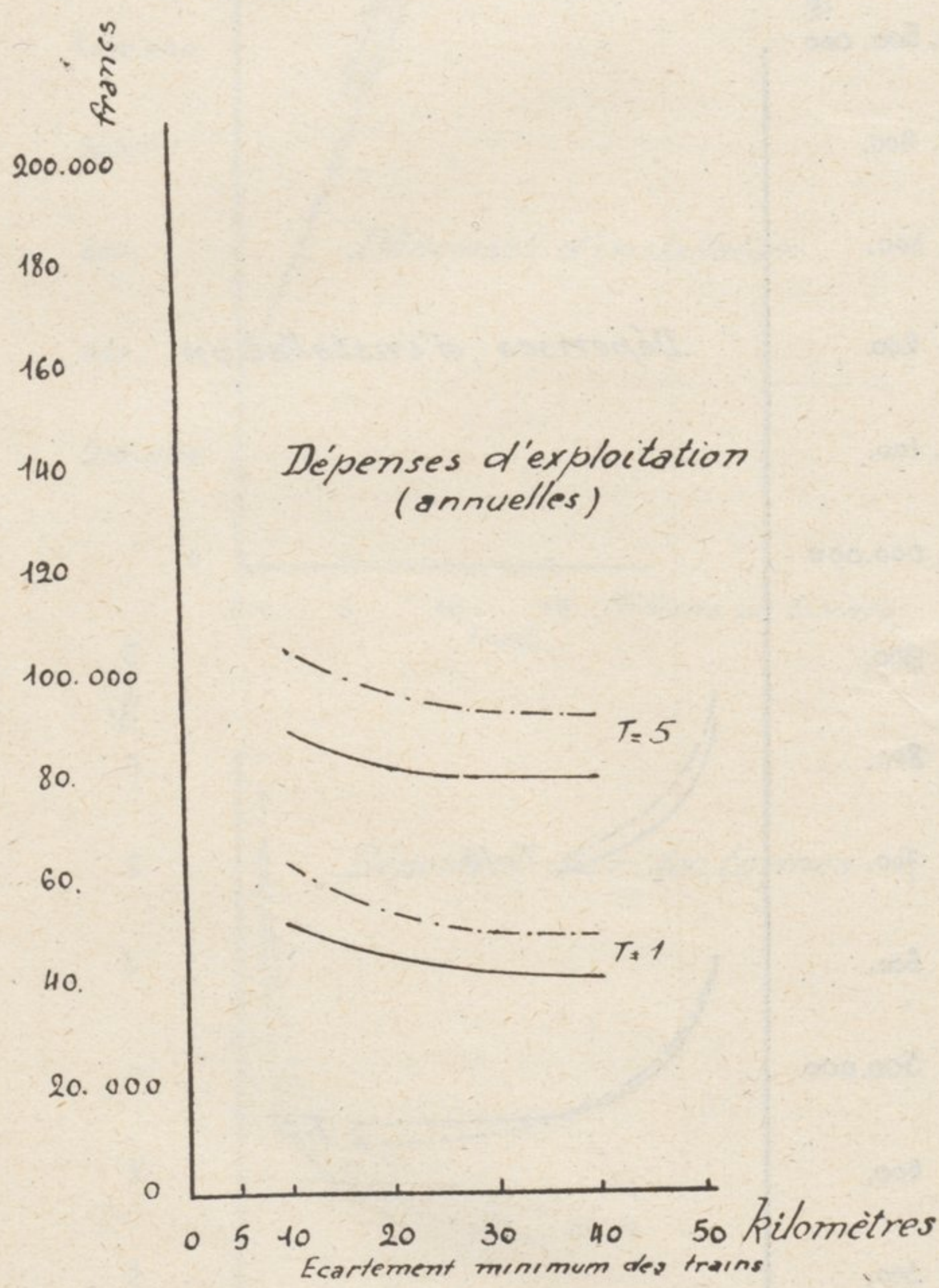
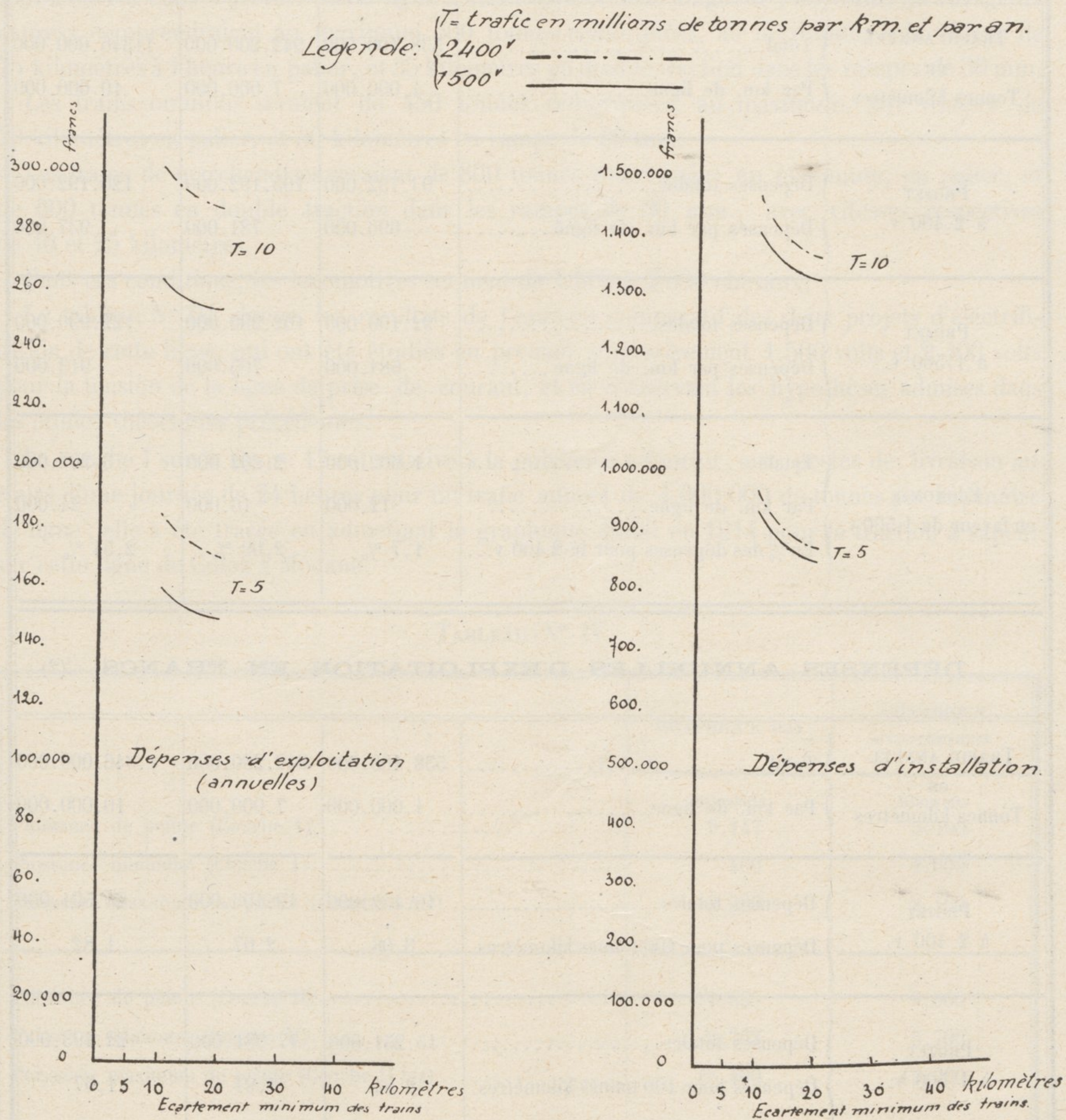




Fig. 16. — ETUDE C<sub>1</sub> (Rampe de 25 mm). — VOIE DOUBLE. — LOCOMOTEURS DE 2.000 H P (Double traction).

Dépenses en fonction de l'écartement minimum des trains aux heures les plus chargées,  
le trafic annuel restant constant.

PRIX de 1920.



TROISIÈME PARTIE. — EXAMEN DE CAS PARTICULIERS.

1<sup>o</sup> **Culoz-Modane.** — L'étude théorique dont il vient d'être question est relative à des lignes à moyens ou forts trafics, nous en avons vérifié les résultats en établissant l'avant-projet d'électrification d'une ligne pouvant être classée dans cette catégorie ; il s'agit de la ligne de Culoz à Modane, fort intéressante par son profil mixte, partie à très faible déclivité, partie en



TABLEAU N° III

DÉPENSES D'INSTALLATION EN FRANCS <span style="float: right;">(1)</span>				
TRAFFIC ANNUEL en Tonnes kilomètres	Total.....	538.400.000	942.200.000	1.346.000.000
	Par km. de ligne.....	4.000.000	7.000.000	10.000.000
PROJET à 2.400 v.	Dépenses totales.....	93.792.000	105.192.000	126.192.000
	Dépenses par km. de ligne.....	696.000	781.000	937.000
PROJET à 1.500 v.	Dépenses totales.....	92.190.000	102.990.000	122.990.000
	Dépenses par km. de ligne.....	684.000	765.000	913.000
ÉCONOMIE en faveur du 1.500 v.	Totale.....	1.602.000	2.202.000	3.202.000
	Par km. de ligne.....	12.000	16.000	24.000
	En % des dépenses pour le 2.400 v...	1,7 %	2,09 %	2,54 %
DÉPENSES ANNUELLES D'EXPLOITATION EN FRANCS <span style="float: right;">(2)</span>				
TRAFFIC ANNUEL en Tonnes kilomètres	Total.....	538.400.000	942.200.000	1.346.000.000
	Par km. de ligne.....	4.000.000	7.000.000	10.000.000
PROJET à 2.400 v.	Dépenses totales.....	16.432.000	19.496.000	24.594.000
	Dépenses pour 100 tonnes kilomètres.	3,06	2,07	1,82
PROJET à 1.500 v.	Dépenses totales.....	15.251.000	17.981.000	22.493.000
	Dépenses pour 100 tonnes kilomètres.	2,84	1,91	1,67
ÉCONOMIE en faveur du 1.500 v.	Totale.....	1.181.000	1.515.000	2.101.000
	Pour 100 tonnes kilomètres.....	0,22	0,16	0,15
	En % des dépenses pour le 2.400 v...	7,2 %	7,75 %	8,55 %
<p>(1) Ces dépenses comprennent toutes dépenses d'installations relatives aux lignes haute tension, sous-stations, lignes de prise de courant, feeders et matériel roulant.</p> <p>(2) Ces dépenses comprennent les dépenses d'intérêt et d'amortissement et les dépenses d'entretien des installations visées au renvoi (1) les dépenses de conduite des sous-stations et du matériel roulant ainsi que les dépenses d'énergie.</p>				



rampe de 10 mm, partie enfin en rampe de 30 mm, et par le trafic annuel qui peut se chiffrer actuellement par 4.000.000 de tonnes par kilomètre. C'est l'ordre de grandeur pour lequel l'électrification peut se justifier économiquement, surtout si des augmentations de trafic sont assurées dans l'avenir. Cette ligne a 135 kilomètres de longueur ; les trains de voyageurs express comprendraient au maximum 500 tonnes remorquées, au maximum, à la vitesse de 75 kilomètres à l'heure en palier, et 35 kilomètres en double traction dans les rampes de 30 mm.

Les trains omnibus seraient de 450 tonnes remorquées, au maximum, aux vitesses de 70 kilomètres en palier, et 30 kilomètres en rampe de 30 mm.

Les trains de marchandises seraient de 800 tonnes remorquées, au maximum, en palier, et de 600 tonnes en double traction dans les rampes de 30 mm., avec vitesses respectives de 40 et 25 kilomètres.

Dans ces conditions, les locomotives seraient de 1.500 à 2.000 chevaux.

Le tableau N° III donne les résultats de l'examen comparatif des deux projets d'électrification de cette ligne, qui ont été étudiés en prenant successivement 1.500 volts et 2.400 volts pour la tension de la ligne de prise de courant, et en conservant les hypothèses admises dans les études théoriques précédentes.

La courbe I sur la figure 17 est relative à la puissance à fournir aux postes de livraison au cours d'une journée de 24 heures pour un trafic annuel de 4.000.000 de tonnes par kilomètre de ligne ; elle a été tracée en admettant le graphique établi en 1914 pour la traction à vapeur sur cette ligne de Culoz à Modane.

TABLEAU N° IV

(1)	GRAPHIQUE 1914	GRAPHIQUE HYPOTHÉTIQUE
	Kilowatts	Kilowatts
Puissance de pointe (Courbe 1),.....	9.147	5.700
Puissance minimum (Courbe 1).....	400	2.600
Puissance maximum de pointe (Courbe 1 bis).....	13.000	8.100
<hr/>		
Puissance de pointe (Courbe II).....	11.835	9.000
Puissance minimum (Courbe II).....	2.763	5.700
Puissance maximum de pointe (Courbe II bis).....	16.400	15.000

(1) COURBE 1. — Puissance nécessaire à la traction des trains express, omnibus, marchandises réguliers. — Trains supposés à charge moyenne.  
 COURBE I bis. — Puissance maximum instantanée en admettant que les trains envisagés pour la courbe I sont à charge maximum.  
 COURBE II. — Puissance nécessaire à la traction de tous les trains de voyageurs réguliers, et de tous les trains de marchandises réguliers et facultatifs dans les deux sens. — Trains supposés à charge moyenne.  
 COURBE II bis. — Puissance maximum instantanée en admettant que les trains envisagés pour la courbe II sont à la charge maximum.

**NOTA.** — Ce tableau montre qu'en modifiant simplement les horaires des trains de marchandises on peut obtenir une réduction considérable de la puissance de pointe et en même temps diminuer l'écart entre la puissance de pointe et la puissance minimum.  
 Les courbes I qui correspondent sensiblement au régime actuel montrent que ce changement d'horaire réduit la puissance de pointe d'environ 40 % tandis que l'écart entre la puissance de pointe et la puissance minimum diminue de plus de 55 %.



**Fig. 17. — LIGNE DE CULOZ A MODANE.**  
 Puissance en kilowatts nécessaire à la traction électrique (courant continu 1.500 volts).  
 Puissance relevée toutes les 20 minutes au cours d'une journée de 24 heures  
 (Service du 3 Juin au 9 Octobre inclus 1914)

- I. ————— Kilowatts nécessaires à la traction des trains expres-omnibus-marchandises réguliers et des trains marchandises facultatifs Nos 6668-6678-6688-6699-6695 (trains supposés à charge moyenne et service correspondant à un trafic de  $4 \times 10^6$  tonnes par km).
- II. - - - - - Kilowatts nécessaires à la traction de tous les trains de voyageurs réguliers et de tous les trains de marchandises réguliers et facultatifs dans les deux sens (trains supposés à charge moyenne).
- Ibis. ———— Puissance maximum instantanée en admettant que les trains envisagés pour la courbe I sont à charge maximum.
- IIbis. - - - - - Puissance maximum instantanée en admettant que les trains envisagés pour la courbe II sont à charge maximum.

**Nota. — I.** Il n'a pas été tenu compte des trains spéciaux (Luxe, Malle, Emigrants) pour l'établissement de courbes.  
**2.** La courbe II et les pointes IIbis ne correspondent pas à un service réel, mais à un service fictif admettant l'existence simultanée de tous les trains facultatifs figurés au graphique de 1914.

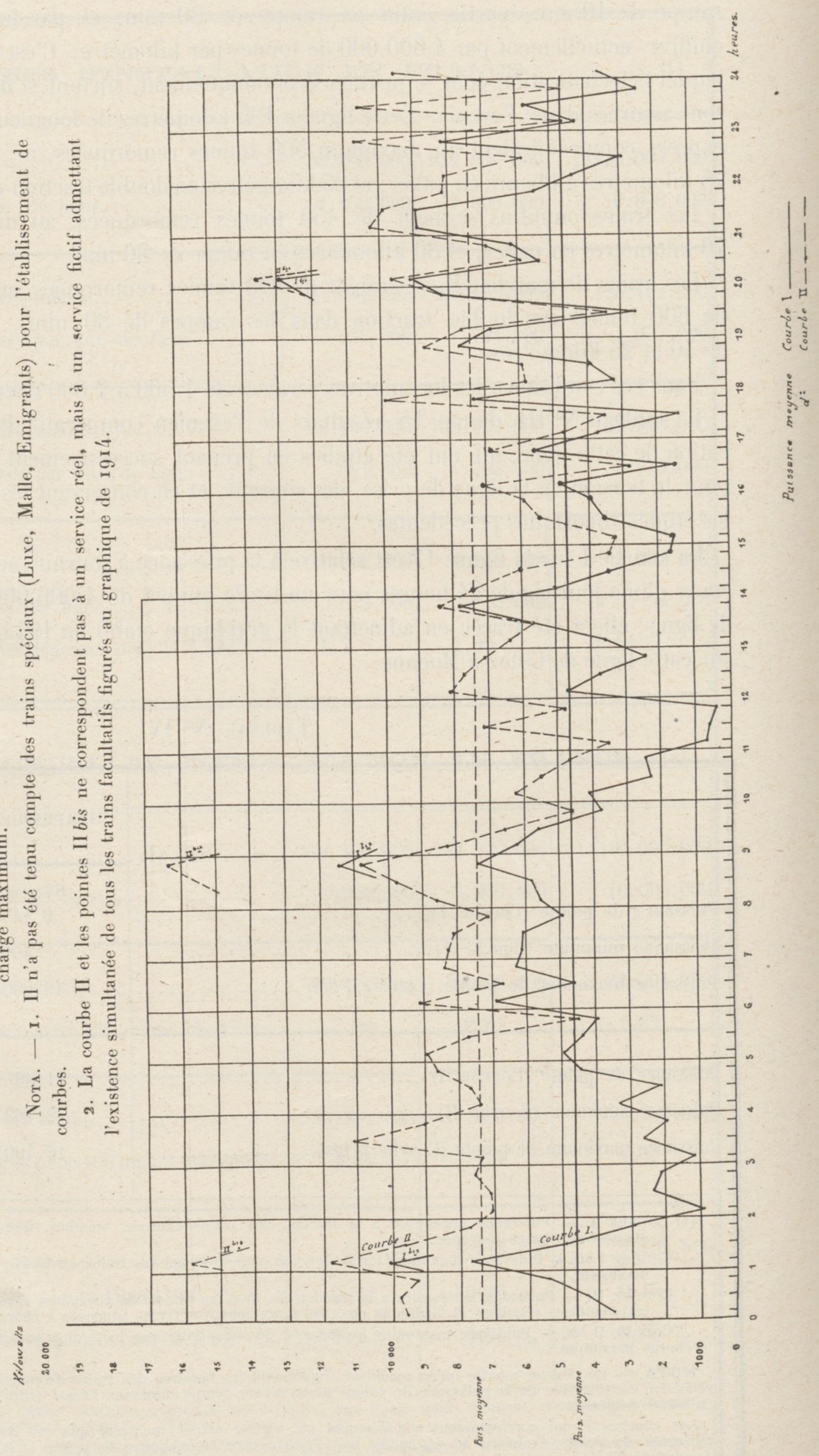


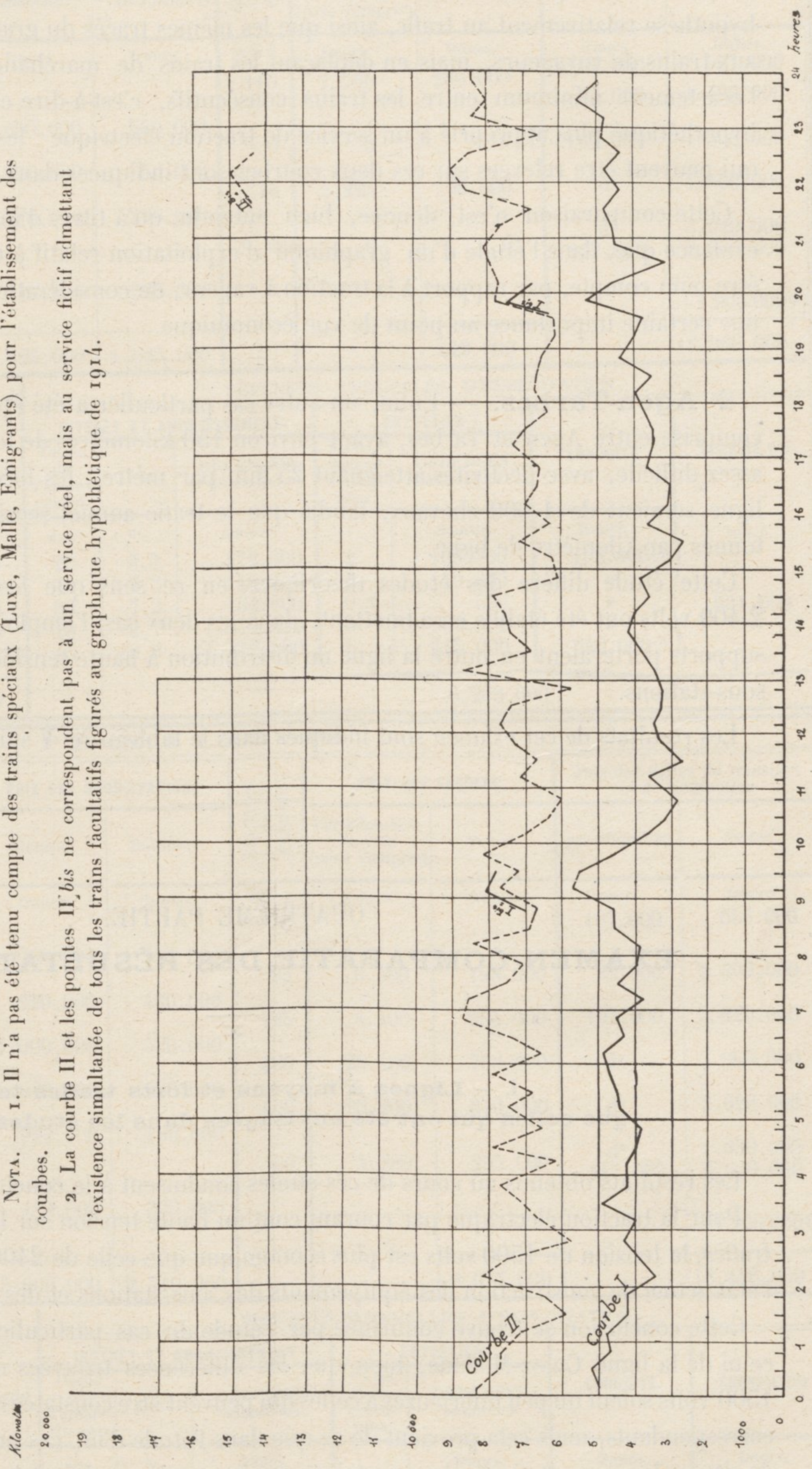


Fig. 18. — LIGNE DE CULOZ A MODANE.

- Puissance en kilowatts nécessaires à la traction électrique (courant continu 1.500 volts).  
 Puissance relevée toutes les 20 minutes au cours d'une journée de 24 h. (Service hypothétique correspondant au trafic de 1914 avec graphique établi de façon à réduire au minimum les pointes de puissance).
- I. ————— Kilowatts nécessaires à la traction des trains express-omnibus-marchandises réguliers (trains supposés à charge moyenne et service correspondant à un trafic annuel de  $4 \times 10^6$  tonnes par kilomètre).
  - II. - - - - - Kilowatts nécessaires à la traction de tous les trains de voyageurs réguliers et de tous les trains de marchandises réguliers et facultatifs dans les deux sens (trains supposés à charge moyenne).
  - I<sup>bis</sup>. ———— Puissance maximum instantanée en admettant que les trains envisagés pour la courbe I sont à charge maximum.
  - II<sup>bis</sup>. - - - - - Puissance maximum instantanée en admettant que les trains envisagés pour la courbe II sont à charge maximum.

NOTA. — 1. II n'a pas été tenu compte des trains spéciaux (Luxe, Malle, Emigrants) pour l'établissement des courbes.

2. La courbe II et les pointes II<sup>bis</sup> ne correspondent pas à un service réel, mais au service fictif admettant l'existence simultanée de tous les trains facultatifs figurés au graphique hypothétique de 1914.





A titre d'exemple une autre courbe I, sur la figure 18, a été établie en conservant la même hypothèse relativement au trafic, ainsi que les mêmes tracés du graphique 1914 précité, relatifs aux trains de voyageurs, mais en déplaçant les trains de marchandises de façon à augmenter l'écartement minimum entre les trains consécutifs, c'est-à-dire en envisageant un graphique hypothétique plus approprié à un service de traction électrique ; les différentes caractéristiques qui peuvent être relevées sur ces deux courbes sont indiquées dans le tableau n° IV.

Cette comparaison n'est donnée, bien entendu, qu'à titre d'indication et pour mettre en évidence que, dans l'étude d'un graphique d'exploitation relatif à une ligne électrifiée, il doit être tenu compte, par rapport à la traction à vapeur, de considérations supplémentaires qui ont une certaine importance au point de vue économique.

2° **Agen-Tarbes.** — Enfin, un autre cas particulier a été étudié : c'est celui de la ligne comprise entre Agen et Tarbes, ayant environ 150 kilomètres de longueur, dont le profil est assez difficile, avec déclivités atteignant 25 mm par mètre ; les locomotives utilisées sur cette ligne seraient de 1.000 chevaux, tandis que le trafic annuel serait inférieur à 1.000.000 de tonnes par kilomètre de ligne.

Cette étude diffère des études théoriques, en ce sens que les deux projets à 1.500 et 2.400 volts ont été établis en admettant, dans les deux cas, l'emploi de ligne caténaire dont les supports porteraient en outre la ligne de distribution à haute tension alternative alimentant les sous-stations.

Les résultats de cet examen sont indiqués dans le tableau N° V suivant.

---

#### QUATRIÈME PARTIE.

### EXAMEN COMPARATIF DES RÉSULTATS OBTENUS

---

#### I. — Lignes à moyens et forts trafics telles que celles qui ont été envisagées dans les études théoriques.

Les résultats obtenus au cours de ces études conduisent à la conclusion de principe suivante : Pour la traction électrique par courant continu haute tension sur les lignes à moyens et forts trafics, la tension de 1500 volts est plus économique que celle de 2400 volts, tout au moins dans l'état actuel de construction des équipements des sous-stations et des locomoteurs électriques.

Cette conclusion se trouve confirmée par l'étude du cas particulier dont nous avons parlé, celui de la ligne Culoz-Modane, bien que les différences trouvées en faveur de la tension de 1500 volts soient un peu inférieures à celles qui peuvent être constatées dans les projets théoriques correspondants, mais cela provient de ce que dans l'étude d'un cas pratique, il est tout indiqué de situer les sous-stations dans certaines gares, et cela conduit à les placer à des écartements légèrement moins économiques que ceux qui ont été admis dans les études théoriques.

Cette conclusion, qui découle d'études faites en ne considérant que l'emploi de locomotives



TABLEAU N° V. — LIGNE D'AGEN A TARBES } ÉLECTRIFICATION EN COURANT CONTINU HAUTE TENSION  
(Longueur 152 Km. dont 130 Km. en voie simple et 22 km. en voie double). (Dépenses évaluées avec prix de 1920).

1° Projet à 2.400 volts.

EMPLACEMENT des SOUS-STATIONS	LONGUEUR des SECTIONS kilom.	PUISSANCES INSTALLÉES Kw.	PRIX DES SOUS-STATIONS		SECTION des FEEDERS m/m 2	PRIX DES FEEDERS		Prix des lignes de transport et de distribution	
			Matériel francs	Bâtiments francs		par kilomètre de voie (pose comprise) francs	TOTAL francs	par kilomètre francs	TOTAL francs
	5,2 (1)				115	7.750	286.000	107.000	557.000
Castex-Lectourois	22,1	2x2.000	1.650.000	550.000	0	0	0	67.000	1.490.000
Auch	42,1	2x2.000	1.650.000	550.000	0	0	0	107.000	4.500.000
Laas	37,4	2x1.500	1.440.000	490.000	75	5.225	196.000	d°	4.000.000
	28,1				0	0	0	d°	3.020.000
Tarbes	17,7 (1)	1x1.000	715.000	335.000	0	0	0	147.000	2.600.000
									+1.900.000 (2)
			5.425.000	1.925.000			449.000		18.060.000

PARTIES de L'INSTALLATION	DÉPENSES D'INSTALLATION francs	DÉPENSES ANNUELLES D'EXPLOITATION						
		INTÉRÊT ET AMORTISSEMENT			ENTRETIEN		CONDUITE francs	ÉNERGIE (6) francs
		Durée de l'amortissem. ans	Taux %	DÉPENSES annuelles francs	% des dépenses d'installation	DÉPENSES annuelles francs		
Sous-stations } Matériel	5.425.000	20	8,7	472.000	2	108.000	192.000 (4)	531.000
Sous-stations } Bâtiments	1.925.000	30	7,3	140.000	1	19.300	»	
Feeders	449.000	30	7,3	32.800	0,1	500	»	
Ligne	18.060.000	20	8,7	1.570.000	5	903.000	»	
Locomotives	10.800.000 (3)	15	10,3	1.110.000	5	545.000	640.000 (5)	
TOTAUX	36.659.000					6.263.600		

2° Projet à 1.500 volts.

EMPLACEMENT des SOUS-STATIONS	LONGUEUR des SECTIONS kilom.	PUISSANCES INSTALLÉES Kw.	PRIX DES SOUS-STATIONS		SECTION des FEEDERS m/m 2	PRIX DES FEEDERS		Prix des lignes de transport et de distribution	
			Matériel francs	Bâtiments francs		par kilomètre de voie (pose comprise) francs	TOTAL francs	par kilomètre francs	TOTAL francs
	5,2 (1)				0			107.000	556.000
Bon-Encontre	30,4	2x1.000	760.000	450.000	95	6.500	198.000	92.000	2.800.000
Lectoure	33,8	2x1.500	920.000	480.000	125	8.400	284.000	107.000	3.620.000
Auch	28,6	2x2.000	1.000.000	520.000	400	26.200	750.000	d°	3.060.000
Mirande	24,5	2x1.500	920.000	480.000	400	26.200	640.000	d°	2.620.000
Villecomtal	12,4	2x1.500	920.000	480.000	60	4.280	205.000	d°	1.330.000
Tarbes	17,7 (1)	1x1.000	480.000	330.000				147.000	2.600.000
									+1.900.000 (2)
			5.000.000	2.740.000			2.077.000		18.486.000

PARTIES de L'INSTALLATION	DÉPENSES D'INSTALLATION francs	DÉPENSES ANNUELLES D'EXPLOITATION						
		INTÉRÊT ET AMORTISSEMENT			ENTRETIEN		CONDUITE francs	ÉNERGIE (6) francs
		Durée de l'amortissem. ans	Taux %	DÉPENSES annuelles francs	% des dépenses d'installation	DÉPENSES annuelles francs		
Sous-stations } Matériel	5.000.000	20	8,7	435.000	2	100.000	288.000 (4)	417.000
Sous-stations } Bâtiments	2.740.000	30	7,3	200.000	1	27.400	»	
Feeders	2.077.000	30	7,3	153.000	0,1	2.100	»	
Ligne	18.486.000	20	8,7	1.605.000	5	925.000	»	
Locomotives	10.260.000 (3)	15	10,3	1.055.000	5	513.000	640.000 (5)	
TOTAUX	38.563.000					6.360.500		

(1) Les parties de section soulignées sont à voie double. — (2) Supplément pour voies de service (38 Km. à 50.000 fr.). — (3) 15 locomotives à 720.000 fr. pour 2.400 v. — 5 % en moins pour 1.500 v. — (4) 6 hommes à 8.000 fr. par s.-station. (5) 40 équipes à 16.000 fr. — (6) A 0 fr. 06 le Kw. h. pour un trafic annuel de 500.000 tonnes par kilomètre.  
NOTA. — Dans les 2 cas : 2.400 et 1.500 v., les dépenses annuelles d'entretien des locomoteurs ont été évaluées en comptant à 5 % du capital engagé.

Prix pour 100 t. remorquées par Km.  
(Ce prix ne comprend que les dépenses spécifiées dans le tableau ci-dessus, c.-à-d. celles relatives aux sous-stations, aux lignes de transport et de distribution et aux locomoteurs).

Projet à 2.400 volts :  
 $6.263.600 \times 100 = 8 \text{ fr. } 25.$   
 $152 \times 500.000$   
 Projet à 1.500 volts :  
 $6.360.500 \times 100 = 8 \text{ fr. } 37.$   
 $152 \times 500.000$



électriques, serait a fortiori la même s'il s'agissait d'automotrices, car il y a une bien plus grande différence entre les prix des automotrices électriques à 2400 et 1500 volts qu'entre les locomotives correspondantes. (1)

Pour un même profil, les dépenses d'installation, ainsi qu'il est possible de le constater dans les exemples cités, varient considérablement avec le trafic, l'écartement minimum à prévoir entre les trains consécutifs et la puissance nécessaire à la propulsion de ces trains, mais elles sont sensiblement les mêmes quelle que soit la tension choisie ; les courbes donnant les dépenses d'installation en fonction du trafic font ressortir un léger avantage en faveur de la tension de 1500 volts. De même les dépenses d'exploitation varient aussi considérablement avec le trafic, l'écartement minimum à prévoir entre les trains consécutifs et la puissance des locomotives, mais elles sont plus faibles pour la tension de 1500 volts que pour celle de 2400 volts. Les différences en faveur de la tension de 1500 volts sont de l'ordre de 15 % d'après l'étude théorique et de 8 % d'après l'étude du cas particulier Culoz-Modane.

Ces résultats peuvent s'expliquer comme suit :

**1° Dépenses d'installation.** — Bien que les sous-stations qui alimentent la ligne de distribution soient plus rapprochées et par suite plus nombreuses avec le 1500 volts qu'avec le 2400 volts, les dépenses d'installation correspondantes sont sensiblement les mêmes dans les deux cas, parce que l'importance individuelle des sous-stations diminue en même temps que leur écartement et que, d'autre part, pour une puissance donnée, les commutatrices (cas du 1500 volts) sont d'un prix beaucoup moins élevé que les groupes moteurs-générateurs (cas du 2400 volts) (1).

Les dépenses relatives aux feeders interviennent peu dans la comparaison, les courbes, donnant les dépenses d'installation et d'exploitation en fonction de l'écartement entre les sous-stations, montrent que cet écartement le meilleur correspond, dans les divers cas, à des dépenses de feeders peu importantes relativement aux autres dépenses.

Les dépenses de matériel roulant locomoteur sont plus petites avec le 1500 volts et l'économie qui en résulte est d'autant plus importante que le trafic augmente davantage.

**2° Dépenses d'exploitation.** — Les dépenses d'installation étant, en général, moins élevées avec le 1500 volts qu'avec le 2400 volts, il en résulte qu'il en est de même des dépenses d'intérêt et d'amortissement.

Les dépenses d'entretien sont moins élevées avec 1500 volts qu'avec 2400 volts parce qu'il y a une économie notable en faveur de 1500 volts pour l'entretien du matériel roulant.

Les dépenses relatives aux pertes d'énergie sont moindres avec le 1500 volts qu'avec le 2400 volts en raison du rendement plus élevé des commutatrices par rapport à celui des groupes moteurs-générateurs ; cette différence de rendement est surtout appréciable aux faibles charges qui correspondent au régime moyen de marche des sous-stations.

Les dépenses de conduite (sous-stations et locomoteurs) sont plus élevées avec le 1500 volts qu'avec le 2400 volts en raison du plus grand nombre des sous-stations, mais le supplément de dépenses qui en résulte est largement compensé par les économies réalisées d'autre part.

---

(1) Les dépenses de matériel roulant locomoteur sont moindres avec 1500 volts qu'avec 2400 volts parce que cette dernière tension exige des contacteurs plus puissants et plus nombreux ainsi que des moteurs plus encombrants et, par suite, plus lourds pour une même puissance.

L'écart entre ces dépenses est environ de 5 % pour les locomotives et de 15 % pour les automotrices.



Ainsi donc, le 1500 volts l'emporte économiquement sur le 2400 volts pour les raisons suivantes :

Avantages résultant de l'emploi de commutatrices au lieu de moteurs-générateurs,  
Economie sur le matériel roulant automoteur.

Les avantages résultant de l'emploi des commutatrices disparaîtraient si ces machines pouvaient être utilisées dans les mêmes conditions pour les deux tensions, mais actuellement, avec la fréquence de 50 périodes, les commutatrices ne pourraient être utilisées pour obtenir 2400 volts qu'en employant des dispositifs compliqués, nécessitant 3 ou 4 commutatrices montées en série, ils n'ont pas été envisagés dans l'étude.

A ce point de vue, la fréquence de 25 périodes serait infiniment préférable à celle de 50, mais elle doit être abandonnée en France pour les Réseaux de distribution de l'énergie (1).

Les prix du kw-heure considérés dans l'étude sont 0 fr. 03 pour 1914 et 0 fr. 06 pour 1920, naturellement toute augmentation de ces prix de bases serait en faveur du 1500 volts qui procure le minimum de pertes d'énergie.

Indépendamment des raisons d'ordre économique dont il vient d'être question, il y a d'autres considérations qui interviennent en faveur de la tension de 1500 volts pour l'électrification des lignes à moyens et forts trafics.

Comparativement aux tensions plus élevées, cette tension de 1500 volts donnera toujours de meilleures garanties de bon fonctionnement et de sécurité pour les sous-stations, la ligne de distribution et le matériel automoteur.

Ainsi qu'il a été dit, il est sage de ne pas utiliser un 3<sup>e</sup> rail isolé de prise de courant avec des tensions supérieures à 1500 volts ; or, ce mode de distribution de l'énergie pourra être préféré dans bien des cas pour l'électrification en courant continu des lignes dont le trafic est important.

En effet, le plus souvent, ces lignes seront empruntées, sur une partie de leur longueur, par des lignes annexes, à très faible trafic, pour lesquelles l'électrification peut ne pas être indiquée. Ces lignes annexes à très faible trafic resteront desservies à la vapeur et, à moins de complications coûteuses et gênantes, les deux systèmes de traction, vapeur et électricité, seront en présence sur les parties communes. Or, les lignes de prise aérienne au dessous desquelles circulent des locomotives à vapeur ne sont pas recommandables, en raison des dépôts de suie qui se forment sur les conducteurs et leurs supports et de l'oxydation de diverses parties de la suspension caténaire.

## II. — Ligne à faible trafic.

L'examen des résultats de l'étude de l'électrification de la ligne Agen-Tarbes, sur laquelle le trafic est tout à fait réduit, montre que la tension de 2400 volts conduirait à des dépenses d'installation légèrement inférieures comparativement à celles correspondantes à la tension de 1500 volts.

Quant aux dépenses d'exploitation elles sont sensiblement les mêmes dans les deux hypothèses.

Pour ces lignes à faible trafic, le choix de la tension est plus discutable ; il est certain que la diminution de l'importance de l'énergie nécessaire, la diminution du nombre de véhicules automoteurs, l'augmentation de l'espacement minimum à prévoir entre les trains consécutifs

---

(1) Le Ministère des Travaux Publics a décidé que pour les grands Réseaux de distribution à établir, la préférence devait être donnée au courant triphasé à 50 périodes. (Circulaire ministérielle du 1<sup>er</sup> avril 1918).



enlèvent au 1.500 volts une partie de son intérêt et peuvent donner l'avantage à la plus haute tension ; mais il n'en reste pas moins évident que la traction électrique appliquée à de semblables lignes ne pourra conduire, en général, qu'à des résultats beaucoup plus coûteux que la traction à vapeur.

Il est possible que les progrès de la technique conduisent dans l'avenir à des procédés de construction ou à des appareils nouveaux donnant une suprématie plus nette à la plus haute tension pour l'électrification de ces lignes à faibles trafics.

---

#### CINQUIÈME PARTIE. — CONCLUSIONS.

En résumé et dans l'état actuel de la technique, les études faites conduisent à envisager, pour l'électrification des réseaux français, l'emploi du courant continu à la tension de 1500 volts pour les lignes à forts et moyens trafics, elles indiquent que des tensions plus élevées peuvent être préférées lorsque l'espacement minimum à prévoir entre les trains consécutifs devient suffisamment important, c'est le cas, sauf de rares exceptions, des lignes à faible trafic.

L'office a estimé qu'il était préférable de fixer à 3000 volts, qui est un multiple de 1500 volts, la valeur à donner à la plus haute tension au lieu de 2400 volts, valeur qui a servi de base à l'étude.

Au point de vue technique, l'adoption de deux tensions différentes ne présente aucun inconvénient ; il suffirait d'exiger en principe que les équipements des locomoteurs à 1500 volts, appelés à circuler éventuellement sur les lignes à 3000 volts, fussent isolés pour la tension maximum et fussent pourvus à la fois de prises de courant pour 3<sup>e</sup> rail et pour lignes catenaires, ce à quoi, d'ailleurs, on sera vraisemblablement conduit dans bien des cas parce que, le plus souvent, les voies de service seront équipées en lignes catenaires, d'installation plus aisée.

Les locomoteurs construits pour lignes à 1500 volts pourraient être alimentés par les lignes à 3000 volts, en n'utilisant que le montage des moteurs en série.

Les véhicules à 3000 volts n'auraient aucune difficulté à circuler sur les lignes à 1500 volts, à la condition toutefois qu'ils fussent pourvus de prise de courant pour 3<sup>e</sup> rail.

Enfin, nous ferons remarquer qu'en cas de nécessité, mobilisation par exemple, ce ne sont pas les locomoteurs des lignes à forts et moyens trafics qui auraient à circuler sur les lignes à faibles trafics, mais que c'est l'inverse qui pourrait se produire et, dans ce cas, les locomotives affectées normalement aux lignes à 3000 volts n'auraient aucune difficulté à circuler sur celles à 1500 volts, sans changement.

**Observations ayant un caractère général.** — Indépendamment des considérations exposées ci-dessus et relatives à la comparaison économique des divers projets, établis aux deux tensions 1500 ou 2400 volts, certaines observations d'ordre plus général sont mises en évidence par cette étude. Il n'est pas inutile, croyons-nous, d'insister encore sur l'intérêt qu'elles peuvent présenter.

Ces observations se rapportent à l'emplacement des sous-stations, au mode rationnel d'exploitation à adopter avec la traction électrique et enfin aux trafics minima au-dessous desquels l'électrification d'une ligne ne paraît pas avantageuse au point de vue économique.



**Emplacement des sous-stations.** — Quelle que soit la tension choisie, on pourra toujours placer les sous-stations dans des gares, tout en restant dans des conditions suffisamment économiques d'écartement entre ces sous-stations.

**Mode d'exploitation.** — Les dépenses d'installation et d'exploitation sont très élevées, mais il faut remarquer qu'elles dépendent beaucoup du mode d'exploitation adopté et, à ce point de vue, il y a une grande différence entre la traction électrique et la traction à vapeur.

Avec cette dernière, il est indifférent d'accumuler les trains les uns à la suite des autres, tandis que, avec la traction électrique, il faut répartir les trains de façon à obtenir entre eux des intervalles peu différents et augmenter ainsi, dans la mesure du possible, l'écartement entre les trains consécutifs.

Choisir pour cet écartement des valeurs trop petites, pour un trafic donné, afin de pouvoir assurer un service exceptionnel, conduit à des augmentations considérables de dépenses d'installation et d'exploitation.

Ainsi pour un trafic annuel de 5.000.000 de tonnes par km. de ligne (double voie) les dépenses d'installation et d'exploitation peuvent varier respectivement de 30 % et de 25 % suivant que l'écartement minimum prévu entre les trains consécutifs, aux heures exceptionnellement chargées, est de 5 km. ou de 20 km. (intervalles de temps correspondants 5 m. et 20 m.).

Enfin, en ce qui concerne le mode d'exploitation, nous signalerons, en passant, une observation, s'appliquant aussi bien à la traction électrique qu'à la traction à vapeur, et qui est relative à la vitesse commerciale, en général très faible, des trains de marchandises : toute augmentation de cette vitesse commerciale, obtenue soit par l'augmentation de la vitesse des trains, soit surtout par la réduction des temps d'arrêts dans les gares, conduira à une diminution correspondante du nombre de locomotives nécessaires et à une réduction du personnel de conduite, ce qui, à l'époque actuelle, se traduira par des économies importantes dues à un meilleur rendement du matériel et du personnel.

**Prix de revient.** — Les courbes donnant le prix de revient de la tonne-km. remorquée, en fonction du trafic, ont, ainsi qu'il a été dit, avec la traction électrique, une forme nettement hyperbolique. Ce prix de revient, excessivement élevé aux faibles trafics, diminue lorsque le trafic augmente pour devenir sensiblement constant à partir d'un certain tonnage remorqué annuellement ; pour une ligne dont les caractéristiques principales sont connues, l'établissement de ces courbes permet de définir le trafic à partir duquel l'électrification est justifiée au point de vue économique.

**Conclusion.** — En ce qui concerne le choix du système à adopter pour la traction électrique sur les grandes lignes des réseaux français, le Comité d'études pour l'électrification des réseaux des chemins de fer d'intérêt général, après avoir pris connaissance de l'avis des réseaux intéressés et de l'étude faite par l'Office Central, présenta au Conseil supérieur des Travaux Publics le projet d'avis suivant :

« Il y a lieu d'adopter pour l'électrification des réseaux d'intérêt général français la traction par courant continu à la tension de 1.500 volts, les locomotives étant munies de deux dispositifs de prise de courant par troisième rail et par ligne aérienne. La tension de 3.000 volts en un ou deux points sera exceptionnellement admise pour quelques lignes présentant des conditions particulières d'installation ou d'exploitation, ou sur des points spéciaux. »

Les conclusions du Comité d'électrification des chemins de fer ont été sanctionnées par une décision ministérielle en date du 29 Août 1920.



SIXIÈME PARTIE

**COMPARAISON ENTRE L'ÉLECTRIFICATION DES LIGNES  
DES RÉSEAUX FRANÇAIS ET L'ÉLECTRIFICATION  
DE LA LIGNE DU CHICAGO-MILWAUKEE-SAINT-PAUL**

Il est possible maintenant d'expliquer pourquoi les Ingénieurs Américains ont préconisé la tension de 3.000 volts pour l'électrification de la ligne du Chicago-Milwaukee-St-Paul et pourquoi ces mêmes Ingénieurs conseillent la tension de 1.500 volts pour l'électrification des lignes des réseaux français.

Sur la ligne américaine, à voie unique, le trafic quoique important, dépassant 5.000.000 de tonnes par kilomètre et par an, ne nécessite qu'un petit nombre de trains journaliers, 9 environ, dont trois de voyageurs, dans chaque sens.

Dans ces conditions, les trains peuvent être très éloignés les uns des autres et, bien que l'espacement moyen entre deux sous-stations consécutives soit environ de 40 kilomètres, il est facile d'établir un graphique d'exploitation de façon à ce qu'il n'y ait jamais qu'un train exigeant de l'énergie dans une section comprise entre deux sous-stations.

Ces trains, peu nombreux, sont naturellement de très fort tonnage ; ils peuvent être réalisés en Amérique grâce aux efforts de traction très élevés permis par les attelages américains.

Il résulte de ce qui précède, que l'adoption d'une tension inférieure à 3.000 volts aurait conduit à un rapprochement des sous-stations sans réduction appréciable de leur puissance individuelle, car ce rapprochement ne diminuerait pas le nombre des trains à prévoir entre deux sous-stations consécutives : les dépenses d'installation relatives aux sous-stations seraient alors plus élevées.

Cette augmentation du nombre de sous-stations, sans diminution correspondante de leur puissance, aurait, en outre, l'inconvénient d'abaisser considérablement le coefficient d'exploitation de chacune d'elles, ce qui atténuerait en grande partie les économies d'énergie qui résulteraient de l'emploi d'appareils à meilleur rendement. Il faut d'ailleurs remarquer que la fourniture de l'énergie à la ligne américaine est faite à des conditions exceptionnelles de bon marché, car le kilowatt-heure revient à environ 0 fr. 025 aux points de livraison ; la question rendement présente ainsi moins d'intérêt qu'en France. Ce bas prix de l'énergie n'est d'ailleurs consenti qu'à la condition que la consommation mensuelle d'énergie représente une utilisation minimum de 60 % de la puissance mise à la disposition, condition à laquelle le chemin de fer ne peut satisfaire que par une répartition de trains judicieusement établie et contrôlée par un système dispatcher très perfectionné.

En France, ainsi qu'il a été exposé dans cette note, les conditions sont très différentes.

Pour un trafic analogue à celui de la ligne américaine, dont il vient d'être question, les trains seraient plus nombreux, parce qu'ils seraient d'un tonnage beaucoup plus réduit en raison de la résistance limitée des attelages ; les horaires des trains de voyageurs, déterminés le plus souvent, par des conditions locales ou autres, occasionneraient des heures inégalement chargées dans le service, dont il faudrait tenir compte pour la détermination des feeders et des sous-stations.

La valeur du rendement de l'installation prend aussi de l'importance en raison du prix plus élevé de l'énergie.

Les conditions étant ainsi nettement différentes, il n'est pas surprenant que les résultats obtenus, au cours de l'étude de l'électrification des lignes françaises à forts et à moyens trafics, aient conduit à préconiser une tension inférieure à celle utilisée sur la ligne de Chicago-Milwaukee-St-Paul.