

NOTE SUR UNE EXPLOSION DE CHAUDIÈRE DE LOCOMOTIVE

par M. CHAN,

Ingénieur Principal du Matériel

à la Compagnie des Chemins de fer Paris-Lyon-Méditerranée

Circonstances de l'avarie

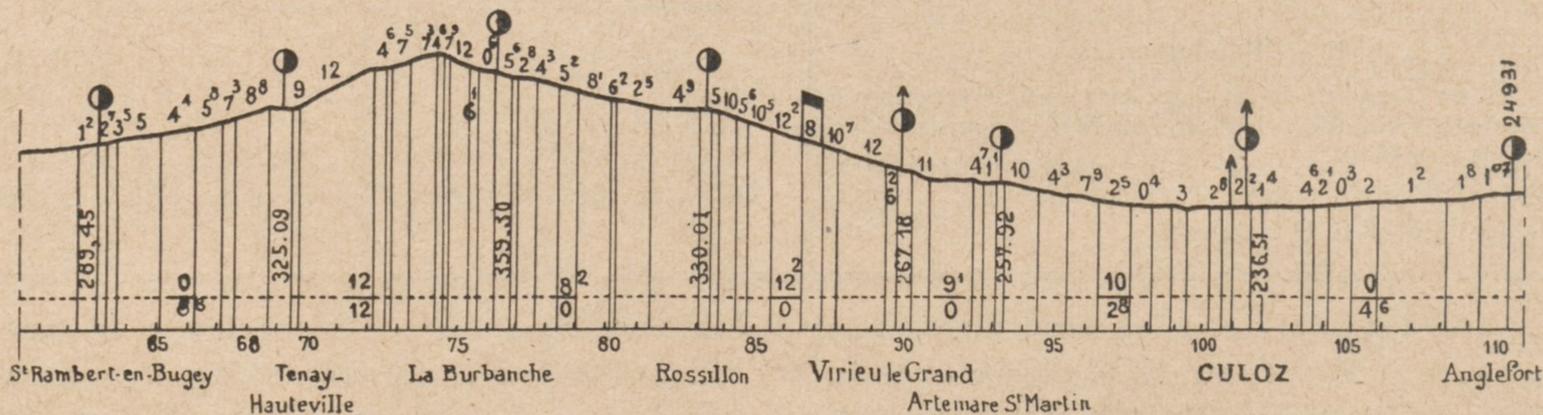
Le 2 Août 1935, vers minuit 15, la chaudière de la locomotive 141 C-623, remorquant le train 658, qui se rendait de Culoz à Ambérieu, a fait explosion au km 68,319 de la ligne, peu après le passage du train en gare de Tenay-Hauteville, tuant le mécanicien et le chauffeur.

On se propose de déterminer ci-après, pour autant que l'a permis l'examen de la chaudière

environ. Puis la voie descend de La Burbanche sur Tenay avec une déclivité également variable atteignant 12 ‰.

D'après le tracé de la marche (la bande Flaman a été rendue illisible par l'explosion), le train 658 devait monter la rampe à une vitesse d'environ 50 km/h et passer à Tenay à 80 km/h. Comme on a constaté, après l'avarie, que le train s'est arrêté en 449 mètres environ, sous l'effet du freinage d'urgence provoqué par la rupture des tuyauteries

Fig. 1. — Profil de la ligne.



avariée, les circonstances de ce douloureux accident.

Nous indiquerons tout d'abord (Fig. 1) le profil de la ligne dans la région considérée.

De Culoz à La Burbanche la voie est en rampe variable avec maximum de 12 ‰ sur 24 km

du robinet de frein consécutive à l'avarie, on peut estimer que la vitesse du train, au moment de l'accident, était bien de l'ordre de 80 km/h.

Le tonnage du train était de 619 tonnes.

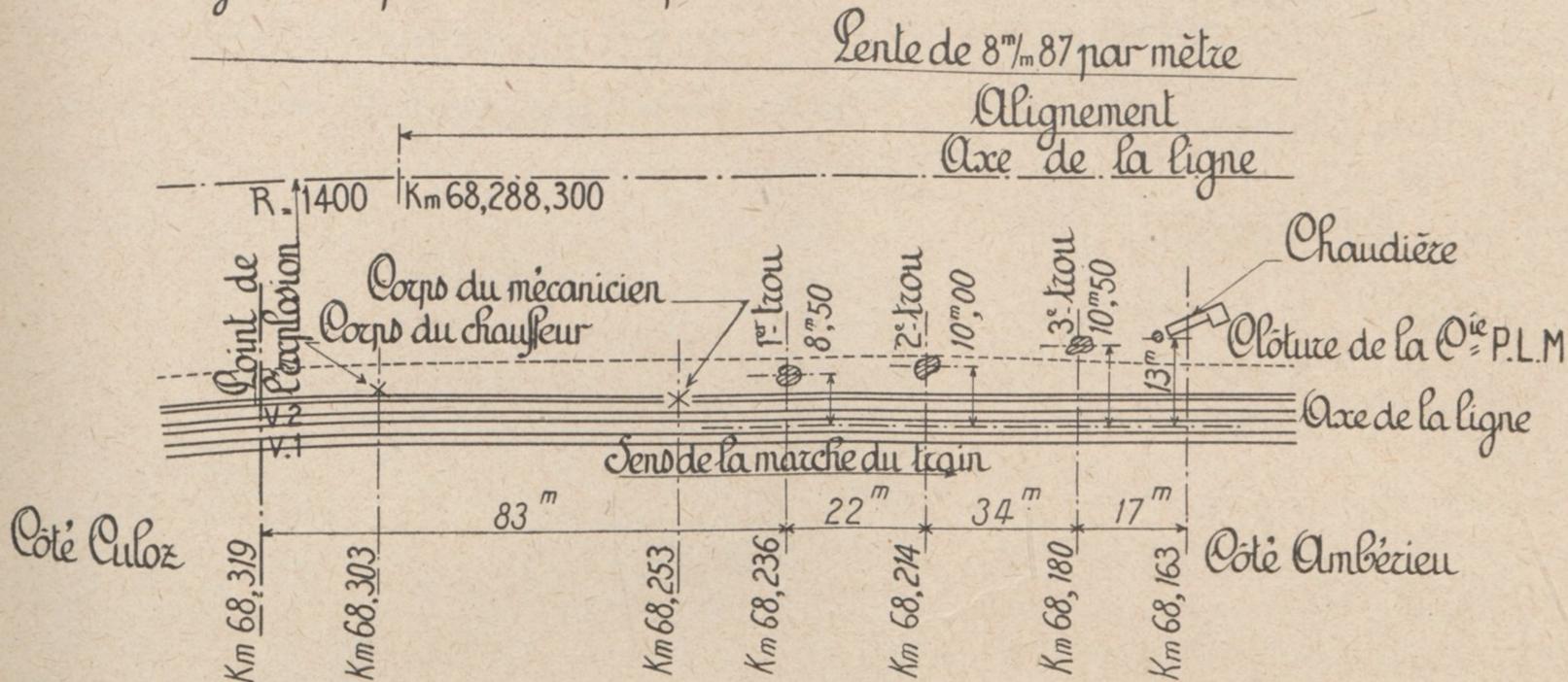
L'explosion s'est produite dans une courbe de centre à droite, arrachant l'herbe de part et d'autre de la voie, ripant la voie voisine de 16 cm

environ et détachant la chaudière du châssis, lequel est resté sur la voie et a continué à rouler en tête du train jusqu'à l'arrêt, qui s'est produit,

l'accident ont été retrouvés déchiquetés sur la voie; ils ne présentaient aucune trace de brûlure.

Passant par dessus la ligne télégraphique, et

Fig. 1^{bis}. Emplacement des points de chute de la chaudière



comme nous l'avons dit, à 449 mètres. Les vêtements du mécanicien et du chauffeur tués par

montant à une hauteur que nous évaluerons plus loin à 18 mètres environ, la chaudière est retombée

une première fois sur son extrémité boîte à feu à 83 mètres du lieu de l'explosion. Puis elle a rebondi et est retombée une deuxième fois, cette fois sur son extrémité côté cheminée. Enfin deux autres bonds l'ont amenée dans la position où elle a été trouvée, à environ 156 mètres du lieu de l'explosion (Fig. 1 bis).

La figure 2 montre l'aspect du 1^{er} trou creusé par la chute de la chaudière; le lieu de l'explosion est à l'arrière plan, à l'endroit marqué d'une croix. On remarquera que la trajectoire de la chaudière se trouve sensiblement dans le plan vertical tangent à la voie.

La figure 3 montre l'ensemble de la chaudière telle qu'elle a été retrouvée, dans un champ voisin de la voie, visible à droite.

Enfin la figure 4 donne l'aspect du châssis de la machine avec son cylindre double en fonte, attache de la chaudière à l'avant, rompu, ses tuyauteries relevées verticalement et ses cendriers latéraux abaissés et écartés par l'explosion.

Fig. 2. — Aspect du premier trou creusé par la chute de la chaudière.



(+ Lieu de l'explosion).

Examen de la chaudière

L'examen de la chaudière montre que l'avarie, localisée au foyer, a consisté en une déchirure du ciel de foyer. Cette chaudière, du type à berceau, a la disposition représentée par la figure 5, où nous avons indiqué, pour la clarté de ce qui suit, la désignation des différentes parties.

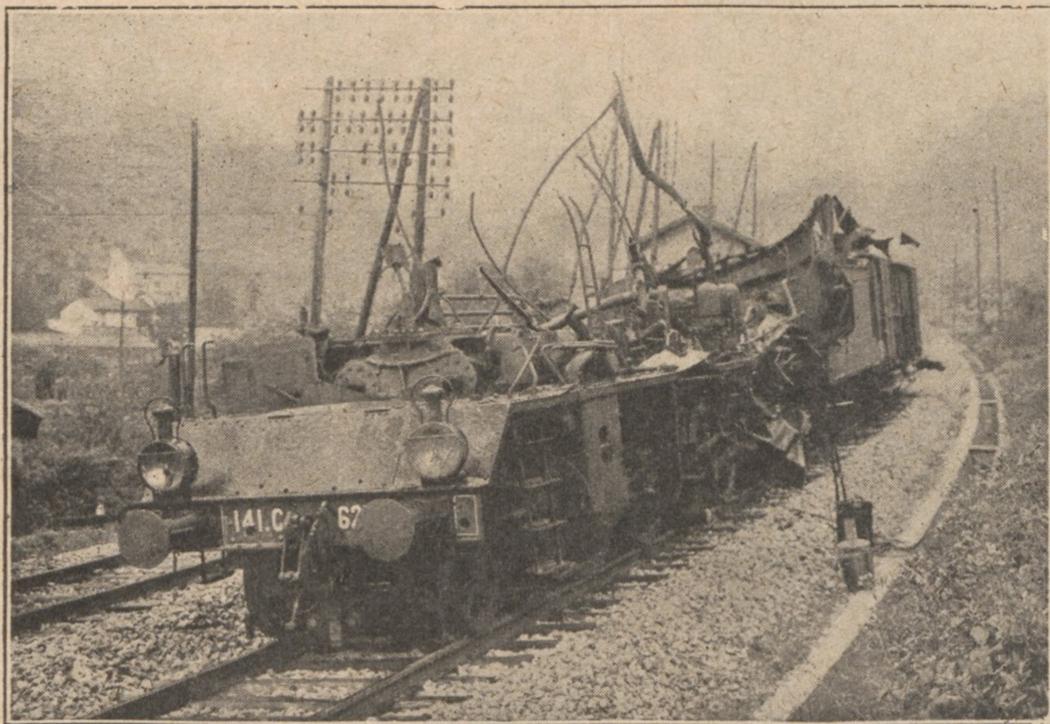
Après sa chute, la boîte à feu s'est couchée sur son côté CD et c'est le ciel E, déchiré par l'explosion, que montre la figure 6, donnant l'aspect de l'intérieur de la chaudière du côté du foyer.

En examinant de près le ciel du foyer, on a pu faire les constatations suivantes :

1° Les bords de la déchirure ramenés dans leur plan initial suivent sensiblement le tracé indiqué par la figure 7, la surface de l'ouverture, après explosion, étant d'environ 1,6 m².

2° Le cuivre du foyer (cuivre de 14 mm d'épaisseur) présente l'aspect **décapé, bleu, caractéristique d'un métal porté au rouge** sur tout le ciel et au-dessous, jusqu'à un niveau situé à 250 mm environ au-

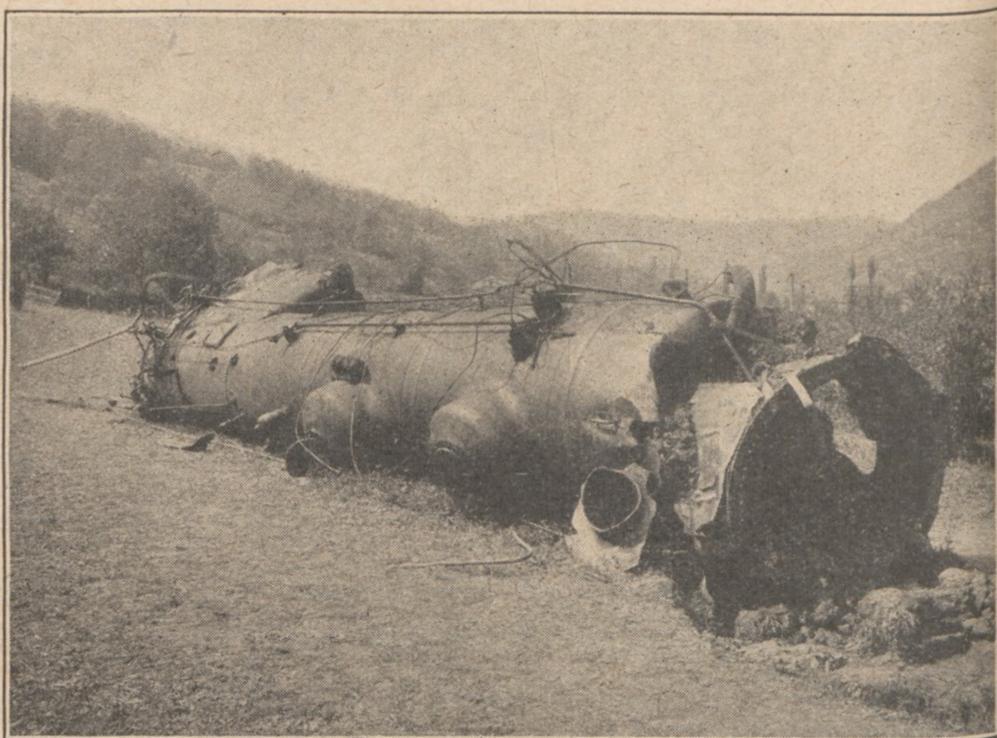
Fig. 4. — Aspect du châssis.



dessous du ciel. Le foyer normalement recouvert d'eau a donc été découvert jusqu'à ce niveau. Le cuivre chauffé à une température élevée,

que nous évaluons plus loin au moins à 700°, a perdu sa résistance et a cédé sous la pression normale de la chaudière. Des trois plombs fusibles, celui d'A n'a pas été retrouvé, celui milieu s'est détaché et a été retrouvé fondu, enfin celui d'arrière était en place, fondu. Sur la figure 6,

Fig. 3. — Vue de la chaudière telle qu'elle a été retrouvée.



l'aspect plus clair de la partie modifiée par le coup de feu est assez visible.

3° Les écrous des tirants ont imprimé dans le cuivre leur empreinte hexagonale, fait qui confirme que le cuivre a été rendu malléable par chauffage au rouge. Les écrous eux-mêmes, portés à haute température, ont lâché, leur filetage ayant perdu sa consistance.

4° Les tirants ne sont ni rompus, ni allongés, mais leur filetage, fixé à la fois dans le cuivre du ciel et l'écrou, a cédé sous l'action de la température, les filets se couchant et les pièces glissant l'une sur l'autre.

A noter que les trois rangées extrêmes, droite et gauche, qui, étant au voisinage des arrondis sont les rangées les plus susceptibles de s'user, n'ont présenté aucune avarie et sont restées intactes. A

noter également que la déchirure n'a pas intéressé la base de ces tirants.

5° Avant de se rompre, le ciel, porté au rouge,

s'est déformé en donnant lieu à des sortes de hernies situées entre les tirants qui le maintenaient encore. Cette déformation, appelée couramment

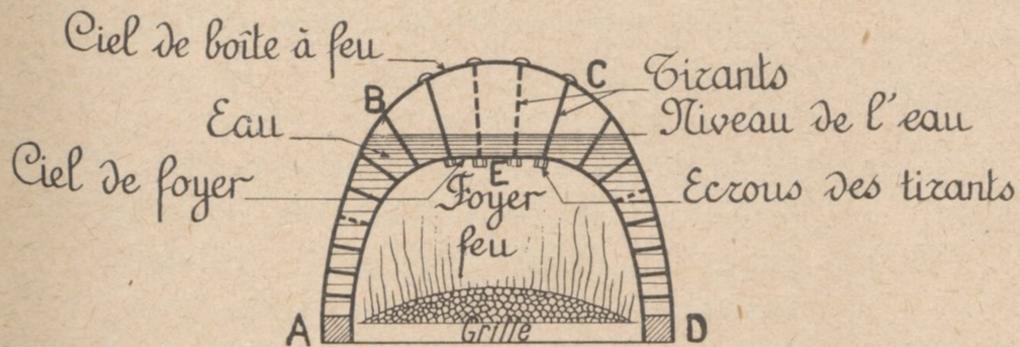


Fig. 5

« matelassage », est surtout accentuée à l'avant du foyer, ce qui montre que la partie qui a commencé à chauffer la première semble avoir été la partie avant du foyer.

On remarquera que la tôle désignée par E sur

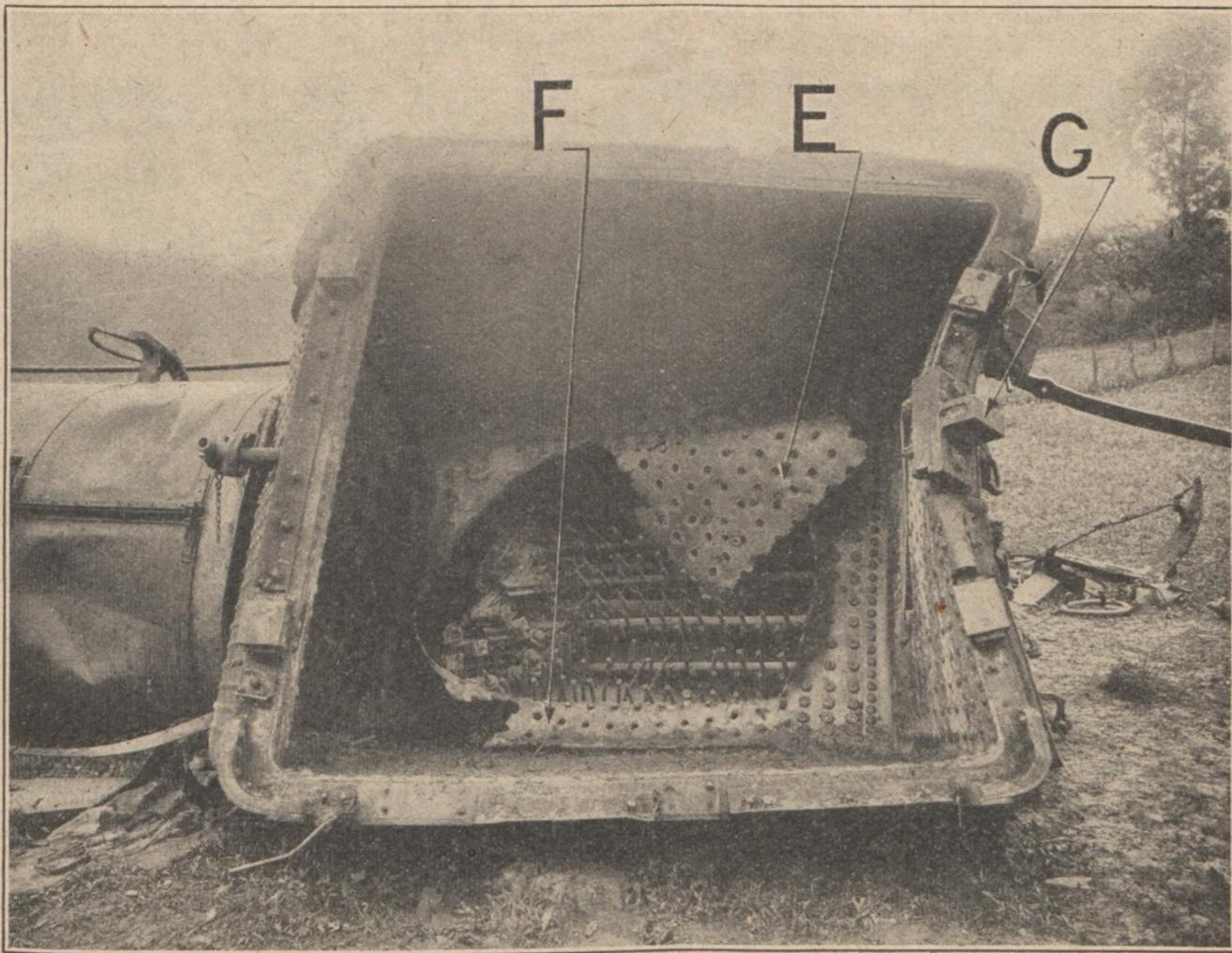
d'entretoises du flanc sur lequel elle s'était rabattue. On y voit aussi des écrous qui, rencontrés par la tôle, y sont restés soudés. Il a fallu qu'après la chute et sous l'effet de son propre poids la tôle E retombe vers le bas.

Ce détail, confirmant ce qui précède, montre d'une manière très nette à quelle température élevée a été porté le ciel par le coup de feu ; il permet, en outre, d'affirmer qu'il n'y a pas eu, au dernier moment, un essai de réalimentation de la chaudière amenant de

l'eau sur un ciel chauffé au rouge, car cette arrivée d'eau aurait refroidi le ciel.

Enfin, et nous ne mentionnons le fait qu'à titre de confirmation des témoignages précédents, un agent de la Compagnie voyageant dans le train a

Fig. 6. — Aspect du foyer.



la figure 6 n'est pas restée plaquée sur le flanc comme la tôle F. Cependant, cette tôle E a été certainement projetée contre le flanc, car on voit sur la figure 6 et, d'une manière encore plus apparente sur la figure 8, à plus grande échelle, les traces laissées par le contact sur la tôle E des têtes

déclaré avoir aperçu immédiatement après l'accident, et dans la nuit, une lueur vive venant de l'emplacement où on a trouvé la chaudière et correspondant très vraisemblablement au ciel du foyer en question porté au rouge.

Température atteinte par le ciel de foyer

On peut avoir une idée de la température atteinte par le foyer en faisant le raisonnement suivant :

En admettant que la pression au moment de l'explosion ait été la pression normale de

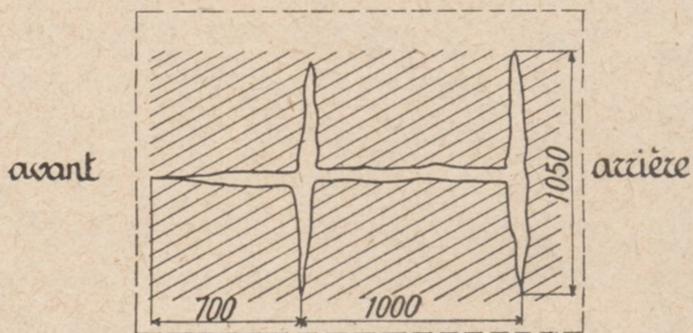


Fig. 7
Lignes de déchirure du ciel (ciel vu par dessous)

16 kg/cm², on connaît la fatigue du métal, qui est de 2 kg/mm² pour le ciel en cuivre entre les

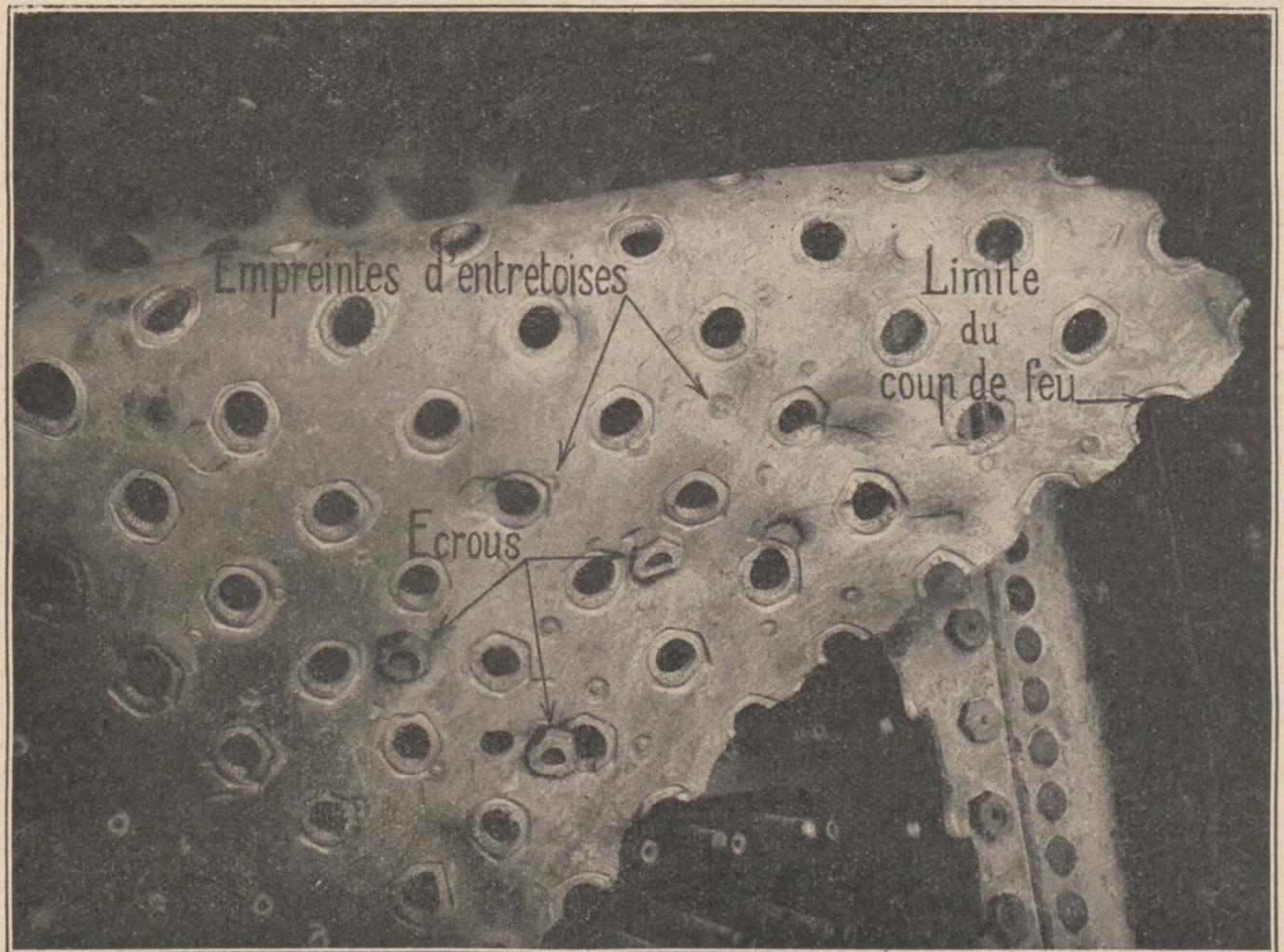
de 5,9 kg pour les tirants eux-mêmes (tirants de 19,5 mm avec trou central de 6 mm).

Pour déterminer la température à laquelle il a fallu que le cuivre soit porté, il suffit de rechercher à quelle température le cuivre n'a plus qu'une résistance de 2 kg par mm².

La courbe de la résistance du cuivre en fonction de la température indiquée ci-dessous, d'après Guillet et Portevin (Précis de métallographie, page 122) montre que si le cuivre a une résistance de 27 kg à la température ordinaire et de 22 kg à 200°, température normale du foyer, il n'a plus, vers 700°, qu'une résistance voisine de 2 kg. La température atteinte paraît donc avoir été au minimum de 700°.

On peut obtenir une confirmation de ce calcul de la manière suivante. Les tirants ne s'étant pas rompus, on peut en déduire que la résistance de l'acier du tirant, normalement égale à 40 kg/mm², n'a pas baissé sous l'action de la chaleur jusqu'à être égale à 5,9 kg, fatigue du tirant. Or, si on se reporte à la courbe de variation de la résistance de l'acier en fonction de la température indiquée ci-après, (extraite de la Revue de la

Fig. 8. — Détail de la tôle E de la figure 6, montrant les empreintes des têtes d'entretoises et 3 écrous soudés.



tirants (d'après la formule $R = \frac{KP}{e^2}$ où K est égal, pour un entretoisement en rectangle à : $\frac{1}{2} \frac{a^4 b^2}{a^4 + b^4}$ a et b, côtés du rectangle étant égaux à 10 cm) et

Métallurgie d'Août 1924, page 368), on voit que la résistance de l'acier ne tombe au-dessous de 5,9 kg qu'après 725°, c'est-à-dire à une température légèrement supérieure à celle que nous avons trouvée en raisonnant sur le cuivre.

Il faut dire également que le tirant, mieux refroidi par sa tige, devait s'échauffer un peu moins vite que le ciel en cuivre.

Nous venons d'évaluer à 700° au minimum la température du foyer, mais il est possible que le métal ait atteint une température encore plus

Variation de la charge de rupture du cuivre en fonction de la température

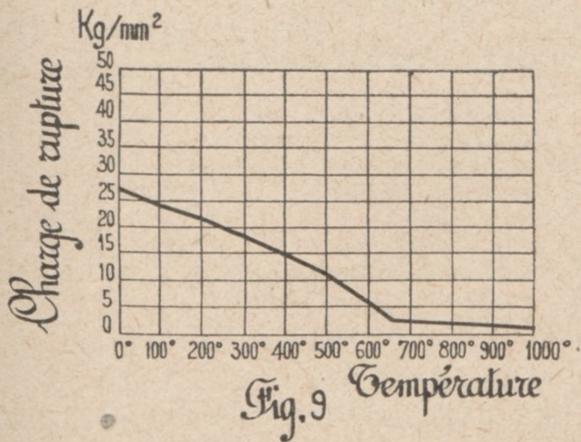


Fig. 9 Température

élevée, si on suppose — ce qui est bien plus probable — que la pression de la chaudière n'était pas au timbre, la machine venant de gravir une longue rampe; la fatigue à admettre étant alors inférieure à 2 kg pour le cuivre, il faudrait peut-être remonter jusqu'à 800°-850° pour trouver une résistance égale à la fatigue.

Variation de la charge de rupture de l'acier extra-doux en fonction de la température

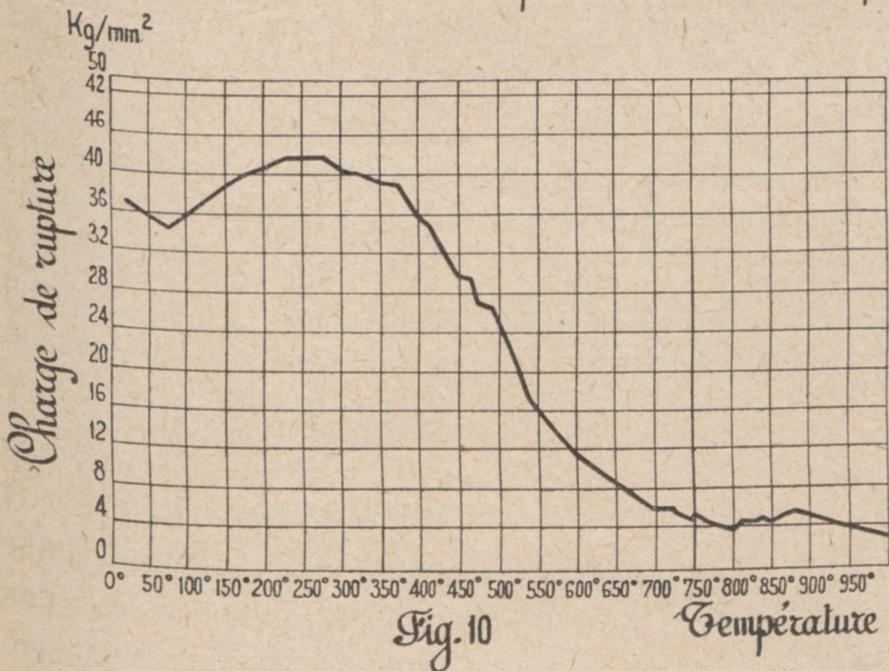


Fig. 10 Température

Soulèvement de la chaudière.

La trajectoire suivie par la chaudière ayant paru surprenante, nous croyons devoir rechercher et indiquer en détail comment les choses ont pu se passer, à notre avis.

On vient de voir que l'avarie est due à une

déchirure brusque du ciel de foyer. Par cette déchirure, la vapeur, s'échappant de haut en bas, a créé une pression brusque dans le foyer tendant à séparer la partie haute de ce foyer, constituée par la chaudière, de sa partie basse, constituée par le cendrier et le châssis. Le jet de vapeur, fusant de haut en bas, a continué à exercer une réaction verticale sur la chaudière, rompant les attaches et soulevant la chaudière à la manière d'un jet de fusée propulsant un projectile.

On peut se rendre compte de l'énergie énorme emmagasinée dans la vapeur, libérée par l'explosion, énergie qui se compose :

a) de l'énergie des 27 kg de vapeur contenus à l'état de vapeur dans la chaudière, soit environ :

$$27 \text{ kg} \times 660 \text{ calories} \times 425 \text{ kgm} = 7\,600 \text{ tonnes-mètres.}$$

b) de l'énergie de la vapeur qui se forme lorsque les 7 tonnes d'eau de la chaudière passent de la température de 200° et 16 kg de pression à 100° et 1 kg de pression. Cette énergie est, grosso modo, égale à :

$$(200^\circ - 100^\circ) \text{ calories} \times 7\,000 \text{ kg} \times 425 \text{ kgm} = 297\,500 \text{ tonnes-mètres.}$$

En admettant seulement que 1% de cette énergie ait été utilisé à soulever la chaudière, on trouve que cela aurait suffi pour élever la chaudière, d'un poids de 35 tonnes, à 90 mètres de hauteur.

L'agrafe arrière de chaudière a cédé, ou plus exactement s'est dégagée de son emboîtement par une déformation de la façade très visible en G de la figure 6. La chaudière soulevée par l'arrière a pivoté un instant autour de sa fixation sur les cylindres avant, qui a cédé rapidement, et a pris un mouvement de rotation.

Enfin, on peut figurer comme indiqué sur la figure 11 le mouvement présumé de cette chaudière.

Pour avoir la hauteur de la première courbe décrite, on peut admettre que le centre de gravité a sensiblement parcouru une parabole. Comme la vitesse horizontale, au départ, était d'environ 80 km/h et qu'il y a une distance de 83 mètres entre le départ et le premier point de chute, il s'est écoulé, semble-t-il, 3,7 secondes entre le départ et la première chute. Pour monter et descendre en 3,7 secondes, un corps pesant doit s'élever de ;

$$h = \frac{1}{2} g t^2 = \frac{1}{2} 9,81 \times (1,9)^2 = 18 \text{ m. environ.}$$

Si on admet le schéma ci-dessus, la vitesse de rotation de la chaudière autour de son centre de gravité est égale à

$$\omega = \frac{5 \pi}{4 \times 3,7} = 0,34 \pi$$

Le moment d'inertie de rotation de la chaudière étant de l'ordre de 15 000 kg mm, l'énergie de rotation $\frac{1}{2} I \omega^2$ est de

$$\frac{1}{2} \times 15\,000 \times 0,1 \times \pi^2 = 7\,500 \text{ kgm, soit 7,5 tonnes-mètres;}$$

ce chiffre est très faible auprès de celui qu'on a indiqué plus haut comme énergie libérée par l'explosion, et il est possible que la chaudière ait tourné sur elle-même plus rapidement que ne l'admet la figure 11. Quoi qu'il en soit, on peut affirmer

que la chaudière a tourné au moins autant que l'indique cette figure.

A la fin de ce premier bond, la chaudière, rencontrant un sol relativement élastique sous une incidence différente de la normale, et étant en outre en rotation sur elle-même, a rebondi une première fois, puis une deuxième et une troisième fois, les bonds successifs étant à partir de l'explosion de 83, 22, 34 et

pêché l'accident et la mort de deux agents ? On ne peut faire à ce sujet que des hypothèses.

Il ne paraît pas douteux en tout cas que l'équipe a eu devant elle, entre le moment de la fusion du premier plomb et celui de l'explosion, le temps dont il était besoin pour effectuer les opérations

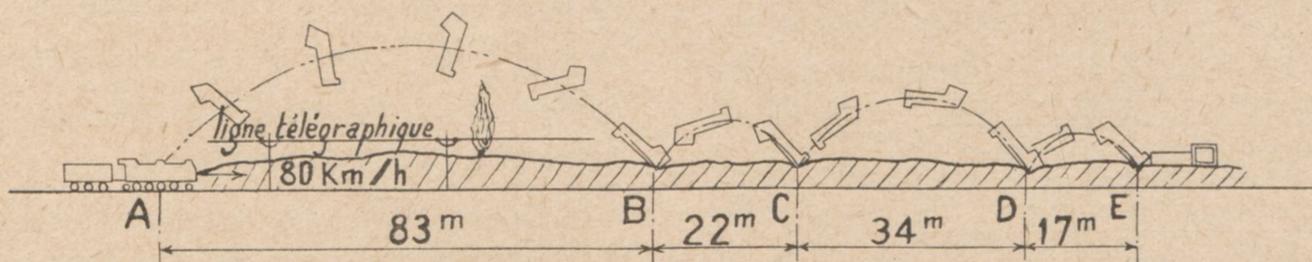


Fig. 11

17 mètres, et la trajectoire n'étant que légèrement déviée vers la gauche comme le montre la figure I bis.

Le fait, assez singulier, que le troisième bond a été plus long que le deuxième, semble montrer que l'énergie de rotation, et peut-être aussi l'action de la vapeur continuant à fuser, sont intervenues au point de chute C pour donner une impulsion au rebondissement plus grande qu'en B.

Positions successives du niveau de l'eau

D'après tout ce qui précède, il est hors de doute que l'accident est dû à un coup de feu.

La consigne des agents des machines est de

prescrites et même un temps supérieur à celui nécessaire, comme nous allons le montrer.

Il est en effet possible de déterminer, par la quantité d'eau qui manquait lors de l'avarie, les positions successives du niveau et l'ordre de grandeur du délai qui s'est écoulé depuis la fusion du premier plomb.

La figure 12 ci-après montre comment se présente, dans les locomotives du type considéré, le ciel du foyer par rapport aux tubes indicateurs de niveau de l'eau, appareils du type Klinger à niveau très apparent.

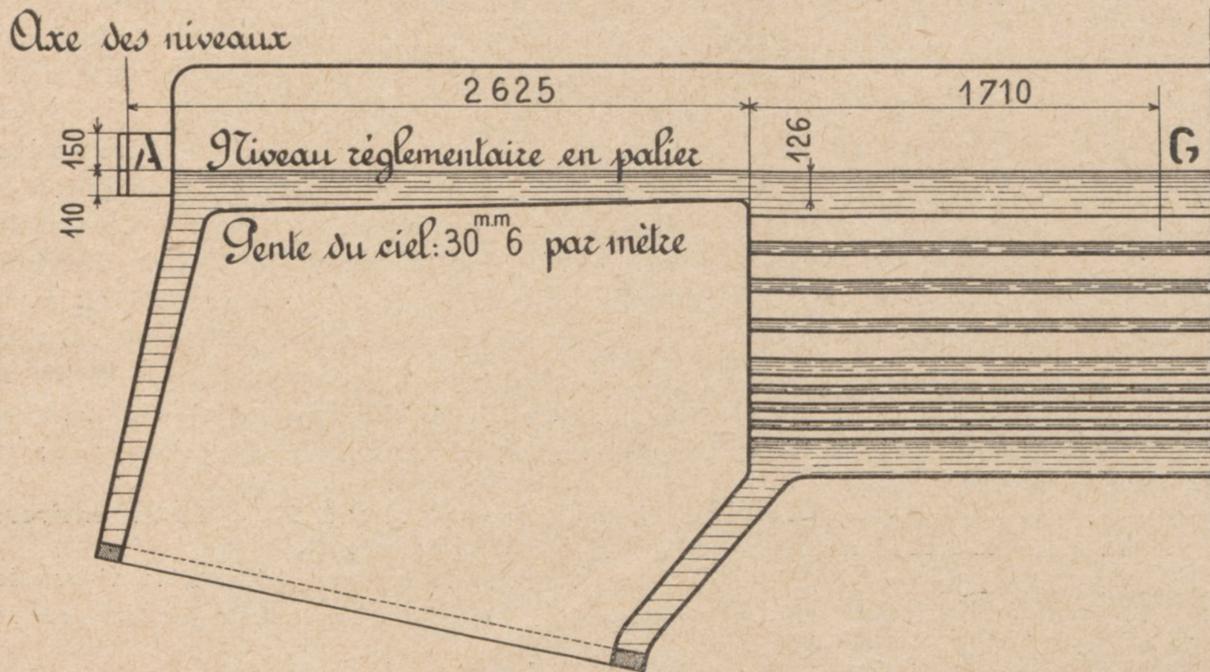


Fig. 12 - Position du plan d'eau en palier

Au niveau réglementaire, en palier, le plan d'eau est à 126 mm au-dessus de la partie avant du foyer (le foyer descend vers l'arrière suivant une pente de 30,6 mm par mètre) au trait A de l'indicateur, à 150 mm du haut et 110 mm du bas des extrémités de la partie visible du tube.

En déclivité de 12 ‰, pente maxima suivie par la machine depuis le dos d'âne de la Burbanche, la position du plan d'eau réglementaire

jeter le charbon du foyer sur la voie aussitôt que la fusion d'un plomb de sûreté les a avertis du danger.

Pour quelle raison l'équipe de la locomotive 141-C-623 ne s'est-elle pas conformée à cette prescription, dont la stricte observation eût em-

taire en déclivité de 12 ‰, qui est marquée par un trait spécial sur l'indicateur, est la ligne BB de la figure 13 ci-après, B étant à 53 mm au-dessous du niveau réglementaire en palier.

Les traces laissées par les coups de feu per-

mettent de dire que le plan d'eau est descendu jusqu'à CC' de la figure 13.

D'après les constatations faites après l'avarie, côté feu et côté eau, le coup de feu a laissé exactement les traces suivantes :

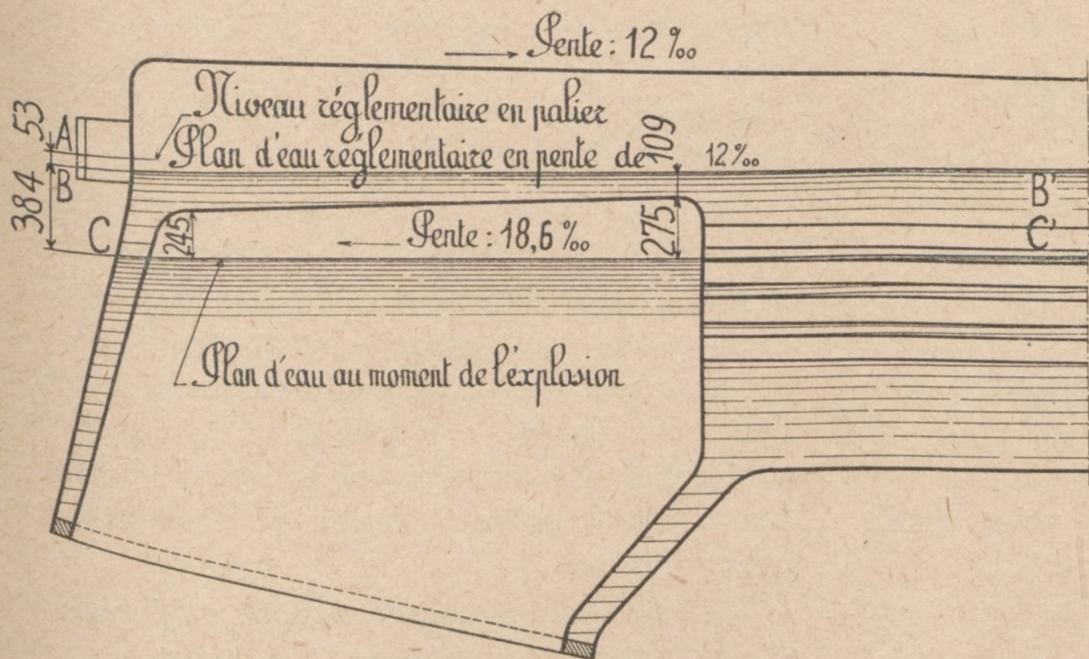


Fig. 13 - Position du plan d'eau en déclivité de 12 %

— Sur les flancs (en cuivre) : au niveau de la première rangée d'entretoises, c'est-à-dire à 275 mm du dessous du ciel à l'AV et 245 mm à l'AR (Fig. 6).

— Sur la plaque de porte (en cuivre) : au niveau des têtes de la troisième rangée d'entretoises, à 245 mm du dessus du ciel (la Fig. 8 montre nettement ce niveau).

— Sur la plaque tubulaire (en acier) : à 175 mm du dessus du ciel si on regarde du côté feu (Fig. 6) et à 210 mm si on regarde du côté de l'eau.

Si les traces laissées sur le cuivre sont dans un même plan, celles marquées sur la plaque tubulaire en acier sont un peu moins basses, sans doute parce que les oscillations d'eau dues aux mouvements de la chaudière, plus sensibles dans le corps cylindrique où la masse d'eau oscille plus aisément, ont pu refroidir après coup une partie découverte, et aussi parce que l'acier garde moins la trace d'un coup de feu. Quoi qu'il en soit, les traces laissées sur le cuivre sont très nettes.

Le volume compris entre CC' et BB' mesure, par rapport au niveau réglementaire en pente de 12 l'insuffisance d'eau qui a existé avant l'explosion. On trouve ainsi que le plan d'eau étant descendu à $109 + 275 = 384$ mm au-dessous du niveau réglementaire, le volume d'eau manquant par rapport au

volume réglementaire était alors d'environ 3 200 litres (1).

Pour déterminer à quel moment le ciel a commencé à se dégarnir, on est conduit à envisager différents cas possibles en remontant le cours du temps à partir de l'explosion. Nous nous bornerons au cas ci-après qui, on le verra, est le plus défavorable et devait réaliser les conditions les plus critiques.

Nous supposons que ni l'injecteur, ni la pompe d'alimentation n'ont fonctionné depuis le sommet de la rampe. Comme le mécanicien a dû fermer son régulateur au passage du dos d'âne ou très peu après (l'appareil a été retrouvé fermé), il n'y aura pas eu de vaporisation

depuis le sommet de la rampe, et la quantité d'eau de la chaudière n'a, dans ce cas, pas varié depuis le passage du sommet.

Le plan d'eau existant avant le sommet s'obtient en faisant tourner CC' d'un angle égal au chan-

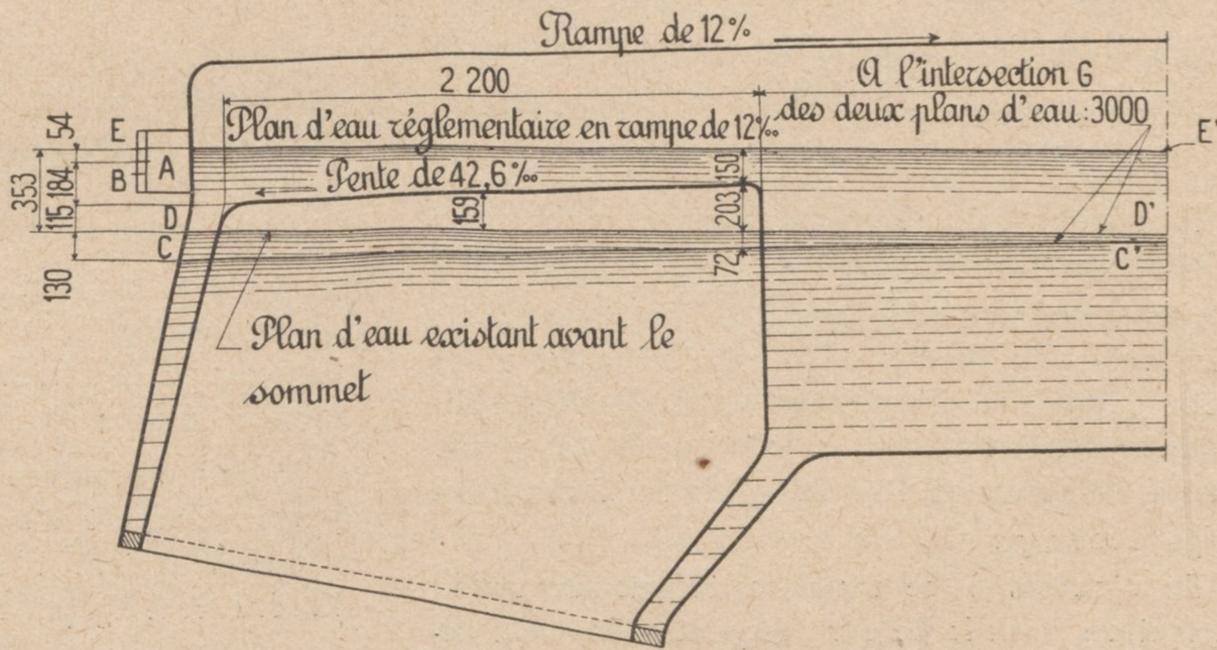


Fig. 14 - Position présumée du plan d'eau DD' avant le sommet de la rampe la machine étant en rampe de 12 %

gement de pente maximum provoqué par le passage du dos d'âne, soit $12\text{‰} + 12\text{‰} = 24\text{‰}$

(1) La surface du plan d'eau au-dessus du foyer est de 12 m^2 et celle du ciel du foyer de 3 m^2 , ce qui donne comme volume : $12\text{ m}^2 \times 384\text{ mm} - 3\text{ m}^2 \times 260\text{ mm} = 3\ 800$ litres, à diminuer de 600 litres pour le volume des tubes soit 3 200 litres au total.

autour du centre de gravité G du plan d'eau CC'. On obtient ainsi le niveau DD' indiqué ci-dessus (Fig. 14).

Dans l'hypothèse faite, on voit **qu'avant le dos d'âne** le niveau devait être en D de la Fig. 14, à 130 mm au-dessus de C et à 353 mm du niveau réglementaire E prescrit en rampe de 12 ‰, l'insuffisance d'eau, par rapport à ce niveau, exprimée en volume, étant toujours égale à 3 200 litres environ. Le volume d'eau compris entre le dessus du ciel et EE' est égal à $12 \text{ m}^2 \times 150 \text{ mm} = 1 800$ litres, et celui compris entre le dessus du ciel et DD', ou quantité d'eau qu'il aurait fallu ajouter à la chaudière pour recouvrir le ciel en rampe de 12 ‰, de 1 400 litres.

Comme on le voit, c'est au cours de la montée en rampe que le manque d'eau aurait commencé. En arrivant au sommet, le foyer aurait déjà été dégarni de 203 mm de hauteur à l'avant et de 115 mm à l'arrière.

On peut rechercher le temps qu'il a fallu pour consommer les 1 400 litres ci-dessus qui manquaient, au sommet, pour recouvrir le ciel. On aura ainsi une idée du temps écoulé depuis le début du coup de feu.

La puissance indiquée demandée à une 141-C remorquant un train de 619 t à 50 km à l'heure, en rampe moyenne de 8 ‰ étant d'environ 2 000 ch (1), la consommation d'eau, à raison de 6 kg par ch/h, ressort à $\frac{2 000 \times 6}{60} = 200$ kg d'eau par minute.

Il a donc fallu 7 minutes pour consommer 1 400 litres d'eau et en admettant que ni la pompe d'alimentation, ni l'injecteur n'ont fonctionné dans la rampe, on arrive à ce résultat **qu'il s'est écoulé environ 7 minutes entre le début du découvrement du ciel et le moment où ayant passé le sommet, le mécanicien a fermé son régulateur (2)**.

En ajoutant à ce temps celui mis depuis la fermeture du régulateur jusqu'au lieu de l'explosion — c'est-à-dire à peu près le temps mis pour descendre du sommet qui est à 6 km de l'explosion — on arrive à un total d'environ 10 à

11 minutes entre le début du coup de feu et l'explosion.

Si on tient compte enfin du délai nécessaire pour la fusion du premier plomb de sûreté — soit environ 1 minute à 1 minute 5 à partir du découvrement — on peut dire en définitive qu'il s'est écoulé entre l'avertissement dû à la fusion du premier plomb et l'explosion, un temps égal à environ 9 minutes.

Les calculs ci-dessus supposent que ni injecteur, ni pompe d'alimentation n'ont fonctionné. Si on admet un fonctionnement de ces appareils, on recule encore davantage le moment où le coup de feu a commencé. Les conditions envisagées sont donc bien les plus défavorables en ce sens qu'elles sont celles qui donnent une valeur minimum du temps écoulé entre la fusion du premier plomb et l'explosion.

Toutefois, notre calcul suppose qu'il n'y a pas eu d'autre consommation de vapeur que celle nécessaire à la remorque du train. S'il y a eu une perte pour une autre cause (fuite aux soupapes ou à des joints), il conviendrait d'en tenir compte, mais ces pertes n'auraient pu être, semble-t-il, que très faibles relativement à la consommation supposée de 200 kg d'eau par minute, chiffre que nous avons d'ailleurs plutôt forcé.

Conclusions

L'examen de la chaudière de la locomotive 141-C-623 et des traces laissées par le coup de feu, permet, comme il vient d'être exposé, d'émettre les conclusions suivantes :

1° L'explosion est due à l'ouverture, sous l'effet de la pression normale de la chaudière, du ciel de foyer porté à haute température par suite d'un manque d'eau ;

2° La température atteinte par le ciel de foyer paraît avoir été d'au moins 700° (à cette température le cuivre n'a plus qu'une résistance de l'ordre de 2 kg par mm², contre 22 kg, résistance du cuivre à la température normale de la chaudière) ;

3° Le niveau de l'eau est descendu jusqu'à environ 384 mm au-dessous du niveau réglementaire et 260 mm au-dessous de l'avant du ciel de foyer. Il manquait à ce moment-là environ 3 200 litres d'eau par rapport au volume réglementaire et 1 400 litres par rapport au volume qui existe lorsque le ciel commence à se découvrir.

4° Environ 9 minutes se sont écoulées entre la fusion du premier plomb et l'accident.

(1) On peut la calculer comme suit, en comptant 150 t pour poids de la machine et du tender, une résistance de 10 kg par tonne pour ce matériel et une résistance de 5 kg pour les voitures :

$$\text{Puissance} = \frac{150 \text{ t} (10 + 8) + 619 (5 + 8)}{270} \times 50 = 1980 \text{ ch.}$$

(2) Pour être rigoureux, notre calcul devrait tenir compte de ce que 7 minutes avant le sommet, la machine n'était pas en rampe de 12 ‰, mais en rampe inférieure à 12 ‰. Mais, comme on peut le voir aisément, avec une même quantité d'eau dans la chaudière, un foyer se découvre davantage en rampe faible qu'en rampe forte, ce qui fait que 7 minutes auparavant, le ciel était non pas au début du découvrement, mais franchement découvert ; notre calcul pêche donc par défaut et donne, comme il est désirable, un minimum.