

Alfred Loebell 2

Just

IX^e CONGRÈS INTERNATIONAL DE NAVIGATION
DUSSELDORF — 1902

1^{re} Section.

2^{me} Communication.

TRACTION ÉLECTRIQUE DES BATEAUX.

DÉTERMINATION

DES

efforts de démarrage et de traction

PAR

Léon GERARD,

Ingénieur, Président de la Société Belge d'Electriciens,
Administrateur-délégué de la Compagnie Générale de Traction Electrique
sur les Voies Navigables, à Oisquerq (Belgique).

✕

BRUXELLES

IMPRIMERIE VANBUGGENHOUDT

—
1902.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



III-307115

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316144

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316144

300 75-107/2018



III-307115

III. 17/85



PERFECTIONNEMENTS APPORTÉS A LA TRACTION MECANIQUE
DES BATEAUX SUR LES CANAUX

TRACTION ÉLECTRIQUE DES BATEAUX

Détermination des efforts de démarrage et de traction

PAR

Léon GERARD

Dans le rapport que j'ai présenté à la 2^e section du Congrès de Navigation de Paris en 1900, j'ai examiné comparativement les divers systèmes de halage électrique, expérimentés en Allemagne, en France et en Belgique, et résumé les données numériques expérimentales que j'avais pu réunir par mes expériences personnelles sur la traction, par tracteur sur berge et par remorqueur à hélice, alimentés par une ligne aérienne triphasée ou autre.

Au point de vue de la traction des bateaux, je concluais que cette question n'admettait pas de solution absolue et invariable et entraînait des solutions différentes suivant les conditions locales du problème envisagé.

D'autre part, j'attirais l'attention du Congrès sur les conséquences avantageuses d'ordre général à résulter de l'établissement de réseaux électriques de distribution d'énergie communs au service des canaux et aux services industriels, agricoles et domestiques des régions traversées.

Le but de cette notice est de résumer très brièvement les résultats de l'expérience que j'ai dirigée en Belgique depuis décembre 1898. C'est un exposé de résultats expérimentaux acquis par près de trois années de service sur une exploitation électrique de 20 kilomètres de canal.

A. — Au point de vue de la traction sur berge, les dépenses d'exploitation à résulter de l'entretien de la route, de l'entretien du matériel et du surcroît de dépenses de force, provenant de l'imperfection de la surface de roulement d'un chemin empierré, condam-

ment absolument, à mon sens, la traction sur berge dans le cas de berges étroites, telles que celles du canal de Charleroi.

B. — Le problème de la traction des bateaux à l'aide de locomotives légères roulant sur deux rails lisses est soluble techniquement et économiquement à l'aide des appareils expérimentés sur le canal et décrits plus loin.

Contrairement à l'opinion que M. l'ingénieur en chef Galliot et moi-même avons émise en 1898 au sujet de la nécessité, en cas d'emploi de rails lisses, de l'emploi de locomotives lourdes pour obtenir le démarrage et sur les inconvénients à en résulter, j'ai été amené par des expériences répétées à pouvoir démontrer que le démarrage pratiqué dans des conditions bien déterminées, n'exigeait, même sur rails lisses, que des poids beaucoup moindres que ceux envisagés d'après les données classiques. Je suis donc amené à conclure que l'emploi de la crémaillère préconisée par M. l'ingénieur Köttgen, dans les essais de Finow, n'est pas utile. Je pense que ses propres expériences postérieures à 1900 sont concordantes sur ce point avec les miennes.

C. — Le remorquage par bateaux à hélice a donné de bons résultats pratiques, a fourni un service régulier et satisfaisant. Son application est à envisager dans le cas d'un trafic sur canaux encombrés et de trajet sinueux.

En vue de réduire la dépense de force motrice et d'augmenter le rendement électrique de la ligne, le remorquage par toueurs agissant sur câble ou sur chaîne (un pour chaque direction) fournit les meilleurs résultats au point de vue du rendement, lorsque le tracé du canal est suffisamment rectiligne.

D. — Le développement économique des réseaux de distribution de force motrice et d'éclairage aux contrées industrielles et agricoles traversées par un canal desservi par l'électricité pour la traction, a été considérable. L'expérience démontre que l'économie de production du courant résultant du coefficient d'exploitation de la centrale a retenti favorablement sur le prix de revient et partant sur le prix de vente du courant à livrer à cette clientèle et au service de la traction. Les services d'ordre général rendus par cet établissement sont notables. Il a permis de desservir des localités et des industries qui, par elles-mêmes, n'auraient pu se procurer, à moins de circonstances spéciales, l'énergie électrique utile à leur développement économique. Nous exposerons successivement les motifs de ces conclusions en donnant un développement spécial au second point.

PREMIÈRE PARTIE

A. — Traction sur berge.

Dans l'exploitation envisagée, celle de 20 kilomètres s'étendant de Virginal à Ruysbroeck, du canal de Charleroi à Bruxelles, la berge disponible pour la traction a de 2^m50 à 3^m50, dont 0^m80 sont occupés par une partie pavée, bordée d'une part d'une bande de terre de 0^m50 et de l'autre d'un chemin de terres non tassées ou rechargées par les produits du dragage du canal et de largeur variable.

C'est sur cette berge que la traction électrique, par l'appareil dénommé « Cheval électrique », fut établie conformément au cahier des charges n° 119, dressé le 6 octobre par le service spécial des canaux houillers, ingénieur M. Chenu, proposé par l'ingénieur en chef directeur Genard sous la date du 17 octobre 1898, et approuvé par décision ministérielle du 4 novembre 1898.

Les prescriptions formelles de ce cahier des charges stipulaient l'emploi de l'appareil dénommé « Cheval électrique » expérimenté en France depuis deux ans ; le cahier des charges belge reproduisait presque toutes les dispositions du cahier des charges primitif français. Disons en passant que ces stipulations françaises furent depuis profondément modifiées en ce qui concerne les clauses et conditions relatives à la création et à l'entretien des chemins et routes empierrés sur lesquels devaient rouler les tracteurs.

L'application réalisée en Belgique en conformité des stipulations administratives préindiquées fut envisagée comme faisant partie d'un ensemble formant un grand réseau de distribution d'énergie électrique, dans une région très industrielle, où la vente du courant à la petite industrie et celle de la lumière aux habitants paraissait devoir prendre de l'extension. Les réseaux desservis en courant polyphasé, 6000 volts, 40 périodes, permirent de ne faire qu'une centrale unique pour la partie du canal à petite section, soit 47 kilomètres. Ce courant est réduit à 600 volts pour le service des tracteurs alimentés directement à courants alternatifs.

Ces appareils très robustes sont représentés dans leur ensemble par la figure 1. Ils puisent par trois trolleys cavaliers le courant

à la ligne secondaire. Celle-ci reçoit l'énergie des postes de transformation espacés de 3 à 5 kilomètres, alimentés par les génératrices de la centrale sous 6000 volts, 40 périodes.



FIG. 1. — Tracteur polyphasé (modèle à adhérence sur berges).

L'ensemble des circuits est complètement isolé, sans aucun retour par la terre, en raison de la proximité immédiate des lignes télégraphiques et téléphoniques du réseau national et international. (Voir fig. 2, cartes.)

Les mécomptes de début éprouvés dans les installations françaises à la Deule portaient sur la production du courant continu

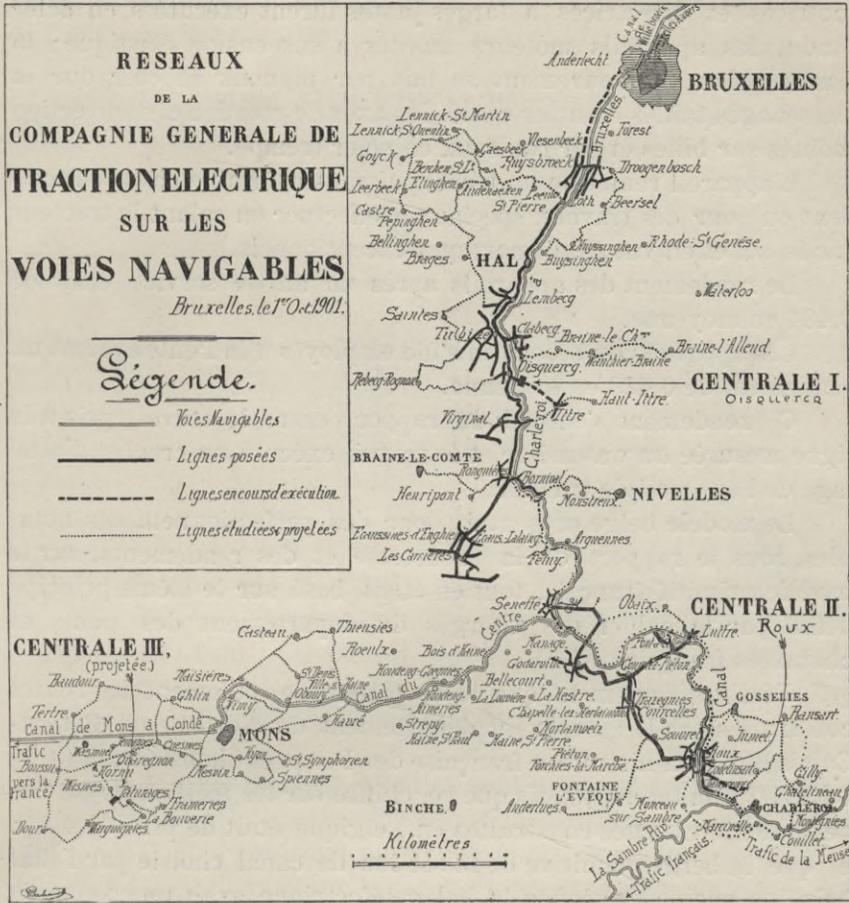


FIG. 2. — Carte des réseaux polyphasés en Belgique.

dans des usines disséminées, ne comportant que des unités de 30 à 40 chevaux, sur la faiblesse des roues de tracteurs dont les jantes garnies de cordes et les rais mêmes ne résistaient pas au service, enfin sur l'emploi de vis tangentes dont l'usure rapide et les imperfections d'exécution diminuaient les rendements mécaniques dans une mesure sérieuse.

Tenant compte de ces faits, j'établis le système en Belgique en centralisant la production dans une usine centrale comprenant des unités de 125 chevaux, avec génératrices à haute tension et en faisant profiter le service de traction du canal de l'économie du prix de revient de l'énergie électrique produite en quantité, en vue d'autres consommateurs.

Les appareils de traction furent renforcés (voir fig. 6), les roues

motrices et directrices à larges jantes furent exécutées en acier fondu, les appareils moteurs montés à suspension élastique; la transmission de mouvement se fait par pignons en cuir dur et engrenages taillés en acier coulé, les axes de rotation et de direction montés sur billes et sur rouleaux en acier trempé.

L'appareil renferme un treuil puissant utilisable en cas d'accident ou pour des travaux spéciaux à effectuer en calant le tracteur sur le sol et en vue de démarrages exceptionnels.

Le rendement des appareils après un an de service était de 0,484 en moyenne.

Les appareils du second modèle employés à la Deûle avaient un rendement de 0,423 en moyenne.

Ce rendement s'entend du rapport entre le travail pris à la ligne mesurée au wattmètre et le travail exécuté au crochet d'attelage de l'appareil de traction.

Le modèle belge présentait donc des perfectionnements notables, sous le rapport de la robustesse et des rendements, sur le modèle primitif français, tout en étant basé sur le même principe défini par le cahier des charges du département des ponts et chaussées français.

J'établis également que le coefficient de roulement des routes construites par le service du département du Nord et du Pas-de-Calais de l'administration française des Ponts et Chaussées, était de 3 kil. 1/2 à la tonne, tandis que ce chiffre sur les meilleures parties de routes sur berges construites en Belgique était de près de 4 kil. et que la berge primitive de la section de canal choisie par l'Etat belge en vue de pratiquer le halage électrique avait un coefficient de roulement de 7 kil. 1/2 à la tonne.

Il en résulte que même en utilisant les moyens de transmission électriques les plus perfectionnés et des moyens mécaniques de traction ayant le meilleur rendement et d'une exécution mécanique soignée et robuste, l'état des chemins entraînait en Belgique un excès de consommation d'énergie d'au moins 35 p. c. au dessus des chiffres normaux.

A ces conditions défavorables à la traction sur berge s'ajoutait l'étroitesse du chemin disponible obligeant les appareils à repasser sur les mêmes traces et aggravant par conséquent les chances de déformation de la plate-forme.

L'influence de l'état des routes est rendue sensible par l'examen du tableau statistique ci-dessous, renseignant la consommation en kilowatts-heures de la ligne de traction au regard de la circulation figurée en bateaux-kilomètres, mois par mois, durant l'année 1901.

On verra clairement que le coefficient de consommation est

variable d'après la saison, ou plutôt d'après l'état de la surface de roulement des chemins.

TABLEAU STATISTIQUE DU HALAGE EN 1901

M O I S	Nombre de bateaux-kilomètres remorqués électriquement	Nombre de kilowatts-heures efficaces au tableau de l'usine	Nombre de kilowatts par bateau-kilomètre
1901			
Janvier	11223	33914	3,022
Février	10442	25918	2,482
Mars	15187	46197	3,041
Avril	17028	43120	2,532
Mai	21086	52899	2,508
Juin	21099	49586	2,350
Juillet	20920	50518	2,415
Août	20157	50113	2,486
Septembre	19752	45098	2,283
Octobre	18429	41351	2,243
Novembre	16779	42053	2,506
Décembre	13726	36862	2,685
Pour l'année 1901.	205828	517629	2,515

Nota. — Fortes gelées en février, sol dur.

Les moyennes de consommation sont prises en général, c'est-à-dire en divisant le nombre de KWH mensuellement produits au tableau de l'usine génératrice, par le nombre de bateaux-kilomètres effectués dans ce temps sur le parcours desservi électriquement. La variation de consommation motivée par l'état de la surface de roulement serait plus accentuée encore, si l'on avait pu distraire des kilowatts totaux la consommation faite sur deux kilomètres, desservis habituellement par remorqueurs électriques.

Sur le canal de Charleroi à petite section la dépense d'énergie effectuée en pleine marche par le tracteur modèle belge remorquant sur berge un bateau de 70 tonnes à la vitesse de 1^m13 par seconde est de 4850 watts sur bon terrain. (KW pris à la ligne mesurée aux tracteurs.)

Nous verrons plus loin que le même appareil placé sur rails ne dépense dans les mêmes conditions de vitesse et d'effort que 4000 watts.

Le rendement net du premier appareil est donc de 0,48, le rendement net du second appareil est de 0,585.

D'autre part, le travail à vide est pour le premier appareil de 4100 watts ; il n'est que de 2000 watts pour l'appareil sur rails.

L'économie de courant est donc considérable. Cette économie est variable d'après l'importance des parcours à vide par rapport aux parcours à charge, mais elle peut être fixée à 20 p. c. en moyenne du total.

— Sous le rapport de la dépense de courant et par répercussion sous le rapport du capital à immobiliser à l'usine centrale pour les machines génératrices, le système sur rails a donc des avantages marqués sur la traction sur berge. Le rapport du nombre des KWH dépensés à l'usine au nombre de bateaux-kilomètres a été en 1901 de $2^{\text{k}}515$.

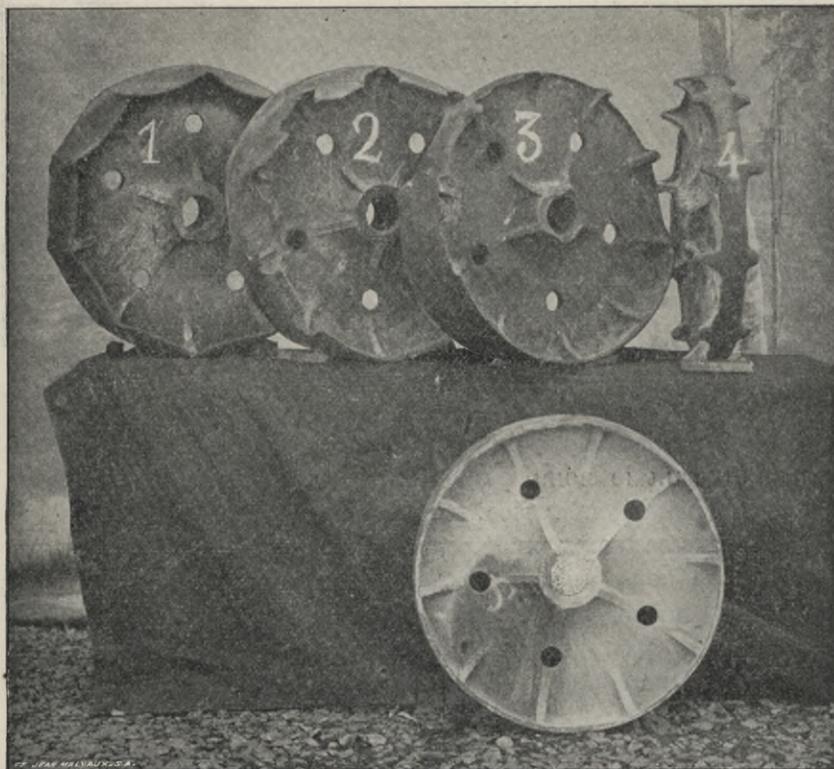


FIG. 3. — Profils d'usure des roues de tracteur sur berge.

En admettant le service établi sur 47 kilomètres, la dépense en kilowatts du premier système serait de 1240000 KWH pour un service de 493720 bateaux-kilomètres. Dans les mêmes conditions la traction sur rails conduirait à une consommation de 991000 KWH.

L'économie annuelle à résulter du chef de la consommation serait donc à raison de 9 centimes par KWH, prix correspondant

au prix actuel du charbon rendu à la chaufferie, soit 15 fr. la tonne, de fr. 22410,00 par an pour le trafic préindiqué. Soit par kilomètre et par an : fr. 476,80. Quant à la puissance d'usine utilisée, elle serait dans le premier cas de 270 KW et dans le second cas de 220 KW, ce qui correspond à une économie de premier établissement de 40000 fr., représentant un intérêt et amortissement de 2488 fr. par an à raison de 800 fr. par KW de puissance d'usine, soit par kilomètre une somme de fr. 52,93 environ (comptée à 6,22 p. c.).

Les dépenses d'entretien de la surface de roulement empierrée à l'aide d'un mélange de gravier de Quenast et de cailloux calcaires, broyés et roulés, se sont élevées dans l'année 1901 à la somme de 15275 fr. pour la main d'œuvre, et à fr. 18979,33 pour la fourniture de la pierre, soit ensemble une dépense de fr. 34254,42.

Il résulte de ce chef une dépense de fr. 1903,02 par kilomètre et par an, la longueur exploitée par traction sur berge étant de 18 kilomètres.

Quant à l'entretien du matériel, les photographies fig. 3 et 4 rendront compte de sa difficulté. La figure 3 représente les profils d'usure ordinaire des roues : la roue n° 1 représente la déformation survenant en général au bout d'un an de service. Elle va en s'accroissant et par les stades représentés en 2 et 3 arriverait à l'état extrême figuré en 4. Les roues sont coulées en acier Martin.

Les usures figurées dans cette planche correspondent approximativement à des parcours en kilomètres de 10000 pour la roue 1, et de 18000 pour la roue 4.

Les pignons en cuir dur résistent à des parcours de 600 à 900 kilomètres. Les engrenages qu'ils commandent ne subissent pas d'usure appréciable.

Les transmissions par chaîne Galle entraînent le remplacement de la chaîne en moyenne au bout d'un parcours de 5000 kilomètres.

L'entretien des moteurs polyphasés à 600 volts, enroulement Eckmeyer, ne présente pas de dépenses appréciables, à moins de chute ou immersion accidentelle dans le canal.

Cette dernière avarie représente la valeur de la réfection du bobinage de 3 p. c. des moteurs en service.

Il résulte de cet exposé que la dépense d'entretien du matériel a été pendant l'année 1901, pour la main-d'œuvre à

l'atelier	fr. 3552,00
" " sur digue.	" 6601,60
les matières premières.	" 2347,00
soit au total.	fr. 12500,60

ce qui représente pour 18 kilomètres exploités par ce système une dépense kilométrique annuelle de fr. 694,46.

La pratique des réparations d'entretien des tramways permet d'affirmer que le même matériel travaillant sur une voie lisse bien posée n'aurait entraîné qu'une dépense atteignant à peine 30 p. c. de ce chiffre. Le système de traction sur berge implique donc un surcroît de dépense d'exploitation du chef d'entretien du matériel de fr. 486,12 par kilomètre et par an en admettant les données pratiques habituelles en tramways.



FIG. 4. — Tracteur sur berge avec roues usées.

En résumé l'économie à porter à l'actif du système à rail lisse comparé au système sur berge se chiffre, par kilom. et par an, par :	
Différence de consommation d'électricité	fr. 476,80
Entretien de la route	» 1903,02
Différence sur entretien du matériel	» 486,12
6,22 p. c. sur la différence de capital immobilisé à l'usine	» 52,93
soit au total.	fr. 2918,87
dont il y a lieu de déduire l'entretien de la voie	
4 p. c. de 8000 francs par kilomètre et par an	fr. 320,00
soit donc une différence de.	fr. 2598,87

Ces chiffres basés sur l'expérience acquise après environ 3 ans de pratique du cheval électrique sur le canal de Charleroi démontrent que ce système ne saurait être préconisé qu'à la condition expresse de disposer de routes larges parfaitement construites, roulées et macadamisées comme le sont les routes françaises, et coûtant par conséquent beaucoup plus cher qu'une voie de rails légers suffisants pour porter des appareils mécaniques de 2000 à 3000 kilogrammes.

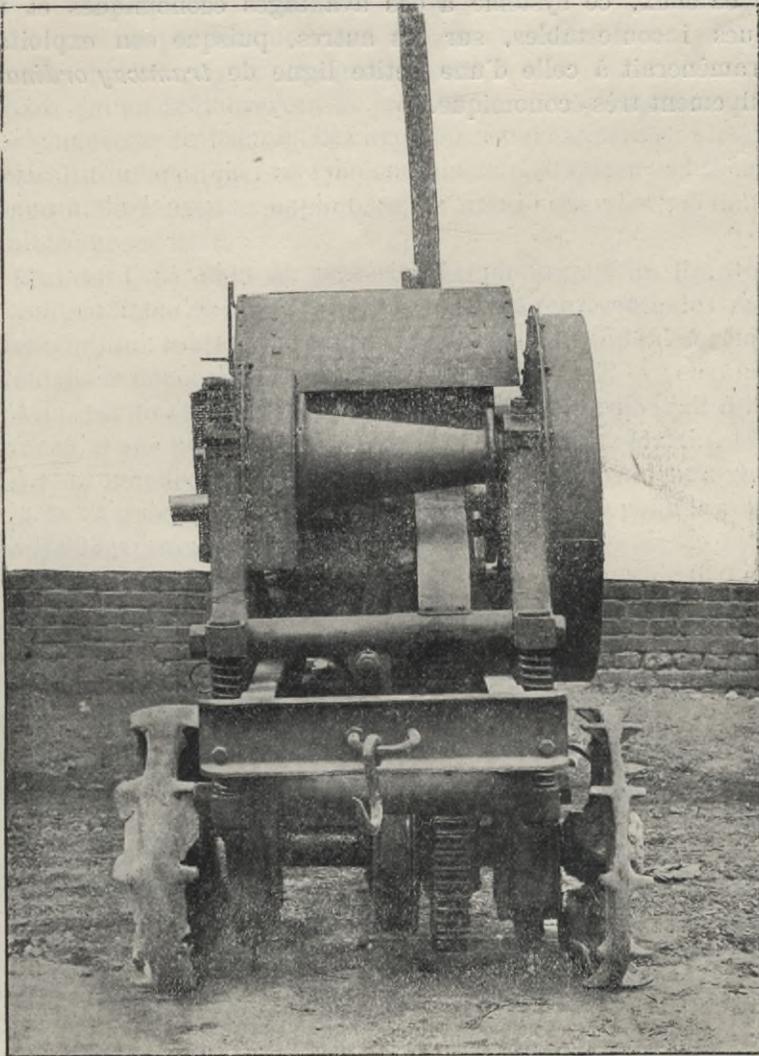


FIG. 4bis. — Tracteur sur berge avec roues usées. (Vu de derrière.)

Ils démontrent aussi que le système essayé en 1898 et 1899 sur le Finow Canal (2 roues sur une file de rails et 2 roues plates roulant sur le sol avec une crémaillère) entraînerait la formation d'une ornière sous les roues plates portant toujours à la même place et que toutes les conséquences fâcheuses de la traction sur berge s'y rencontreraient avec l'inconvénient additionnel d'une dépense considérable de premier établissement, nécessitée par le rail unique et sa crémaillère. Ils démontrent enfin que, comme la traction ordinaire sur rail lisse se prête au problème de la traction des bateaux, ce système a des avantages économiques et techniques incontestables, sur les autres, puisque son exploitation se ramènerait à celle d'une petite ligne de *tramway ordinaire* à équipement très économique.

DEUXIÈME PARTIE

B. — Traction sur rails lisses

La traction par locomotives à vapeur sur rails lisses, appliquée au halage des bateaux, a pour inventeur M. le baron Floris van Loo, de Gand, qui en 1872 breveta le premier procédé mécanique appliqué à l'industrie du halage. Les expériences qui servirent à établir la possibilité d'appliquer ce système, furent pratiquées sur le canal de Gand à Terneuzen et appliquées au halage des navires de mer et d'intérieur en 1871.

Plus tard, de 1873 à 1878, Larmanjat établit en France un système analogue de halage, reproduisant toutes les dispositions de l'inventeur, sur le canal de Bourgogne et ensuite sur le canal de la Deûle dans le département du Nord.

Au point de vue économique, l'emploi d'une locomotive de 10 à 15 tonnes, d'une puissance trop grande, rendait nécessaire le groupement de nombreux bateaux pour former un train suffisant. A défaut de ce groupement, l'unité de traction dont on disposait avait un rendement mécanique très faible lorsqu'il s'agissait de remorquer seulement deux, ou un seul bateau.

Pendant la période de concurrence aiguë des Compagnies de chemins de fer et des canaux, l'essai de Larmanjat prit fin par suite de diverses circonstances dont les principales étaient étrangères, du reste, aux conditions techniques de cette conception.

Lorsque les progrès dans l'application de l'électricité à la traction, et surtout dans la construction pratique d'électromoteurs de force réduite, permirent de réaliser des appareils de traction de petite puissance appliqués au remorquage de quelques bateaux de 60 à 300 tonnes, les inventeurs de la traction sur berge, M. le docteur Henry, M. Galliot, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Dijon, M. A. Denèfle, de Paris, etc., purent réaliser un programme répondant logiquement en apparence aux conditions du problème, et dont les caractéristiques étaient :

- 1) Petite puissance des appareils (5 à 10 chevaux environ);
- 2) Frais d'établissement réduits. — Le prix kilométrique de l'installation ne comportant que les frais d'une usine, d'une ligne

aérienne et d'appareils de traction, à l'exclusion d'une voie, par suite de l'emploi de la digue comme surface de roulement ;

3) Grande puissance de démarrage d'un appareil de poids réduit. — 25 p. c. du poids portant sur l'essieu moteur pouvaient être utilement appliqués à l'effort de démarrage, par suite de l'adhérence des roues sur le gravier du chemin.

Dès 1895, les essais du canal de Bourgogne (Galliot) ; en 1897, les installations effectuées au canal de la Deûle, et en 1899, les installations du canal de Charleroi à Bruxelles (Léon Gerard), permirent de se rendre compte exactement de la réalité et de la portée pratique des avantages théoriques prêtés au système.

L'exposé qui précède explique qu'à mon opinion personnelle formée expérimentalement, et contrairement à mes propres prévisions et à celles de la plupart de ceux qui se sont occupés de la question, la traction sur berge, dans les conditions indiquées par l'administration des canaux houillers belges, n'a pas répondu, dans son application au canal de Charleroi, aux espérances de ses inventeurs.

Les inconvénients constatés, et du reste correctibles, résultent de la nature de la surface de roulement.

*C^e G^e de Traction Electrique sur les Voies Navigables.
Canal de Bruxelles à Charleroi.*

— Profil d'envasement
- - - Profil normal théorique
Echelle : 1:50

** Profil à 200 mètres en amont du pont d'Argenteuf — Révisé en Juin 1902*

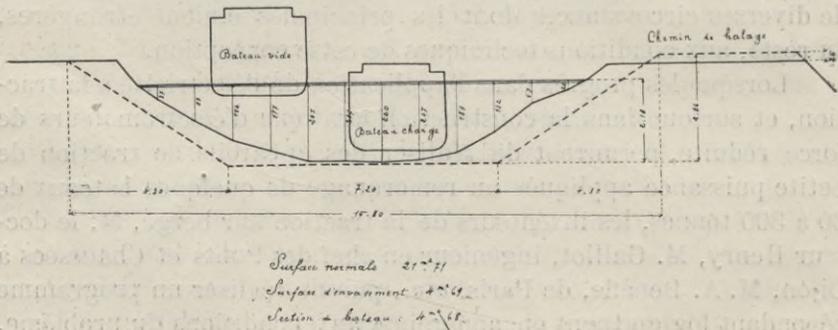


FIG. 5. — Profil du canal de Charleroi à Bruxelles.

La conclusion logique de l'expérience faite conduisait donc à l'adoption d'une voie birail, mais l'opinion classique de la valeur

des efforts de démarrage, que l'on fixait arbitrairement à 800 kilogrammes au moins pour un canal du type du canal étudié, empêchait d'envisager l'emploi d'appareils de traction devant peser de 5400 à 8000 kilogrammes, puisque l'adhérence sur rails n'est guère que de 10 à 15 p. c. du poids moteur.

C'est pour vérifier l'exactitude de ce chiffre fondamental que je réalisai des expériences destinées à préciser en chiffres les travaux réels à effectuer pour le démarrage et aussi pour la traction en marche normale de barques à fond plat et avant non effilé, de 70 tonnes, sur un canal de 21,72 mètres carrés de section théorique. La section réelle du canal au point où les expériences ont été réalisées est de 17 mètres carrés en moyenne (voir fig. 5). La section du maître-bau du bateau chargé est de 4,68 mètres carrés. Ces expériences ont été faites à l'aide d'un tracteur ayant les mêmes dispositions mécaniques que le tracteur sur berge, sauf en ce qui concerne les roues à jantes plates en acier qui ont été remplacées par des roues légères en acier trempé dur Griffin, roues à bourrelets type tramway roulant sur rails Vignole de 9 kilogrammes. La voie a un écartement de 0^m92 (fig. 6).

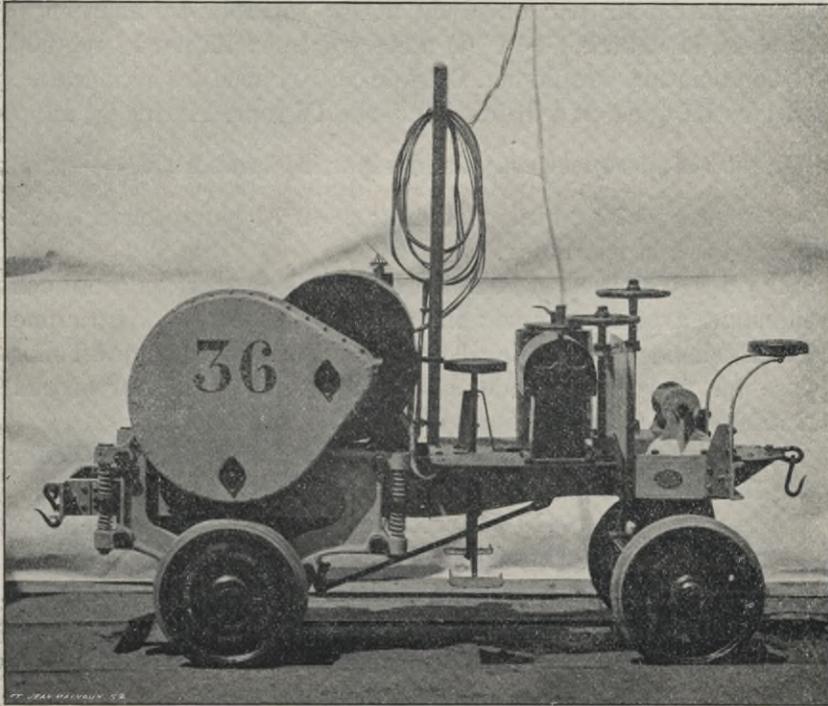


FIG. 6. — Tracteur polyphasé (modèle à adhérence sur rails lisses).

Détermination des efforts de traction

La difficulté de la lecture exacte des dynamomètres de traction et l'incertitude de ces lectures par suite de l'obliquité du câble de traction par rapport à l'axe du chemin parcouru et des battements du câble, nous a fait adopter le méthode de l'observation de la loi du ralentissement d'un bateau lancé d'abord à une vitesse initiale constante, puis abandonné à lui-même. L'étude du mouvement varié résultant de la variation des décroissements des vitesses nous a donné, en opérant un nombre suffisant d'expériences, des chiffres moyens qui ont servi de base pour l'étude des efforts nécessaires pour réaliser des vitesses de 0 à 7 kilomètres à l'heure.

Les diagrammes (fig.7) ne mentionnent que les résultats relatifs aux vitesses de 0 à 4,2 kilomètres, vitesse adoptée par le cahier des charges actuel comme vitesse maxima dans le canal considéré.

La courbe I représente les espaces parcourus en fonction du temps, soit $e = f(t)$; e en mètres et t en secondes. Elle a servi à construire la courbe II des vitesses $V = f'(t)$; or, Υ représentant l'effort retardateur par unité de masse variable en fonction de la vitesse, la courbe $\Upsilon = f''(t)$ a été tracée en III par la méthode de différenciation graphique. C'est de cette courbe des accélérations négatives III que l'on a déduit la courbe IV représentant les efforts

de traction F , lesquels sont donnés par la formule : $F = \frac{P}{g} \times \Upsilon$;

$P = 70$ tonnes = 70000 kilogrammes; $g = 9^m81$ par seconde = accélération due à la pesanteur.

Il y a lieu d'observer combien les efforts de traction diminuent rapidement avec la vitesse : en supposant les divers diagrammes tracés à échelle convenable, il est facile de contrôler que l'effort opposé en marche normale à la vitesse de 1^m17 par seconde (4,2 kilomètres à l'heure) étant de 147 kilogrammes :

A la vitesse de 0,83 par seconde (3 kilomètres à l'heure) l'effort est de 75 kilogrammes ;

A la vitesse de 0,415 par seconde (1 1/2 kilomètre à l'heure) l'effort est de 21 kilogrammes.

A partir de ce point la décroissance des efforts est très faible.

La courbe des efforts de traction pour le canal considéré a par conséquent trois points d'inflexion caractérisés, déterminant trois régimes, à savoir : de la vitesse 0 à 1 1/2 kilomètre, de 1 1/2 kilomètre à 3 k. et de 3 à 4 kilomètres. Dans la première période aucun remous de l'eau, ni aucun soulèvement du bateau ne sont observés ;

Canal de Bruxelles à Charleroy

Diagramme des Efforts de Traction

Bateaux de 70 tonnes

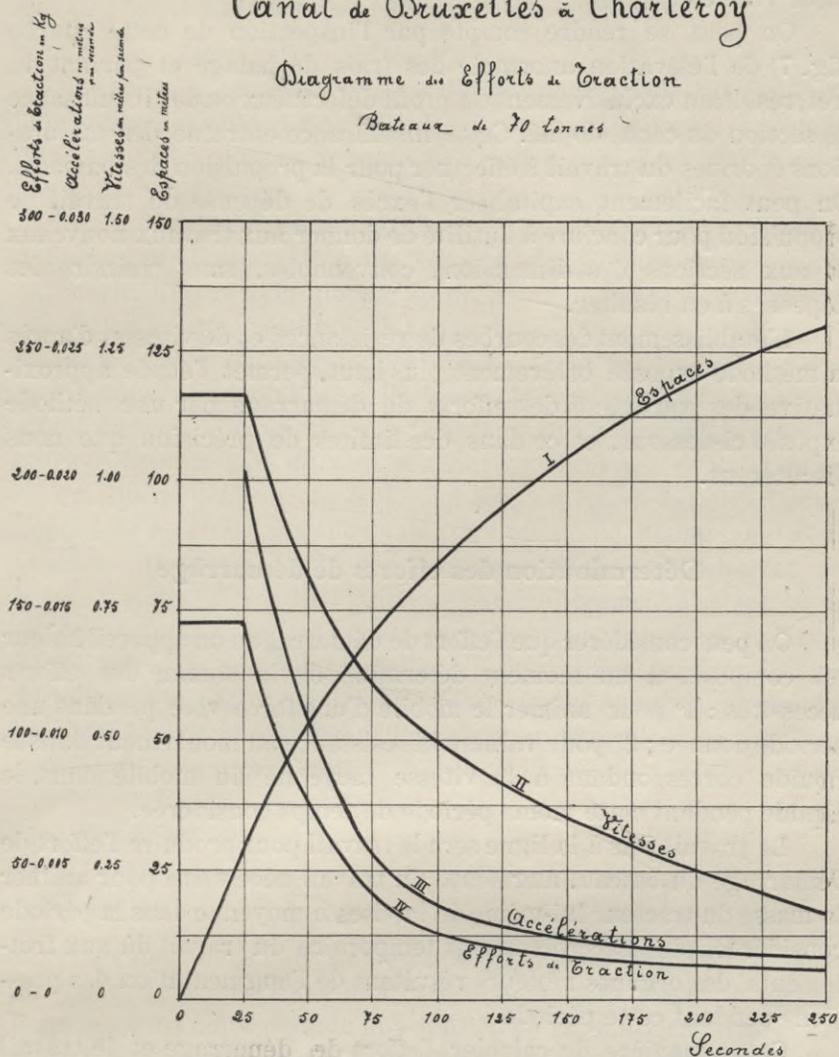


Fig. 7. — Diagrammes des espaces parcourus, des vitesses, accélérations et efforts de traction en fonction du temps. (Canal de Charleroi.)

dans la seconde, un courant d'eau s'établit entre les bords du canal et le bateau dans un sens inverse du mouvement de celui-ci; dans la troisième période un remous se produit en avant du bateau, une dénivellation marquée de la surface du liquide s'observe au droit de la proue, tandis qu'une surélévation des deux nappes latérales et un léger plongement à l'arrière du bateau se manifestent.

Ces observations concordent avec celles de M. l'ingénieur Haack

sur le canal de Dortmund à l'Ems et aussi avec celles de M. l'ingénieur Thiele (1).

On peut se rendre compte par l'inspection de cette courbe (fig. 7) de l'élévation anormale des frais de halage et partant du fret, résultant exclusivement du profil défectueux ou de l'insuffisance de section du canal donné. Cette insuffisance entraîne des majorations énormes du travail à effectuer pour la propulsion des bateaux. On peut facilement capitaliser l'excès de dépense du travail de propulsion pour conclure à l'utilité de donner aux travaux nouveaux et aux sections des dimensions convenables, sans craindre les dépenses à en résulter.

L'établissement des courbes de résistances et de vitesses d'après la méthode exposée brièvement plus haut, permet l'étude approximative des variations des efforts de démarrage par une méthode exposée ci-dessous, et ce dans des limites de précision que nous discuterons.

Détermination des efforts de démarrage

On peut considérer que l'effort de démarrage d'un appareil haleur est composé, à un moment déterminé, de la somme des efforts nécessités : 1^o pour animer le mobile d'une force vive pendant une période donnée ; 2^o pour vaincre la résistance au mouvement dans le liquide correspondant à la vitesse moyenne du mobile dans le liquide pendant cette même période de temps considérée.

Le travail pris à la ligne sera le travail pour produire l'effort de démarrage du bateau, augmenté du travail nécessaire pour animer la masse du tracteur lui-même de la vitesse moyenne dans la période considérée, plus l'accroissement temporaire du travail dû aux frottements des organes moteurs résultant de l'augmentation des pressions pendant cette période.

Cette manière de calculer l'effort de démarrage et le travail correspondant est affectée d'une erreur provenant, ainsi que nous pourrions en juger par l'inspection du diagramme, de ce que la variation de la vitesse en fonction du temps, pendant la période considérée que l'on choisit cependant suffisamment courte, n'est pas représentée exactement par une droite, et de ce que l'effort moyen ne correspond pas rigoureusement à la moyenne des vitesses initiales et finales de la période considérée.

(1) Haack. — *Schiffswiderstand und Schiffsbetrieb*. Asher et Co, Berlin 1900, et *Annales des travaux publics*, tome V, p. 350.

Thiele. — *Centralblatt der Bauverwaltung et Annales des travaux publics*, tome VII p. 715.

Limites de précision de la méthode

La seconde de ces erreurs est d'ordre négligeable par rapport à la première, et celle-ci est de l'ordre des centièmes pour des périodes de temps de 5 secondes, lorsque les vitesses sont d'environ 1 mètre par seconde au moins.

La méthode de détermination que je viens d'indiquer repose en définitive sur l'observation des espaces et des temps employés à les parcourir. Elle ne vaut que par la précision de ces mesures simultanées et les erreurs résultant des hypothèses faites sont négligeables au regard des erreurs probables d'observation et des erreurs dues aux causes accidentelles, telles que : 1° variations d'intensité et même de sens du courant dans la voie navigable; 2° effets accélérateurs ou retardateurs du vent pendant les lectures. A ce point de vue et à moins de dispositions très soignées, la méthode est difficilement applicable à l'étude des efforts de traction et de démarrage à des vitesses inférieures à 0^m15 par seconde (500 m. à l'heure) et aux bateaux vides. Il y a lieu d'attirer particulièrement l'attention des expérimentateurs sur les causes perturbatrices apportées à l'expérience par une manœuvre malhabile du barreur pendant le lancé du bateau à la période initiale de l'expérience, et sur la nécessité de procéder à un nombre suffisant d'essais pour déterminer des moyennes servant de base aux calculs.

Résultats du calcul des efforts de démarrage

La valeur moyenne pendant une période de temps t de la partie de l'effort de démarrage due à l'accroissement de force vive du système pendant cette période aux limites de laquelle les vitesses sont V_1 et V_2 , vitesses dont la moyenne est V_m , est donnée par la formule : $\frac{M(V_2^2 - V_1^2)}{2} = \frac{F(V_2 - V_1)t}{2}$, expression dans laquelle F exprime en kilogrammes l'effort moyen effectué, et t le temps en secondes.

Pour un moment considéré et à vitesse constante, $Ft = MV$; et approximativement pour une période correspondant à des vitesses variant de V_1 à V_2 , on pourra écrire :

$$F t = m (V_2 - V_1) \text{ soit } Ft = m \Delta v \text{ d'où } F = \frac{m \Delta v}{t} \quad (1)$$

Appelons R_m l'effort moyen nécessaire pour vaincre la résis-

tance du liquide pendant le temps considéré : l'effort total de démarrage D sera $F + R_m$, d'où $D = \frac{m \Delta v}{t} + R_m$ (2)

Diagrammes de démarrage

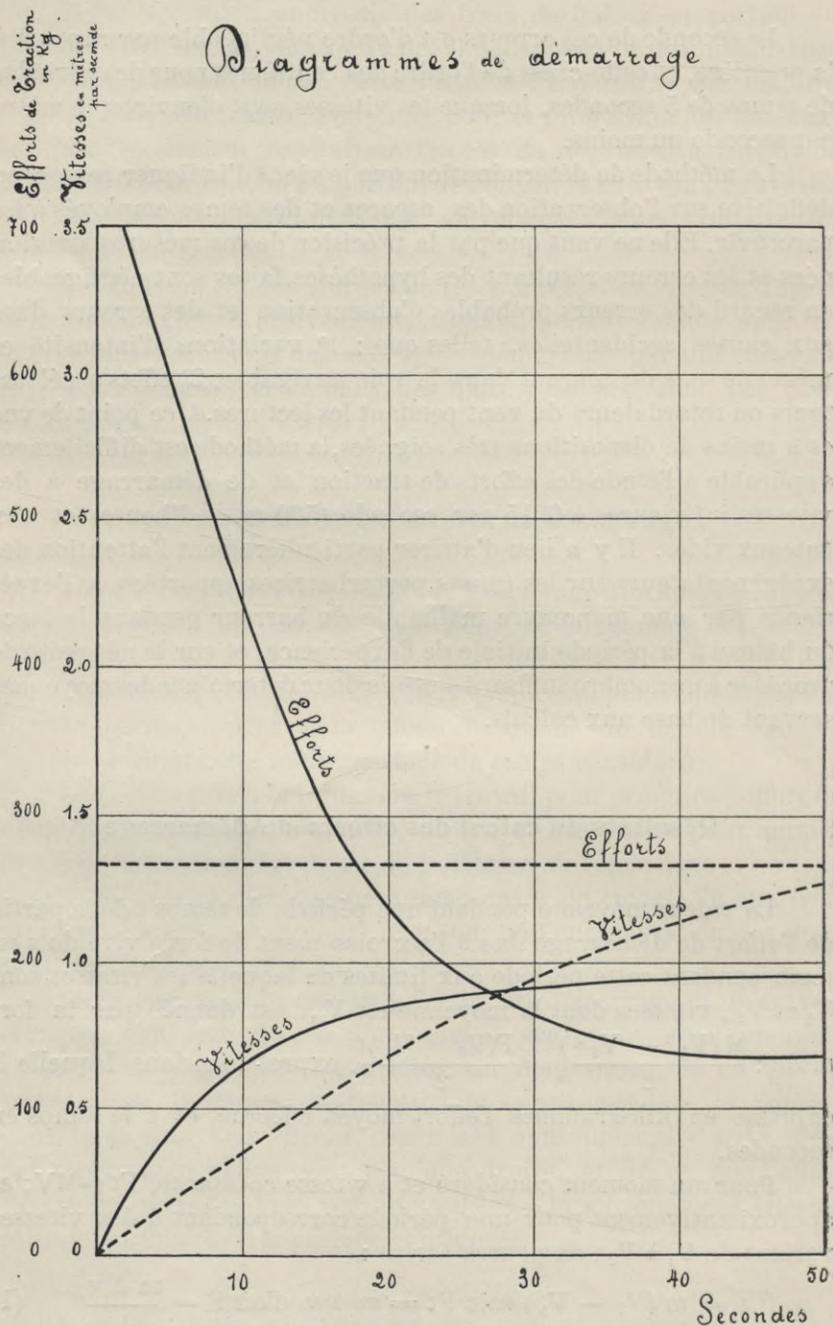


FIG. 8. — Diagrammes des efforts de démarrage et vitesses des bateaux (canal de Charleroi).
A. — (Trait interrompu) sous effort variable.
B. — (Trait continu) sous effort constant.

Cette équation dont les éléments constitutifs sont représentés dans le diagramme fig. 7 permet la solution pratique des deux problèmes suivants relatifs au démarrage :

1. — Déterminer les efforts correspondant à un démarrage conduit par phases de durée et d'intensité arbitraires;
2. — Déterminer les temps à employer pour l'application d'un effort déterminé variable ou constant à volonté, pour faire passer successivement le bateau par des vitesses connues.

Pour résoudre ces deux problèmes il suffit de construire un tableau composé : 1° des vitesses successives V observées (voir diagramme fig. 7); 2° des différences successives $V_1 - V_2$ soit les Δv ; 3° des lectures R_e (courbe IV) des efforts de traction correspondant aux diverses valeurs de V (courbe II); 4° des valeurs moyennes R_m correspondant aux efforts R_e au commencement ou à la fin des périodes de temps envisagées. Ces données sont toutes relevées sur les diagrammes fig. 7.

D'après une courbe de démarrage arbitraire, on peut se proposer (traits pleins du diagramme fig. 8) de trouver les efforts de traction correspondants. A cet effet on écrira : $X = \frac{m \Delta v}{t} + R_m$, t étant une constante que l'on pourra sans grande erreur fixer en pratique à 5 secondes pour le cas envisagé.

Les diagrammes en traits pleins (fig. 8A) se rapportent au cas d'un démarrage ordinaire par tracteur sur berge à grande adhérence et sans rails. Les efforts de traction atteignent au début 625 kilogrammes pour tomber rapidement à 120 kilogrammes. Un tel démarrage correspond à l'idée générale que l'on se fait des efforts nécessaires et inhérents à cette opération. Cette idée est inexacte, ou plutôt elle n'est exacte que si le démarrage est conduit d'une manière non judicieuse.

Si nous admettons que le tracteur ait 1650 kilogrammes de poids utile sur l'essieu moteur, et qu'en raison du caractère spécial du moteur électrique, l'adhérence utile soit 0,16, cet appareil nous permettra de disposer de 264 kilogrammes pour la réaction utile à la traction.

Proposons-nous de déterminer les temps successifs nécessaires pour que l'effort de traction atteigne 264 kilogrammes et reste constant dans ce cas ; nous écrirons en portant dans l'équation (2)

$$R_m \text{ dans le premier membre : } D - R_m = \frac{m \Delta v}{t}$$

$$\text{En prenant } t \text{ comme inconnue : } X = \frac{m \Delta v}{D - R_m} \quad (4)$$

Ce qui dans l'exemple choisi, et pour un bateau de 70 tonnes s'écrira :

$$X = \frac{70000 \times 0,102 \times V}{264 - R_m} \quad (5)$$

La construction par points de la courbe $X = f(v)$ est facile une fois la série des valeurs de X calculée d'après la formule (5).

Les diagrammes en traits discontinus (fig. 8 B) sont relatifs au cas d'un démarrage sur rail, dans lequel l'effort ne dépasse pas 264 kilogrammes.

Les diagrammes en traits pleins sont relatifs au cas d'un démarrage sur berge avec effort variant de 625 à 120 kilogrammes.

Les deux diagrammes correspondent à des démarrages effectués en 50 secondes; ils démontrent théoriquement : 1° la possibilité d'obtenir le démarrage sur rail lisse sans glissement, même sur rail humide, et cela sans dépasser l'effort très normal de 264 kilogrammes à attendre d'un poids d'essieu-moteur de 1650 kilogrammes; 2° l'économie résultant d'une meilleure utilisation du matériel, le système évitant par lui-même la possibilité d'écart dans les efforts momentanés : le patinage éventuel agit en effet comme un moyen de limiter et de régulariser les sollicitations des appareils sur la ligne; 3° la possibilité d'obtenir en 50" une vitesse de marche plus grande même que dans le démarrage sur berge.

Vérifications expérimentales

Les essais faits en 1902 à l'usine d'Oisquercq, sur une voie de 0^m92 d'écartement, ont confirmé de manière complète les considérations théoriques découlant des expériences relatées ci-dessus; en effet, le démarrage des bateaux soumis à l'expérience s'est fait en moyenne en 45 secondes, quoique les conditions des expériences fussent aggravées par l'emploi de câbles et de poulies de renvoi, la voie d'expérience étant à 30 mètres de l'axe de la voie navigable. Malgré ces conditions défavorables du champ d'expériences, celles-ci ont corroboré de manière complète les considérations mathématiques qui précèdent.

Il résulte de ces expériences que les économies et les facilités de service à résulter de l'emploi d'une voie à deux rails lisses sont réalisables, grâce à l'emploi de l'électricité, de la manière la plus simple, et cela en conformité des prévisions émises, dès 1872, par M. le baron Floris van Loo, le véritable promoteur de la traction mécanique des bateaux, à une époque où la locomotive à vapeur ne fournissait qu'un organe trop lourd et trop puissant pour le

travail à effectuer. Au reste, l'on sait que la locomotive à vapeur est inférieure de 40 p. c. à la locomotive électrique sous le rapport de l'utilisation du poids-mort (1).

Au cours des essais expérimentaux, il a été constaté que le lavage à grande eau du rail et du boudin n'entraînait pas le patinage, et que plus de 16 p. c. du poids moteur était disponible pour la réaction motrice. L'emploi du sable a permis de porter régulièrement l'effort initial à plus de 600 kilogrammes sans aucune difficulté, à condition de procéder graduellement et sans à-coup.

Il y a lieu de remarquer, à ce sujet, que les moteurs polyphasés à bagues, avec résistances de démarrage convenablement graduées, se prêtent particulièrement bien et sans échauffement à un démarrage progressif. Ajoutons que la brusquerie du démarrage, brusquerie volontaire ou accidentelle, ne peut que causer des ennuis sérieux résultant du bris des remorques, des avaries de coques et aussi et surtout des pulsations très vives dans le régime de la centrale. A ces points de vue, le démarrage progressif est donc très supérieur au démarrage rapide.

A tous points de vue, économie du courant, économie d'entretien et conditions d'exploitation, la traction sur rails lisses me paraît donc, après des expériences prolongées et personnellement conduites, préférable à la traction sur berge.

(1) Voir « Chemins de fer électriques », Léon Gerard, *Annales des Travaux publics*, t. VII, page 434.

TROISIÈME PARTIE

C. — Remorquage électrique

Les bateaux électriques alimentés par une ligne latérale polyphasée posée sur la digue, représentés dans la fig. 9, font le service du halage sur le canal de Charleroi sur une longueur de 2 à 4 kilomètres dans la traversée de la ville de Hal. Dans certaines saisons, les quais de cette partie du canal sont encombrés des dépôts provenant du déchargement des betteraves et des charbons; de plus, quatre ouvrages d'art dont un pont-canal, rendent le passage des tracteurs sur berge difficile.

Au point de vue pratique ces bateaux ont donné des résultats très favorables. L'absence d'avaries, les facilités de service, la grande mobilité et la maniabilité de ces petites embarcations, qui développent jusqu'à 12 chevaux dans une coque de 0,60 de tirant d'eau, en font des organes de remorquage excellents. Le bateau étant à 25 mètres de l'axe des lignes, les trolleys fonctionnent parfaitement bien en laissant au bateau toute l'aisance d'évolution, sa vitesse pouvant aller ainsi jusque 10 kilomètres à l'heure.

En revanche, l'emploi de l'hélice et d'un train d'engrenages fait tomber le rendement moyen à un chiffre inférieur à 30 p. c. (Voir rapport Congrès de Navigation, Paris 1900, et discussions.)

En discutant la question de l'emploi du remorqueur électrique au point de vue du rendement, je conclusais en 1900 (1) en disant que la préférence à accorder au remorquage par bateaux électriques par rapport à la traction sur berges devait dépendre de la question de savoir si l'entretien de la voie, de la surface de roulement et du matériel, sera par kilomètre et par an de plus ou moins 1000 francs pour un canal exigeant 100 chevaux de force par 10 kilomètres.

Les faits expérimentaux nous ont démontré que la traction sur berge entraînait des frais d'entretien, comme on l'a vu plus haut, bien plus élevés que ce taux.

Le remorquage reste donc seul en présence de la traction sur rails. Il est certain que l'on peut prévoir que pour de grands remor-

(1) LÉON GERARD. — Notes et expériences sur la traction électrique sur les voies navigables. *Bulletin de la Société belge d'Electriciens*. 1901, tome XVIII.

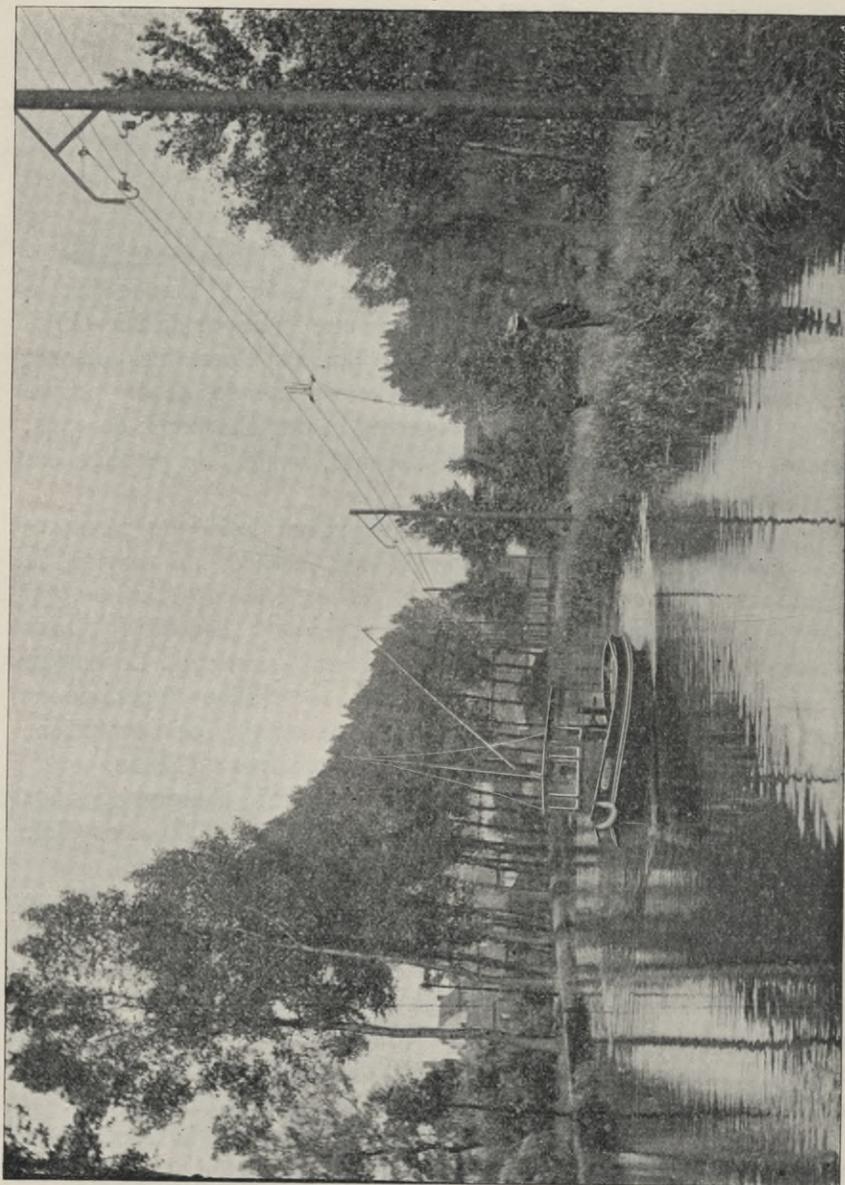


FIG. 9. — Remorqueur électrique à hélice avec ligne polyphasée. (Canal de Charleroi.)

queurs le rendement sera meilleur par suite de la possibilité de supprimer l'engrenage, le tirant d'eau étant assez grand pour permettre le couplage direct.

Au reste, l'adoption d'hélices à pas progressif et divers perfectionnements de détail nous ont permis d'amener déjà le rendement des bateaux électriques à hélice à une valeur voisine de 38 p. c.

Dans le cas d'un canal à tracé rectiligne ou à courbes de très grand rayon, l'emploi des bateaux toueurs tirant sur chaîne ou sur câble devra être envisagé comme une solution possible, à la fois économique comme rendement à cause du grand effet utile de ce genre d'appareils, du caractère pratique de leur maniement et de la réduction des frais de leur entretien. Le rendement peut atteindre avec les appareils électriques toueurs 80 p. c. L'auteur entend par rendement du bateau électrique le rapport entre le travail pris à la ligne et le travail au crochet d'attelage.

En résumé, la pratique a consacré les prévisions émises au Congrès de 1900 au sujet du remorquage électrique.

QUATRIÈME PARTIE

D. — Considérations générales

Dans son rapport au Congrès de Paris de 1900, M. l'ingénieur des Ponts et Chaussées français La Rivière énonçait ce principe que tout le problème de la traction mécanique des bateaux se réduit en définitive à une question de distribution de force motrice.

Le seul mode économique de transmission à de très longues distances est la transmission électrique à haute tension.

Il est certain que le problème ramené à cette forme ne permet de solution favorable que si l'usine centrale de production électrique se trouve dans des conditions économiques lui permettant d'acquérir une clientèle suffisante pour débiter un nombre rémunérateur de kilowatts par an, soit par la traction seule si la navigation ne cesse pas avec le jour, soit par l'éclairage et par d'autres consommateurs en cas contraire.

La réalisation de la traction mécanique est donc liée intimement au problème de la création d'usines ayant un débit électrique suffisant pour que le prix du kilowatt, qui est composé pour une part considérable de frais d'intérêts et d'amortissement du capital immobilisé, soit aussi réduit que possible.

Dans ce but, il importe de grouper sur un même réseau tous les consommateurs d'énergie, tant sous forme de lumière que de force motrice.

C'est la tendance de toutes les installations électriques actuelles. C'est pour cette raison que les réseaux de distribution dans les villes tendent de plus en plus à desservir de nombreux tramways et les deux services ainsi réunis se ressentent favorablement de cette coopération.

L'auteur disait en 1901 :

« Le caractère principal du progrès apporté par les lignes de distribution électriques est que les grands consommateurs ne sont pas seuls à en bénéficier et que la rénovation de la petite industrie à domicile, le rétablissement des industries familiales du tissage, de l'armurerie, de la mécanique de précision, du travail

» du bois et des métaux sont liés intimement au développement
» des lignes de distribution d'énergie électrique. — A côté de ces
» consommateurs, les coopératives agricoles se présentent dans cer-
» tains cas, comme devant bénéficier directement des avantages
» de la distribution de la force motrice.

» Il y a donc un intérêt d'Etat des plus puissant à développer
» pratiquement de tels organismes.

» L'établissement du halage ou du remorquage électrique ne
» doit pas être, dans beaucoup de cas, considéré au point de vue
» économique comme le seul objet d'une ligne de distribution élec-
» trique. Sur beaucoup de canaux, la navigation cesse avec le jour
» ou présente des alternatives, des variations d'activité assez
» grandes, de telle sorte que la force motrice et le personnel peu-
» vent être économiquement et pratiquement utilisés à la distribu-
» tion de l'énergie électrique sous toute les formes pour l'usage
» public et privé.

» C'est dans ce sens large qu'il est nécessaire de considérer les
» installations de traction électrique sur les voies navigables et qu'il
» est possible d'en tirer tout l'effet utile au grand bénéfice des
» procédés de navigation et des intérêts généraux économiques et
» sociaux les plus essentiels. »

L'expérience a confirmé cette manière de voir puisque, en 1901-1902, en plus d'une consommation annuelle pour le halage de 600000 KWH, les réseaux créés par l'auteur et représentés dans la fig. 2, ont débité par an près de 1 million de kilowatts distribués jusque dans des villages et des districts qui, par eux-mêmes, n'eussent jamais pu se procurer, à moins de circonstances spéciales, l'énergie électrique si utile à leur développement.

D'autre part, ce débit a permis, en augmentant le coefficient d'utilisation des installations fixes, de diminuer les prix de revient dans une large mesure. Il y a donc lieu de constater, que si, d'une part, le système spécial et le seul connu du reste à ce moment en matière de halage, prescrit par le cahier des charges dressé par le service spécial des canaux houillers belges en 1898, et dont il a été question plus haut, a donné lieu à des résultats pratiques peu favorables en raison du roulement sur digue, en revanche, une contrée étendue a bénéficié largement de l'établissement de près de 200 kilomètres de lignes de distribution à haute et à basse tension, répartissant dans une partie importante du pays et sur une surface de plus de 600 kilomètres carrés, l'énergie électrique à bon marché, en permettant sa distribution à l'agriculture et à la petite industrie. Cette partie de notre pays est donc redevable des effets favorables de la distribution

d'énergie électrique à la décision ministérielle préindiquée relative à l'établissement du halage sur le canal de Charleroi.

D'autre part, les expériences relatées plus haut permettent de déterminer les conditions rationnelles à adopter pour parer aux inconvénients constatés; enfin, le développement des chemins de fer vicinaux électriques est de nature à diminuer encore le prix de revient de l'énergie électrique à utiliser pour le halage des bateaux.

Grâce à ces circonstances et avec les modifications étudiées, le halage et le remorquage électriques permettront d'organiser efficacement la traction des bateaux. Celle-ci est en général abandonnée aux hasards du louage des chevaux et elle est toujours lente et incertaine. Cette lenteur et le prix du halage expliquent pour certains canaux la préférence accordée au transport par le chemin de fer et donnent ainsi la raison de la décadence de ces voies navigables essentielles cependant à la vie économique des contrées qu'elles desservent.

On doit donc souhaiter, et cela avec chance de succès, que les expériences faites de toutes parts et concordantes, je pense, avec les résultats expérimentaux de l'auteur relatés dans le présent mémoire, donneront à cette question une solution favorable.

LÉON GERARD.

15 juin 1902.

1000

