

BULLETIN
DE LA
COMMISSION INTERNATIONALE
DU
CONGRÈS DES CHEMINS DE FER

NOTE

SUR QUELQUES EXPÉRIENCES RELATIVES AUX VARIATIONS
DU POUVOIR VAPORISATEUR DES TUBES A FUMÉE

Par ERNEST GERARD

INGÉNIEUR PRINCIPAL AUX CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT BELGE

Définition. — Le pouvoir vaporisateur des tubes à fumée de locomotives dont il est ici question est fonction de la conductibilité, de la convexion du calorique à travers une portion donnée du tube. Bien que lié nécessairement aux degrés de température des milieux gazeux et liquides en contact avec le tube, ce pouvoir vaporisateur varie également avec la nature propre du métal et surtout avec l'état de ses parois. Rien, et nous n'insisterons guère sur ce point, rien n'est négligeable de ce qui touche aux éléments entrant en jeu dans la vaporisation.

Aujourd'hui, ce n'est pas dans l'accroissement du poids, ni du nombre d'essieux, ni de la longueur de la chaudière qu'on cherche l'augmentation de la puissance des locomotives; la limite de l'adhérence semble atteinte; et si l'on s'attaque toujours naturellement aux organes de la production et à ceux de l'utilisation de la vapeur, c'est moins pour les agrandir encore que pour en changer les dispositifs et les proportions relatives. Tel est le but des essais du système compound visant l'extrême utilisation de la détente, au prix de la complication des organes; tel est le but des changements incessants et innombrables apportés aux dimensions des parties de la chaudière, dont le type reste néanmoins presque immuable.

Confinant aux limites du poids des rails et du remorqueur, on rattache aux moindres améliorations, de légers mais avantageux succès d'exploitation en vitesse et en charge remorquée. On serait heureux, dans cet ordre d'idées, d'obtenir ne fût-ce qu'une augmentation de 10 p. c. de la puissance fournie par un volume donné de vapeur, ou d'en produire 10 p. c. de plus *par tonne de moteur*.

Limite de la recherche. — Nous n'avons pas en vue ici les variations de la quantité de chaleur transmises à l'eau des différents points d'une même tubulure, ni ses relations avec la nature du combustible, avec les dimensions et le nombre de tubes, avec l'intensité du feu ou le dispositif du foyer, questions largement élaborées par d'habiles expérimentateurs, et notamment en dernier lieu par M. Henry, de la Compagnie du Paris-Lyon-Méditerranée.

Notre recherche a eu simplement pour objet, de déterminer la différence, dans la faculté de transmettre la chaleur, présentée par deux tubulures, l'une de laiton, l'autre de fer, au commencement de leur mise en service et après des périodes successives d'usage.

Sans doute, il est difficile d'expérimenter de façon à soustraire l'objet d'une investigation de l'espèce aux influences des autres facteurs concourant au même produit, lequel ici, finalement, est toujours le poids de l'eau évaporée. On verra si la méthode que nous avons suivie est susceptible de fournir des résultats positifs. Avant de l'exposer, rappelons sommairement les notions les plus répandues sur la matière.

Les éléments auxquels sont liées les propriétés diathermanes de la paroi d'un tube sont : la nature du métal, l'épaisseur de la paroi, les enduits qui la recouvrent intérieurement et extérieurement.

Nature du métal. — A l'origine, les chaudières de locomotives ne recevaient que des tubes en cuivre rouge. La vieille chaudronnerie était spécialement familiarisée avec le travail de ce métal pour la confection d'appareils étanches de petite dimension. On employait alors du coke dans des foyers profonds à grilles restreintes. Lors de l'excitation du tirage, les escarbilles entraînées, projetées sur un métal mou, l'usaient rapidement. Aussi l'usage de ce métal ne fut-il conservé que dans les machines où l'on brûlait du bois, pour disparaître successivement avec l'emploi de ce combustible. Le laiton fut substitué au cuivre dès 1833 au chemin de fer de Liverpool à Manchester.

Le fer resta longtemps écarté pour divers motifs et ne fut essayé sérieusement qu'à l'époque où se fit en grand la fabrication du fer homogène et des aciers doux.

Mais bien que l'expérience de sa mise en œuvre soit un fait accompli depuis long-temps aux États-Unis, ainsi qu'en Europe, et malgré la réduction considérable de prix, il n'a pas encore jusqu'ici détrôné le laiton (¹).

La question de conductibilité relative a pu jouer un certain rôle dans cette indécision. Indépendamment de la notion élémentaire de physique, certaines expériences directes d'évaporation ont pu y contribuer. Rappelons-en une qui remonte à 1858 et fut exécutée par M. Tosh sur deux bouts de tubes, l'un en fer, l'autre en laiton, de 60 centimètres de hauteur, chauffés extérieurement par une flamme de gaz, et contenant intérieurement de l'eau renouvelée de façon à garder un niveau à peu près constant. Le tube en laiton vaporisa 25 p. c. d'eau de plus que le tube en fer. M. Gustave Richard, en citant cette expérience (²), fait ressortir, avec raison, que les surfaces des tubes étaient restées propres, condition peu durable en pratique.

Est-ce l'influence de ces incertitudes qui expliquerait la conservation de tubulures en cuivre dans une partie des machines de plusieurs Compagnies européennes ? M. Bertoldo en nomme trois dans son rapport au Congrès de 1892, à Saint-Pétersbourg (³). Cet auteur n'est pas absolument affirmatif à cet égard, si l'on en juge par les passages suivants de son rapport :

“ Les tubes en cuivre rouge et les tubes coniques en laiton *ne paraissent pas* produire une diminution dans la consommation de combustible, comme on l'avait supposé au commencement. ”

Et plus loin :

“ La nature du métal des tubes à fumée *ne paraît pas* avoir une influence appréciable sur la consommation du combustible et sur la production de vapeur. ”

L'expérimentation directe lèvera le doute, d'ailleurs très répandu, exprimé dans ces phrases.

(¹) Le prix des tubes en laiton au kilogramme est de 1 fr. 30 c.; celui du fer, 40 centimes. En tenant compte de leur usure dans l'évaluation du vieux métal revendu, on trouve encore le rapport $\frac{88}{38}$ entre les dépenses comptées par kilogramme. — Le poids du tube de laiton neuf est de $3^{\frac{1}{2}}$ par mètre courant, celui du tube en fer $2^{\frac{1}{2}}$ pour des tubes de 5 centimètres de diamètre extérieur.

(²) G. RICHARD, *La chaudière locomotive*.

(³) Question XV-B : “ Renseignements techniques relatifs aux tubes à fumée ”, par M. J. Bertoldo, ingénieur chef de division de la Société italienne des chemins de fer de la Méditerranée.

Épaisseur de la paroi. — L'opinion générale est que l'épaisseur du métal des tubes n'exerce aucun effet, qu'elle ne joue aucun rôle dans les limites de la construction commune moderne. Une expérience exécutée en 1890 par l'Amirauté anglaise permet d'apprécier quels minimes coefficients les modifications de cette épaisseur introduiraient dans la théorie de la vaporisation.

M. A.-J. Durston, ingénieur en chef, prit un vase en fer de 25 centimètres de diamètre, de 7 1/2 centimètres de hauteur, portant, attachés sous le fond, d'une épaisseur de 6 millimètres, huit fragments de métaux présentant divers degrés de fusibilité, depuis 104° centigrades jusqu'à 123°, les surfaces étant propres de part et d'autre. On y fit bouillir de l'eau au moyen d'une flamme de bec Bunsen dont la température dépassait 800°. Les gouttes métalliques fusibles à 115°6 et au-dessous se fondirent, mais celle dont le point de fusion atteignait 117°7 se ramollit superficiellement. On en conclut que la différence de température entre la paroi intérieure et l'extérieure, fraîchement mises en usage, est de 16° seulement. Ce résultat se modifie, comme nous le verrons, selon les conditions de l'expérience; mais si déjà, pour une tôle de 6 millimètres d'épaisseur, la température tombe de 800° à 116° sur la face extérieure de cette tôle, quand l'eau est à 100° de l'autre côté, on conclura que pareil régime supposé établi pour la paroi beaucoup plus mince d'un tube ne subirait pas de modification mesurable, du chef des différences d'épaisseur qu'elle peut présenter. On va voir, du reste, comment ce régime se modifie dès que les surfaces considérées ont cessé d'être propres.

Enduits et dépôts. — Les couches de matières qui ne tardent pas à couvrir sur ses deux faces la paroi d'un tube, changent considérablement le régime qui s'établit entre les températures du feu, de la surface externe et de la surface interne, et, par suite, le rendement de la surface de chauffe qui est fonction de ces trois températures.

M. Durston avait déjà montré qu'une perte de 8 à 15 p. c. de ce rendement, avec une moyenne de 11 p. c., pouvait résulter de la présence d'une mince couche de graisse sur les tubes. Heureusement qu'une locomotive neuve ou dont la chaudière sort de réparation se dépouille rapidement, *en primant*, des enduits auxquels l'expose la manipulation des tubes. En vue de déterminer les températures des gaz et des surfaces métalliques ainsi modifiées. M. Durston exécuta, en 1892, quelques expériences dont voici les intéressants résultats.

“ a) Température des tôles pendant l'ébullition de l'eau en vase ouvert sous diverses conditions. ”

Un réservoir de 60 centimètres de diamètre et 75 centimètres de profondeur, en tôle de 6 centimètres, constamment alimenté d'eau, était maintenu au-dessus d'un feu de forge et muni au-dessous de pastilles métalliques présentant de nombreux degrés de fusibilité.

D'abord, en chauffant modérément, on retrouva sur la face extérieure du fond la même température de 116° qu'avec la flamme Bunsen. Ensuite, on excita le feu jusqu'à obtenir sur cette plaque 138°, toujours avec l'eau et les surfaces propres. Ensuite, on modifia l'état de ces dernières et on trouva les résultats suivants :

TEMPÉRATURE EN DEGRÉS CENTIGRADES			
	du côté le plus chaud de la tôle de fond.	du feu.	
Eau propre	138°	1,204°	
Huile minérale graduellement ajoutée jusqu'à 5 p. c.	154°	1,260°	
Eau fraîche avec 2 1/2 p. c. de paraffine . .	166°	1,150°	
Eau fraîche à 2 1/2 p. c. d'alcool méthylique.	149°	1,370°	
Dépôt graisseux de 1 1/2 millimètre sur le fond.	288°	1,370°	

“ 3) Température de la tôle pendant l'ébullition de l'eau en vase clos à des températures supérieures à 100°. ”

Cette recherche se fit au moyen d'un appareil de mêmes dimensions que le précédent, mais fermé comme une petite chaudière.

Eau et surfaces métalliques propres :

TEMPÉRATURE EN DEGRÉS CENTIGRADES			
	du côté le plus chaud du fond.	de l'eau.	Différence.
Au-dessus d'un brûleur Bunsen	221°	184°	37°
Au-dessus d'un feu de forge ardent	221°	177°	44°

Fond de la chaudière enduit de graisse :

	TEMPÉRATURE EN DEGRÉS CENTIGRADES		
	du côté le plus chaud du fond.	de l'eau.	Différence.
Sur feu de forge, avec enduit de 1 1/2 millimètre d'épaisseur	266°	182°	84°
Mêmes conditions, l'enduit graisseux étant de nature plus sèche ou terreux.	288°	177°	111°
Mêmes conditions, en étendant l'enduit sur les parois latérales.	325° ⁽¹⁾	45°	280°

En poussant plus loin la pression de la vapeur, on n'a pas observé de notables accroissements dans l'excès de la température externe de la tôle sur l'interne.

Afin d'apprécier à quel degré agit, sur le rendement de vaporisation, une augmentation de la température de régime à la surface la plus chaude d'un tube, il convient de connaître la température régnant dans les gaz qui y circulent.

Le même expérimentateur nous fournit cette donnée recueillie sur une chaudière marine ayant des tubes de 2^m025. Au moyen d'un pyromètre Lechatelier introduit successivement à différentes distances des tubes d'une rangée verticale, il a obtenu les moyennes suivantes pour une température d'au moins 1,650° centigrades au foyer, et de 896° dans la chambre de combustion :

Température dans la chambre de combustion	896°
— à l'embouchure du tube.	843°
— à 0 ^m 025 de la chambre de combustion	797°
— à 0 ^m 050 — — — —	774°
— à 0 ^m 075 — — — —	763°
— à 0 ^m 100 — — — —	767°
— à 0 ^m 125 — — — —	759°
— à 0 ^m 150 — — — —	763°
— à 0 ^m 175 — — — —	760°
— à 0 ^m 200 — — — —	766°
— à 0 ^m 350 — — — —	742°

⁽¹⁾ Cette température fut atteinte trois minutes après le placement de la chaudière sur le feu à plein vent en pleine ardeur.

Température à 0 ^m 500 de la chambre de combustion	702°.
— à 0 ^m 800 — — —	648°
— à 1 ^m 100 — — —	597°
— à 1 ^m 400 — — —	546°
— à 1 ^m 700 — — —	497°
— à 2 ^m 020 — — —	475°
— dans la boîte à fumée	417°

Si de telles données existaient assez nombreuses pour une locomotive, on établirait utilement la relation reliant la température moyenne des gaz, les températures des surfaces internes et externes du tube, et le rendement de vaporisation. Toutefois, le rapprochement des chiffres précédents donne une idée de l'influence qu'exerce sur ce rendement un accroissement de résistance au passage du calorique. Partant de la température moyenne de 650° trouvée dans le tube de la chaudière marine, si l'on y rapporte les accroissements de température externe que subissent les tôles expérimentées, en présence d'enduits étendus sur leur face interne, on en déduira que la chute totale de température des gaz traversant la tubulure doit s'en trouver considérablement affectée, ce qui équivaut à un défaut proportionnel d'absorption du calorique par l'eau à vaporiser. N'était la nécessité de prendre les précautions exigées par la sécurité, les lavages fréquents, l'expérience l'a amplement démontré, favorisent l'économie de combustible.

Une complication de la question naît du fait que les dépôts se comportent différemment sur les différents métaux. Voici comment s'exprime à cet égard M. W. Adams, dans l'étude présentée au Congrès à Saint-Pétersbourg (¹), à propos de l'emploi de l'acier doux dans la confection des tubulures en remplacement du laiton :

“ Ce métal (l'acier doux) est plus économique, mais il a l'inconvénient d'être un peu moins bon conducteur de la chaleur et de retenir plus facilement les incrustations. Aussi, certains ingénieurs considèrent-ils encore que son emploi doit dépendre de la composition chimique des eaux d'alimentation. Son emploi nécessite aussi d'après eux, comme en Amérique, un lavage plus fréquent des chaudières, ou l'emploi d'eaux d'alimentation préalablement épurées avant leur entrée dans la chaudière. ”

(¹) Question XI-B : “ Hautes pressions, distributions diverses ”, par M. W. ADAMS, ingénieur en chef de la traction du London and South-Western Railway.

Ainsi deux causes contribueraient à éléver le degré de résistance thermique de ce métal : sa nature d'abord et une sorte d'affinité spéciale pour les matières incrustantes.

Reste à savoir, cependant, si la couche calcareuse ou séléniteuse plus adhérente au fer qu'au laiton, y est en même temps plus épaisse, ou de formation plus rapide, et surtout si la cohésion particulière du dépôt en fait un écran plus efficace, contre la transmission du calorique, que celui qui s'attache au laiton.

Les expériences que nous allons décrire ont été conduites de façon à suivre, autant que possible, la marche progressive des effets dus à ces causes multiples dans la vaporisation.

Comparaison expérimentale des tubes en laiton et des tubes en fer. — *Objet de l'expérience.* — Ces essais, comme nous l'avons dit, n'ont porté que sur le pouvoir vaporisateur des deux espèces de tubes d'usage le plus courant dans les locomotives européennes : tubes de fer doux, tubes de laiton à 25 ou 30 p. c. de zinc, à paroi de 2.5 millimètres d'épaisseur.

L'objet des recherches était ainsi limité : de deux faisceaux tubulaires, l'un de fer, l'autre de laiton, placés dans des conditions identiques, se rapprochant de la pratique, quel serait celui qui vaporiserait la plus grande quantité d'eau pendant un même temps, pour une même consommation de combustible?

Durée des essais. — On devait prévoir une période d'essai suffisante pour arriver à l'établissement d'un régime de pouvoir vaporisateur assez constant de part et d'autre et s'assurer de la sorte que les données recueillies répondaient, dans leur ensemble, à la série de phénomènes susceptibles d'introduire des modifications dans la résistance thermique de l'une et l'autre matière. Ces essais, commencés le 12 octobre 1891, prirent fin au mois de juillet 1892, sans compter la période d'installation, de démontage et d'examen des appareils.

Condition des essais, installations. — Les expériences ont été exécutées de deux manières, les unes au moyen de deux bouilleurs spéciaux à évaporation libre, les autres au moyen de chaudières locomobiles, d'une puissance de 10 chevaux. Inutile d'ajouter que dans chaque paire d'appareils l'un des deux était garni des tubes en laiton, l'autre des tubes en fer.

Dans le premier cas (fig. 1 et 2), les bouilleurs jumeaux étaient installés sur un four à réverbère servant à chauffer les lames de ressorts; les flammes perdues avant leur arrivée dans la cheminée passaient dans les tubes des chaudières.

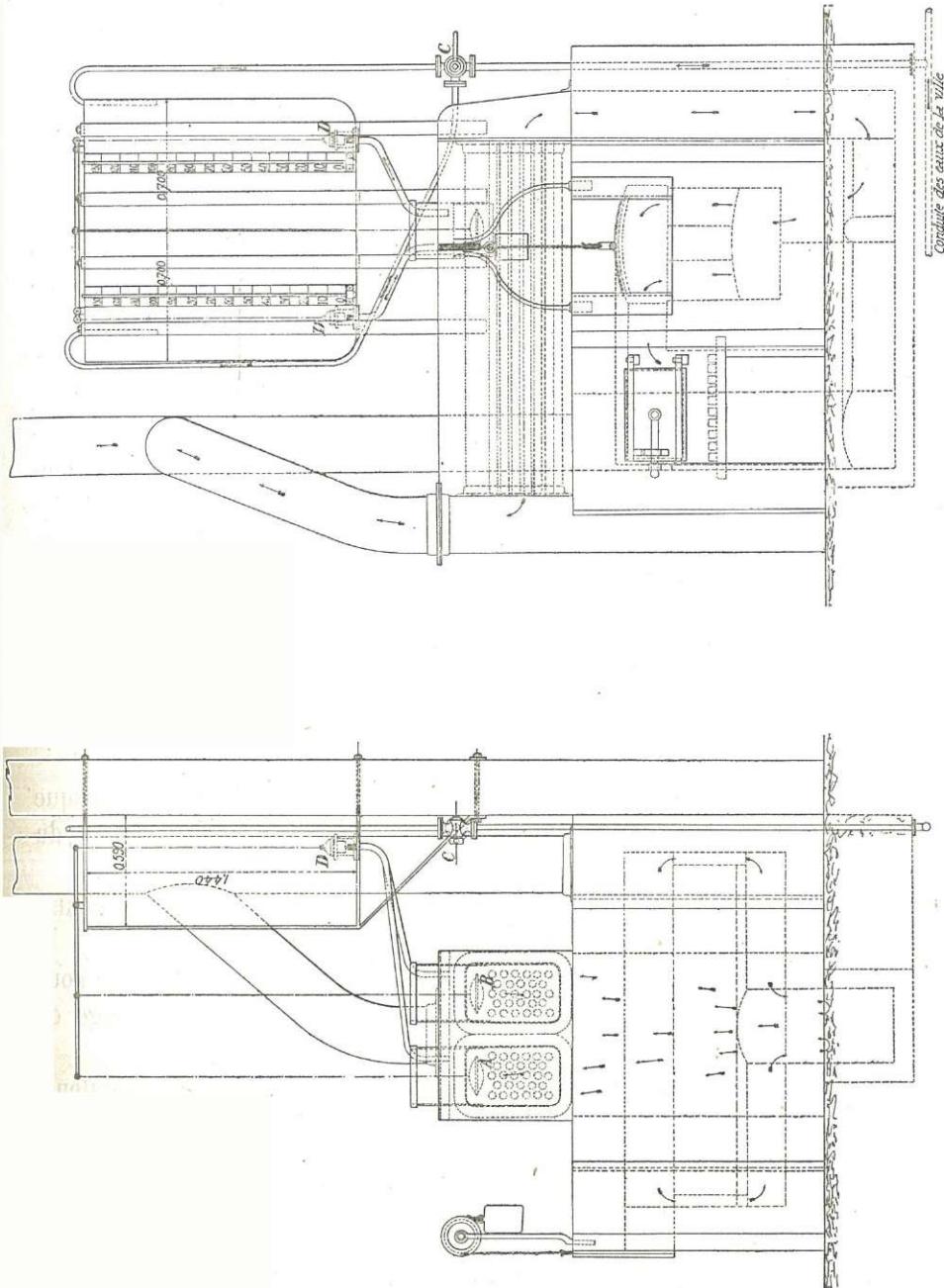


Fig. 1 et 2. — Bouteilleurs jumeaux sur le four à ressorts. Échelle : 1/40.

Dans l'installation des bouilleurs et des carneaux, on avait pris les précautions nécessaires pour obtenir une égale répartition du gaz dans chacun des faisceaux tubulaires.

Deux réservoirs (E et F) indépendants l'un de l'autre alimentaient respectivement les bouilleurs (A et B) à niveau constant. A cette fin, chacun de ceux-ci était muni d'un flotteur actionnant automatiquement une soupape (D) placée dans le réservoir correspondant.

Chacun des réservoirs pourvu d'un indicateur de niveau d'eau, gradué en centimètres, était rempli chaque matin par un agent spécial chargé de relever en même temps les index de la consommation.

Dans le second genre d'essais (fig. 3 et 4), il était fait usage de petites chaudières forme locomobile, de la puissance de 10 chevaux. Celles-ci, complètement indépendantes sous tous les rapports, étaient desservies par un chauffeur placé sous la surveillance de l'agent spécial chargé de relever les consommations.

D'après les instructions données, le chauffeur faisait en sorte de consommer, dans un même laps de temps, une égale quantité de charbon dans chacune des chaudières. Elles étaient alimentées d'eau froide, au moyen d'injecteurs dont les eaux de purge étaient recueillies séparément et portées en compte.

Deux fois par jour, les réservoirs d'alimentation (A et B) étaient remplis par le même agent spécial chargé également de relever l'index des consommations et de mesurer les quantités d'eau perdues par les injecteurs.

Une fois par jour, un égal poids de charbon était déposé auprès de chaque chaudière, et en même temps il était tenu attachement des quantités restantes du jour précédent.

Les pressions indiquées par les manomètres des chaudières étaient notées quatre fois par jour, de façon à obtenir une assez bonne moyenne quotidienne.

Dans l'emploi de la vapeur produite par ces deux petites chaudières, il ne nous a pas été possible de réaliser l'identité constante de part et d'autre, l'usage en commun étant prohibé par le but visé.

On commença donc par alterner l'envoi de la vapeur de chaque générateur, tantôt à un gros marteau-pilon, tantôt au petit pilon des forges.

Mais comme le chauffeur avait ordre de brûler la même quantité de charbon dans chaque foyer, il devait arriver pendant cette période, et les attachements tenus le constatent, que la consommation de combustible fut parfois excessive, de l'un des côtés, relativement à celle de l'eau.

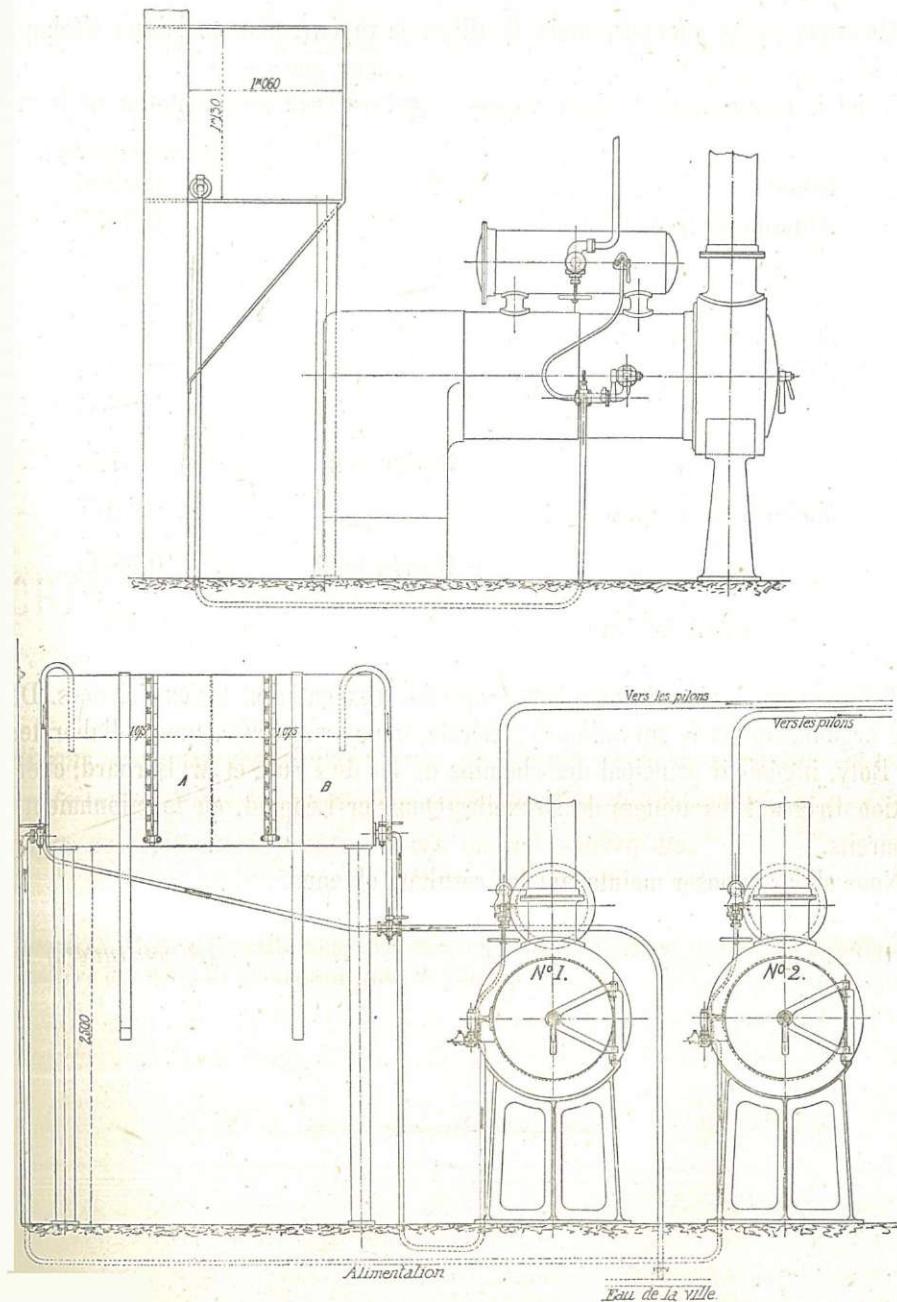


Fig. 3 et 4. — Chaudières locomobiles de 10 chevaux. Échelle : 1/50.

On cessa, après quelques mois, d'utiliser la vapeur, pour la laisser s'échapper par les soupapes sous une pression aussi constante que possible.

Voici la composition de l'eau employée, qui est l'eau d'alimentation de la ville.

	Gramme par litre.
Silice	0.0206
Alumine et traces de fer	0.0037
Chaux.	0.1551
Magnésie	0.0088
Acide sulfurique et combiné	0.0231
Acide carbonique	0.0351
Chlore.	0.0264
Résidu salin	0.3728
Matières organiques.	0.1077
Résidu total	0.3805
Degré hydrotimétrique	27°

Telles furent les conditions dans lesquelles s'exécutèrent les expériences. Dans leur organisation et la surveillance générale, nous avons eu comme collaborateurs M. Boty, ingénieur principal des chemins de fer de l'État, et M. Barnard, chef de section dirigeant les ateliers de Bruxelles-Quartier-Léopold, où fonctionnaient les appareils.

Nous allons exposer maintenant les résultats obtenus.

(A continuer.)