
LOCOMOTIVES COMPOUND

A QUATRE CYLINDRES ET A GRANDE VITESSE

DU CHEMIN DE FER DU NORD

Par M. PULIN,

INGÉNIEUR, CHARGÉ DES ESSAIS ET DES RÉCEPTIONS

(Pl. VII à X).

SOMMAIRE :

I. Préliminaires. — II. Description des machines avec tender à bogies. — III. Observations sur les résultats pratiques fournis par les locomotives compound à grande vitesse de la Compagnie du Nord : 1° Perfectionnements successifs des machines ; 2° Résultats d'exploitation (trains rapides, trains de marchandises). — IV. Expériences : 1° Marche en rampes ; 2° Marche en pente ; 3° Travail développé à faible vitesse. — V. Examen des conditions d'établissement : 1° Production de la vapeur ; 2° Utilisation de la vapeur (Relation entre les crans de marche) ; 3° Recherche du minimum de poids. — VI. Conclusions.

I. — Préliminaires.

Dans un article très documenté, sur les premières locomotives compound à grande vitesse, à 4 cylindres, de la Compagnie du Chemin de fer du Nord (1), M. du Bousquet, Ingénieur en Chef du Matériel et de la Traction, a rendu compte des excellents résultats donnés par la machine N° 701, construite en 1885 aux ateliers de Belfort de la *Société Alsacienne de Constructions mécaniques*. Il a montré en outre comment la Compagnie du Nord avait été conduite à faire construire deux autres locomotives, N°s 2.121-2.122, d'un système analogue mais présentant, avec une augmentation de puissance, des dispositions différentes, et il a fourni, sur leur service et sur les expériences auxquelles on les a soumises, des renseignements circonstanciés.

La Compagnie du Nord a commandé ensuite à la *Société Alsacienne*, trois séries de locomotives compound à grande vitesse peu différentes des précédentes. La première de ces séries

(1) *Revue Générale*, N° de Juin 1892.

comprenait 15 machines, 2.123-2.137, qui ont été mises en service du mois d'avril 1893 au mois de février 1894; la seconde se composait de 20 machines pour lesquelles la pression de la chaudière a été portée de 14 à 15 kilogrammes. Ces 20 machines ont été mises en service du mois de juin 1895 au mois d'avril 1896.

Enfin trois nouvelles locomotives 2.158-2.160, portant à 40 le nombre des machines de ce type, ont été mises en service en juin et juillet 1896. Elles se distinguent des précédentes par les dimensions un peu plus grandes de la chaudière et de la grille et surtout par la nature de leurs tenders qui sont pourvus de deux bogies.

Avant de décrire ces nouvelles machines et de mentionner les résultats qu'elles ont fournis en service courant et dans les essais auxquels on les a soumises, nous croyons utile d'exposer succinctement les progrès accomplis depuis quelques années à la Compagnie du Nord, dans la traction des trains rapides. Il nous suffira de montrer quels ont été les accroissements de vitesse et de charge des principaux trains de cette nature, pour faire ressortir la puissance des locomotives compound du Nord.

Les tableaux ci-après indiquent pour les lignes de Lille et de Calais, sur lesquelles les progrès réalisés ont été les plus frappants, les vitesses commerciales prévues par l'itinéraire, depuis 1892 jusqu'à 1896, soit entre les points extrêmes des lignes, soit entre deux stations consécutives. Nous avons porté également sur ces tableaux les trains O et C N qui n'existaient pas en 1892, et dont la vitesse est très élevée.

VITESSES COMMERCIALES DE QUELQUES TRAINS ENTRE LES DEUX POINTS TERMINUS.

	NUMÉROS DES TRAINS		1892		1893		1894		1895		1896		OBSERVATIONS
	ANCIENS	NOUVEAUX	ÉTÉ	HIVER									
Paris-Lille.....	29	317	66,9	66,9	66,9	73,4	75,3	75,3	75,3	75,3	77,2	77,2	Le service d'hiver commence au mois de Novembre.
Lille-Paris.....	18	306	68,4	68,4	68,1	75,3	75,3	75,3	75,3	75,3	77,2	77,2	
Paris-Calais....	1	7	69	69	69	69	69	69	75,9	75,9	75,9	75,9	Vingt minutes d'arrêt à Amiens.
	15	9	73,3	73,3	73,3	73,3	78,2	78,2	79,3	79,3	79,6	79,6	
			RC	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Calais-Paris....	0	18	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	75,5	75,5	75,5	75,5	De Calais-Ville à Pierrefite.
	P	P	67,7	67,7	67,7	67,7	73,6	73,6	73,6	73,6	75,5	79	
		12	»	»	69	69	69	69	76,5	76,5	75,5	75,5	
		O	»	»	»	65,6	68,3	68,3	68,3	68,3	75,5	80,9	
		C N	»	»	»	»	»	»	»	80,1	80,1	80,1	D°

(1) La numérotation des trains a été changée en 1893.

VITESSES MOYENNES BRUTES DE QUELQUES TRAINS ENTRE DEUX STATIONS CONSÉCUTIVES,

(Calculées sans déduction du temps perdu pour les démarrages et les arrêts).

STATIONS.	NUMÉROS DES TRAINS		1892		1893		1894		1895		1896		1897		OBSERVATIONS
	ANCIENS	NOUVEAUX	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	
Paris à Lille.															
Paris-Longueau	29	317	72 ^k	72 »	72 »	79,6	84, »	84, »	84, »	84, »	84, »	84, »	84, »	84, »	
Longueau-Arras	29	317	71,5	71,5	71,5	78,7	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	
Arras-Douai	29	317	67,6	67,6	67,6	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	77,7	
Douai-Lille	29	317	62,8	62,8	62,8	67, »	71,8	71,8	71,8	71,8	74,4	74,4	74,4	74,4	
Lille à Paris.															
Lille-Douai	18	306	67 ^{km}	67, »	67, »	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4	74,4	
Douai-Arras	18	306	67,6	67,6	67,6	74, »	74, »	74, »	74, »	74, »	77,7	77,7	77,7	77,7	
Arras-Longueau	18	306	75,7	75,7	75,7	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	82, »	
Longueau-Paris	18	306	73,4	73,4	72,7	80,4	80,4	80,4	80,4	80,4	84, »	84, »	84, »	84, »	
Paris à Calais.															
Paris-Amiens	15	9	76,1	76,1	76,1	76,1	81,6	81,6	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	
	B	7	73,9	73,9	76, »	76, »	81,6	81,6	81,6	81,6	81,6	81,6	87,1	87,1	
	»	R C	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	92,2	
Amiens-Calais	15	9	74, »	74, »	74, »	74, »	78,8	78,8	80, »	80, »	80,7	80,7	80,7	80,7	
Amiens-Boulogne	B	7	73,1	73,1	73,1	73,1	77,7	77,7	77,7	77,7	78,5	78,5	82, »	82, »	
Amiens-Calais	»	R C	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	82,9	
Calais à Paris.															
Calais-Amiens	O	18	73,6	73,6	73,6	73,6	73,6	73,6	77,8	77,8	77,8	77,8	77,8	77,8	
	P	P	70, »	70, »	70, »	70, »	73,6	73,6	73,6	73,6	74,8	82,9	82,9	82,9	
	»	O	»	»	»	66,4	67,2	67,2	67,2	67,2	76,6	82,9	82,9	82,9	
	»	C N	»	»	»	»	»	»	»	79,6	79,6	79,6	79,6	79,6	
Amiens-Paris	O	18	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	76,1	Voir le Nota.
	P	P	68,2	68,2	68,2	68,2	77,8	77,8	77,8	77,8	78,6	76,2	76,2	76,2	D'Amiens à Pierrefitte.
	»	O	»	»	»	65,7	70,8	70,8	70,8	70,8	76,1	80,3	80,3	80,3	d°
	»	C N	»	»	»	»	»	»	»	83,1	83,1	83,1	83,1	83,1	d°
Paris à Jeumont.															
Paris-St-Quentin	»	179	»	»	»	»	»	»	»	»	85,8	85,8	85,8	85,8	
St-Quentin-Jeumont	»	179	»	»	»	»	»	»	»	»	80,7	80,7	80,7	80,7	
Aulnoye-Busigny	16 bis	112	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	78,5	81,5	81,5	
Busigny-St-Quentin	16 bis	112	71, »	71, »	71, »	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	
St-Quentin-Tergnier	16 bis	112	66,6	66,6	66,6	70, »	70, »	70, »	70, »	70, »	70, »	70, »	70, »	70, »	
Tergnier-Compiègne	16 bis	112	70,9	70,9	70,9	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	78,7	81, »	81, »	
Compiègne-Paris	16 bis	112	70,8	70,8	69,6	77,1	77,1	77,1	77,1	77,1	77,1	77,1	83,6	83,6	
<p>NOTA. — Ce train est le premier qui ait été accéléré. Des considérations d'exploitation ont déterminé le maintien de son itinéraire depuis 1892.</p>															

Nous mentionnerons enfin spécialement le train hebdomaire N° 179 (Nord-Express) qui n'existe que depuis 1896 et qui fait sans arrêt le trajet de Paris à St-Quentin (153^{km},1) en 1 heure 47 , (cet horaire correspond à la vitesse brute très élevée de 85 km., 8 à l'heure), et le train R C (Rome-Calais) mis en marche en novembre 1897, qui franchit en 1 h. 25' les 130 km.,6 qui séparent Paris d'Amiens. Sa vitesse brute est de 92 km.,2 à l'heure. C'est la plus élevée du Continent).

En 1892, la traction des express, sauf celle du train O (18), était encore faite exclusivement par les machines « Outrance ». La puissance de ces locomotives augmentée durant les années précédentes par l'élévation du timbre de la chaudière — porté de 10 à 11 kg. — et par le remplacement des cylindres dont le diamètre avait passé de 0^m,432, sa valeur primitive, à 0^m,460 — devenait elle-même insuffisante en présence de l'accroissement continu et simultané de la charge et de la vitesse des trains.

C'est en 1893 — année où les 15 locomotives semblables 2.123-2.137 ont été mises successivement en service, — et dans l'année suivante, que des augmentations importantes de vitesse se sont manifestées, comme on peut le voir sur les tableaux ci-dessus. On remarque également sur ces tableaux une nouvelle accélération dans la marche de certains trains, qui s'est produite à partir du service d'été de 1895, époque à laquelle l'entraînement du personnel s'est trouvé complet. En même temps, la mise en service de la seconde série des Compound 2.138-2.157 a permis d'augmenter le nombre de trains accélérés qui atteint aujourd'hui 39 sur les différentes lignes comme le montre le tableau ci-après A.

Pour une valeur donnée de la charge remorquée, l'accroissement de la vitesse commerciale nécessite, même lorsqu'il est relativement faible, une surproduction de travail assez importante, pour les motifs suivants :

Le temps des stationnements restant le même, la réduction opérée sur la durée totale du trajet est prise entièrement sur le temps consacré à la marche, ce qui exige des démarrages francs et rapides et une vitesse moyenne de marche plus grande, aussi bien sur les rampes que sur les pentes.

Or il résulte de toutes les expériences qui ont été faites que la formule qui représente la résistance *du train remorqué* contient un terme V^2 (1).

Le travail développé au crochet de traction contient donc un terme en V^3 .

Si l'on considère en outre que le travail dû à la résistance de l'air sur les surfaces de front de la machine croît comme le cube de la vitesse, on reconnaît que tout concourt à rendre nécessaire l'augmentation parfois très notable du travail développé aux jantes des roues motrices pour la remorque du train entier.

Ce que nous venons de dire s'applique à l'accélération de la marche des trains supposés de même poids.

(1) Les expériences récentes du Chemin de fer du Nord notamment, dont les résultats ont été publiés dans la *Revue Générale* (avril 1897), ont conduit à adopter la formule suivante pour exprimer la résistance du matériel à voyageurs sans bogies, en palier et alignement droit, aux vitesses comprises entre 60 et 115 kilomètres à l'heure :

$$R = 1,6 + 0,023 V + 0,00046 V^2$$

ou sous une autre forme :

$$R = 1,6 + 0,46 V \left(\frac{V + 50}{1000} \right)$$

Dans cette formule R représente la résistance par tonne de train remorqué et V la vitesse en kilomètres à l'heure.

Tableau A. — COMPARAISON DES DURÉES DE TRAJET (NON COMPRIS LES ARRÊTS) DES TRAINS EXPRESS ET RAPIDES ENTRE LES SERVICES D'ÉTÉ 1892 ET D'HIVER 1897 ET 1898.

	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98	ÉTÉ 1892	HIVER 1897-98
Ligne de Paris à Calais (296km. 5).																								
Numéros des trains..	9 (ancien 15)		1 (ancien 7)		23 (ancien 31)		18 (ancien 0)		4 (ancien 10)		12 (ancien 32)		O Pierrefitte		P Pierrefitte		C. N. Pierrefitte		R. C.					
Durée du trajet.....	4h.01 3h.41 — 20' soit 8,3 %		4h.11 3h.41 — 30' soit 11,95 %		4h.39 4h.09 — 30' soit 11,1 %		4h.01 3h.53 — 8' soit 3,3 %		4h.33 4h.08 — 25' soit 9,1 %		4h.09 3h.49 — 20' soit 8 %		4h.11 3h.30 — 41' soit 16,3 %		4h.11 3h.35 — 36' soit 14,4 %		» 3h.32		» 3h.32		» 3h.25		» 3h.25	
Ligne de Paris à Boulogne (253km. 6).																								
Numéros des trains..	7 (ancien B).		27				(16 ancien G)		E.L.															
Durée du trajet.....	3h.27 3h. — 27' soit 13 %		» 3h.27		» 3h.27		3h.27 3h.12 — 15' soit 7,2 %		» 3h.25		» 3h.25		» 3h.25		» 3h.25		» 3h.25		» 3h.25		» 3h.25		» 3h.25	
Ligne de Paris à Lille (251 km.).																								
Numéros des trains..	309 (ancien 11)		317 (ancien 29)				306 (ancien 18)		312 (ancien 30)		320 (ancien 46)													
Durée du trajet.....	3h.40 3h.16 — 24' soit 10,9 %		3h.35 3h.05 — 30' soit 14 %		» 3h.05		3h.28 3h.05 — 23' soit 11,1 %		3h.45 3h.14 — 31' soit 13,7 %		3h.27 3h.08 — 19' soit 9,2 %		» 3h.08		» 3h.08		» 3h.08		» 3h.08		» 3h.08		» 3h.08	
Ligne de Paris à Mons et Charleroi (268km. 8).																								
Numéros des trains..	115 (anc. 25 bis Mons)		123 (anc. 33 bis Mons)		127 (anc. 33 Charleroi).		112 (anc. 16 bis Mons)		122 (anc. 34 bis Mons)		128 (anc. 48 Mons)		170		180									
Durée du trajet.....	3h.44 3h.32 — 12' soit 5,3 %		3h.52 3h.30 — 22' soit 9,5 %		3h.58 3h.43 — 15' soit 6,3 %		3h.39 3h.12 — 27' soit 12,3 %		3h.32 3h.26 — 6' soit 2,8 %		3h.51 3h.35 — 16' soit 6,9 %		» 3h.43		» 3h.28		» 3h.28		» 3h.28		» 3h.28		» 3h.28	
Ligne de Calais à Tournai (134km. 6).																								
Numéros des trains..	2200 (anc. 180)		2222 (anc. 188) par La Madeleine et Fives.		2258 par La Madeleine et Fives		2211* (anc. 183) *		2235 (anc. 183) par Lille et la Madeleine		2259													
Durée du trajet.....	2h.20 2h.10 — 10' soit 7,1 %		2h.19 1h.51 — 28' soit 20,1 %		» 1h.46		2h.22 2h. — 22' soit 15,5 %		2h.21 1h.47 — 34' soit 24,1 %		» 1h.55		» 1h.55		» 1h.55		» 1h.55		» 1h.55		» 1h.55		» 1h.55	

(*) Supprimé au départ de Lille ; les voyageurs continuent par le train 1281.

Mais, de plus, depuis l'apparition des locomotives compound, les charges des divers express n'ont cessé de croître.

On peut se rendre compte des progrès accomplis sous ce rapport en comparant les charges actuelles des trains express avec celles que l'on pouvait prendre à l'époque où le service était fait par les machines « *outrance* ». A cette époque un train composé de 26 essieux — soit une charge de 155 tonnes environ — était considéré comme lourd et, avec cette charge, on montait, *en service courant*, les longues rampes de 5^m/_m, à la vitesse de 65 kilomètres à l'heure au maximum. Même avec les « *outrance* » renforcées, comme nous l'avons dit plus haut, on devait s'interdire, sous peine de s'exposer à des retards, une composition de trains plus forte que 32 essieux.

Aujourd'hui, ainsi qu'on le verra plus loin par des exemples pris dans la pratique journalière, ce maximum de poids ancien est souvent dépassé de beaucoup malgré l'accroissement des vitesses et, dans le service courant, avec une charge de 180 à 200 tonnes, on monte les rampes de 5^m/_m à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure, vitesse qui peut, au besoin, être portée à 85 kilomètres.

Comme composition, les trains comportent fréquemment 36 à 40 essieux. Ils en ont même parfois un plus grand nombre en été et l'on peut, si cela est nécessaire, remorquer les trains de 48 essieux.

Il est utile de rechercher à quel prix ces résultats certainement intéressants ont été acquis.

1° COMBUSTIBLE.

La première année de leur apparition (1892), les machines compound ont fait le même service que les machines « *outrance* ».

Leur parcours fut.....	158.459 km.
Leur consommation.....	1.424.750 kg., soit 9 kg. par km.
Les machines <i>outrance</i> parcouraient.	5.888.387 km.
avec une consommation (1) de.....	59.849.350 kg., soit 10 ^{kg.} ,16 par km.

Ce résultat dûment constaté, M. du Bousquet résolut de consacrer l'économie à l'augmentation des vitesses.

Une économie de 1 kg. par km. de parcours ne représente en effet pour le parcours de Lille à Paris et retour que 500 kg., soit en argent 7 fr. 50 (en comptant la tonne à 15 fr., transport compris).

On a pensé qu'en réduisant la durée du parcours (aller et retour) de 40 minutes on augmenterait le nombre des voyages dans la même journée. — Un seul voyageur en plus représente 41 fr. 50 !

39 trains rapides ont donc été accélérés successivement ou créés en 1893, 1894 et 1895. — Quelle est la consommation actuelle ?

En 1896, les machines compound ont parcouru	2.732.591 km.
	et consommé 28.064.900 kg., soit 10 ^{kg.} ,27 par kilomètre ;
les machines <i>outrance</i> ont parcouru.....	5.556.104 km.
	avec une consommation de 56.668.675 kg., soit 10 ^{kg.} ,2 par kilomètre.

(1) Les consommations doivent s'entendre allumage compris.

Ces dernières ne remorquent plus cependant que des trains beaucoup plus faciles.
On peut donc dire que les augmentations de charge et de vitesse que nous avons réalisées ne nous coûtent rien comme combustible.

2° GRAISSAGE.

La consommation de graissage des compound est nécessairement plus forte que celle des machines à simple expansion.

Elle s'est élevée à 2^{kg.},84 pour cent kilomètres,
contre 1 ,74 (machines « outrance »).

Différence en plus 1^{kg.},10 par cent kilomètres.

L'huile dont nous nous servons coûtant 0 fr. 27, cette différence représente, en argent, pour le parcours de Paris-Lille $\frac{250}{100} \times 1.1 \times 0 \text{ fr. } 27 = 0 \text{ fr. } 74$. — C'est absolument insignifiant, en regard des résultats acquis.

3° RÉPARATIONS.

On ne peut se rendre compte exactement du coût kilométrique des réparations qu'au bout d'un certain nombre d'années ; toutefois les parcours annuels des compound atteignent le chiffre moyen de 72.000 kilomètres par machine-parcours extrêmement élevé-contre 36.000 (machines ordinaires) ; on peut dire qu'elles vivent double.

Aussi toutes les machines de la 1^{re} série qui ont plus de 300.000 km. de parcours ont-elles déjà subi de grandes réparations.

En outre, nous avons dû remplacer les tubes Serve de toutes les machines de la série 2.138-2.157, ce qui a forcé la dépense d'une manière anormale. (Ce remplacement a été nécessité par la manière défectueuse dont se comportaient les bouts en cuivre rouge aujourd'hui abandonnés pour ce système de tubes).

Il ne sera donc pas inutile d'indiquer quelles ont été les dépenses comparatives des deux types de machines dans ces quatre dernières années. Le chiffre des dépenses comprend 70 % des frais généraux sur la main d'œuvre.

	Kilomètres parcourus.	Dépense.	Dépense kilométrique.
Outrance.....	24.117.000	3.701.117 fr.	0 fr. 153
Compound.....	6.087.005	758.670 fr.	0 fr. 124

Il y a une différence sensible en faveur des compound ; elle ira certainement en s'atténuant avec le temps, mais rien n'indique qu'elle doive changer de sens.

Cette différence tient en grande partie à ce que les essieux coudés des machines compound moins fatigués font de beaucoup plus beaux parcours que les autres. Voici quelques renseignements à l'appui :

4° PARCOURS DES ESSIEUX COUDÉS (COMPOUND).

Deux essieux ont été retirés du service après 120.000 et 100.000 kilomètres ; ce sont ceux des machines 2.121 et 2.122 dont les congés étaient trop faibles.

Trois ont été retirés après 220.000, 280.000 et 320.000 kilomètres.

Tous les autres sont encore en service et leurs parcours sont les suivants :

PARCOURS DES ESSIEUX COUDÉS DES MACHINES COMPOUND AU 30 NOVEMBRE 1897.

NUMÉROS DES ESSIEUX.	DATE DE MISE EN SERVICE.	PARCOURS AU 30 NOVEMBRE 1897	NUMÉROS DES ESSIEUX.	DATE DE MISE EN SERVICE.	PARCOURS AU 30 NOVEMBRE 1897
13.303	1 Mai 1893	261.474	13.326	22 Août 1895	165.873
13.307	6 Juin 1893	330.855	13.327	1 Octobre 1895	204.583
13.308	16 Août 1893	295.543	13.328	12 Octobre 1895	186.823
13.310	11 Septembre 1893	348.174	13.329	16 Septembre 1895	194.643
13.311	25 Septembre 1893	284.147	13.330	23 Octobre 1895	197.168
13.312	2 Octobre 1893	280.613	13.331	31 Octobre 1895	186.720
13.313	18 Octobre 1893	296.040	13.332	14 Décembre 1895	183.248
13.314	26 Octobre 1893	262.987	13.333	24 Décembre 1895	187.195
13.315	3 Novembre 1893	254.923	13.334	10 Janvier 1896	172.990
13.316	6 Décembre 1893	271.650	13.335	15 Février 1896	143.143
13.317	20 Décembre 1893	248.830	13.336	29 Février 1896	157.137
13.318	20 Janvier 1894	301.071	13.337	7 Mars 1896	147.219
13.319	29 Janvier 1894	249.672	13.338	24 Mars 1896	133.593
13.320	5 Février 1894	271.527	13.339	31 Mars 1896	133.456
13.301	8 Juillet 1895	176.884	13.340	26 Octobre 1896	88.537
13.304	19 Septembre 1894	161.300	13.371	1 Juillet 1896	138.515
13.321	22 Juin 1895	177.682	13.372	15 Juillet 1896	140.069
13.322	1 Juillet 1895	181.752	13.373	27 Juillet 1896	64.875
13.323	17 Juillet 1895	177.309	13.302	8 Août 1896	80.157
13.324	30 Juillet 1895	167.816	13.306	12 Janvier 1897	86.822
13.325	12 Août 1895	158.081			

Sur 45 essieux mis en service depuis 1893, 5 ont été remplacés, soit 1 sur 9.

Dans le même laps de temps on a placé sous les machines " Outrance " 123 essieux, dont 41 ont été remplacés, soit 1 sur 3.

II. — Description des machines avec tender à bogies.

Les Planches VII à X représentent ces nouvelles locomotives et le tableau suivant renferme leurs principales dimensions et conditions d'établissement :

1 ^o MACHINE			
Grille.....	{	longueur horizontale.....	2 ^m 289
		largeur.....	1 ^m 005
		surface.....	2 ^{mq} 30
Hauteur intérieure du foyer.....	{	à l'avant.....	1 ^m 900
		à l'arrière.....	1 ^m 330
Corps cylindrique.....	{	diamètre intérieur moyen.....	1 ^m 350
		épaisseur des tôles.....	0 ^m 016
		hauteur de l'axe au-dessus des rails.....	2 ^m 450

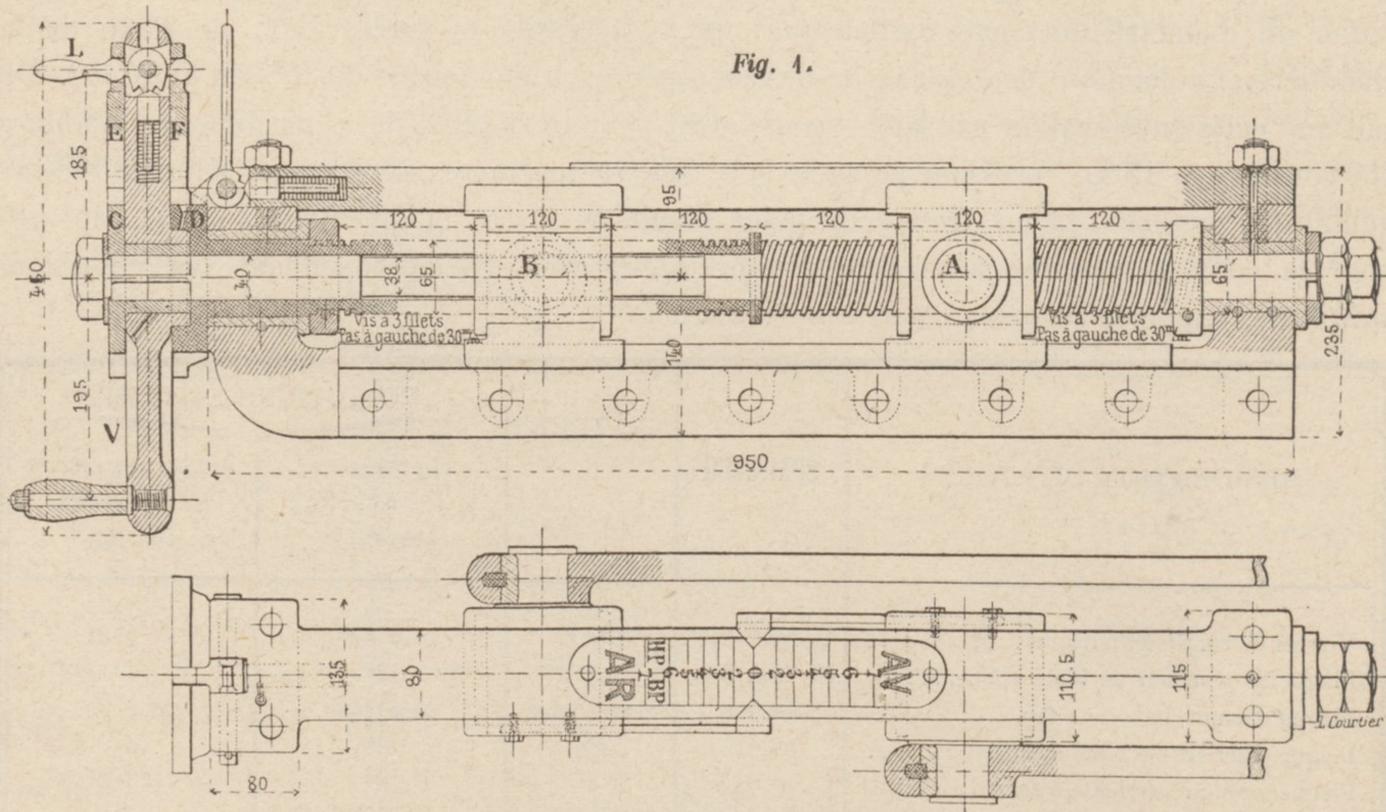
	{	nombre	107	
Tubes à air chaud (système Serve)...		diamètre extérieur	0 ^m 070	
		épaisseur.....	0 ^m 0025	
		longueur entre les plaques tubulaires	3 ^m 900	
Surface de chauffe.....		du foyer.	11 ^{mq} 35	
		des tubes à l'intérieur	164 ^{mq} 23	
		totale.....	175 ^{mq} 58	
Timbre de la chaudière.....			15 ^{kg}	
Pression maxima au réservoir intermédiaire			6 ^{kg}	
Écartement intérieur des longerons.....			1 ^m 230	
Épaisseur des longerons (fer).....			28 ^{m/m}	
Diamètre des roues au contact.....	{	1 ^{er}	1 ^m 040	
		2 ^e	1 ^m 040	
		3 ^e	2 ^m 114	
		4 ^e	2 ^m 114	
Écartement des essieux	{	1 ^{er} 2 ^e	1 ^m 800	
		2 ^e 3 ^e	2 ^m 530	
		3 ^e 4 ^e	3 ^m 000	
Écartement des essieux extrêmes.....			7 ^m 330	
Distance de l'axe du bogie à l'essieu d'arrière.....			6 ^m 430	
Rayon des manivelles d'accouplement.....			0 ^m 320	
Cylindres.....	{	Écartement d'axe en axe.....	Haute pression. 2 ^m 070	Basse pression. 0 ^m 570
		Diamètre	0 ^m 340	0 ^m 530
		Course des pistons.....	0 ^m 640	0 ^m 640
Effort de traction théorique (fonctionnement Compound).....			8.000 ^{kg}	
Effort de traction maximum théorique (avec échappement des petits cylindres dans l'atmosphère et admission directe de la vapeur de la chaudière dans les grands cylindres à la pression maxima de 6 kg).....			10.350 ^{kg}	
Poids de la machine.....	{	vide.....	46 ^t 20	
		en ordre de marche	50 ^t 46	
Répartition du poids par essieu..... (machine en charge)	{	1 ^e	} 19 ^t 45	
		2 ^e		
		3 ^e		15 ^t 51
		4 ^e		15 ^t 50
Poids utile pour l'adhérence ..			31 ^t 01	

2^e TENDER.

Diamètre des roues au contact.....		1 ^m 040	
Écartement des essieux d'un même bogie.....		1 ^m 800	
Écartement des bogies d'axe en axe.		3 ^m 850	
Approvisionnements.....	{	eau.....	18 ^{m.c.}
		combustible	5.000 ^{kg}
Poids du tender	{	vide sans agrès.....	19 ^t 84
		plein avec 300 kg d'agrès.....	43 ^t 0

Les trois nouvelles machines sont, comme celles de la série 2.138-2.157, pourvues de deux injecteurs système Friedmann de $9^m/m,5$ à débit variable et à réamorçage automatique. Sur les locomotives de la première série (2.123-2.137), on avait appliqué un gros injecteur de $9^m/m,5$ et un petit de $7^m/m,5$ destiné à fonctionner continuellement. Mais en raison du travail croissant demandé aux machines de ce type, l'alimentation continue, au moyen du petit injecteur, était devenue insuffisante et l'on a trouvé préférable de lui substituer un gros injecteur de $9^m/m,5$ qui, par la variabilité de son débit, permet de tout concilier.

2° *Mécanisme et châssis.* — Les mécanismes du propulsion et de distribution des locomotives 2.158-2.160 sont semblables à ceux des locomotives 2.123-2.137. Toutefois, en ce qui concerne le changement de marche, la disposition suivante, plus simple que la première, a été adoptée pour les nouvelles machines (Fig. 1). Cette disposition est due à M. de Glehn, administrateur délégué de la Société Alsacienne.



Les deux vis de changement de marche sont montées suivant le même axe, la partie lisse de la vis d'avant passant à l'intérieur de la vis d'arrière, comme dans un fourreau. L'écrou A commande l'arbre de relevage du mouvement de distribution de haute pression et l'écrou B l'arbre de relevage de la basse pression.

Le mécanicien peut mouvoir à sa volonté, l'une ou l'autre des deux vis séparément, ou les deux ensemble, par la manœuvre du même volant V. Ce volant est monté à frottement doux sur une bague en fer calée à l'extrémité de la partie lisse de la vis d'avant, bague qui fait corps avec un disque C pourvu de crans à sa périphérie. La tête de la vis creuse d'arrière se termine par un disque D portant des crans semblables.

Enfin un levier L, articulé sur un axe placé dans le plan médian du volant V, commande deux verrous E, F, qui peuvent être enclenchés ou déclenchés à volonté sur les crans des deux disques dont il vient d'être question.

Pour la position du levier L indiquée sur la figure, les deux verrous sont enclenchés à moitié, de sorte que la manœuvre du volant V déplace à la fois, dans un même sens, les deux écrous de changement de marche. Lorsqu'on agit sur la poignée du levier L de manière

à l'incliner vers l'extérieur, le verrou E se déclenche tandis que le verrou F s'enclenche à fond. Dans ces conditions, la rotation du volant de changement de marche ne fait mouvoir que la vis d'arrière, celle du mécanisme de basse pression. Mais si, au contraire, la poignée du levier L est inclinée vers l'intérieur, le verrou E se trouve seul enclenché et la rotation du volant n'entraîne que la vis d'avant, qui commande le mécanisme de haute pression.

Le châssis n'a pas subi de modification sensible. Toutes les pièces de rechange sont donc les mêmes pour les 40 locomotives 2.121-2.160. Par suite de l'allongement de la boîte à feu, le cadre du bas de foyer à l'arrière se trouve placé directement au-dessus de l'axe de l'essieu, disposition qui évite l'introduction des cendres à l'intérieur des boîtes à graisse et l'échauffement de celles-ci.

Les trois nouvelles machines ont été munies, lors de leur construction, du frein Westinghouse à action rapide, avec freinage des quatre roues accouplées. Enfin sur ces machines, l'air comprimé emprunté au réservoir principal du frein Westinghouse, a été substitué à la vapeur pour la commande du servo-moteur qui sert à produire, à la volonté du mécanicien, l'échappement des cylindres de haute pression, soit au réservoir intermédiaire, soit directement dans l'atmosphère. Cette modification a été faite pour éviter l'inconvénient des fuites de vapeur et d'eau qui, sur les précédentes locomotives, se manifestaient fréquemment à la garniture de la prise de vapeur du servo-moteur.

^{3.}
3° *Tender*. — Le tender diffère des précédents, qui sont à trois essieux, en ce que son châssis est porté par deux bogies articulés (Pl. X).

Les 16 mètres cubes d'eau, que renferment les tenders à trois essieux des locomotives construites antérieurement, étant devenus insuffisants pour les longs parcours effectués sans arrêt, la capacité des caisses a été portée à 18 mètres cubes.

Le poids du tender en charge s'est ainsi trouvé porté de 33 tonnes à 41 tonnes, mais la résistance du tender à bogies n'étant que les 0,8 du tender sur 3 essieux (Voir *Revue Générale* N° d'avril 1897), la résistance à la traction est demeurée la même ($41 \times 0,8 = 32,8$).

On a adopté une disposition nouvelle pour l'attelage entre locomotive et tender, dans le but de le rendre très flexible et de faciliter l'inscription des deux véhicules dans les courbes. Cette disposition consiste dans le remplacement des deux ressorts spirales de tampons de connexion, habituellement employés, par un ressort à lames dont la chape est articulée sur la cheville d'attelage et dont les extrémités servent de butées aux tiges des tampons.

Les 8 roues du tender à bogies sont munies de sabots de frein. L'ensemble de la machine et du tender est donc pourvu d'un freinage énergique.

Aux très grandes vitesses, les remous atmosphériques qui se produisent habituellement entre le tender et le fourgon de tête du train sont une cause de résistance appréciable. Pour diminuer cette résistance, on a réduit au minimum l'intervalle entre les deux véhicules, en terminant le tender à l'arrière par une seule paroi verticale, sur laquelle les tampons de choc ne font saillie que de la quantité strictement nécessaire.

III. — Observations sur les résultats pratiques fournis par les locomotives compound à grande vitesse de la Compagnie du Nord.

1° *Perfectionnements successifs de ces machines*. — Dans l'espace de dix ans, la Compagnie du Nord a apporté à ses locomotives compound à grande vitesse des modifications successives qui sont résumées ci-après.

SÉRIES DE MACHINES	OBSERVATIONS
701	Compound à 4 cylindres, à deux essieux moteurs indépendants. Chaudière à 11 kgs. Machine étudiée par M. A. de Glehn, Ingénieur et Administrateur de la Société Alsacienne de Constructions mécaniques, construite par cette Société qui l'a fait figurer à l'Exposition universelle de 1889 à Paris.
2.121 — 2.122	Elévation à 14 kgs du timbre de la chaudière. Permutation des cylindres de haute et de basse pression. Augmentation des volumes de cylindres. Disposition permettant l'échappement direct des cylindres de haute pression dans l'atmosphère. Application d'un bogie à l'avant. Accouplement des deux essieux moteurs. La locomotive 2.122 a figuré à l'Exposition de Chicago en 1893.
2.123 — 2.137	Application de tubes à ailerons système Serve.
2.138 — 2.157	Elévation à 15 kgs du timbre de la chaudière. La locomotive 2.157 a figuré à l'Exposition de Rouen en 1896.
2.158 — 2.160	Augmentation de la surface de grille, de la surface de chauffe et du diamètre du corps cylindrique. Emploi de la tôle d'acier pour la construction de la chaudière. Adoption du type de tender à deux bogies. La machine 2.160 a figuré à l'Exposition de Bruxelles en 1897.

Enfin le tableau suivant renferme, à titre de comparaison, les dimensions principales des locomotives compound à quatre cylindres depuis leur origine :

DÉSIGNATION DES MACHINES.....	701	2.121-2.122	2.123-2.137	2.138-2.157	2.158-2.160
ANNÉE DE LA CONSTRUCTION.....	1885	1891	1893	1895	1896
Nombre d'essieux moteurs accouplés..... »	2	2	2	2	2
Timbre de la chaudière Kg	11 Kg	14	14	15	15
Surface de grille (projection horizontale)..... m ²	2,27	2,04	2,04	2,04	2,30
Surface de chauffe du foyer m ²	9,50	10,91	10,91	10,91	11,35
Tubes	Nombre..... »	204	202	94	94
	Nature des tubes..... »	lisses à l'intérieur.	lisses à l'intérieur.	à ailerons.	à ailerons.
	Diamètre extérieur..... m	0,045	0,045	0,070	0,070
	Longueur entre les plaques tubulaires. m	3,560	3,900	3,900	3,900
	Surface intérieure m ²	93,53	98,98	144,43	144,43
à air chaud.	Surface extérieure m ²	102,70	111,40	80,62	80,62
	Section de passage des gaz à l'entrée des tubes..... m ²	0,2312	0,2290	0,2750	0,2750
	Section de passage des gaz dans le corps des tubes..... m ²	0,2562	0,2537	0,2820	0,2820
Diamètre intérieur moyen du corps cylindrique..... m	1,2365	1,260	1,260	1,256	1,350
Volume d'eau avec 0 ^m ,10 au-dessus du ciel..... m ³	3,090	3,430	3,430	3,430	4,010
Diamètre des cylindres.....	Haute pression..... m	0,330	0,340	0,340	0,340
	Basse pression..... m	0,460	0,530	0,530	0,530
Course des pistons..... m	0,610	0,640	0,640	0,640	0,640
Diamètre des roues motrices au contact..... m	2,100	2,114	2,114	2,114	2,114
Poids adhérent..... t	27,60	30,50	30,52	30,77	31,01
Poids de la locomotive en ordre de marche..... t	37,80	47,80	48,52	48,93	50,46

2° RÉSULTATS D'EXPLOITATION.

Les trois locomotives 2.158-2.160 construites en 1896 sont affectées au même service que les précédentes ; elles le font avec plus de facilité encore. Malgré l'élévation du centre de gravité de la chaudière, leur stabilité est très bonne. Celle de leurs tenders à bogies, qui procure une grande aisance pour l'entrée et la sortie des courbes, est également excellente.

Pour bien mettre en évidence l'aptitude de ces locomotives à remorquer les trains particulièrement lourds à des vitesses très élevées, nous citerons quelques exemples pris dans le service courant. La marche entre Aulnoye et Paris du train 122 (Charleroi-Mons-Paris) du 30 septembre 1896, qui a été fait par la machine 2.159, mérite d'être citée en premier lieu. L'affluence des voyageurs à cette date, qui a précédé de quelques jours l'arrivée des Souverains Russes à Paris, était considérable et, afin de satisfaire aux exigences du service, on a dû atteindre, pour le train en question, la composition la plus forte possible, soit 48 essieux (maximum autorisé par le règlement) répartis sous 23 voitures.

Ce « Rapide » comportait comme capacité de trafic :

- 15 voitures offrant 515 places aux voyageurs ;
- 7 fourgons pouvant recevoir 19 tonnes de bagages ;
- 1 bureau ambulante de la Poste.

L'utilisation a été la suivante :

390 voyageurs sont descendus à Paris, ce qui représente 76 % du nombre des places offertes. D'autre part, les 7 fourgons contenaient plus de 400 colis-bagages et, en outre, les sacs de dépêches postales internationales qui ne trouvent pas place dans le bureau-poste spécial.

Voici d'ailleurs le relevé exact du poids du train :

Poids réel des véhicules vides.....	253t.,37
Poids des voyageurs (y compris le poids des bagages déposés dans les filets).....	39t.,00
Poids des bagages enregistrés et des sacs de dépêches de la poste.....	12t.,00
Poids du train remorqué.....	304t.,37
Poids de la locomotive en ordre de marche.....	50t.,46
Poids du tender en charge.....	41t.,04
Poids du train entier.....	91t.,50
	395t.,87

Voici maintenant quelle a été la marche de ce train qui a été fait en gagnant pendant la marche, 8 minutes sur le temps fixé par l'itinéraire :

DISTANCES		STATIONS	DURÉE DES TRAJETS	VITESSE MOYENNE DE MARCHÉ EN KILOMÈTRES A L'HEURE
DE PARIS	PARTIELLES			
216	62	Aulnoye.....	43 minutes.	$\frac{62 \times 60}{43} = 86$ kilomètres 5.
154		Saint-Quentin.....		
0	154	Paris.....	117 minutes.	$\frac{154 \times 60}{117} = 79$ kilomètres.

Les vitesses qui figurent dans ce tableau ont été obtenues en divisant l'espace parcouru par le temps total. Il est à remarquer que, durant le trajet de St-Quentin à Paris le train a subi deux

ralentissements occasionnés par les travaux de la voie. En évaluant, selon la règle habituelle, à 5 minutes le temps perdu de ce fait — évaluation inférieure à la réalité — on trouve que si la voie avait été libre entre St-Quentin et Paris ce parcours aurait été effectué en 112 minutes, ce qui correspond à une vitesse moyenne de marche égale à 82 km, 5 à l'heure.

Eu égard à la charge remorquée de 304 tonnes, ces vitesses moyennes de 86 km. 5 et 82 km. 5, réalisées sur les deux fractions du parcours, sont remarquables. Elles dénotent la production, au crochet de traction du tender, d'un travail considérable et méthodiquement soutenu pendant un laps de temps prolongé.

Nous avons indiqué la marche de ce train 122 du 30 septembre 1896, parce que la charge remorquée a atteint le maximum autorisé. Mais il est essentiel d'ajouter que les locomotives compound du *Nord* sont appelées à fournir fréquemment dans leur service habituel, aux époques où le trafic des voyageurs est très important, un travail approchant beaucoup de celui que nous avons signalé. Il n'est pas rare, en effet, de voir le train 122, comprenant 42 à 46 essieux, partir d'Aulnoye avec un retard assez prononcé, à cause de la réunion des deux trains N° 122 de Charleroi et de Mons — et arriver à l'heure à Paris.

Nous citerons encore comme exemples pris dans le service courant les trains 1 et 18 du 27 février 1897, dont la marche a été très rapide. Ces trains ont été remorqués par la locomotive 2.157 (3^e série).

Le train 1 était composé comme suit :

Nombre de véhicules.....	15
Nombre d'essieux.....	32
Poids des véhicules du train.....	170T
Poids des voyageurs et des bagages.....	28T
Charge totale remorquée.....	198T

Malgré les conditions atmosphériques défavorables à l'adhérence pendant la majeure partie du trajet, un retard de 5 minutes au départ de Paris a été regagné et au delà sur la marche ; la vitesse commerciale entre les points extrêmes a été de 77 km. 6 à l'heure au lieu de 75 km. 9, vitesse prévue par l'itinéraire. Les rampes prolongées de 5^m/_m par mètre ont été parcourues à la vitesse moyenne de 80 kilomètres. La vitesse soutenue en palier a varié de 90 à 95 kilomètres.

Ces résultats fournis par une des locomotives compound de la 3^e série sont intéressants, mais au train 18, retour du précédent, la même locomotive 2.157 a fourni un travail plus remarquable encore. Le train 18 du 27 février avait la composition suivante :

Nombre de véhicules.....	17
Nombre d'essieux.....	38
Poids des véhicules du train.....	199T
Poids des voyageurs et des bagages.....	36T
Charge totale remorquée.....	235T

En raison du retard qui s'est produit au départ de Calais-Ville, le mécanicien a dû, pour arriver à l'heure à Paris, gagner 17 minutes sur la marche, de sorte que la vitesse commerciale qui, d'après l'itinéraire, doit être de 75 km. 5 entre les points terminus a été en réalité de 81 km. 7. Il est à remarquer que 13 minutes ont été gagnées entre Calais et Amiens — premier point d'arrêt. — Il ne restait donc au départ de cette gare que 4 minutes à regagner. Les principales

observations qui se rapportent à la marche de ce train sont consignées ci-après. Au kilomètre 290, la rampe de $8^m/m$ qui, sur une étendue de 12 kilomètres précède la station de Caffiers, a été abordée à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure environ et, lorsqu'on est arrivé au sommet, la vitesse était encore de 65 kilomètres.

Pendant ce trajet l'effort au crochet de traction du tender a été en moyenne de 2.600 kg. Il a atteint 2.950 kg. au haut de la rampe. Sur les pentes de $8^m/m$ qui suivent la dite station, la vitesse qui s'est maintenue à 110 kilomètres à l'heure, entre les kilomètres 273.5 et 270, s'est élevée ensuite jusqu'à 119 km.

Enfin, entre Etaples et Ailly-sur-Somme, sur un profil qui a la configuration générale d'un palier de 50 kilomètres, suivi d'une faible rampe de 1 ou $2^m/m$ sur un parcours de 35 kilomètres, la vitesse a été constamment maintenue entre 90 et 95 kil., l'effort au crochet de traction du tender étant de 1.300 kg. environ. Eu égard à l'importance de la charge remorquée (235 tonnes) ce résultat est des plus concluants. Il met bien en évidence la qualité que possèdent les locomotives compound de la Compagnie du Nord, de développer sans difficulté pendant un temps très prolongé, le travail nécessaire pour le remorquage des trains lourds et très rapides.

Parmi les trains dont la marche est journellement très rapide, on peut citer le train 12, constamment en retard au départ de Calais par suite de l'arrivée tardive du paquebot.

Voici un exemple choisi au hasard :

Le train 12 (Calais-Paris), du 27 mars 1897, avait au départ de Calais, 20 minutes de retard. Il était composé de 15 voitures avec 30 essieux (charge 175 tonnes; voyageurs et bagages compris). Il a été remorqué jusqu'à Amiens par la machine 2.139 (2^e série).

Ce trajet, qui comporte deux arrêts, l'un à Boulogne-Tintelleries et l'autre à Abbeville, a été effectué en 2 heures au lieu de 2 h. 08, temps prévu par l'itinéraire, malgré une perte de temps de 1 minute à Abbeville et deux ralentissements exigés par un parcours en voie unique, entre cette gare et Pont-Rémy.

Le parcours total étant de 164 kilomètres, la vitesse commerciale ressort à 82 kilomètres à l'heure, au lieu de 76 kil. 8, vitesse calculée d'après l'itinéraire.

Au départ d'Amiens, le train 12 du 27 mars, avait 16 voitures et pesait 186 tonnes, y compris le poids des voyageurs et des bagages. Ce train remorqué par la locomotive 2.158 (4^e série) est arrivé à l'heure à Paris. On avait donc regagné 20 minutes sur la marche depuis Calais, dont 8 minutes entre Calais et Amiens et 12 entre Amiens et Paris. Ce dernier parcours, qui comporte un arrêt à Creil, est le plus remarquable. Le trajet (130 kil. 6) s'est effectué en 1 h. 29 au lieu de 1 h. 41, temps accordé par l'itinéraire. La vitesse commerciale réelle a été de 88 kilomètres à l'heure au lieu de 77 kil. 5, vitesse calculée d'après l'itinéraire.

Pour réaliser cette vitesse commerciale, il a fallu atteindre une vitesse moyenne de marche très élevée, qui a été enregistrée exactement, le train en question, étant un de ceux sur lesquels ont eu lieu les expériences mentionnées plus loin. Nous nous bornerons à signaler que dans le trajet de Creil à Paris, la montée des rampes de $5^m/m$, du kil. 41 au kil. 27.5 (point culminant) a eu lieu à la vitesse soutenue de 85 kil. à l'heure. A la descente, sur les pentes de $5^m/m$, on a atteint progressivement 120 kil. à l'heure, vitesse qui a été maintenue d'une façon très régulière entre les kil. 16 et 8, et qui n'est entrée en décroissance qu'en raison de l'approche de Paris.

La Fig. 2 représente la courbe des vitesses de ce train entre Creil et Paris.

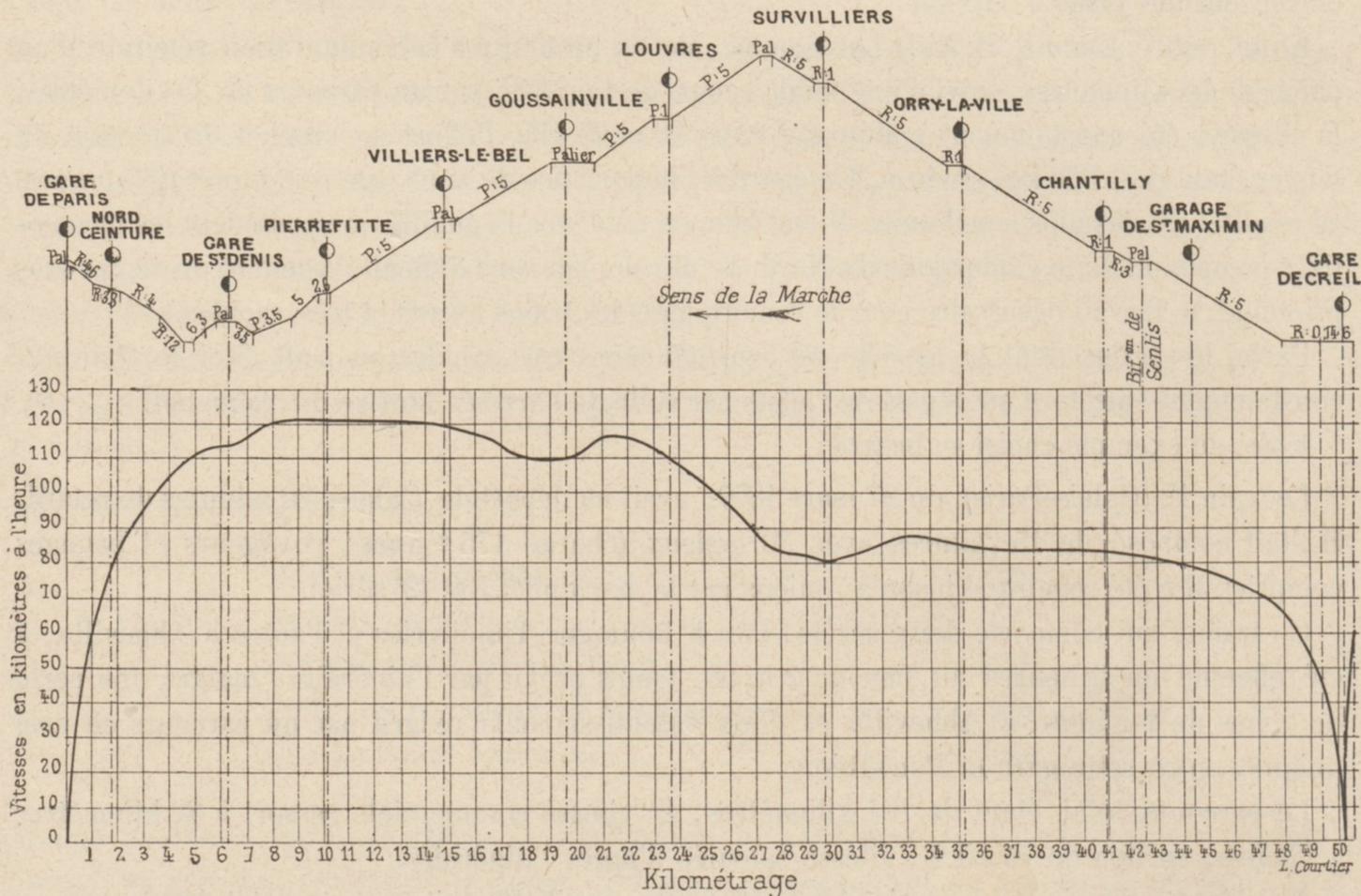
Eu égard à la charge remorquée de 186 tonnes, ces résultats obtenus fréquemment au

train 12, méritaient d'être signalés d'une manière particulière, mais il ne faudrait pas croire que ce sont les vitesses maxima réalisées avec nos machines. Il nous arrive fréquemment avec des trains de 160 tonnes, de franchir en 1 h. 20 la distance de Paris à Amiens (130 kil. 6).

C'est une vitesse brute de 98 kilomètres.

Fig. 2. — COURBE DES VITESSES DU TRAIN 12, DU 27 MARS 1897.

(16 voitures : 186 tonnes).



Trains de marchandises. — On vient de voir ce que les locomotives compound peuvent donner dans le service des express, à très grande vitesse. M. du Bousquet a voulu aussi éprouver la puissance de ces machines et étudier les conditions inverses de celles de leur travail habituel, en les faisant participer, conjointement avec des locomotives à marchandises, à un service spécial de trains de houille à marche accélérée, qu'il a établi et prolongé pendant deux mois, à titre d'essai, entre Lens et La Plaine-Saint-Denis. Il est à peine besoin de dire qu'en raison de l'adhérence relativement faible des locomotives à grande vitesse, on a dû faire un usage fréquent du sable.

Précédemment un premier train de ce genre N° 4024, composé de 44 wagons pesant 634 t. 2 avait été remorqué par la machine 2.159, entre Creil et La Plaine, le 3 décembre 1896. On a obtenu sur une rampe de 5 m/m par mètre du kilomètre 39 au kilomètre 38 la vitesse moyenne de 38 kil. 5 à l'heure. La production de la chaudière a été plus que suffisante pour soutenir cette marche avec l'admission à 65 % qui avait été choisie pour les cylindres de haute pression.

Voici le détail de la marche de l'un des trains de houille dont il vient d'être question. Ce train (LP) a été remorqué, par la machine 2.159, le 10 décembre 1896, de Lens à La Plaine (par Beaumont et Épluches).

Ce train, pesant 682 t. 8, était composé de 45 véhicules, dont 43 wagons de charbon, un fourgon et un wagon dynamomètre.

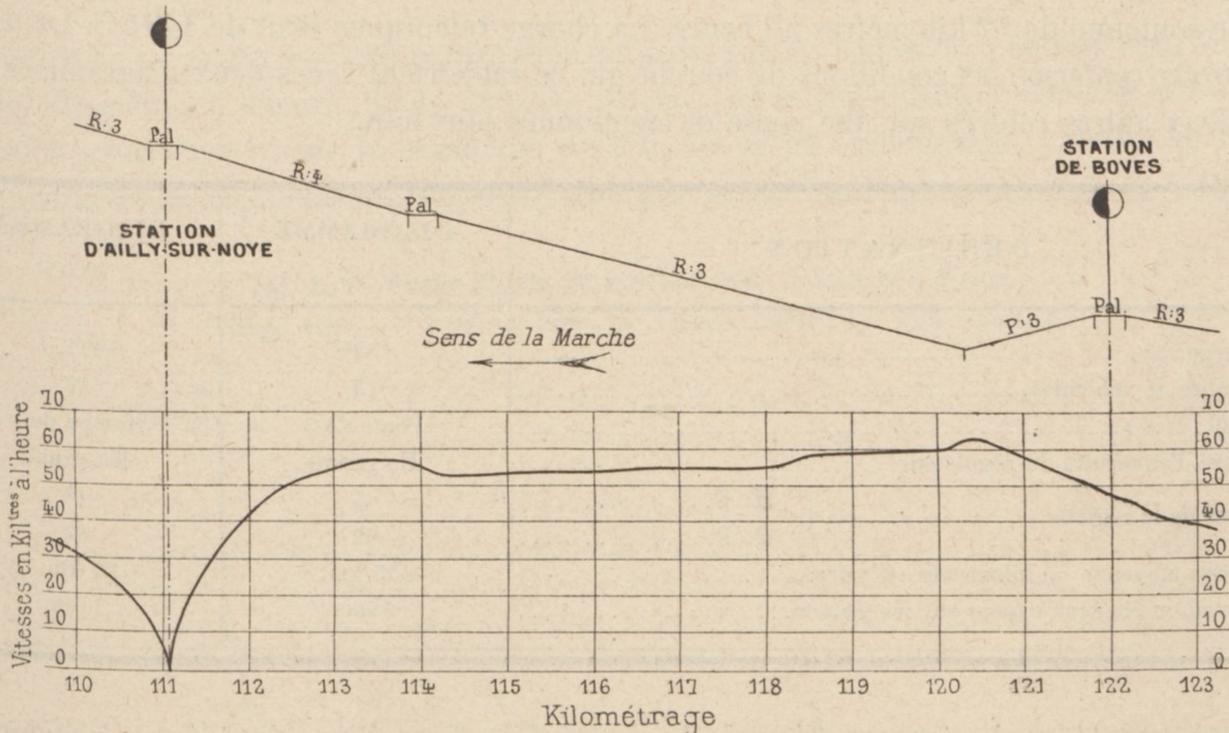
Cette charge est celle que prennent, à faible vitesse, sur la ligne en question les locomotives à huit roues couplées. D'après l'itinéraire du train, qui ne comportait qu'un seul arrêt de 15 minutes à Ailly-sur-Noye pour prise d'eau, la durée totale du trajet devait être de 6 h. 25, pour un parcours de 226 kil. 7, ce qui correspond à une vitesse commerciale de 35 kil. 3 à l'heure. Mais il y a lieu de défalquer du temps prévu par l'itinéraire :

Pour retard au départ.....	10 minutes.
Pour arrêt imprévu à Longueau (retrait d'un wagon).....	20 —
Pour arrêt imprévu à Creil.....	9 —
Pour avance à l'arrivée de La Chapelle.....	5 —
TOTAL.....	44 minutes.

Le trajet a donc été effectué en 5 h. 41 avec une vitesse commerciale de 40 kilomètres à l'heure.

La marche de ce train a été très remarquable entre les stations de Boves et d'Ailly-sur-Noye. La Fig. 3 représente la partie du graphique afférente à ce parcours.

Fig. 3. — COURBE DES VITESSES DU TRAIN L. P., DU 10 DÉCEMBRE 1896.
(45 véhicules : 683 tonnes).



La vitesse de 55 kilomètres à l'heure qui a été obtenue sur les rampes de 3 et 4 m/m du kilomètre 118 au kilomètre 113 aurait pu être soutenue plus longtemps si l'on n'avait pas été obligé de fermer le régulateur pour l'arrêt prévu à Ailly-sur-Noye.

IV. — Expériences.

Il était intéressant de se rendre un compte exact de la puissance des nouvelles locomotives et d'étudier les conditions de leur distribution aux vitesses très élevées que ces machines peuvent atteindre couramment.

Dans ce but, M. du Bousquet a fait procéder à des expériences nombreuses et variées. Notamment, on a relevé des diagrammes dans des conditions de marche très diverses. Ces relevés ont eu lieu au moyen de l'*auto-indicateur* de la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest, que M. Clérault, Ingénieur en chef du Matériel et de la Traction de cette Compagnie a bien voulu, très obligeamment, mettre à notre disposition.

Les expériences ont eu lieu avec le concours dévoué de M. Brillié, Inspecteur du Matériel et de la Traction des Chemins de fer de l'Ouest, qui a dirigé l'installation de l'*auto-indicateur* sur la locomotive 2.158 et suivi les essais dans tous leurs détails.

Les difficultés inhérentes aux systèmes d'indicateurs de pression employés jusqu'ici pour relever les diagrammes sur les locomotives, croissent avec la vitesse au point de devenir insurmontables lorsqu'on atteint 100 kilomètres à l'heure. L'*auto-indicateur* qui a été décrit dans la *Revue Générale* (1) est susceptible de simplifier cette question. Il a, en effet, permis d'obtenir des diagrammes aux plus grandes vitesses.

Les documents déjà nombreux recueillis dans ces expériences ont fait l'objet d'une étude minutieuse de la distribution de la vapeur. Les résultats de cette étude seront publiés prochainement dans la *Revue*. Nous nous bornerons donc ici à reproduire quelques diagrammes pris dans des conditions de marche remarquables et à dégager d'un examen sommaire de l'ensemble des résultats, les principaux enseignements qu'ils comportent.

1° *Marche en rampe.* — La Figure 4 représente la transformation des deux diagrammes de haute et de basse pression relevés au train 12 du 15 janvier 1897, sur rampe de 5^m/_m à la vitesse soutenue de 92 kilomètres à l'heure. La charge remorquée était de 143 t. 5. Le tableau ci-dessous renferme les conditions de marche qui se rapportent à ces deux diagrammes ainsi qu'à deux autres relevés sur une pente et mentionnés plus loin.

DÉSIGNATION	DIAGRAMME	DIAGRAMME
	n° 17	n° 11
Charge.....	152 ^t	143 ^t , 5
Nombre de véhicules.....	13	13
Profil.....	Pente de 5	Rampe de 5
Degré d'ouverture du régulateur.....	En grand	En grand
Crans de la réglette.....	H. P.....	48
	B. P.....	62
Vitesse moyenne en kilomètres à l'heure.....	125 km.	92 km.
Travail en chevaux vapeur sur les pistons.....	1200	1100

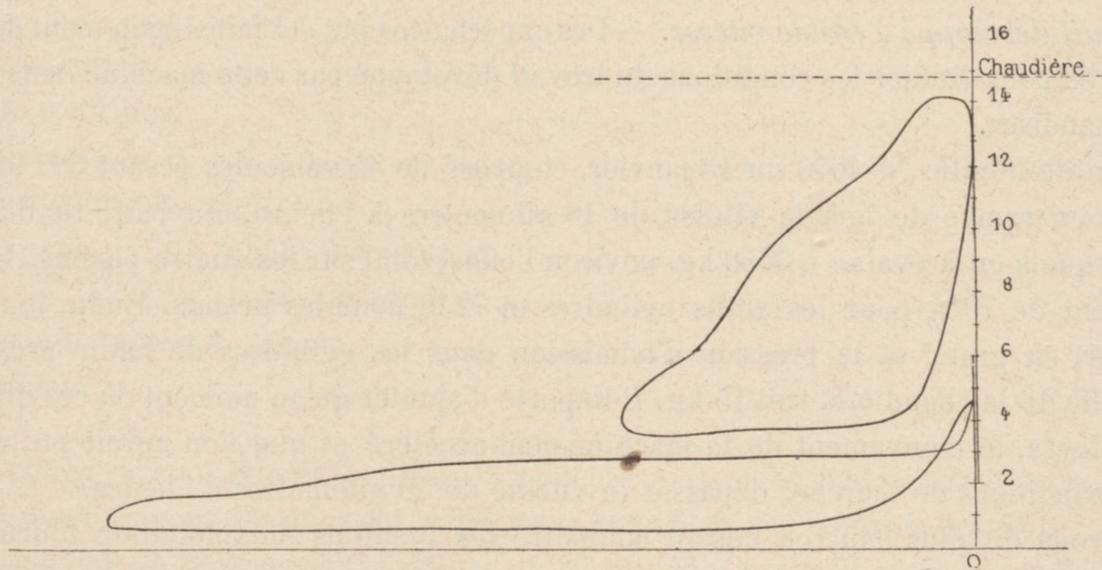
On a constaté que les travaux développés sur les deux faces d'un même piston n'étaient pas entièrement semblables, comme cela peut arriver sur les locomotives, même lorsque les distributions sont convenablement réglées. En tenant compte de cette circonstance, le travail indiqué de la machine, calculé d'après les diagrammes de la Figure 4, peut être évalué à 1100 chevaux, dont 650 chevaux produits dans les cylindres de haute pression et 450 dans les cylindres de détente.

La vitesse de 92 kilomètres à l'heure a été notablement dépassée sur les rampes de 5^m/_m. Ainsi

(1) Numéro de Septembre 1896.

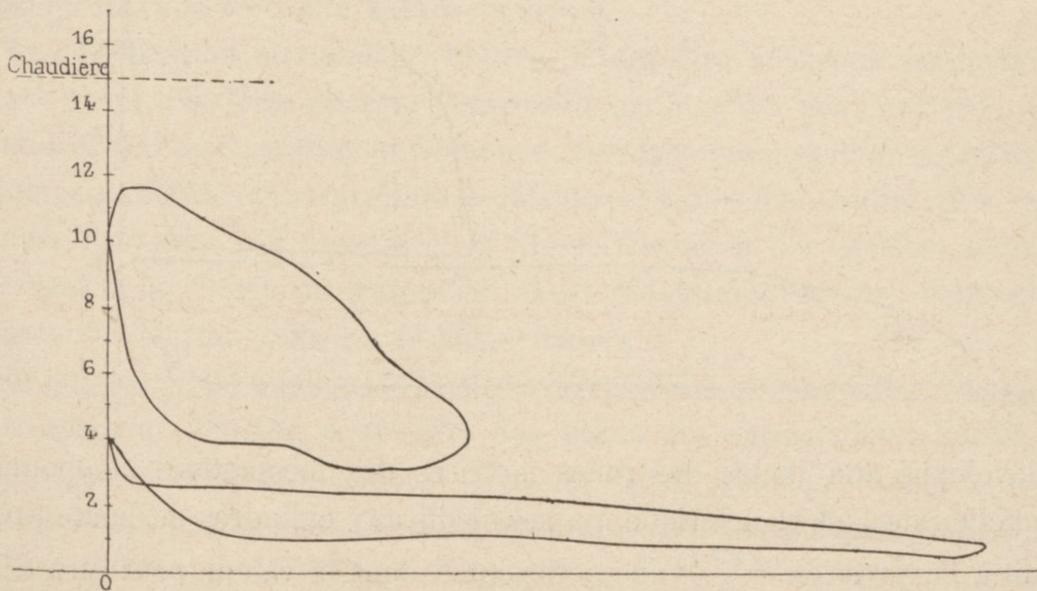
au train 1 du 8 janvier, avec 15 véhicules pesant ensemble 177 t., on a atteint sur un parcours de plusieurs kilomètres, la vitesse uniforme de 96 kilomètres à l'heure. On a même pu atteindre avec ce même train, celle de 100 kilomètres à l'heure, du kilomètre 10, au kilomètre 11,5. Mais il n'a pas été relevé de diagrammes à ce moment.

Fig. 4. — TRAIN 12, DU 15 JANVIER 1897, D'AMIENS A PARIS.
Charge 143 t.,5. — Rampe de 5^{mm}. — Vitesse 92 km à l'heure. — 1100 chevaux.
(Diagramme N° 11).



2° *Marche en pente.* — On a réalisé sans difficulté sur les pentes de 5 millimètres, la vitesse de 125 kilomètres à l'heure, limite extrême admise par le règlement, y compris la tolérance accordée généralement sur le maximum de 120. On aurait certainement pu aller au delà de cette limite. Nous reproduisons, Figure 5, une des paires de diagrammes H.P. et B.P. trans-

Fig. 5. — TRAIN 12, DU 20 JANVIER 1897, D'AMIENS A PARIS.
Charge 152 t. — Pente de 5^{mm}. — Vitesse 125 km. — 1200 chevaux.



formés d'après ceux qui ont été relevés à cette vitesse de 125 kilomètres à l'heure. Le retard à l'admission qui semblerait exister dans le petit cylindre ne provient pas de la distribution elle-même. Quoi qu'il en soit, on peut évaluer le travail indiqué à 1200 chevaux approximativement, dont 800 chevaux produits dans les cylindres de haute pression et 400 dans les grands

cylindres. L'étude qui sera faite du rendement de la locomotive expérimentée, pour toute l'échelle des vitesses et pour différents profils, fera ressortir la part très importante de résistance, qui, aux vitesses de 120 à 125 kilomètres à l'heure, incombe à la réaction de l'air sur les différentes surfaces de front de la machine.

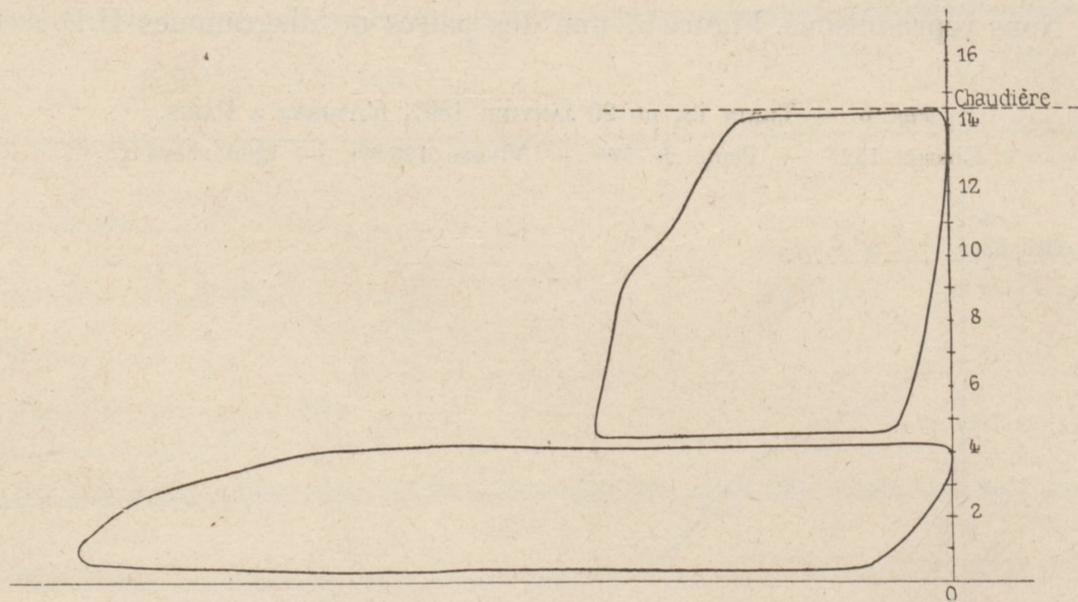
Enfin, nous examinerons plus loin, tout au moins d'une manière sommaire, l'influence que l'indépendance des distributions des deux groupes de cylindres, peut avoir sur les résultats pratiques dont nous venons de fournir des exemples pour la marche à grande vitesse.

3° *Travail développé à faible vitesse.* — Des expériences ont été faites également sur la locomotive 2.158 pour étudier les conditions du travail développé par cette machine dans le service des marchandises.

Au train de houille N° 4070 du 13 janvier, composé de 45 véhicules pesant 682 tonnes, il a été relevé en rampe de 5, à la vitesse de 18 kilomètres à l'heure, une paire de diagrammes d'après lesquels on a évalué à 5650 kg. environ l'effort total sur les quatre pistons. Les admissions étaient de 70% pour les petits cylindres et 72% pour les grands. Enfin, le régulateur était ouvert en grand et la pression d'admission dans les cylindres de haute pression était égale à celle de la chaudière, soit 15 kg. Il importe d'ajouter qu'au moment où ces diagrammes ont été relevés, le mouvement de la machine était accéléré et que l'on aurait pu, en restant dans ces conditions de marche, dépasser la vitesse de 40 kilomètres à l'heure.

Nous avons dit plus haut en faisant connaître les résultats d'exploitation fournis par ces machines, que l'admission de 65% aux petits cylindres pouvait être employée d'une façon continue et qu'elle avait procuré une vitesse de 38 kilomètres à l'heure.

Fig. 6. — TRAIN 4070, DU 27 JANVIER 1897, DE LENS A LA PLAINE.
(Diagramme N° 28).



L'effort développé aux jantes des roues motrices des locomotives compound, peut être évalué en fonction de l'effort théorique qui serait dû aux cylindres de haute pression, seuls, en appliquant à l'expression $\frac{p d^2 l}{D}$ un coefficient K dont la valeur peut être déterminée au moyen des diagrammes d'indicateur. Pour les machines qui nous occupent l'effort théorique est égal à 5.250 kg. Pour exprimer au moyen de la formule $F = \frac{K p d^2 l}{D}$ l'effort développé aux jantes de la machine 2.158 dans le cas présent, il faudrait donc attribuer à K la valeur $\frac{5650}{5250} = 1,07$. Nous ajouterons que la valeur de F ainsi calculée est un peu inférieure au maxi-

num pratique. En effet les diagrammes qui ont servi pour cette évaluation ont été relevés avec l'admission de 70% aux petits cylindres, tandis qu'en plaçant le changement de marche à fond de course on obtient une admission de 76% (1). La valeur du coefficient K donnant l'effort maximum pratique évalué aux jantes, serait donc voisine de $K = 1,1$.

Les expériences ont fourni également des indications sur le travail développé d'une façon soutenue sur les rampes, lorsqu'on utilise ces locomotives d'express comme machines à marchandises. Les diagrammes de la Figure 6 et le tableau suivant se rapportent à ces conditions de marche :

Charge remorquée.....	652 tonnes
Nombre de véhicules.....	43
Profil de la voie.....	rampe de 3 ^m /m 5
Degré d'ouverture du régulateur.....	en grand
Crans de marche.....	{ haute pression..... 60
	{ basse pression..... 65
Vitesse en kilomètres à l'heure.....	38
Travail indiqué.....	790 chevaux

(Le train comportait au départ de Lens 45 véhicules pesant ensemble 682 tonnes, mais on a dû différer deux wagons en cours de route, pour chauffage des boîtes à graisse).

Le travail indiqué de 790 chevaux n'est pas un maximum. On aurait pu dépasser l'admission de 60% aux petits cylindres, mais il est certain que le travail obtenu avec la production maximum de la chaudière à petite vitesse, est inférieur à 900 chevaux, tandis que dans la marche à grande vitesse, sur rampe de 3 à 4 ^m/m, les mêmes machines développent facilement 1100 chevaux sur leurs pistons. Les causes de cette différence consistent pour une faible part dans la différence des productions maxima de la chaudière à grande ou à petite vitesse. Elles résident surtout dans l'utilisation de la vapeur qui n'est plus aussi bonne dans le second cas, les conditions d'établissement de la machine et notamment le diamètre des roues motrices n'étant plus appropriés, ainsi qu'on va le voir, à la nature du service.

En premier lieu l'admission aux petits cylindres devant être beaucoup augmentée dans la marche lente avec une très forte charge, l'expansion totale, qui a pour valeur le rapport du volume des cylindres de basse pression au volume de la vapeur admise dans les petits cylindres se trouve notablement réduite et le travail de la détente est moins bien utilisé. En second lieu le nombre de tours de roues par seconde et la vitesse moyenne des pistons étant diminués proportionnellement à la vitesse de translation, il est indubitable que les condensations de vapeur sont augmentées surtout dans les grands cylindres.

Les remarques qui précèdent expliquent l'infériorité relative que la machine, comparée à elle-même présente lorsqu'on l'utilise pour faire des trains de marchandises lourds à vitesse accélérée. Cette observation faite, il importe d'insister sur ce point que tous les trains de ce genre dont il est question précédemment ont été remorqués avec une grande facilité.

(1) Pour calculer l'effort maximum développé aux jantes d'une locomotive compound à quatre cylindres, en fonction de l'effort maximum théorique dû aux cylindres de haute pression. M. A. Mallet, emploie la formule $F = \frac{p d^2 l}{D}$ D'après le calcul ci-dessus, cette formule qui offre l'avantage d'une grande simplicité et qui revient à supposer $K = 1$, conduirait à une évaluation un peu faible.

Les résultats d'exploitation et d'expériences que nous avons rapportés dans ce qui précède sont précieux à enregistrer, surtout en présence de certaines opinions qui considéraient naguère la locomotive à vapeur comme parvenue à la limite de ses perfectionnements et de sa puissance.

Ces différents exemples montrent bien l'admirable souplesse des machines compound à 4 cylindres qui nous occupent et la facilité de leur conduite.

Les deux mouvements, dont les positions relatives sont fixées convenablement par les bielles d'accouplement, s'équilibrent si bien que les contrepoids des roues peuvent être extrêmement réduits ; la fatigue de la voie en est très diminuée, aussi peut-on dire sans crainte d'être taxé d'exagération que sous ce rapport encore les machines compound à 4 cylindres se recommandent particulièrement pour les trains de vitesse (1). Elles ont encore l'avantage de la répartition du travail total sur deux essieux moteurs ce qui constitue, lorsque ce travail devient très élevé, une garantie de sécurité et d'économie d'entretien. Mais il y a plus : la somme de travail soutenu qui a été réalisé, grâce au système compound, montre d'une façon péremptoire que l'économie du fonctionnement thermique des locomotives à force intensive est un facteur essentiel de leur puissance.

V. — Examen des conditions d'établissement.

L'examen que nous nous proposons de faire porte nécessairement sur les trois éléments suivants de la puissance, qui se rapportent à toute locomotive :

- 1° Production de la vapeur ;
- 2° Utilisation de la vapeur ;
- 3° Recherche du minimum de poids.

1° PRODUCTION DE LA VAPEUR.

L'activité de la vaporisation étant de première importance pour les locomotives à grande vitesse, on a augmenté la surface de grille qui a été portée de 2^m2,04 à 2,30 sur les dernières machines. A ce même point de vue l'emploi des tubes à ailerons, système Serve, pour les chaudières à grande production se trouve tout indiqué. On a donc adopté pour les chaudières 2.123-2.160, les tubes de ce système au lieu et place de ceux du type ordinaire qui existent sur les locomotives 2.121-2.122. Le premier avantage des tubes Serve est de faciliter la convection des gaz chauds tout en diminuant la résistance qu'ils éprouvent pour se rendre dans la boîte à fumée et par suite, l'intensité du tirage nécessaire. Cette propriété est particulièrement avantageuse dans le cas des locomotives compound, pour lesquelles on a

(1) Les avantages fournis par cette disposition des quatre cylindres des machines compound sont aujourd'hui universellement reconnus. En Angleterre, M. Webb, vient de créer une machine à quatre cylindres où on la trouve reproduite. En Allemagne, on y attache une grande importance, comme l'indique l'extrait ci-dessous du discours du Ministre des Travaux publics au Landtag :

« On a fait dans ces derniers temps des progrès considérables dans la construction des locomotives, progrès qui ont » eu surtout pour but de diminuer la fatigue de la voie, tout en augmentant la puissance des machines. Nous avons » ainsi pu commander des machines à trois essieux couplés, avec avant-train à deux essieux, compound à quatre cylindres, » qui nous permettront de nous passer de la traction double pour nos express lourds. La grande stabilité de ces machines » et le parfait équilibrage des pièces en mouvement, diminueront en même temps considérablement la fatigue de » nos voies. »

intérêt à diminuer le plus possible la contre-pression sur les pistons des cylindres de détente à cause de leur grande surface. La marche à tirage modéré avec échappement ouvert en grand constitue l'un des principaux moyens dont on dispose pour réduire au minimum la contre-pression et la perte de travail qui en résulte.

L'emploi des tubes Serve n'offre pas seulement l'avantage de faciliter la transmission de la chaleur des gaz; il se prête également bien à l'augmentation de la section de passage offerte à ces gaz, comme on peut le voir sur le tableau de la page 78, en comparant les sections de passage obtenues avec les tubes lisses d'une part et les tubes Serve d'autre part dans les chaudières des locomotives 2.121-2.122 et 2.123-2.137, chaudières qui ne diffèrent entre elles que par le genre de tubes.

Cette similitude des chaudières a donné lieu à une comparaison très intéressante des deux sortes de tubulures qu'elles renferment. Le tableau ci-après indique, d'après les données du tableau de la page 78, les surfaces de chauffe intérieures et extérieures des tubes ordinaires des chaudières des locomotives 2.121-2.122 et des tubes Serve adoptés pour les chaudières des locomotives construites ultérieurement.

DÉSIGNATION	SURFACE DE CHAUFFE	
	A L'INTÉRIEUR DES TUBES	A L'EXTÉRIEUR DES TUBES
Tubes ordinaires lisses à l'intérieur.....	98 ^m 2,98	111 ^m 2,40
Tubes à ailerons système Serve.....	144,43	80,62

On voit que si la surface de chauffe intérieure des tubes Serve est beaucoup plus considérable que celle des tubes ordinaires (près de 50 % en plus), par contre, la surface extérieure des premiers est notablement inférieure à celle des seconds (près de 30 % en moins). Or, la pratique courante du service a montré que la production de la vapeur est, dans les mêmes conditions de marche, beaucoup plus facile dans les chaudières avec tubes Serve que dans celles qui sont munies de tubes ordinaires; d'où résulte la confirmation pratique de ce fait que la convection des gaz chauds — c'est-à-dire la transmission de la chaleur qu'ils possèdent à la surface interne des tubes — est beaucoup moins facile que la diffusion de la même quantité de chaleur dans l'eau au contact de la surface externe. En d'autres termes pour dépouiller les gaz chauds d'une quantité donnée de calorique et le transmettre à l'eau dans un même temps, la surface de paroi nécessaire et suffisante doit être notablement plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur des tubes. Cela ne veut pas dire qu'à *surface intérieure égale* la transmission de la chaleur ne serait pas plus facile par les tubes ordinaires que par les tubes Serve, puisque la présence des ailerons dans ces derniers équivaut à une surépaisseur importante des parois, qui augmente la résistance au passage du calorique. Mais la comparaison qui précède, montre clairement que l'emploi des tubes Serve permet de loger dans un corps cylindrique de diamètre donné, une tubulure capable de produire une vaporisation beaucoup plus facile que celle obtenue par l'emploi des tubes ordinaires.

A cet avantage s'ajoute, en faveur des tubes Serve, celui de donner lieu à une moindre résistance au passage des gaz, malgré l'augmentation de périmètre que ces tubes présentent à l'intérieur. C'est là un fait d'expérience qui s'explique par la diminution de vitesse des gaz.

Les sections de passage sont, en effet, de $0\text{m}^2,2290$ pour les tubes ordinaires et de $0\text{m}^2,2750$ pour les tubes Serve (Tableau de la page 78).

Ces remarques une fois faites, on constate, d'après ce même tableau que la surface de chauffe tubulaire des trois locomotives 2.158-2.160 est notablement plus grande que celle des machines des deux séries précédentes. Les diamètres des tubes et leur longueur entre les plaques tubulaires n'ont pas été changés, mais leur nombre a été porté de 94 à 107. L'augmentation de surface intérieure des tubes et celle de la section de passage des gaz sont corrélatives de l'accroissement de la surface de grille et ces deux changements joints à l'augmentation de volume de la chaudière ont rendu la puissance de la machine sensiblement plus grande, bien que les autres conditions d'établissement n'aient pas été modifiées. Pour des locomotives astreintes non seulement à développer un travail soutenu voisin de leur limite de puissance, mais encore à donner des corps de collier, le volume très important qui a été donné au réservoir d'eau de la chaudière est, en particulier, une ressource précieuse à cause de la réserve de puissance qu'il représente.

2° UTILISATION DE LA VAPEUR.

a. — *Timbre de la chaudière.* — Le fonctionnement compound présente le double avantage d'améliorer notablement l'utilisation de la détente, à cause du grand volume donné aux cylindres de basse pression, et de réduire l'écart qui existe entre les températures extrêmes de la vapeur dans un même cylindre. A ce dernier point de vue l'avantage du système, déjà très net pour les pressions de 10 ou 11 kg, s'accroît encore lorsque la pression s'élève davantage. Mais de plus, lorsqu'elle atteint 14 ou 15 kg *dans les cylindres*, le fonctionnement compound devient seul admissible sur les locomotives, en raison de la consommation excessive de vapeur qui, dans ces conditions, résulterait de son travail à simple expansion. Ce fait a été vérifié sur les locomotives compound de la Compagnie du Nord qui sont disposées de façon à permettre aux petits cylindres d'échapper directement dans l'atmosphère. M. du Bouquet a relaté (1) qu'à la suite de la rupture d'un plateau de cylindre de basse pression, la machine 2.121 avait continué son train de 150 tonnes remorquées, sur un parcours de 61 kilomètres, à la vitesse moyenne de 74 kilomètres à l'heure, en utilisant les petits cylindres seuls. L'indépendance des distributions et celle des échappements sont donc très avantageux en cas d'avaries; mais aussi, on a constaté une consommation de vapeur très élevée due à l'échappement direct dans l'atmosphère, pour des cylindres qui admettaient cette vapeur à la pression effective de 14 ou 15 kg.

Les chaudières des trois nouvelles machines ont été, comme celles des locomotives 2.138-2.157, timbrées à 15 kg. L'adoption d'une pression plus élevée aurait, en effet, entraîné, sans nécessité pour les besoins actuels, une majoration du poids de la chaudière.

b. — *Volume des cylindres.* — Les locomotives compound ayant la faculté d'admettre directement la vapeur de la chaudière dans les grands cylindres pour faciliter les démarrages, la règle à suivre pour déterminer le volume des cylindres à haute pression consiste :

1° A pouvoir obtenir, avec la pleine admission de vapeur, le maximum d'effort de traction que la machine doit produire à faible vitesse;

(1) *Revue Générale* N° de juin 1892, page 345.

2° A réaliser le travail de pleine marche avec une admission de vapeur au moins égale à 35 ou 40 %.

Si le volume de la vapeur à dépenser correspondait à une admission notablement plus faible que celle ci-dessus, on verrait réapparaître les divers inconvénients que le fonctionnement compound a précisément pour but d'éviter. C'est pour ce motif que le volume des cylindres des nouvelles machines n'a pas été augmenté, les locomotives ne travaillant pas toujours à leur maximum de puissance. On verra plus loin quelles sont les limites d'admission en usage.

c. — *Volume du réservoir intermédiaire.* — Afin que les variations de pression dans ce réservoir ne soient pas trop fortes, il importe de lui donner un volume supérieur à celui des deux cylindres de haute pression réunis. Mais d'autre part, un réservoir trop grand entraînerait une perte par condensation très appréciable. L'usage est d'admettre le rapport $\frac{1}{1,25}$ à $\frac{1}{2}$ entre le volume des petits cylindres et celui du réservoir. Ce rapport qui, dans les locomotives 2.121-2.157, était égal à $\frac{1}{1,36}$ s'est trouvé porté à $\frac{1}{1,95}$ sur les trois dernières locomotives par suite de la surélévation du corps cylindrique.

d. — *Distribution de la vapeur.* — Les inconvénients inhérents aux faibles admissions de vapeur dans la distribution par coulisses et tiroirs à recouvrements, consistent principalement dans l'insuffisance de l'ouverture maxima de la lumière et dans la facilité avec laquelle les distributions se dérèglent. Ces inconvénients ont une importance d'autant plus grande que la vitesse des machines est plus élevée. Le système compound qui repose sur l'emploi des admissions prolongées n'a donc pas seulement l'avantage thermique de son fonctionnement ; il constitue en outre une distribution perfectionnée — la plus simple de toutes pour les locomotives. — Mais afin d'en tirer le meilleur parti possible, il est nécessaire d'observer certaines conditions que nous allons examiner.

Compression. — Sur les locomotives compound, on remédie en partie aux inconvénients d'une compression exagérée par une augmentation voulue des espaces nuisibles qui, dans les locomotives ordinaires, représentent 6 à 7 % du volume du cylindre. Pour les cylindres de haute pression des machines qui nous occupent ce rapport est de 12,6 % (1). Mais cette précaution seule n'eût pas suffi. Il a fallu de plus, diminuer la durée de la compression en réduisant les recouvrements intérieurs qui sont devenus négatifs. On est ainsi arrivé à donner aux tiroirs de haute et de basse pression un *découvrement* intérieur de 3^m/_m de chaque côté, modification qui a été reconnue nécessaire dès la mise en service des deux locomotives 2.121-2.122. On sera même, peut-être, conduit à augmenter encore ce découvrement sur les tiroirs de la basse pression. Les diagrammes présentent en effet une petite boucle.

Enfin comme les inconvénients de la compression se font d'autant plus sentir que la vitesse est plus élevée, il y a lieu, ainsi que nous le montrerons plus loin, de modifier la relation des crans d'admission pour la haute et la basse pression, suivant la vitesse à laquelle on marche.

Chute de pression au réservoir intermédiaire. — Pour utiliser complètement la détente de la vapeur à la production du travail mécanique il faudrait théoriquement éviter toute chute de pression au réservoir intermédiaire.

(1) Dans les machines marines à triple expansion l'espace libre du cylindre intermédiaire atteint 20 %.

L'admission des cylindres de détente, qui réaliserait cette condition et que l'on appelle *point critique* serait constante et aurait pour valeur :

$$a = \frac{1}{r}$$

expression dans laquelle a représente l'admission cherchée, en fraction de l'unité et r le rapport du volume des cylindres de détente aux cylindres de haute pression.

Hâtons-nous de dire que ce système de marche n'est pas usité quand les machines sont employées à la remorque des trains rapides. Comme il est bien prouvé qu'une chute de pression au réservoir intermédiaire, fût-elle de plusieurs kilogrammes, n'est pas de nature à compromettre l'économie du fonctionnement compound, on a préféré établir, d'après d'autres considérations, le rapport entre les admissions simultanées des petits et des grands cylindres.

Il est à remarquer du reste que la perte par les condensations intérieures décroît avec la température du réservoir intermédiaire, c'est-à-dire avec la pression dans ce réservoir. On regagne donc quelque chose de ce côté.

Relation entre les crans de marche. — Les locomotives compound de divers types qui existent actuellement se divisent, eu égard au système de distribution, en deux catégories principales : les machines dont les distributions de haute et de basse pression sont invariablement liées et celles qui ont des distributions indépendantes, tout au moins d'une manière facultative. Avec la première disposition, le mécanicien ne peut choisir que le degré d'introduction dans le ou les petits cylindres. Pour la basse pression, l'admission a lieu indépendamment de la volonté du mécanicien, suivant une combinaison de crans de marche fixée une fois pour toutes. Dans le second cas, l'indépendance des changements de marche permet d'adopter telles combinaisons de crans qui lui paraissent le plus avantageuses.

Lorsque les distributions sont dépendantes l'une de l'autre, elles peuvent être liées de deux façons différentes, soit de manière à donner toujours des introductions égales entre elles dans les cylindres de haute et de basse pression, soit de manière à réaliser approximativement l'égalité des travaux qu'ils produisent. La première disposition, qui n'est applicable qu'au cas où le rapport des volumes des cylindres est au moins égal à 2,2 a pour but de simplifier le mécanisme de distribution. La seconde disposition se justifie d'elle-même, en principe. La répartition du travail total de la vapeur, faite par moitié sur chacun des deux essieux moteurs d'une locomotive à quatre cylindres, est à rechercher mais cette condition n'a rien d'absolu et, lors même qu'on s'en éloigne, la division du travail constitue encore un avantage très appréciable au point de vue d'une moindre fatigue des organes.

Les deux systèmes de distributions liées dont nous venons d'indiquer la raison d'être peuvent présenter des inconvénients pour certains types de locomotives. C'est ainsi que, d'après les observations faites à la Compagnie du Chemin de fer du Nord, l'indépendance facultative des distributions des locomotives compound de trains express a été reconnue nécessaire au libre développement de leur puissance et à la facilité de leur allure à grande vitesse. Dans l'article de la *Revue* déjà signalé, M. du Bousquet a montré combien cette disposition est avantageuse. Nous n'aurions donc pas besoin d'y revenir si ce n'était pour constater l'excellence des résultats qu'elle a fournis depuis six ans et pour faire connaître l'usage suivant lequel s'est établi, en service courant, la relation entre les crans de marche de haute et de basse pression. Ces crans sont indiqués en centièmes de course sur les réglettes des changements de marche.

Pour les petits cylindres, les mécaniciens évitent en général l'emploi des admissions intérieures à 40 %. Ils préfèrent, lorsque le travail à développer diminue, conserver le cran 40 et marcher avec le régulateur entr'ouvert, ce qui est facile d'après la disposition de cet appareil, composé de 2 tiroirs à déplacement successif. L'ouverture du premier tiroir seulement est souvent suffisante sur les pentes, pour la marche au cran 40 des petits cylindres. La pression d'admission et la période de détente se trouvent alors réduites, mais on recueille les grands avantages que présentent les admissions prolongées. Avec le régulateur entièrement ouvert et pour les grands efforts en pleine marche, l'admission est comprise entre 40 et 50 %, ce dernier cran étant rarement dépassé.

En ce qui concerne la basse pression, le rapport 2,43, entre les volumes des cylindres B.P. et H. P. montre que le point critique serait théoriquement à $\frac{1}{2,43} = 0,41$ d'admission. Or, la marche au cran 41 des grands cylindres qui a été essayée, ne permet pas à la machine de *courir* comme il convient de le faire pour réaliser les grandes vitesses. Etant donné que cette admission est insuffisante, jusqu'à quel point devient-il nécessaire de la prolonger ? La réponse à cette question ne pouvait être trouvée que par un tâtonnement, bien simple d'ailleurs.

Il a été promptement constaté dès la mise en service des locomotives 2.121-2.122, en 1891, que pour les cylindres de basse pression, il fallait atteindre et même dépasser le cran 50. Puis, les vitesses augmentant, on a poussé plus loin l'admission, en se tenant entre les crans 55 et 60 des grands cylindres pour les plus faibles admissions usitées aux cylindres de haute pression. Cependant, ce système de marche n'a rien d'absolu. Il a été reconnu, en effet, au cours des expériences, dont nous avons rendu compte précédemment que, dans le cas où la machine était utilisée comme locomotive à marchandises, il convient de diminuer de plus en plus l'admission aux cylindres à basse pression. Nos mécaniciens de grande vitesse, peu habitués à un pareil service, n'ont agi qu'avec timidité, ils sont arrivés cependant, tout en manifestant quelque étonnement, à rendre les admissions de haute et de basse pression voisines de l'égalité.

La facilité de marche que l'on donne à la machine aux grandes vitesses en augmentant l'admission des grands cylindres, sans modifier celle des petits, s'explique par la consommation plus grande de vapeur qui en résulte. La consommation apparente de l'un des petits cylindres par coup de piston, est égale au poids de la vapeur présente dans ce cylindre à la fin de l'admission, diminué du poids de la vapeur présente dans l'espace neutre à la fin de la compression. Le premier terme de cette différence ne change pas lorsqu'on allonge l'admission des grands cylindres, tout en conservant intacte celle des cylindres de haute pression, mais comme cette opération a pour effet de faire baisser la pression au réservoir intermédiaire, pression qui est sensiblement celle de la vapeur conservée dans les petits cylindres pour la compression, il en résulte que le terme soustractif est plus faible. Il faut ajouter que cette diminution de la compression dans les petits cylindres contribue d'une manière sensible à augmenter la liberté d'allure de la machine.

L'accélération imprimée à la machine dans ces conditions doit être considérée de prime abord comme une conséquence de l'augmentation du poids de la vapeur admise par coup de piston.

La marche aux crans 40 ou 45 des petits cylindres et 55 à 60 des grands, permet de répartir les travaux sur les deux essieux moteurs de façon à ne pas trop s'éloigner de l'égalité de ces travaux. L'égalité est avantageuse au point de vue de l'entretien, mais il convient de ne pas lui accorder une importance exagérée, il est au contraire essentiel de faire passer en première

ligne l'utilisation économique de la vapeur, procurée par le système compound, et la liberté d'allure de la machine. Or, puisque l'économie du fonctionnement subsiste avec une faible atténuation lorsque, en prolongeant l'admission aux grands cylindres, on augmente de plus en plus la chute de pression au réservoir intermédiaire, l'inégalité qui peut en résulter pour la division du travail entre les deux groupes de cylindres, doit être acceptée comme un inconvénient de médiocre importance.

Au surplus, si l'on se préoccupe, pour les locomotives compound de la répartition des travaux entre les deux groupes de cylindres, c'est uniquement dans le but d'uniformiser autant que possible la fatigue des pièces du mécanisme. L'inégalité des travaux des deux groupes de cylindres est sans importance au point de vue de la limite d'adhérence de chaque paire de roues motrices, puisque les essieux sont liés par une bielle d'accouplement. Cette inégalité s'accroît avec la vitesse, or, d'après le diagramme représenté, par la figure 5, le travail indiqué sur les grands cylindres est à 125 km. à l'heure, de 400 chevaux, celui des cylindres à haute pression étant de 800.

Ainsi, contrairement à ce qui a été dit, le rôle des cylindres de détente est encore considérable dans la marche à très grande vitesse. Soulager de 400 chevaux l'essieu moteur d'une machine ordinaire, lui demander seulement 800 chevaux au lieu de 1200, n'est certainement pas un avantage à dédaigner.

Sur les locomotives de la Compagnie du Nord, la marche avec les petits cylindres seulement n'a été prévue qu'à titre temporaire. Les employer seuls avec une pression initiale de 15 kgs serait la négation du principe fondamental sur lequel repose la nouvelle théorie des machines à vapeur : l'influence anti-économique de la conductibilité des parois sur l'utilisation de la détente prolongée de la vapeur dans un même cylindre.

Nous avons dit, que jusqu'ici sur les machines compound du Nord remorquant des trains de grande vitesse, on a renfermé dans des limites très étroites les variations du cran de marche pour les cylindres de détente, mais en donnant à cette admission une valeur bien supérieure à celle qui résulterait des considérations purement théoriques. Il ne faudrait cependant pas en conclure qu'il y aurait avantage à disposer les mécanismes de changement de marche de manière à donner une admission constante de 60% aux grands cylindres. De même qu'il suffit d'une variation de 1 millimètre en plus ou en moins sur les recouvrements des tiroirs des locomotives pour influencer notablement sur leur distribution, de même une différence d'admission de quelques centièmes aux grands cylindres d'une machine compound, peut modifier d'une façon très appréciable la marche de la machine. Le choix du degré d'introduction le plus avantageux dépend de circonstances multiples, parmi lesquelles le degré d'ouverture du régulateur, l'admission aux petits cylindres et la vitesse jouent un rôle prépondérant. Dans la considération de ces circonstances de la marche, l'influence de la vitesse entre en première ligne et c'est à l'initiative du mécanicien qu'il convient de s'en rapporter, pour modifier cette combinaison s'il y a lieu, ou pour agir sur l'ouverture du régulateur.

Nous nous sommes toujours bien trouvés de laisser à la volonté du mécanicien le réglage de l'introduction des cylindres de détente, indépendamment de celle des cylindres admetteurs. On n'a pas à redouter d'inconséquences fâcheuses et l'intervention de cette volonté est au contraire désirable pour faire produire à la machine tout ce qu'elle peut donner, sans négliger toutefois l'économie de son fonctionnement.

D'ailleurs, puisqu'il s'agit ici d'un service de traction particulièrement difficile, il est à remarquer que les qualités du personnel ne sont pas seulement exigibles pour les machines

compound, mais qu'elles le sont aussi pour toute locomotive placée dans des conditions de service semblables, eu égard à sa puissance. En passant des machines «outrance» aux locomotives compound nos mécaniciens ont eu simplement, par suite de l'adjonction du mécanisme de basse pression, une préoccupation de plus dans le même ordre de difficultés.

3° RECHERCHE DU MINIMUM DE POIDS.

Les augmentations des vitesses commerciales déjà réalisées et celles qu'on réalisera encore n'ont pu et ne pourront être obtenues que par l'accroissement de la vitesse de marche en palier et sur les rampes, étant donné que les stationnements des grands express dans les gares sont courts et peu nombreux et que les vitesses supérieures à 110 kilomètres à l'heure (chiffre voisin de la limite qui nous est imposée) sont couramment obtenues depuis longtemps sur les pentes. Pour réaliser au crochet de traction du tender le travail considérable exigé par l'accroissement simultané des vitesses et des charges nous avons toujours recherché le minimum de poids de la machine, compatible avec le développement du travail indiqué. C'est ainsi que les trois nouvelles machines 2.158-2.160 pèsent en ordre de marche une tonne et demie seulement de plus que celles de la série précédente et encore cette majoration du poids est-elle due pour un tiers de sa valeur à l'augmentation du volume d'eau de la chaudière, qui constitue une ressource des plus utiles pour les coups de collier.

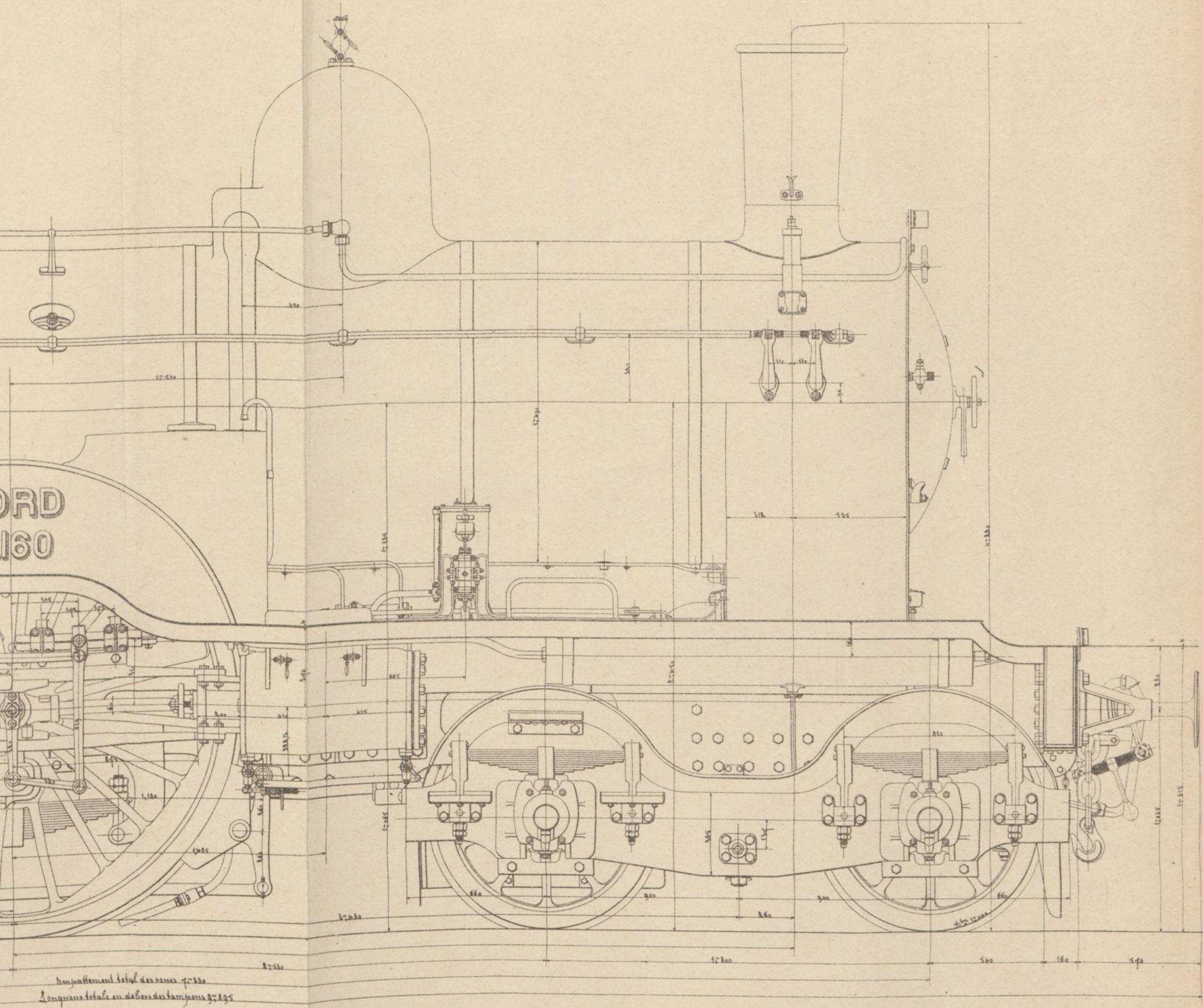
La légèreté relative est une des conditions qui ont permis aux locomotives du Nord d'atteindre avec des charges croissantes, les vitesses rapidement progressives obtenues depuis 1893. D'après les résultats acquis, il n'est pas exagéré de dire, à défaut de formule précise applicable en la matière, qu'en raison des progrès actuels de la traction des express, une locomotive doit pouvoir réaliser, au besoin d'une façon soutenue, sur les longues rampes de 5 millimètres et avec les trains lourds, une vitesse moyenne de pleine marche supérieure à la vitesse commerciale exigée. C'est une constatation qui vaut la peine d'être méditée, non seulement à cause de son actualité, mais encore parce que la rigueur de cette condition sera désormais inévitablement applicable à tous les systèmes de traction.

VI. — Conclusions.

Pour conclure il suffit de mettre les résultats d'exploitation et d'expériences signalés plus haut en regard des principes qui ont présidé à l'établissement des 40 locomotives compound à grande vitesse du Chemin de fer du Nord.

Le fait important que l'on dégage de cet examen est que le système compound à 4 cylindres judicieusement appliqué aux locomotives se prête très bien à la traction des trains rapides et lourds en permettant, par son fonctionnement économique, la production d'un travail considérable, sans exagération du poids des machines et en permettant aussi leur *roulement* facile, sans qu'il soit nécessaire pour cela de rien sacrifier des avantages du système. Ce programme a été réalisé en observant les conditions d'établissement décrites et discutées dans la présente Note. Parmi ces conditions, celles qui se rapportent au mécanisme sont communes à toutes les locomotives 2.121-2.160. Les trois nouvelles machines se distinguent seulement par une plus grande facilité à effectuer un service remarquable, auquel participent indistinctement les 40 locomotives comprises dans les séries successivement construites.

Élévation

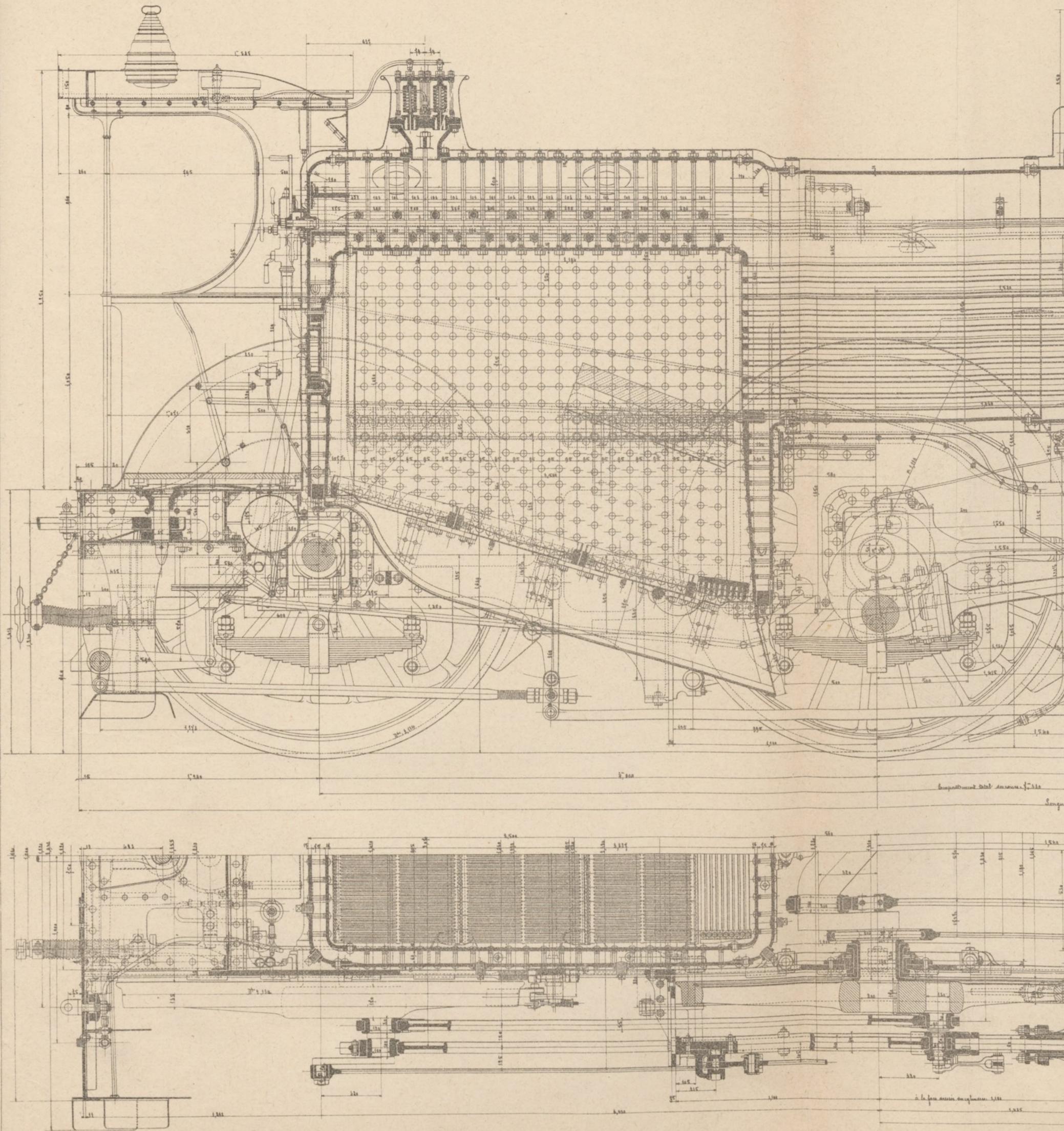


Dimensions principales

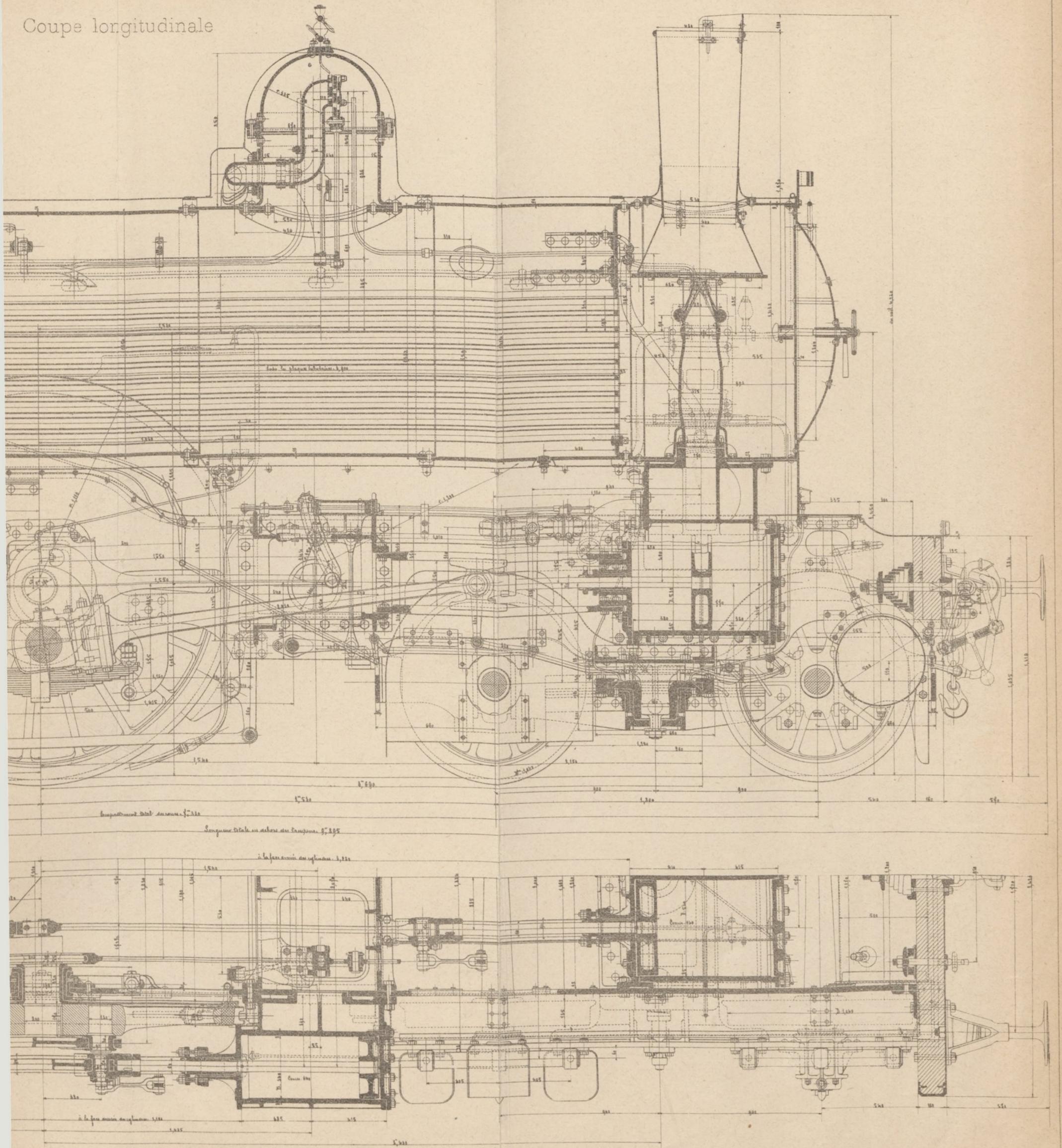
Surface de chauffe des tubes (intérieur).....	164 ^{m²} ,23
Surface de chauffe du foyer.....	11 ^{m²} ,35
Surface de chauffe totale.....	175 ^{m²} ,58
Surface de la grille.....	2 ^{m²} ,30

Diamètre des cylindres d'admission.....	0 ^m ,340	Ecartement des essieux extrêmes.....	1 ^m ,330
Diamètre des cylindres de détente.....	0 ^m ,530	Longueur totale de la machine.....	9 ^m ,895
Course des pistons.....	0 ^m ,640	Largeur totale de la machine.....	2 ^m ,640
Diamètre des roues motrices.....	2 ^m ,114	Voie normale.....	
Diamètre des roues porteuses.....	1 ^m ,040		

Coupe longitudinale



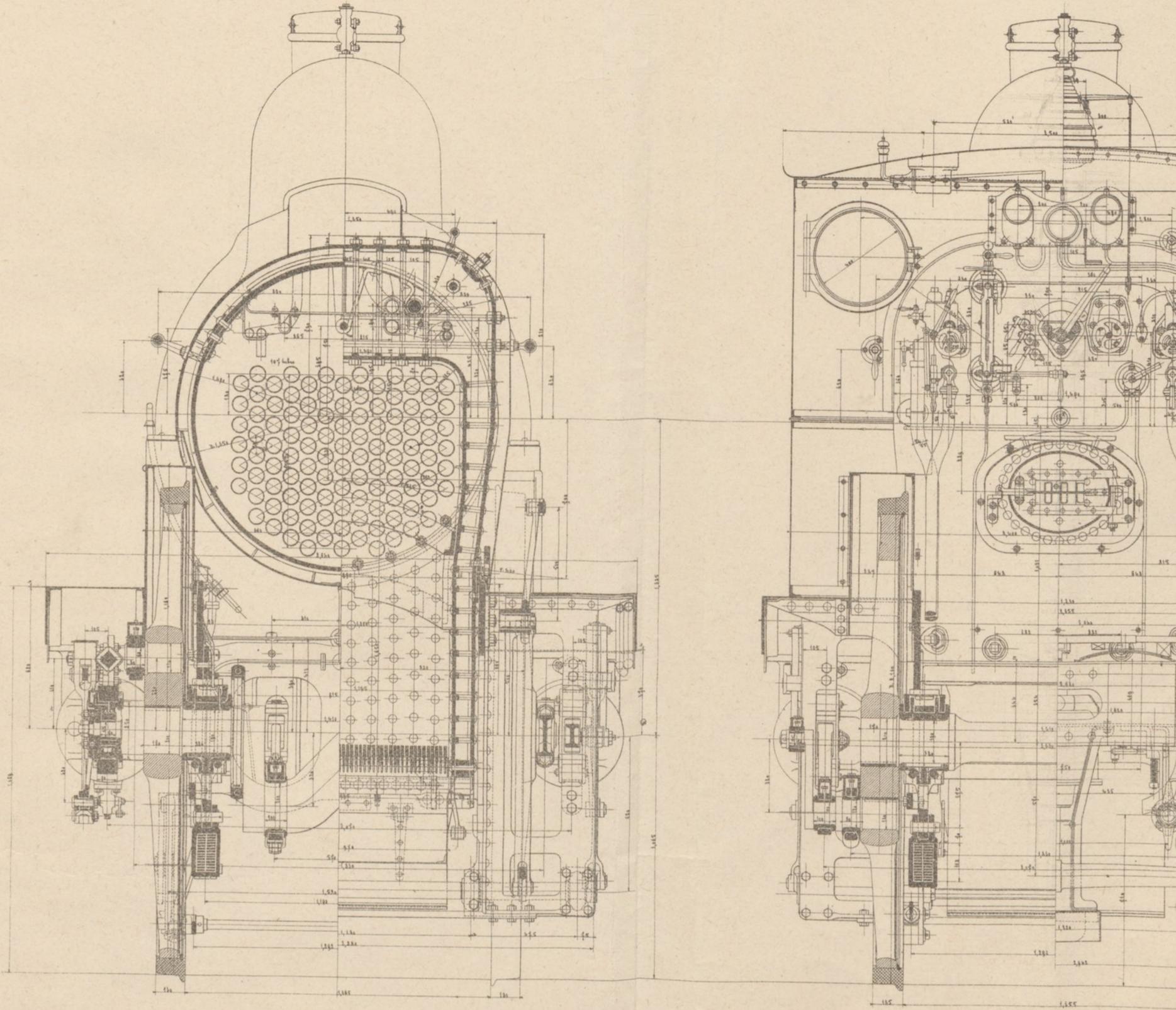
Coupe longitudinale



Coupe par l'axe
de la roue motrice d'avant

Coupe par le foyer

Coupe par l'axe
de la roue motrice d'arrière



2/4
24 1.20 / 5
2

2.48 / 12

par l'axe
notrice d'arrière

Vue d'arrière

Coupe par l'axe
du cylindre à basse pression

Coupe par l'axe
du cylindre à haute pression

