

1925

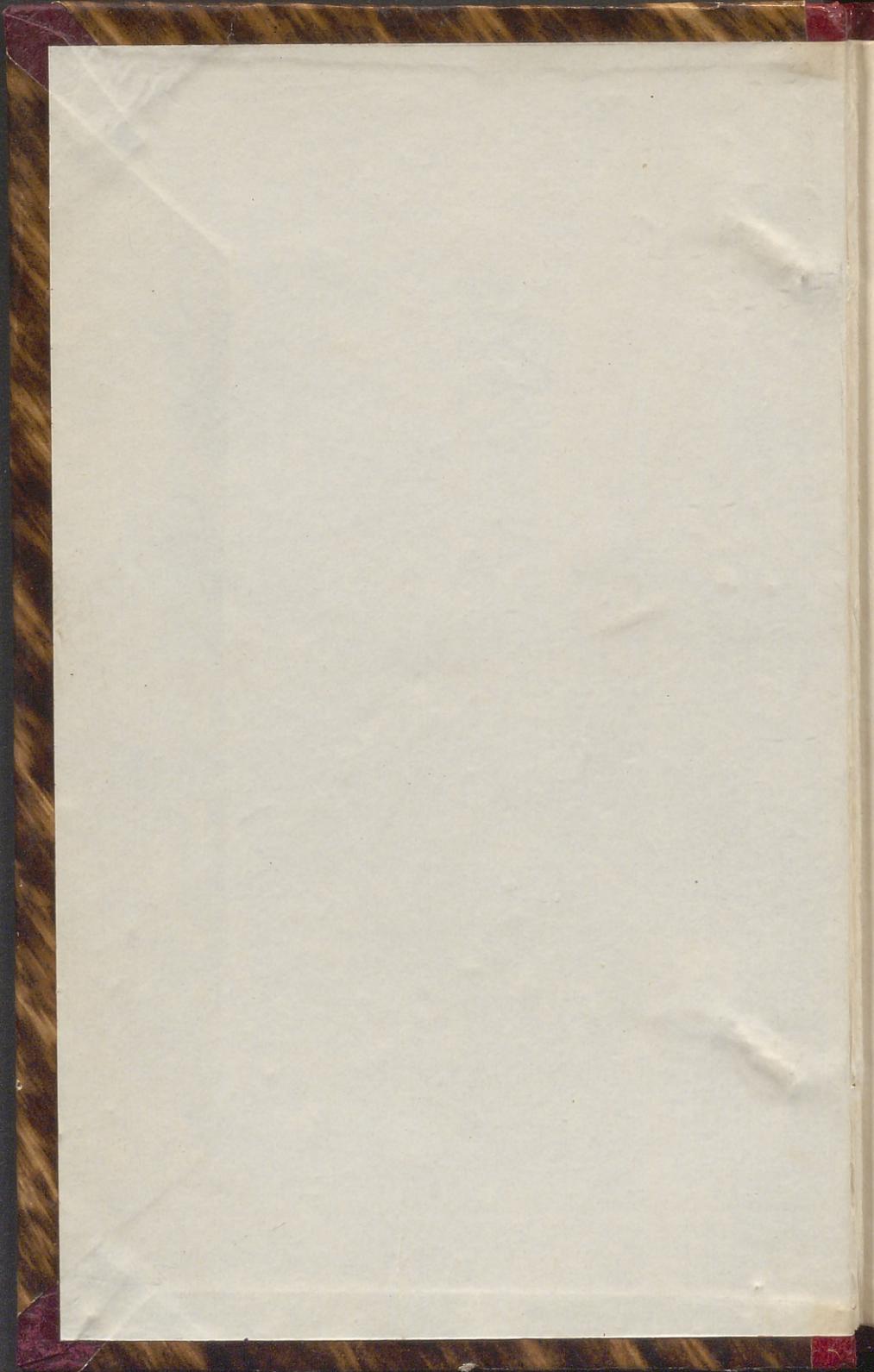
1925

W. H. BAKER

1925

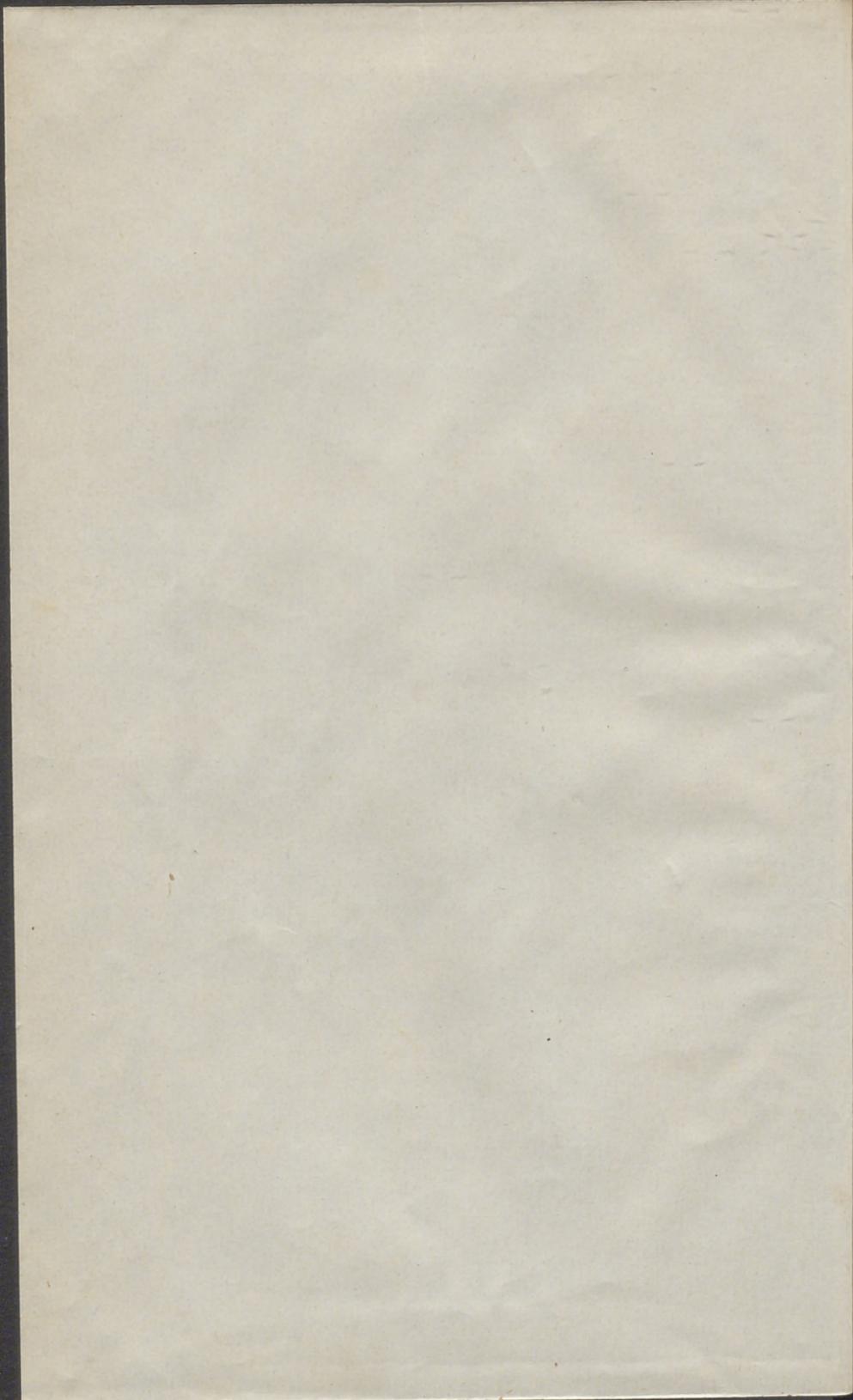
1925

1925



M

X OA/1036



NOTICE
SUR
LES EXPLOSIONS
DE
CHAUDIÈRES A VAPEUR.

NOTICE

LES ÉDITIONS

CHATELAIN & FABRE

PARIS. — IMPRIMERIE DE FAIN ET THUNOT,
IMPRIMEURS DE L'UNIVERSITÉ ROYALE DE FRANCE,
Rue Racine, n° 28, près de l'Odéon.

NOTICE
SUR
LES EXPLOSIONS
DE
CHAUDIÈRES A VAPEUR

PAR M. COMBES,
INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES.

Extrait du tome XX des Annales des mines.

PARIS.
CARILIAN-GOEURY ET V^{OR} DALMONT,
LIBRAIRES DES CORPS ROYAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,
Quai des Augustins, nos 39 et 41.

—
1842

NOTICE

LES EXPLOITATIONS

CHAUDRONNERIE & FABRIQUE

DE LA CHAUDRONNERIE

PARIS

CHATELAIN, COUREY ET VALENTIN

1819

NOTICE

Sur les explosions de chaudières à vapeur, dont les procès-verbaux sont arrivés à l'administration des travaux publics, depuis l'année 1827 jusqu'à l'année 1841.

Par M. CH. COMBES, Ingénieur en chef des mines.

MM. les ingénieurs des mines et des ponts et chaussées, chargés du service des machines à vapeur, doivent, toutes les fois qu'il survient une explosion de chaudière ou un accident analogue, se rendre immédiatement sur les lieux, pour dresser un procès-verbal de l'accident et des circonstances qui l'ont accompagné. Ces procès-verbaux sont adressés à M. le ministre des travaux publics, et transmis par lui à la commission des machines à vapeur, qui les examine, et adresse au ministre les observations qui lui sont suggérées par les faits survenus.

Pour les chaudières placées à bord des bateaux, les procès-verbaux sont rédigés par les commissions de surveillance instituées dans les départements.

La commission des machines à vapeur a pensé que la publication, par extrait, des documents qu'elle possède sur les explosions de chaudières, pourrait contribuer à diminuer le nombre de ces accidents déjà fort restreint, parce que, d'une part, elle montrerait aux propriétaires d'appareils à vapeur l'utilité des mesures et des précautions prescrites par les règlements administratifs,

et que, d'un autre côté, elle rendrait plus circonspets les constructeurs de chaudières ou générateurs à vapeur, en signalant les vices de construction qui ont été la cause certaine de plusieurs accidents.

M. le ministre des travaux publics a approuvé ces vues, et la commission m'a chargé d'écrire une notice sur quelques explosions déjà anciennes, dont elle possède les procès-verbaux; les documents relatifs aux explosions survenues sur les bateaux à vapeur *le Citis*, à Châlons-sur-Saône, et *la Bretagne*, à Nantes, dans le courant de l'année 1841, seront publiés séparément.

La commission des machines à vapeur regrette de ne pas pouvoir publier un catalogue complet des explosions qui ont eu lieu depuis dix ou douze ans. Elles ont été d'ailleurs fort heureusement peu fréquentes; mais l'administration ne reçoit que depuis deux ou trois ans les procès-verbaux détaillés des accidents de ce genre. La commission, ne pouvant présenter l'historique de toutes les explosions, a pensé qu'il valait mieux, en exposant les faits bien connus, rapprocher les analogues que de suivre l'ordre des dates.

I. *Accident survenu à la chaudière du bateau à vapeur le Parisien, n° 2, naviguant sur la Seine en amont de Paris, le 23 juin 1839.*

La chaudière du bateau à vapeur *le Parisien*, n° 2 (voyez *Pl. III, fig. 1 et 2*), se compose d'un cylindre extérieur en tôle de 1^m,25 de diamètre et 3^m,92 de longueur.

Dans l'intérieur de ce cylindre est placé un autre tuyau en tôle, dont la section est à peu

près une ellipse dont le diamètre horizontal a $1^m,02$, et le diamètre vertical $0^m,79$.

Une rangée de tubes bouilleurs verticaux, au nombre de vingt-deux, forme une cloison longitudinale qui divise ce tuyau ou canal intérieur en deux parties égales. Six autres tubes bouilleurs, trois de chaque côté, sont disposés dans un plan horizontal contenant les grands axes des sections elliptiques, s'étendent dans toute la longueur, et se prolongent d'un mètre sur le devant de la chaudière, où ils débouchent dans un bouilleur horizontal placé transversalement, qui est réuni, par un septième bouilleur horizontal parallèle aux six premiers, au tube bouilleur vertical antérieur. Le prolongement de ces six tubes forme, avec le dernier dont nous venons de parler, le plafond du foyer, qui est bordé en outre de chaque côté par un tube bouilleur.

Enfin, quatre autres tubes bouilleurs, deux à droite et deux à gauche, sont placés au-dessus de la première rangée horizontale, vont d'un bout à l'autre du canal intérieur, et sont mis en communication avec la chaudière par des tuyaux recourbés en dessus adaptés à leurs extrémités.

La flamme passe d'abord sous les six tubes bouilleurs horizontaux, et revient à la cheminée placée sur le devant en passant sur ces six tubes, et en léchant les quatre tubes supérieurs.

On a ainsi une grande surface de chauffe, mais une chaudière très-compiquée, et dans laquelle il y a un grand nombre de joints.

Cette chaudière avait subi l'épreuve par la pompe de pression. Elle était munie de deux soupapes de sûreté, dont les dimensions étaient en rapport avec la surface de chauffe, de deux ron-

delles fusibles, la première à 151, la seconde à 161 degrés centigrades, d'un tube indicateur du niveau de l'eau.

Le 23 juin 1839, le bateau *le Parisien* venait d'arriver à Melun, où il s'arrêta pour déposer et embarquer des voyageurs. Au moment où il allait reprendre le large, deux des tubes bouilleurs du même côté de la rangée horizontale supérieure se déchirèrent près du joint qui les réunissait aux tuyaux recourbés qui les mettaient en communication avec la chaudière : la vapeur et l'eau se répandirent dans la cale où étaient trois chauffeurs et le mécanicien. L'un mourut sur-le-champ, et les trois autres n'ont survécu que peu de temps. Le comptable du bateau et M. Adolphe Cochot, fils du propriétaire du bateau, qui étaient sur le pont, et penchés sur le *capot*, furent aussi blessés, le premier très-grièvement, ainsi qu'un homme de l'équipage qui voulut descendre pour porter secours à ceux qui étaient dans la cale. Du reste, aucun des voyageurs qui étaient dans les salles ne fut atteint, grâce à la forte cloison doublée en tôle qui sépare les salles des passagers des appareils moteurs.

Après l'accident, le bateau fut immédiatement visité par la commission de surveillance des bateaux à vapeur de Melun, et, trois jours après, par la commission de surveillance du département de la Seine.

La commission de surveillance de Melun reconnut :

- 1° Que les pompes alimentaires, examinées aussitôt après l'accident, étaient en bon état ;
- 2° Que les deux rondelles n'étaient point fondues ; que la moins fusible cependant était par-

semée à la surface de petits globules qui avaient été fondus, et que la grille en fer de retenue était fortement comprimée dans l'épaisseur du métal fusible ;

3° Que les bouilleurs ne contenaient aucune trace de sédiment ;

4° Que le métal des bouilleurs déchirés était brillant et décapé à l'extérieur, ce qui indiquait que ces tubes avaient été portés à une température très-élevée ;

5° Elle crut s'apercevoir que le jeu de l'une des soupapes de sûreté n'était pas parfaitement libre.

La commission de Paris reconnut en outre que le dôme du tuyau elliptique, contenant les bouilleurs, avait fléchi sous la pression de la vapeur, était rentré en dedans, et que cette partie du tuyau, en venant s'appuyer sur les tubes bouilleurs, avait déterminé leur déchirure.

L'état de l'une des soupapes, signalé par la commission de Melun, ne lui parut pas de nature à empêcher le jeu de cette soupape.

Au surplus, les deux commissions s'accordent à regarder l'accident comme étant le résultat de l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière, et du développement rapide de vapeur que produisit la projection de l'eau sur les parois suréchauffées antérieurement par l'action de la flamme, tandis qu'elles n'étaient point intérieurement baignées d'eau.

Pendant le stationnement du bateau à Melun, la chaudière ne fut point alimentée ; les passagers se portèrent presque tous du côté du bateau voisin de la terre, et le firent incliner de ce côté. Par cette double circonstance, le niveau baissa du côté opposé, et les deux bouilleurs de la rangée

horizontale supérieure placés de ce côté se vidèrent d'eau.

Au moment de prendre le large, l'eau arriva sur ces parois suréchauffées, soit par l'effet naturel du redressement du bateau, soit parce que l'un des chauffeurs, ayant reconnu l'abaissement du niveau, injecta de l'eau dans la chaudière en faisant jouer une petite machine à vapeur destinée à alimenter, quand le râteau ne marche pas, et qu'on nomme *le petit cheval*.

En tout cas, l'eau, arrivant sur ces parois suréchauffées, et d'une grande étendue, puisqu'elle se composait du dôme du grand tuyau elliptique et d'une portion de la surface de deux tubes bouilleurs, donna lieu à une formation de vapeur très-rapide, qui, ne trouvant pas une issue suffisante par les soupapes de sûreté, détermina l'accroissement de tension intérieure, qui a produit la dépression de la paroi du tuyau, et ensuite la rupture des tubes.

Il est impossible de ne pas admettre cette explication, quand on voit que les deux tubes bouilleurs déchirés conservaient, après l'accident, la trace de la température élevée à laquelle ils avaient été exposés.

Les faits que nous venons de rapporter nous paraissent donc offrir un nouvel exemple qu'on peut ajouter à ceux qui sont cités dans la notice de M. Arago sur les explosions, du danger de laisser des parois métalliques non baignées d'eau, exposées à l'action directe de la flamme ou des gaz chauds. La déformation du tuyau elliptique, observée par la commission de Paris, montre aussi les inconvénients que présentent les tubes intérieurs sous le rapport de la résistance à la rupture ou à l'écrasement.

II. *Explosion d'une chaudière placée dans l'établissement de teinture de M. Dumas, à Puteaux (Seine), survenue le 6 juin 1827.*

Cette explosion eut lieu le 6 juin 1827, et causa la mort de M. Dumas, le propriétaire de l'établissement, et d'un ouvrier.

Le 9 du même mois, les ingénieurs des mines du département de la Seine se transportèrent sur les lieux, et constatèrent les faits suivants :

La chaudière était cylindrique, terminée par deux fonds plats; elle avait 1^m, 10 de diamètre, et 3 mètres de longueur. L'épaisseur de la tôle de fer était, pour la partie cylindrique comme pour les fonds, de 6 millim. 77.

M. Dumas avait établi, deux ans auparavant, une machine servie par une chaudière d'une grande dimension, qui fournissait en même temps la vapeur nécessaire au chauffage des ateliers. Ayant renoncé à ce mode de chauffage, il dut faire diminuer les dimensions de la chaudière, qui fut transportée à cet effet chez un chaudronnier; celui-ci la raccourcit, et remplaça par un nouveau fond en tôle celui qui tenait à la partie supprimée. La longueur fut réduite à 3 mètres, ainsi qu'il a été dit plus haut.

Ainsi modifiée, la chaudière, munie de deux soupapes de sûreté placées sur la même tubulure, fut installée, sans avoir été soumise à l'épreuve au moyen de la pompe de pression, prescrite par les réglemens, et sans qu'on y eût adapté de rondelles fusibles, sur un fourneau construit en plein air dans la cour de l'établissement. On alluma le feu le 6 juin dans l'après-midi, et l'explosion eut lieu entre quatre et cinq heures du soir.

Le fond récemment adapté à la chaudière se déchira le long de la clouure sur presque tout son contour. La vapeur et l'eau bouillante se répandirent subitement au dehors par cette large ouverture; un hangar, placé à 14 mètres de distance en avant de la chaudière, fut entièrement renversé; le corps de la chaudière fut lancé en arrière par la réaction du fluide; il alla frapper et rompre le volant de la machine à vapeur, puis, continuant son trajet, il renversa deux murs parallèles de 30 centimètres environ d'épaisseur, enleva le pied d'un escalier placé entre ces deux murs, et tomba à 4 ou 5 mètres de distance du dernier mur renversé, à 20 mètres de distance de l'emplacement du fourneau.

L'ancien fond adhérent au corps de la chaudière, qui était un peu bombé en dehors, présentait après l'accident une forme concave et rentrante en dedans. Le nouveau fond, retrouvé sous les décombres du hangar, était fait avec de la tôle de 6 millimètres 77 d'épaisseur, comme nous l'avons dit plus haut, mais que les ingénieurs reconnurent d'une qualité très-inférieure à la tôle qui formait l'ancienne chaudière. La tôle était évidemment composée de trois feuilles mal soudées ensemble, qui étaient très-distinctes sur tous les points de la déchirure.

L'appareil des soupapes fut retrouvé parmi les débris. Le diamètre de chaque soupape était de 0^m,0335; le rapport des bras de levier était, pour la position extrême du poids, celui de 1 à 10. Le poids placé sur ce levier était de 6^k,363. Un commis de l'établissement déclara aux ingénieurs que, quelques instants avant l'accident, il avait vu les poids placés tout à fait à l'extrémité des bras de levier.

En s'appuyant de cette déclaration et des données précédentes, les ingénieurs ont calculé que la tension de la vapeur, dans l'intérieur de la chaudière, avait pu s'élever à 7^{at.},992, tout près de 8 atmosphères.

Si la tôle eût été de bonne qualité, elle avait une épaisseur suffisante pour résister à cette pression ; mais il est impossible de ne pas reconnaître que l'explosion a eu pour cause la mauvaise construction de la chaudière ou le défaut de qualité de la tôle ; on est donc fondé à croire que l'épreuve préalable par la pompe de pression aurait mis ces vices à découvert, et prévenu l'explosion funeste dont on vient de rendre compte (1).

III. *Explosion d'une chaudière placée dans une fabrique de sucre à Saint-Saulve, près Valenciennes (Nord).*

Au mois de juin 1839, une chaudière à vapeur placée dans la fabrique de sucre de M. Guyot, à Saint-Saulve, fit explosion.

M. Dusouich, ingénieur des mines à Arras, se transporta sur les lieux le lendemain du jour de l'accident, et constata les faits suivants :

La chaudière qui avait sauté fournissait la vapeur à une machine et à une chaudière à déféquer.

Elle était alimentée par une pompe ordinaire mue par la machine et par un retour d'eau ;

Sa forme était celle d'un cylindre à fonds plats ,

(1) Nous renvoyons, pour ce qui concerne les suites de l'explosion, à l'article 5 de cette notice, relatif à la chaudière d'Avrillé.

sans bouilleurs ; son diamètre était de 1^m,11, sa longueur de 4^m,70.

Suivant la déclaration du fabricant, elle était munie d'une seule rondelle fusible qui n'a pu être retrouvée ; elle avait en outre deux soupapes chargées, l'une directement, l'autre par l'intermédiaire d'un levier. Celle-ci a été retrouvée et mesurée ; elle était conique : la base la plus petite avait un diamètre de 34 millimètres : la grande base, un diamètre de 47^{mill.},50. D'après le poids qui la chargeait et le rapport des bras du levier, elle pouvait faire équilibre à une tension intérieure de 7 atmosphères, en prenant pour la surface pressée par la vapeur celle de la petite base. On trouverait 4 atmosphères seulement au lieu de 7, si l'on considérait la surface pressée par la vapeur comme égale à la grande base.

L'épaisseur de la tôle était de 13 millimètres pour la partie cylindrique, et de 11 millimètres pour les fonds plats.

Cette chaudière avait eu autrefois un tube intérieur pour la circulation des gaz chauds. On avait enlevé ce tube et fermé les trous des deux fonds par des plaques de tôle assemblées à rivets, et réunies entre elles par un tirant longitudinal composé de deux pièces assemblées, dans le milieu de la longueur de la chaudière, par un emmanchement à fourchette et une clavette. Chaque pièce portait à son extrémité une embase sur laquelle portait la feuille de tôle percée, et un pas de vis qui recevait un écrou placé extérieurement, destiné à presser la feuille de tôle percée sur les bords de l'embase.

M. Dusouich a recherché inutilement sur la chaudière rompue la médaille destinée à recevoir

le timbre apposé après l'épreuve que prescrivent les réglemens. Il est en conséquence probable que cette chaudière n'avait point été soumise à l'épreuve.

La *fig. 1, Pl. IV*, est la copie du croquis joint au rapport de M. Dusouich. Ce croquis représente la position des choses après l'événement. Le fond plat postérieur de la chaudière avait été déchiré sur tout le pourtour, aux points de courbure de la tôle : il avait été traversé par l'écrou extérieur ; projeté suivant une direction inclinée à l'horizon, il avait été frapper et renverser le mur O, et était retombé dans la bêche B, où on l'a retrouvé à une dizaine de mètres de son emplacement primitif.

Le corps de la chaudière avait été repoussé en arrière. Il avait démoli la maçonnerie du fourneau des générateurs *g*, rasé les tubulures portant les soupapes de cette chaudière, emporté avec lui le tuyau de retour d'eau en fonte ; les soupapes du second générateur *g* étaient aussi enlevées. Continuant ensuite son trajet, il renversa le mur *l*, d'une brique d'épaisseur, emporta et déforma complètement les chaudières de cuite *cc*, traversa un second mur *m*, d'une brique et demie d'épaisseur, alla battre en brèche le mur de soutènement du sol de la propriété voisine, qui était heureusement plus élevé que celui de la rue, renversa ce mur, et s'enfonça de 1^m,50 dans le sol avant que sa vitesse fût détruite par la résistance des terres à l'enfoncement. Les effets de la détente de la vapeur, après sa sortie du générateur, ne furent pas moins extraordinaires. Une partie de la corniche du bâtiment des ateliers A, située à 8 mètres de hauteur, fut détachée, et retomba sur la machine qui fut gravement détériorée.

La toiture du bâtiment où étaient les générateurs fut presque complètement emportée.

Une croisée, communiquant de ce bâtiment au bâtiment A, et fermée par une cloison d'une demi-brique, fut enfoncée.

Peu de dégâts eurent lieu dans l'atelier A; mais dans le bâtiment P, toutes les pannes de la couverture du bâtiment Q, situées de l'autre côté, furent également enlevées sur une longueur de 22 mètres et projetées dans la cour.

Le fond antérieur de la chaudière ainsi projeté à 24 mètres de son emplacement primitif, et enfoncé de 1^m,50 dans un massif de terre, était entièrement déformé et brisé par les chocs violents qu'il avait reçus. Le fond supérieur avait été lancé en sens contraire.

Les deux parties du tirant qui réunissait les deux fonds étaient séparées. L'emmanchement à fourchette était ouvert, et la clavette n'a pas été retrouvée. L'écrou correspondant au fond, demeuré adhérent au corps de la chaudière, était brisé sans doute par un des chocs auxquels il avait été exposé dans le trajet de la chaudière.

La machine à vapeur, immédiatement avant l'accident, donnait trente coups par minute, comme à l'ordinaire, suivant la déclaration du propriétaire. M. Dusouich a observé avec soin la tôle du fond détaché de la chaudière; elle ne lui a pas paru de très-bonne qualité, et il pense que ce défaut a concouru, avec la courbure de la tôle presque à angle droit, à diminuer la solidité de ce fond.

L'explosion de Saint-Saulve présente dans ses effets, et sans doute aussi dans les causes qui l'ont

déterminée, une analogie frappante avec l'explosion de Puteaux. Dans les deux cas, c'est un des fonds plats de la chaudière qui cède en se déchirant, à Puteaux, suivant la clouure, à Saint-Saulve, suivant la courbure presque à angle droit des feuilles de tôle, qui rattachent ce fond aux parois latérales de la chaudière.

N'est-il pas évident que cette courbure sur les bords n'a pas pu être donnée à un disque plat en tôle, sans produire des gerçures et sans altérer considérablement la ténacité du métal ?

Le tirant qui réunissait les deux fonds de la chaudière de Saint-Saulve a dû probablement céder, dans son milieu, à l'emmanchement, sous la tension de la vapeur qui tendait à bomber les deux fonds et à allonger le tirant. La clavette ne paraît pas s'être brisée; ce serait la fourche qui se serait ouverte pour laisser passer les bouts de cette clavette courbée sous l'effort de traction. Le fond postérieur ayant ensuite cédé, il est probable que la moitié du tirant emportée par lui s'en est détachée en l'air, par suite des chocs et des vibrations violentes que ces deux corps ont éprouvés. La chaudière fonctionnait d'ailleurs comme à l'ordinaire; il est donc probable que l'explosion de Saint-Saulve a été le résultat de la tension ordinaire de la vapeur, qui a suffi pour déchirer sur son contour le fond plat postérieur, après avoir fait céder l'emmanchement du tirant qui reliait les deux fonds, et il est possible que l'épreuve légale eût mis à découvert, si elle avait eu lieu, le vice de cette chaudière. On ne serait pas fondé à combattre cette explication, par le motif que la chaudière fonctionnait depuis longtemps, sous une tension qui n'aurait pas été dépassée le jour de

l'accident; car on sait bien qu'un corps solide peut supporter longtemps un effort voisin de celui qui pourrait occasionner la rupture avant de finir par céder; et d'ailleurs, par suite de la forme plate des fonds, la chaudière dont il s'agit devait se déformer progressivement, et le tirant intérieur devait s'allonger de la même manière.

On peut dire encore que si l'explosion eût été déterminée par suite d'un abaissement du niveau de l'eau intérieur et d'une formation instantanée ou très-rapide de vapeur qui aurait été occasionnée par le contact de l'eau liquide et des parois suréchauffées, la chaudière se serait probablement déchirée suivant une ligne voisine de la surface de l'eau, et des parties suréchauffées dont la ténacité aurait été affaiblie par cette cause; la déchirure a eu lieu, au contraire, suivant le contour du fond plat, et paraît même avoir commencé par la partie inférieure de ce contour, puisque le fond a été projeté par l'action de la vapeur dans une direction inclinée de bas en haut.

Les effets destructifs produits par la détente de la vapeur dans l'établissement de Saint-Saulve, ont suggéré à M. Dusouich des observations sur les dispositions du local destiné aux chaudières des machines à vapeur.

Il pense qu'il est inutile de donner à ce local des dimensions plus grandes que celles qui sont nécessaires pour rendre le service commode; que la toiture du bâtiment devrait être très-légère; les murs placés du côté des ateliers et des maisons voisines suffisamment épais pour résister aux effets de la détente, et même des corps solides projetés par l'explosion; que les autres murs devraient être au contraire très-légers.

Il est certainement rationnel de diminuer les obstacles sur les côtés où il y a le moins de danger, et la grandeur du local affecté aux chaudières est en effet sans importance pour prévenir les suites des explosions. Ce qu'il y a de mieux à faire à cet égard, quand on le peut, c'est de placer les chaudières dans une excavation en contre-bas du sol naturel, et de construire au-dessus un bâtiment à murs peu élevés, et à toiture très-légère.

Ces dispositions, que l'administration favorise autant qu'elle le peut, en diminuant, dans ce cas, les distances à observer entre les chaudières et les bâtiments voisins, réuniront souvent l'économie à la sûreté. Malheureusement, elles ne sont pas compatibles avec les nécessités de toutes les industries qui font usage de la vapeur, et occasionneraient, dans quelques localités, des dépenses trop considérables : elles sont assez fréquemment adoptées dans le département de la Seine.

IV. *Explosion d'une chaudière établie dans l'atelier du sieur Jacquet Robillard, à Arras, le 3 février 1841.*

M. Dusouich, ingénieur des mines à Arras, fut informé par la voix publique de l'explosion de cette chaudière qui avait été établie sans autorisation, et sans avoir satisfait à aucune des mesures de sûreté prescrites par les règlements ; il se transporta immédiatement dans l'atelier du sieur Jacquet, et constata les faits suivants :

La chaudière était cylindrique, à fonds presque plats, d'un diamètre de 0^m,68 et d'une longueur de 1^m,50 ; l'épaisseur de la tôle était de 4 millimètres, 2.

Elle alimentait une petite machine dont le cylindre avait $0^m,097$ de diamètre, avec une course de piston de $0^m,135$. Le volant faisait habituellement, suivant la déclaration du propriétaire, quatre-vingt-dix tours par minute.

A sa sortie du cylindre, la vapeur était conduite, par un tuyau recourbé, dans une tonne pleine d'eau, où elle se condensait. L'eau, réchauffée par la condensation de la vapeur, était prise par la pompe alimentaire menée par la machine; il n'y avait point de pompe à air. La tonne était entretenue pleine d'eau froide par les ouvriers.

La chaudière avait un flotteur, une soupape de sûreté et un manomètre fermé.

L'explosion eut lieu, suivant la déclaration du propriétaire, pendant un arrêt de la machine. Un des fonds plats fut déchiré sur tout son contour, et lancé d'un côté; le reste de la chaudière recula du côté opposé, alla frapper un mur de $0^m,12$ d'épaisseur, situé à la distance de $1^m,60$, qu'il renversa, démonta un escalier en sapin qui se trouvait derrière le mur dans l'habitation voisine, et s'arrêta là.

Les autres dégâts consistèrent en quelques vitres brisées; le sieur Jacquet fut seul blessé par une échelle qui fut renversée et le frappa au front. Les murs du local de la chaudière étaient couverts d'une légère couche de boue déposée par l'eau qui avait été lancée de tous côtés à la suite de la rupture de la chaudière.

Le manomètre était brisé. Le sieur Jacquet déclara qu'au moment de l'explosion il n'indiquait aucun excès de pression de la vapeur sur la pression atmosphérique; mais qu'après l'accident on avait reconnu que le tube de communication entre

le manomètre et la chaudière était obstrué par un dépôt argileux.

Une obstruction semblable existait dans le conduit aboutissant à la tubulure qui portait la soupape, et avait empêché le jeu de celle-ci. Le propriétaire déclara que le manomètre n'indiquait dans la marche habituelle, qu'une pression d'une atmosphère et demie à deux atmosphères, et que la soupape, chargée de deux cylindres en plomb, pesant ensemble 10 kilog., se soulevait pour une pression totale de 2 atmosphères $\frac{1}{4}$. M. Dusouich a constaté l'inexactitude de cette déclaration, en ce qui concernait la soupape de sûreté. Il a mesuré l'orifice de la tubulure, qui avait 19 millimètres $\frac{1}{2}$ de diamètre. Il a retrouvé un des cylindres de plomb qui pesait 7^k,10; le second cylindre n'a pu être retrouvé. Or, une charge de 10 kilog. sur un orifice de 19 millim. $\frac{1}{2}$ de diamètre, donne 3^k,33 par centimètre carré superficiel. La soupape ne devait donc s'ouvrir que sous une tension de la vapeur de 4 atmosphères $\frac{1}{4}$.

M. Dusouich examina le fond en tôle qui avait été séparé de la chaudière, et trouva que la tôle avait une texture cristalline annonçant un fer de mauvaise qualité; il remarque que l'épaisseur de la tôle, pour le diamètre de la chaudière et la charge de la soupape, aurait dû être de 6 millimètres $\frac{1}{4}$, d'après les instructions annexées aux règlements, au lieu de 4 millim. $\frac{1}{4}$; que la rupture a pu avoir lieu sous une faible pression, à cause de la faible ténacité que présentaient les bords recourbés presque à angle droit des fonds plats en tôle, et il pense que l'épreuve préalable de la chaudière, par la pompe de pression, aurait

vraisemblablement mis en évidence les défauts de cette chaudière.

Il ajoute que cet accident a montré que le jeu des manomètres, et même des soupapes, peut être quelquefois empêché par des obstructions provenant des matières boueuses tenues en suspension dans l'eau, et que les mécaniciens et propriétaires de machines doivent se tenir en garde contre la possibilité de ces obstructions lorsqu'ils font usage d'eaux limoneuses.

L'explosion d'Arras est tout à fait analogue à celles de Puteaux et de Saint-Saulve. Les formes des chaudières sont les mêmes; la rupture s'opère de la même manière, dans le collet recourbé qui joint un des fonds plats à la partie cylindrique de la chaudière. Les effets de l'explosion sont moins étendus, moins graves à Arras, parce que la pression qui a produit la rupture est plus faible, et surtout parce que la masse d'eau chaude contenue dans la chaudière est beaucoup moins considérable.

V. *Explosion d'une chaudière de machine à vapeur, placée sur une carrière d'ardoises de la commune d'Avrillé, près d'Angers (Maine-et-Loire).*

Cette explosion eut lieu dans la nuit du 26 au 27 avril 1839, à trois heures du matin. M. Lechatelier, ingénieur des mines de l'arrondissement, était alors en tournée, et ne put se transporter sur les lieux que quinze jours après l'événement; il a adressé à M. le sous-secrétaire d'état des travaux publics un rapport détaillé, avec un plan de la localité et des dessins de la chaudière, avant et après l'explosion. (Voir *Pl. IV.*)

La chaudière, sortie des ateliers de M. Burelle de Nantes, était cylindrique, terminée par des calottes hémisphériques, et avait deux tubes bouilleurs en tôle :

	mèt.
Le diamètre de la chaudière était de . . .	0,90
Celui des bouilleurs de	0,38
La longueur de la chaudière était de . . .	4,70
Celle des bouilleurs de	5,00

La tôle de la chaudière avait 0^m,009 d'épaisseur ;

Celle des bouilleurs était plus forte.

Cette chaudière avait été établie au mois d'octobre 1837 ; l'essai par la pompe de pression avait été fait le 14 novembre 1838, un an après l'établissement, et cinq mois avant l'explosion. Elle avait très-bien soutenu une pression d'eau effective de 12 atmosphères, et avait été en conséquence timbrée à 5 atmosphères. Toutes les conditions de sûreté prescrites par les ordonnances avaient été remplies. Ainsi, il y avait deux soupapes de sûreté de 0^m,052 de diamètre pour une surface de chauffe de 17 mètres carrés, deux rondelles fusibles, l'une à 163, l'autre à 173° ; elle était munie en outre d'un manomètre et d'un flotteur. La machine avait une force de 10 chevaux, plus que suffisante pour l'épuisement des eaux de la carrière auquel elle était destinée. M. Lechatelier remarque en outre que les eaux étaient peu abondantes à l'époque de l'explosion, et il en conclut qu'il n'y avait aucun motif de surcharger les soupapes de sûreté, et qu'au contraire il est fort probable que l'on n'avait pas besoin de pousser la tension de la vapeur à plus de 2 atmosphères $\frac{1}{2}$; enfin, la chaudière avait été nettoyée deux jours avant l'accident.

La machine était renfermée dans une petite

chambre fermée par des cloisons légères en briques, et faisant partie d'un bâtiment clos sur deux faces par des murs en pierres de 0^m,60 d'épaisseur, et, sur les deux autres faces, par de simples cloisons en planches. La cheminée, adossée à l'un des murs du bâtiment et au massif du fourneau, avait 15^m de hauteur, et 2^m de largeur à sa base. Dans l'un des angles du bâtiment était un petit cabinet et un lit pour le chauffeur qui n'était pas de service. (Voir le plan, *Pl. IV, fig. 2.*)

Le 26 avril 1839, l'un des chauffeurs, s'étant absenté, fut remplacé par un nommé Jean-François, forgeron de la carrière, qui avait déjà chauffé plusieurs fois, mais qui était peu exercé, et passait en outre pour être ivrogne. François commença sa pose à minuit, et le chauffeur de jour fut se coucher sur le lit dont nous avons parlé, où il dormait au moment de l'explosion.

A trois heures du matin, le clerc d'à bas (surveillant des travaux du fond), qui logeait dans la maison de direction située à 200 mètres de distance, entendit une détonation très-forte; il s'habilla à la hâte et courut à la machine, où il arriva deux ou trois minutes après l'explosion. La cheminée était renversée, le bâtiment rasé; auprès de ces ruines était le cadavre de François. Le chauffeur qui dormait sur le lit était enseveli sous les décombres et poussait des cris de détresse; le surveillant courut à son secours, et le dégagea. Il n'avait d'autre blessure, qu'une brûlure à la joue, produite par un morceau de coke embrasé, ou de fer rougi. D'autres personnes, réveillées par le bruit de l'explosion, accoururent sur les lieux, et on examina de plus près les effets de l'explosion.

Le cadavre du chauffeur était au point E du

plan, couché sur le dos, les pieds en avant; il était tout brûlé: la partie postérieure du crâne était emportée. Les bouilleurs restaient intacts sur les débris du fourneau; ils étaient seulement tombés sur le devant, et un peu déviés de leur direction. L'eau chaude jaillissait encore par les tubulures, au moment de l'arrivée du surveillant. Une feuille de tôle entièrement développée et formant un anneau complet du cylindre était demeurée attachée aux tubulures. Cette feuille est désignée par le n° 1 sur les *fig.* 3 et 4, *Pl. IV*. La partie postérieure de la chaudière, formant plus de la moitié de celle-ci, fut retrouvée à la distance de 190 mètres, au pied d'un gros chêne, qui l'avait arrêtée dans son trajet; elle pesait 675 kilog. La calotte opposée, à laquelle adhérait seulement une bande annulaire de tôle marquée du n° 1 sur la *fig.* 4, *Pl. IV*, avait été lancée jusqu'au point C du plan, à la distance de 70 mètres. Les feuilles de tôle, 3, 4 et 5, furent retrouvées, dans l'intervalle, au point D: elles n'étaient plus que faiblement adhérentes les unes aux autres. Une assez grande quantité d'eau avait été projetée avec le corps de chaudière; car l'espace G du plan a été trouvé couvert d'eau, et était encore mouillé deux heures après l'événement. A l'arrivée de M. Lechatelier, il a pu voir encore sur les ardoises empilées dans le voisinage de l'espace G, les traces que le dépôt contenu dans l'eau y avait laissées.

La partie postérieure de la chaudière, avant de s'arrêter au pied du chêne B, avait frappé le sol au point 1 où elle avait laissé une empreinte de 0^m,50 de profondeur sur 1^m,50 de long; elle avait ensuite ricoché, rompu deux souches d'arbres 2 et 3 et frappé le chêne B, dont elle avait entamé l'écorce à 2 mè-

tres au-dessus du sol. Les feuilles de tôle *a*, *b*, et *c* de la calotte qui terminait la chaudière étaient aplaties et rentrées en dedans par les chocs violents qu'elles avaient éprouvés.

Les parties de la chaudière ont été toutes retrouvées, et conservées jusqu'à l'arrivée de M. Lechatelier qui a pu les dessiner, et retrouver, en reconstruisant la chaudière avec les morceaux détachés, les lignes de rupture, qu'il a indiquées dans la *fig. 3*, et dans la *fig. 4* qui représente le développement de la partie cylindrique de la chaudière sur un plan horizontal. Le cylindre est supposé ouvert suivant la génératrice située entre les tubulures des bouilleurs et la surface extérieure en dessus.

Les rondelles fusibles n'ont point été fondues. La plus fusible a été comprimée dans les intervalles de la grille en fer qui la consolide, sans apparence de fusion; les soufflures du métal ont à peu près 10 millimètres de hauteur. L'autre rondelle n'a été que très-peu déformée, et cela probablement dans l'acte même de l'explosion.

On voit par les *fig. 3* et *4*, *Pl. IV*, que la chaudière s'est rompué suivant trois cercles parallèles aux bases du cylindre, et que ces lignes de rupture se trouvent dans le voisinage du tuyau alimentaire, du foyer et destubulures des bouilleurs. Les cercles de rupture sont en outre réunis par une ligne de rupture horizontale, qui se trouve à peu près au milieu de la hauteur de la chaudière, et un peu au-dessous du niveau de l'eau. Enfin toutes les lignes de rupture principales parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la chaudière sont parallèles aux lignes d'assemblage des feuilles de

tôle au moyen de rivets, et très-voisines de ces lignes.

Les eaux extraites de la carrière d'ardoises et qui servaient à alimenter la chaudière sont très-sensiblement acides, et chargées de sels.

D'après les recherches qu'a faites M. Lechatelier, elles contiennent des sulfates de peroxyde de fer, de chaux et de magnésie, des chlorures en quantité notable, et en outre de l'acide sulfurique libre. Elles rougissent le papier de tournesol, et, ce qui est un signe plus positif d'acidité, elles attaquent rapidement un morceau de fer qu'on y plonge, avec dégagement très-sensible d'hydrogène.

M. Lechatelier a donc examiné avec soin les feuilles de tôle, sur la partie interne de la chaudière : il a trouvé que dans les parties en contact avec l'eau, l'épaisseur de la tôle avait été réduite, de 9 millimètres, à 5 millimètres d'épaisseur maximum. Près des clouures, les feuilles de tôle avaient conservé leur épaisseur sous les parties protégées par les rivets, qui avaient été eux-mêmes rongés; cet état de choses est représenté par la *fig. 6, Pl. IV*, qui fait voir l'état des joints, dans toute la moitié inférieure de la chaudière. Sur quelques joints, et notamment près des tubulures des bouilleurs, l'amincissement était bien plus considérable encore.

Ainsi, au point *m*, *fig. 4*, l'épaisseur de la tôle n'était pas même d'un millimètre. Elle était aussi très-fortement amincie aux points *p* et *q* où aboutissaient les attaches qui liaient la chaudière à la maçonnerie du fourneau.

Malgré les détériorations qu'il a reconnues dans la chaudière, M. Lechatelier ne pense pas qu'elle

ait cédé sous la pression ordinaire de la vapeur, eût-elle été portée à 5 atmosph. Il dit que l'amin-cissement de la tôle a ordinairement pour effet de produire une déchirure qui donne lieu à une fuite d'eau, sans être suivie d'explosion. La chaudière employée avant celle dont il s'agit en est un exemple. Elle n'avait point de bouilleurs; sa forme était celle d'un cylindre aplati en dessous, d'un diamètre de 1^m,30. Elle était timbrée à quatre atmosphères. De temps en temps, il se déclarait des fuites qui n'ont jamais occasionné d'accidents. On les fermait, en remplaçant les feuilles de tôle détériorées, et l'on est ainsi parvenu à faire durer la chaudière quatre ou cinq ans.

D'un autre côté, les effets épouvantables de l'explosion, la projection de la chaudière à une distance de près de 200 mètres, après avoir renversé la cheminée en maçonnerie, dont le socle seul est resté debout, sur une hauteur d'un mètre, et rompu deux troncs d'arbre, les déchirures simultanées de la chaudière suivant trois cercles parallèles à la base, ne lui paraissent pouvoir s'expliquer que par une énorme augmentation de la pression intérieure.

M. Lechatelier suppose donc que François aura négligé la conduite du feu, qu'il aura fortement chargé le foyer de combustible, et puis qu'il se sera endormi; qu'alors la tension de la vapeur aura augmenté de manière à ce que les soupapes se soient soulevées et aient donné issue à un mélange d'eau et de vapeur formé par l'ébullition tumultueuse. Ce mélange serait aussi arrivé dans la machine, et la chaudière se serait en partie vidée, parce que la pompe alimentaire aurait été insuffisante pour remplacer l'eau écoulée; le jeu de la

machine aurait fini par se ralentir par suite de l'épuisement de l'eau de la chaudière, et les parois de celle-ci, dénudées d'eau, seraient arrivées à une température élevée. Si dans ce moment François s'est réveillé, il se sera pressé d'alimenter, et la formation rapide de la vapeur par l'injection de l'eau sur les parois suréchauffées expliquerait l'explosion.

Ces suppositions n'ont certainement rien que de très-naturel, et les choses ont pu se passer ainsi. Cependant, on pourrait objecter qu'une grande quantité d'eau a été projetée par l'explosion même, en G, à une assez grande distance du foyer, et sur le trajet que le corps de la chaudière lancé par l'explosion a dû parcourir; que cette eau ne pouvait venir ni des bouilleurs qui étaient encore presque pleins au moment de l'arrivée du surveillant du fond, ni du réservoir supérieur à la chaudière qui a été renversé en dedans de l'atelier; qu'une marche aussi anormale de la chaudière et de la machine, surtout le bruit de l'eau sortant par les soupapes de sûreté, aurait dû réveiller le chauffeur qui dormait tranquillement à côté de la chaudière, qui n'a été au contraire réveillé que par le fracas de l'explosion et la ruine du bâtiment, et n'a pu fournir aucun renseignement sur ce qui s'était passé. M. Lechatelier a lui-même indiqué la difficulté d'expliquer la projection d'une grande quantité d'eau dans l'espace G. Il ajoute que le constructeur de la machine, qui est arrivé sur les lieux trois heures après l'explosion, a reconnu que le robinet d'alimentation était ouvert, et la pompe alimentaire en bon état, ce qui du reste ne serait point une objection contre l'explication des faits qu'il présente.

Les circonstances qui ont immédiatement précédé l'explosion étant demeurées tout à fait inconnues, il est impossible de remonter d'une manière certaine à ses causes directes. L'explication donnée par M. Lechatelier est probable; mais on peut aussi en donner une autre qui me paraît même s'accorder mieux avec l'ensemble des faits observés. Je me permettrai de la développer, parce qu'il me semble important de montrer que les projections de chaudières à des distances de 150 à 200 mètres, et les autres effets destructeurs des explosions, ne prouvent pas qu'il y ait eu une augmentation de tension énorme, préalablement à l'accident, comme le croient beaucoup de personnes. Tous les effets de l'explosion d'Avrillé peuvent en effet se concevoir en admettant que la tension de la vapeur dans la chaudière n'a jamais dépassé celle de 5 atmosphères, qui correspondait à la charge des soupapes de sûreté, si celle-ci a suffi pour surmonter la résistance des parois, et produire la première rupture.

Des faits observés il paraît résulter que les déchirures de la chaudière n'ont point été simultanées, mais successives. Je crois qu'il s'est fait d'abord une déchirure suivant la ligne horizontale xy , *fig. 3, Pl. IV*, dans une partie où la tôle était fortement amincie. Cette ligne de rupture se serait prolongée horizontalement, si elle n'eût pas rencontré des lignes de moindre résistance qui lui étaient perpendiculaires; les deux anneaux fendus xy se sont alors ouverts en se déchirant suivant des circonférences de cercle parallèles aux lignes de rivets; les deux parties antérieure et postérieure sont ainsi demeurées liées, pendant le premier instant, sur le côté opposé à

la déchirure horizontale xy , et peut-être en dessous, par le lambeau de tôle qui est resté adhérent aux tubulures des bouilleurs; cela explique comment elles ont été lancées dans des directions qui ne sont point opposées, et qui forment l'une et l'autre un angle très-marqué avec l'axe de la chaudière. Si les déchirures suivant des cercles s'étaient faites sur tout le contour à la fois, les parties disjointes auraient été évidemment projetées dans des sens opposés, suivant les prolongements de cet axe.

En supposant que la chaudière ait contenu, au moment de la rupture, un volume d'eau égal à la moitié de sa capacité, comme dans sa marche habituelle, il y aurait eu environ 1400 litres, ou 1400 kilogrammes d'eau, sans compter celle que renfermaient les bouilleurs. Une partie de cette eau a pu être projetée en masse, au moment de l'explosion, par la force expansive de la vapeur sortant soit de la chaudière, soit des tubulures des bouilleurs, et aller retomber en G, où le sol a été trouvé mouillé; peut-être aussi une partie de la masse aqueuse a suivi, dans le mouvement de recul, le corps principal de chaudière, et a pu se vider pendant le trajet. Toutefois la première explication est plus vraisemblable, parce que la chaudière rompue se trouvant ouverte sur toute l'étendue de la section transversale, il semble que le corps de la chaudière et la masse d'eau demeurée à l'état liquide, ont dû prendre sinon aussitôt après l'explosion, du moins peu de temps après, et à une petite distance, des vitesses en sens opposé.

Quoi qu'il en soit, il est évident que la force expansive de la vapeur contenue dans 1400 litres

d'eau à la température de 153° , qui correspond à la charge des soupapes et à la tension intérieure de 5 atmosphères, est bien plus que suffisante pour expliquer la projection à 200 mètres de distance environ du corps de cette chaudière pesant 675 kilogrammes, et les autres effets décrits dans le rapport de M. Lechatelier.

En effet un kilogramme d'eau à la température de 153° contient 53 unités de chaleur au-dessus de 100° , température correspondante à une tension de la vapeur capable de faire équilibre à la pression atmosphérique. De là résulte qu'il peut être regardé comme composé de $\frac{53}{550} = 0^{\text{kilog.}},0963$ de vapeur, et de $0^{\text{kilog.}},9037$ d'eau liquide conservant encore la température de 100° (je suppose qu'un kilog. de vapeur à son maximum de densité renferme 650 unités de chaleur, quelles que soient la pression et la température, ce qui est suffisamment exact pour les recherches pratiques : la physique ne nous offre pas d'ailleurs de données plus précises à cet égard),

Ainsi les $0^{\text{k.}},0963$ de vapeur contenus dans chaque kilogramme d'eau chaude peuvent être supposés conserver, en se développant, la température de 153° et la tension correspondante de 5 atmosphères. Les 1400 kilogrammes d'eau renfermés dans la chaudière peuvent donc former, avec leur propre chaleur, l'eau restée liquide conservant encore la température de 100° , $1400 \times 0,0963 = 136^{\text{k.}},82$ de vapeur, à la tension totale de 5 atmosphères, ou de 4 atmosphères en sus de la pression atmosphérique (1).

(1) M. Pouillet, dans ses leçons au Conservatoire des arts et métiers, a considéré le travail moteur que la va-

Si cette vapeur agissait sur un piston pressé sur sa face opposée par l'atmosphère, elle le pousserait avec une force de 40,000 kilogrammes par mètre carré superficiel; et comme 1 kilogramme de vapeur à 5 atmosphères de tension et à son maximum de densité doit occuper un espace de 400 litres à peu près (1), 134^k,82 de vapeur sont susceptibles d'occuper, en se développant, un volume de 53,928 litres ou 53 mètres cubes, 928;

peur contenue dans l'eau portée à une température supérieure à 100° est susceptible de développer, comme pouvant expliquer ces ruptures de chaudières, qui ont suivi l'ouverture d'une large issue offerte à la vapeur. Il pense que l'eau projetée avec violence, contre les parois, par la force expansive de la vapeur intérieure, au moment où la pression sur la surface de la masse aqueuse est tout à coup supprimée par l'ouverture d'une issue, peut rompre ces parois.

L'explication donnée par ce savant physicien ne me paraît pas applicable aux accidents de Puteaux, de Saint-Saulve, d'Arras et d'Avrillé, où la rupture a été déterminée très-probablement par une tension intérieure qui a dépassé la résistance des parois, et non par des chocs. Ce sont les effets consécutifs à la rupture que j'attribue au travail dû à l'expansion de la vapeur.

Toutefois, il y a entre les idées que M. Pouillet a bien voulu me communiquer et celles qui sont développées ici, cette analogie, que tous les effets sont considérés comme étant dus à la vapeur condensée, si l'on peut s'exprimer ainsi, dans l'eau chauffée au-dessus de 100°, et n'agissant qu'à une tension égale ou peu supérieure à celle qu'elle possède habituellement dans la chaudière.

(1) Je prends dans le tableau des volumes relatifs de la vapeur, dressé par M. de Pambour, page 67 du *Traité des machines locomotives*, 400 pour le volume relatif de la vapeur sous la pression totale de 5 kilog. par centimètre carré superficiel. Ces nombres, sans être rigoureusement exacts, sont suffisants pour des calculs approximatifs, comme ceux que nous entreprenons.

c'est-à-dire que la vapeur, en se formant sous une pression de 5 atmosphères, serait capable de pousser un piston d'un mètre carré de surface à une distance de $53^m,928$, en exerçant sur lui une pression constante de 40,000 kilogrammes et développant par conséquent un travail moteur de 2,157,120 kilogrammes élevés à un mètre. Cette vapeur est en outre susceptible de fournir, par la détente, depuis 5 jusqu'à 1 atmosphère, une quantité de travail qui serait, en négligeant l'abaissement de la température résultant de la dilatation, et en appliquant la loi de Mariotte, des tensions en raison inverse des volumes, exprimée par le produit : $50,000 \times 53,928 \times \log. \text{hyp. } 5 = 2,157.120 = 2.190.280$ kil. élevés à un mètre; c'est-à-dire que le travail moteur dû à la détente de la vapeur serait encore un peu supérieur à celui qui est développé par sa formation. Sans doute, il y a une fort grande réduction à faire sur ce chiffre, à cause de l'abaissement de la température résultant de la propre dilatation de la vapeur et de la chaleur communiquée à l'air dans lequel elle se répand; mais aussi la quantité de travail que la vapeur contenue dans la masse d'eau chauffée à 153° peut fournir par sa formation ou par sa détente jusqu'à la pression atmosphérique d'après les calculs ci-dessus, est-elle bien plus que suffisante pour produire les effets observés après l'explosion de la chaudière d'Avrillé.

On pourrait penser que presque tout le travail moteur développé par la vapeur doit être employé à imprimer une énorme vitesse à l'eau vaporisée ou liquide, et qu'une très-faible partie de ce travail porte sur les parties solides de la chaudière

rompue. Mais on est conduit, par un examen attentif, à une conclusion différente.

D'abord, au moment même de la rupture, la tension de la vapeur étant de 5 atmosphères, surpasse la pression atmosphérique de 40.000 kilogrammes par mètre carré superficiel. La section transversale de la chaudière d'Avrillé étant un cercle de 0^m,90 de diamètre, la surface est 0^m,6362; les deux parties disjointes de la chaudière sont en conséquence repoussées avec une force de $0.6362 \times 40.000 = 25.448$ kilogrammes. Si la tôle affaiblie par l'amincissement a cédé sous cette pression, celle-ci n'a pas dû diminuer sensiblement après la rupture, et elle a été plus que suffisante pour démolir la maçonnerie du fourneau, rompre les attaches et détacher la chaudière. Le fond antérieur détaché de la chaudière avec les feuilles de tôle contiguës, aura été poussé en avant avec une certaine quantité d'eau liquide, et la vapeur formée aura communiqué à l'air qui remplissait le local de la machine, un ébranlement suffisant pour renverser les murs, la toiture, déterminer les projections des matériaux, etc. C'est à ce même moment que je conçois qu'une portion de la masse d'eau qui correspondait à la partie rompue de la chaudière, et qui se trouvait au-dessus des tubulures des bouilleurs, aura été projetée du côté de l'espace G par la force expansive de la vapeur dégagée de l'eau contenue dans les bouilleurs qui n'ont pas été rompus. Quant au corps principal de la chaudière, on peut concevoir qu'après la rupture, il s'est trouvé libre, contenant encore à peu près les $\frac{2}{3}$ de la quantité totale d'eau que la chaudière contenait, c'est-à-dire

environ 900 kilog. d'eau, à la température de 153° susceptible de former de la vapeur à une pression de 5 atmosphères. Eh bien! concevons que la vapeur se soit formée dans le fond, près de la calotte de la chaudière, et qu'elle ait repoussé en sens inverse la chaudière métallique pesant 675 kilog., et la masse d'eau antérieure du poids de 900 kilog. environ. La force répulsive, d'après ce qui a été dit, a dû être de $40.000 \times 0,6362 = 25.448$ kilog. Si cette force était demeurée constante, le corps de la chaudière aurait pris un mouvement uniformément accéléré en arrière, et la masse aqueuse un mouvement uniformément accéléré en avant.

Les vitesses acquises dans ce mouvement auraient été respectivement égales aux produits des masses par la force impulsive et les durées de son action; et les espaces parcourus auraient été égaux à la moitié des produits des vitesses finales par les durées des temps. On peut donc former le tableau suivant.

Tableau des vitesses acquises, et des espaces parcourus dans les intervalles de temps suivants, par la chaudière et la masse liquide, poussées par une force impulsive de 25,448 kilogrammes.

INTERVALLES de temps en secondes <i>t.</i>	VITESSE acquise par la chaudière pesant 675 kilog. $V = \frac{25448}{675} \text{gt.}$	ESPACE parcouru par la chaudière dans le sens de la force impulsive $e = \frac{25448}{675} g \frac{t^2}{2}$	VITESSE acquise par la masse d'eau pesant 900 kilog. $V' = \frac{25448}{900} \text{gt.}$	ESPACE parcouru par la masse d'eau dans le sens de la force impulsive $e' = \frac{25448}{900} g \frac{t^2}{2}$
1/100	mètres. 3,698	mètres. 0,01849	mètres. 2,7735	mètres. 0,01386
2/100	7,396	0,07396	5,547	0,05544
4/100	14,792	0,29584	11,094	0,22176
8/100	29,584	1,19326	22,188	0,88704
10/100	36,98	1,849	27,735	1,386
15/100	55,47	4,160	41,602	3,1185
20/100	73,96	7,396	55,70	5,557
25/100	92,45	11,556	69,34	8,66

Il résulte de ce tableau :

Qu'abstraction faite de la résistance de l'air et autres résistances extérieures, la chaudière et la masse liquide auraient acquis au bout de $\frac{8}{100}$ de seconde des vitesses opposées qui, estimées suivant l'axe de la chaudière, seraient respectivement de 29^m,584 et 22,188 par seconde. La somme des espaces parcourus en sens inverse par la masse liquide et le tronçon de chaudière serait au bout du même temps .

$1^m, 19336 + 0,8704 = 2^m, 06376$, longueur plus petite que celle du tronçon postérieur de la chaudière, de sorte qu'alors la totalité de l'eau ne serait point encore dégagée de la concavité de la chaudière.

Au bout de $\frac{1}{10}$ de seconde, la vitesse acquise par le tronçon de la chaudière serait de $36^m, 98$; mais la totalité de l'eau considérée comme une masse dont le volume reste constant, se serait dégagée un peu avant ce terme, et il semble que l'eau une fois sortie par la partie antérieure, la pression ne peut plus s'exercer contre le fond.

Mais la masse aqueuse ne conserve pas un volume constant et ne peut être chassée de la chaudière, comme le serait un tampon solide. Cette masse, dont le poids est d'environ 900 kilog., contient $900 \times 0,0963 = 86^{\text{kilog}}, 67$ de vapeur, qui, sous la tension de 5 atmosphères, occupent un volume de $86,67 \times 400 = 34.668$ litres ou 34 mètres cubes, 668.

Elle doit donc s'étendre, par suite du développement de la vapeur aussitôt après la rupture de la chaudière, en comprimant l'air extérieur contigu à la section de rupture. On peut l'assimiler à une série de couches ou lames solides, entre lesquelles seraient interposées des ressorts tendus et susceptibles de porter les lames à une distance égale à environ $\frac{34,668}{0,9} = 38 \frac{1}{2}$ fois leur distance primitive; sans que leur tension diminue sensiblement. (Cette distance une fois dépassée, la tension décroîtrait rapidement.) La vitesse imprimée aux lames voisines de la section de rupture se communique à l'air contigu, qui est en même temps fortement comprimé. Il résulte de là que la masse aqueuse doit s'allonger, à mesure que le

tronçon solide de la chaudière recule; que la pression, qui peut être considérée comme à peu près égale à 5 atmosphères dans une certaine tranche de cette masse où la vitesse serait nulle, décroît progressivement de part et d'autre de ce point, jusqu'au fond de la chaudière d'une part, et de l'autre jusqu'à l'extrémité antérieure, où elle est encore très-supérieure à la pression atmosphérique ordinaire; enfin qu'une partie de l'eau suit d'abord la chaudière dans son mouvement de recul, pour prendre plus tard un mouvement en sens inverse. Si les choses se passent ainsi, la vitesse de la chaudière croîtra, il est vrai, moins rapidement que ne l'indiquent les calculs qui précèdent, mais la vitesse imprimée à la masse liquide sera surtout diminuée par la résistance de l'air sur lequel elle s'appuie; la pression de la vapeur sur le fond de la chaudière se continuera plus longtemps, et en définitive le travail développé par l'expansion de la vapeur se partagera entre la chaudière et l'eau, dans des proportions plus favorables à la chaudière que ne l'indiquent les calculs précédents. Ce serait d'ailleurs, je crois, une tentative inutile que de chercher à les rendre plus rigoureux.

Je me bornerai donc à ajouter, 1^o que le renversement de la cheminée est facile à expliquer par les considérations précédentes: cette cheminée devant se trouver à une distance de 2 à 3 mètres au moins en arrière de la chaudière, a du être frappée par celle-ci, lorsqu'elle était animée d'une vitesse voisine de 40 à 50 mètres par seconde. Or on comprend très-bien qu'une masse de 675 kilog., animée de 40 à 50 mètres de vitesse, renverse une cheminée.

2^o Que d'après les lois connues de la mécanique,

une vitesse initiale de 62 mètres par seconde suffirait pour porter un projectile qui serait lancé sous une inclinaison de 15 degrés seulement à l'horizon, à une distance de 200 mètres, abstraction faite de la résistance de l'air, qui pour des vitesses aussi faibles n'exerce pas une très-grande influence, tandis qu'il est très-concevable que l'action de la vapeur ait pu imprimer à notre chaudière une vitesse initiale de 92 mètres, vitesse qui n'aurait été acquise qu'après un parcours d'une dizaine de mètres sous l'action de la force impulsive.

3° Que la demi-force vive correspondante à une vitesse de 92^m,45 imprimée à la chaudière, et de 69^m,34 imprimée à une masse aqueuse du poids de 900 kilog., est seulement égale à :

$$\frac{1}{2} \left(\frac{675}{9.8088} \times 92,45^2 + \frac{900}{9.8088} \times 69,34^2 \right) = 514.662.$$

Or la vapeur contenue dans les 900 kilog. d'eau à 153° que nous avons supposés contenus dans le tronçon postérieur de la chaudière, forme, d'après les calculs déjà présentés, un poids de $900 \times 0,0963 = 86^k,67$, qui par leur formation seule sont susceptibles de développer un travail moteur égal à $40.000 \times \frac{86,67 \times 400}{1000} = 1.386,720$ kilog. élevés à un mètre de hauteur. La demi-force vive calculée ci-dessus n'est que les $\frac{37}{100}$ de ce travail moteur. Ainsi les déductions que nous venons de présenter n'ont rien que de naturel et de conforme aux principes de la mécanique.

Il n'est donc pas certain que l'explosion d'Avrillé ait été déterminée, comme le croit M. Lechatellier, par un développement rapide de vapeur dû à l'abaissement du niveau de l'eau et au surchauffement des parois; et même, l'état de dégradation

de la chaudière, minutieusement constaté par cet habile ingénieur, tend à faire croire que la rupture a eu lieu sous une pression de la vapeur qui ne dépassait pas la charge des soupapes. Enfin, si l'on veut bien réfléchir qu'il est impossible d'admettre que la totalité ou seulement une partie notable de l'eau contenue dans une chaudière soit élevée tout à coup à une température beaucoup plus élevée que celle qui correspond à la pression déterminée par la charge des soupapes, on en conclura, sans que nous ayons besoin d'insister sur ce point, que l'augmentation rapide de tension déterminée par l'arrivée de l'eau sur les parois suréchauffées peut être, conformément à l'opinion généralement admise, une cause de rupture de chaudières, d'ailleurs très-solides, très-bien construites, mais que cette augmentation de tension ne peut pas ajouter beaucoup aux effets de projection et de destruction qui suivent la rupture. Ces effets ne sont pas le résultat d'un simple accroissement de pression, quelque énorme qu'il soit. Il faut, pour les produire, une pression prolongée, pendant que les corps lancés cèdent à cette pression; en un mot il faut un travail moteur, et celui qui peut être dû à la vapeur et à la petite portion d'eau suréchauffées, ou plus exactement à la quantité de chaleur emmagasinée dans les parois solides de la chaudière, sera généralement, dans les chaudières à haute pression, une petite fraction de celui que peut développer la masse d'eau totale contenue dans la chaudière, et amenée à la température correspondante à la pression déterminée par la charge des soupapes (1).

(1) Ainsi on admettra sans doute qu'en supposant que,

Quoi qu'il en soit, cet accident, sur lequel j'ai cru devoir insister pour combattre l'opinion que j'ai souvent entendu émettre, que les effets des explosions de chaudières ne pouvaient s'expliquer que par des pressions intérieures énormes, approchant de celle qui est déterminée par l'inflammation de la poudre dans l'âme des bouches à feu, met en évidence le danger d'alimenter les chaudières à haute pression avec des eaux acides qui attaquent rapidement la tôle et diminuent chaque jour son épaisseur et sa ténacité. Les chaudières à très-basse pression, 1 atmosphère $\frac{1}{4}$ ou 1 atmosphère $\frac{1}{2}$, ne présentent point le même danger : l'explosion est impossible, pourvu que le chauffeur ne surcharge pas les soupapes et maintienne le niveau de l'eau au-dessus des carneaux qui conduisent la fumée et les gaz chauds. L'action des eaux sur la tôle donne seulement lieu à des fuites d'eau fréquentes, et leur entretien devient une source considérable de dépenses.

dans la chaudière d'Avrillé, 200 kilog. de fer aient été portés à la température de 500° , on fait une hypothèse exagérée sur le suréchauffement possible des parois. Cependant, admettons que cela ait eu lieu ainsi. La capacité spécifique du fer étant prise pour unité, 200 kil. de fer, en se refroidissant de 500 à 153° , c'est-à-dire de 347° , pourront céder à l'eau $200 \times 347 \times 0,12 = 8328$ unités de chaleur seulement. Ces 8328 unités de chaleur, en se portant sur un petit volume d'eau supposé déjà à 153° , dont chaque kilogramme exige par conséquent 497 nouvelles unités de chaleur pour passer à l'état de vapeur, ne peuvent former

que $\frac{8328}{497} = 16,75$ kilog. de vapeur, tandis que la masse

d'eau chaude à 153° contenue dans la chaudière remplie jusqu'à son niveau normal, contient, ainsi que nous l'avons vu, assez de chaleur pour former plus de 134 kil. de vapeur. D'ailleurs, ce n'est pas instantanément que le fer échauffé cède sa chaleur à l'eau.

Les exemples ne manquent pas , et je puis citer quelques mines de houille du département de la Loire (presque toutes celles où il y a des couches incendiées), celles de Rochemelle (Gard), etc. , où sont installées des chaudières à basse pression (1), alimentées par des eaux très-acides, sans qu'il y ait jamais eu d'explosion.

Mais l'entretien des chaudières et même des machines à vapeur y est extrêmement dispendieux.

Je ne vois guère d'autre remède à ces inconvénients que l'alimentation avec de l'eau distillée; les machines à condensation extérieure, ou à condenseur fermé, dont l'usage commence à se répandre dans l'industrie, satisfont à cette condition, et seront probablement bientôt les seules dont on fera usage dans les circonstances dont il s'agit.

Résumé et conclusions générales.

En résumé, sur les cinq accidents dont nous venons de rendre compte, trois appartiennent à des chaudières qui n'avaient pas été soumises à la pression d'épreuve prescrite par les règlements, et que l'on peut regarder comme offrant des vices graves de construction, dont cette épreuve aurait probablement fait justice. Il est évident que les fonds plats recourbés presque à angle droit sur leur contour, pour se joindre à la partie cylindrique des chaudières, sont une disposition mauvaise, lorsque les chaudières doivent supporter des pressions intérieures un peu considérables.

(1) La tension de la vapeur ne dépassait pas dans ces chaudières, alimentées par la pression d'une colonne d'eau de 4 à 5 mètres au plus, une atmosphère et demie.

Il est impossible de recourber ainsi les bords d'un disque en tôle, sans le gercer, sans détruire son élasticité. Ce mode de construction doit donc être rejeté par les mécaniciens, ou du moins appliqué avec discernement et des précautions particulières.

Une des explosions, celle d'Avrillé, peut s'expliquer par l'amincissement progressif de la tôle dû à l'action des eaux acides, et la diminution de ténacité qui en a été la conséquence. Elle démontre le danger qui résulte de l'emploi d'eaux acides pour alimenter les chaudières à haute pression.

Enfin l'accident arrivé à bord du bateau *le Parisien*, est certainement dû à l'excès de tension intérieure de la vapeur, provenant de l'abaissement du niveau de l'eau dans la chaudière. Il vient s'ajouter aux exemples déjà connus, pour faire voir que les soupapes de sûreté et les rondelles fusibles sont inefficaces pour prévenir les effets du suréchauffement accidentel des parois, et de la formation rapide de vapeurs produites par le contact de l'eau et de ces parois.

De là résulte la nécessité de bons appareils indicateurs du niveau de l'eau, qui doivent être construits et disposés dans les chaudières installées à bord des bateaux, de façon à ce que l'abaissement du niveau au-dessous d'un point quelconque des conduits de la flamme, ne puisse pas échapper à l'attention du chauffeur et du mécanicien; il paraît indispensable qu'il y en ait plusieurs sur une même chaudière, à cause des inclinaisons diverses par rapport à l'horizon, que peuvent prendre les parois de cette chaudière dans les mouvements du bateau.

RAPPORT

Sur l'explosion de la chaudière du bateau à vapeur le Citis ;

Par M. Ch. COMBES, Ingénieur en chef des mines.

Monsieur le sous-secrétaire d'état des travaux publics a transmis à la commission des machines à vapeur, pour avoir son avis, les documents relatifs à l'explosion de la chaudière du bateau à vapeur *le Citis*. La commission m'a chargé d'examiner ces documents et de lui faire un rapport sur les causes probables de l'explosion dont il s'agit.

Je m'attacherai à résumer succinctement les faits contenus dans le rapport de la commission de surveillance de Châlons-sur-Saône, et la note de MM. Schneider et Bourdon.

La chaudière (*Pl. V, fig. 1*) qui a fait explosion était formée 1° d'une enveloppe cylindrique en tôle de 1^m,60 de diamètre, 7 mètres de longueur, et 9 à 10 millimètres d'épaisseur, dans laquelle l'eau devait s'élever jusqu'à 30 centimètres de l'arête supérieure; 2° d'un cylindre excentrique intérieur, aussi de 7 mètres de longueur, 1 mètre de diamètre, 6 à 7 millimètres d'épaisseur, contenant à l'avant le cendrier, la grille et le foyer; il donnait passage à la flamme et aux produits gazeux de la combustion qu'il conduisait à la cheminée; 3° enfin, d'un bouilleur concentrique au cylindre précédent, qui le renfermait entièrement. Ce bouilleur avait 5^m,67 de longueur, un diamètre de 0,50, une épaisseur de tôle de 7 à 8 millimètres; il communiquait avec la partie inférieure de la chaudière par trois tubulures situées à son fond, et destinées

à l'alimentation, et avec la partie supérieure de cette même chaudière par une seule tubulure située à son extrémité opposée au foyer, et destinée à la transmission de la vapeur formée dans le bouilleur. La chaudière ainsi composée était fermée à l'avant par un fond plat, en tôle, de 10 millimètres d'épaisseur, portant deux tubes indicateurs en verre et trois robinets indicateurs.

Elle était en outre munie de deux soupapes de sûreté, ayant l'une 12 centimètres, et l'autre 4^{cent.}, 2 de diamètre, de deux rondelles fusibles marquées des numéros 155 et 165. D'après l'article 5 de l'ordonnance royale du 29 octobre 1823, et la table des forces élastiques de la vapeur annexée à la circulaire du 19 mai 1825, ces timbres doivent correspondre à une pression de 4 atmosphères dans l'intérieur de la chaudière.

La chaudière ne portait pas le timbre constant qu'elle avait été soumise à l'épreuve d'une pression hydraulique triple de la pression effective de la vapeur, et la commission de surveillance de Châlons-sur-Saône s'est assurée que cette épreuve n'avait point été faite.

Il paraît que la chaudière n'était pas pourvue d'un manomètre. La commission de surveillance ne paraît pas avoir vérifié si la charge des soupapes de sûreté correspondait exactement à la pression intérieure de 4 atmosphères.

La chaudière avait été exécutée dans l'usine de Pont-sur-l'Oignon (Haute-Saône). L'établissement du Creusot avait été chargé de confectionner la machine à vapeur, et de compléter les aménagements.

Le dimanche 17 février 1841 eut lieu le premier essai du bateau à vapeur *en marche*.

MM. Schneider et Bourdon, celui-là propriétaire, celui-ci directeur des ateliers de construction du Creusot, étaient à bord; avec eux se trouvaient plusieurs mécaniciens et chauffeurs expérimentés.

Suivant la déclaration de MM. Bourdon et Schneider, les feux furent allumés, à midi, avec des charbons de mauvaise qualité du canal du Centre. A deux heures et demie, les machines purent commencer à fonctionner. Le bateau descendit la Saône très-lentement. Bien que la pression fût très-faible, une soupape mal rodée laissait perdre la vapeur. Arrivés à 4 kilomètres au-dessous de Châlons, au port Guillot, on résolut d'arrêter, pour renouveler le feu avec des charbons plus gros. La grille fut décrassée et rechargée de charbons frais. Le bateau était arrêté depuis 15 à 25 minutes, amarré à terre; MM. Schneider et Bourdon venaient de quitter la chambre des machines et de remonter sur le pont; ils déclarent qu'ils s'étaient assurés l'un et l'autre du niveau de l'eau, à l'avant de la chaudière, tant par l'inspection des tubes indicateurs que par les robinets de jauge. Aucun ordre de départ n'avait été donné lorsque l'explosion eut lieu; peu d'instants après le bateau avait sombré; sur vingt-six personnes qui étaient à bord, onze furent tuées, et neuf blessées plus ou moins grièvement.

Le lundi, 25 janvier, la chaudière fut retirée de l'eau, et le bateau mis suffisamment à sec, pour que l'on pût constater les effets de l'explosion.

Le fond antérieur de la chaudière, le foyer et la partie du cylindre intérieur qui recouvrait le foyer, avaient été projetés au loin vers l'avant du bateau. Le reste du cylindre intérieur contenant

le foyer, était écrasé et était venu s'appliquer sur le dôme et les flancs latéraux du bouilleur par des plis rentrants. Le corps entier de la chaudière, du poids de 4500 kilog., avait été lancé en arrière, avait brisé une des jambes du mât, enfoncé la base de la cheminée, rompu l'arrière du bateau qu'il avait traversé, et avait été projeté dans la rivière à 35 mètres environ de distance de son emplacement primitif, suivant la commission de surveillance, et à 15 mètres de distance de l'arrière du bateau, suivant MM. Schneider et Bourdon (ces évaluations doivent être très-rapprochées). Le corps du bouilleur n'était aucunement endommagé; le grand cylindre de la chaudière n'était pas non plus déformé; seulement les soupapes de sûreté avaient été enlevées et n'ont pu être retrouvées. Le bout du tuyau de conduite de la vapeur avait été détaché de la chaudière par la rupture, à ce qu'il paraît, de ses collets en fonte, et lancé à 15 mètres de distance vers la proue; la plaque de fermeture du trou d'homme était tombée dans l'intérieur de la chaudière. Les rondelles fusibles étaient demeurées attachées à la chaudière, et ont été retrouvées intactes.

Discussion.

Il résulte du rapport de la commission de surveillance de Châlons, que la chaudière du bateau *le Citis* n'avait point été soumise à l'épreuve de la pression hydraulique, triple de la pression effective formellement prescrite par l'article 3 de l'ordonnance royale du 29 octobre 1823, et par l'article 1^{er} de l'ordonnance royale du 7 mai 1828. Les épaisseurs de la tôle du grand cylindre-enveloppe et du bouilleur intérieur étaient suffisantes

pour une pression intérieure de quatre atmosphères, et en dessus des limites fixées par la table annexée à l'instruction ministérielle du 12 juillet 1828. L'épaisseur du cylindre intérieur contenant le foyer était, au contraire, un peu en dessous de celle que devrait avoir un cylindre de même diamètre (1 mètre), qui contiendrait de la vapeur dans son intérieur et serait pressé de dedans en dehors normalement à sa paroi concave. L'épaisseur prescrite est de 8^{millim.},4, et l'épaisseur du cylindre intérieur était seulement de 7 à 8 millimètres. Or, il est évident que ce cylindre était dans des conditions bien autrement défavorables que s'il eût contenu la vapeur dans son intérieur; il était en effet pressé de dehors en dedans, par une force qui tendait à l'écraser sur lui-même.

La pression intérieure de la vapeur a dû d'abord faire fléchir, dans le sens longitudinal, toutes les arêtes du cylindre intérieur contenant le foyer, de façon que ce cylindre prît un diamètre plus petit vers le milieu de sa longueur. Les deux fonds plats ont dû par cela même se déverser l'un vers l'autre, en tournant autour du cercle de jonction avec le cylindre-enveloppe. Ils ont pris, au lieu de la forme plane, la forme de surfaces de troncs de cône, à sommets tournés vers l'intérieur de la chaudière, de telle sorte que les arêtes fissent un angle aigu avec celles de la surface cylindrique-enveloppe, obtus avec celles de la surface cylindrique intérieure. Ces effets ont dû se produire même sous une pression effective fort peu élevée de la vapeur; ils étaient une conséquence forcée de la forme de la chaudière, et on ne voit pas que le constructeur eût cherché à les prévenir

ou à les atténuer par des armatures convenablement disposées. On conçoit maintenant très-bien qu'il se soit fait une première déchirure, soit à la jonction d'un des fonds plats avec le cylindre extérieur ou intérieur, soit dans un des fonds. Dès lors rien n'a empêché le cylindre intérieur de s'affaisser sur lui-même en se plissant dans le sens de sa longueur, comme cela est réellement arrivé. Le fond antérieur, séparé d'abord sur un point du cylindre-enveloppe, a été bientôt complètement arraché et projeté par la pression intérieure. Il a emporté avec lui une petite partie du cylindre intérieur; le bouilleur n'a point éprouvé la moindre altération; le cylindre extérieur lui-même n'a pas eu de déformation notable. Si le tuyau de conduite de la vapeur a été rompu et les soupapes de sûreté enlevées, on peut tout aussi bien croire que ces ruptures proviennent des chocs que ces parties saillantes ont éprouvés contre des objets extérieurs lors du recul de cette chaudière, que des pressions développées au moment de l'explosion. Enfin, on peut remarquer que le fond du cylindre intérieur ne s'est pas non plus déformé dans le voisinage de la ligne à laquelle venaient aboutir les trois tubulures qui réunissaient les parois du bouilleur à celles du cylindre intérieur. Ces tubulures ont fait ici l'office d'armatures et ont prévenu l'écrasement.

J'estime, en conséquence, qu'il n'est pas besoin, pour expliquer l'explosion du bateau *le Citis*, de supposer qu'une portion quelconque des parois intérieures de la chaudière ou du bouilleur ait rougi, parce qu'elle aurait été extérieurement en contact avec la flamme ou les gaz échauffés, et intérieurement hors de l'eau, ainsi

que l'ont supposé, d'une part, MM. les membres de la commission de surveillance de Châlons, et d'autre part, MM. Schneider et Bourdon. D'abord, le témoignage de ces derniers suffirait pour qu'on fût assuré que l'eau n'a pas manqué dans la chaudière principale, quand bien même toutes les circonstances qui ont précédé l'explosion, et notamment l'attention des personnes expérimentées qui se trouvaient à bord, ne viendraient pas prêter à ce témoignage une force de nature à porter une conviction entière dans tous les esprits.

D'un autre côté, s'il s'est fait un vide d'eau vers le dôme du bouilleur, comme le supposent MM. Schneider et Bourdon, il est impossible d'admettre que ce vide ait été fort étendu, bien qu'on doive reconnaître l'insuffisance et la mauvaise position de la tubulure unique destinée à porter à la partie supérieure de la chaudière la vapeur formée dans le bouilleur. Mais, malgré ce vice de construction, on ne pourrait concevoir un vide d'eau quelque peu étendu dans l'intérieur du bouilleur, qu'autant que l'axe de celui-ci aurait été fortement incliné de l'avant vers l'arrière du bateau, tandis qu'il résulte des dessins transmis (*Pl. V, fig. 3, 4 et 5*) et des explications données dans le rapport de la commission de Châlons, que cet axe était sensiblement horizontal.

Un feu vif n'était allumé que depuis 25 minutes au plus, le bateau était immobile, la production de vapeur devait être régulière, et rien ne paraît justifier l'idée de ces retours d'eau alternatifs sur l'espace délaissé par la vapeur, émise par MM. Schneider et Bourdon. Enfin, si un développement considérable, et pour ainsi dire instantané, de vapeur dans l'intérieur du bouilleur

eût été la cause première de la catastrophe, pourquoi le bouilleur n'a-t-il pas été endommagé? On sait que, dans de pareilles circonstances, l'excès de solidité ne garantit pas les parties sur lesquelles se porte d'abord l'action des forces qui tendent à produire des ruptures.

Au contraire, tout indique que la pression de la vapeur a augmenté graduellement et uniformément dans tout l'intérieur de la chaudière : c'est la partie évidemment la plus faible qui a cédé, c'est le fond plat antérieur qui ne tenait qu'aux bouts des deux cylindres intérieur et extérieur. Le fond plat postérieur a résisté parce qu'il était renforcé par le voisinage d'une des tubulures inférieures du bouilleur, par la tubulure allant du bouilleur à la partie supérieure de la chaudière, enfin par la jonction avec la base de la cheminée. La première déchirure une fois survenue, tout le reste se conçoit sans peine et ne diffère en rien des faits déjà observés dans d'autres explosions.

Conclusions.

De tout ce qui précède, je pense qu'on peut conclure que l'explosion de la chaudière du bateau *le Citis* provient d'abord des vices de construction de la chaudière, qui, à raison de sa forme et du défaut d'armatures convenables pour prévenir la déformation du cylindre intérieur et des fonds plats, et de l'épaisseur trop faible de ce cylindre, était incapable de supporter longtemps une pression intérieure de quatre atmosphères.

Je ne puis m'empêcher de faire observer que si la chaudière eût été convenablement éprouvée, comme elle aurait dû l'être, sous une pres-

sion d'eau triple de la pression effective, conformément aux dispositions des ordonnances royales des 29 octobre 1823 et 7 mai 1828, il paraît très-probable qu'elle ne l'aurait pas soutenue, et qu'on aurait ainsi prévenu la catastrophe déplorable du 17 janvier. On doit donc vivement regretter cette inexécution du règlement, et j'estime qu'il y a lieu de la signaler à MM. les préfets des départements de la Haute-Saône et de Saône-et-Loire, en leur rappelant qu'aux termes des ordonnances citées plus haut « les chaudières » des machines à haute pression ne peuvent être » mises dans le commerce, ni employées dans un » établissement, sans que préalablement leur force » ait été soumise à l'épreuve de la presse hydraulique. »

Je regarde aussi comme très-fâcheux qu'il n'ait pas eu de manomètre adapté, avant l'essai du 17 janvier, à la chaudière du bateau *le Citis*, bien que je ne pense pas qu'il y ait eu excès de tension de la vapeur. Il eût été à désirer que le fait pût être formellement constaté par les indications du manomètre, auxquelles ne peuvent suppléer complètement les soupapes de sûreté (1).

Enfin, en terminant, je crois devoir insister sur les dangers particulièrement graves qui résultent de l'emploi des chaudières à larges tubes intérieurs, comme l'était celle du *Citis*, et qui ont des faces planes, même peu étendues. Ces parties ne résistent pas à la manière des surfaces sphériques ou cylindriques pressées de dedans en dehors; elles peuvent en effet se déformer sans

Un manomètre était adapté à la chaudière du *Citis*.
(Voyez le rapport supplémentaire qui suit.)

déchirure préalable, et même sans extension de leurs fibres, de manière à augmenter la capacité intérieure de la chaudière. En conséquence, on doit munir ces sortes de chaudières de fortes armatures, convenablement disposées, pour prévenir ces déformations; et l'épreuve par la pression hydraulique est le seul moyen de reconnaître si elles sont capables d'opposer une résistance suffisante. Cette épreuve a suffi déjà pour faire mettre au rebut quelques chaudières de ce genre, construites à Paris; il sera très-utile d'appeler sur ce sujet l'attention de MM. les préfets, des ingénieurs et des commissions de surveillance.

Approuvé par la commission des machines à vapeur, dans sa séance du 1^{er} mars 1841.

RAPPORT SUPPLÉMENTAIRE*Sur l'explosion de la chaudière du bateau
à vapeur le Citis.*

Par M. COMBES, Ingénieur en chef des mines.

M. Schneider aîné a adressé à M. le sous-secrétaire d'État des travaux publics, le 24 mars derniers, une lettre contenant des observations, au sujet du rapport de la commission des machines à vapeur, sur l'explosion de la chaudière du *Citis*.

La commission des machines à vapeur a principalement insisté : 1° sur l'omission de l'épreuve préalable de la chaudière, sous une pression d'eau triple de la pression effective, prescrite par les ordonnances royales des 29 octobre 1823 et 7 mai 1828; 2° sur l'épaisseur trop faible du cylindre intérieur d'un mètre de diamètre et de 7 mètres de long contenant le foyer intérieur, et surtout sur le défaut d'armatures suffisantes, pour prévenir l'écrasement de ce cylindre, et les dangers particuliers que présentent les larges tubes intérieurs qui sont pressés de dehors en dedans; 3° elle a remarqué que, dans les chaudières, rien n'indiquait dans le rapport de la commission de surveillance, ni dans la note de MM. Schneider et Bourdon, qu'un manomètre fût adapté à la chaudière; 4° tout en reconnaissant la mauvaise disposition de la tubulure unique destinée à conduire dans la partie supérieure de la chaudière principale la vapeur d'eau formée dans le bouilleur, il lui a paru que l'explosion, vu les circonstances qui l'ont précédée, pouvait être attribuée, avec

beaucoup de vraisemblance, au défaut de résistance de la chaudière, sans avoir recours à l'hypothèse d'une formation rapide, presque instantanée, d'une grande quantité de vapeur dans l'intérieur du bouilleur; elle a en conséquence déclaré qu'il lui paraissait très-probable que la chaudière n'aurait pas soutenu, sans être déformée, l'épreuve préalable de la pression triple de la pression effective, prescrite par les ordonnances.

M. Schneider combat surtout cette dernière opinion. Il rappelle que le fond plat de l'avant avait 11 à 12 millimètres d'épaisseur. Il ajoute qu'il était fortement renforcé par *deux fers d'angle servant à la jonction des deux cylindres de la chaudière*, et que, *de plus, vers le milieu de la partie plane, il y avait un fer d'angle rivé et armé de tirants qui reliaient les deux fonds; que le petit cylindre avait de 7 à 8 millimètres d'épaisseur, et que,* BIEN QU'IL NE FUT PAS SANS DOUTE DANS DE BONNES CONDITIONS D'AVENIR, *il était certainement assez fort pour résister à l'épreuve, en raison de son petit diamètre, de la faible dimension des feuilles de tôle placées transversalement et des rivures très-rapprochées, qui ajoutaient à la force, pour résister à la pression extérieure.*

M. Schneider dit ensuite qu'on a éprouvé au Creusot plusieurs chaudières, dans des conditions de forme analogues, qui toutes ont parfaitement supporté l'épreuve; il cite notamment une chaudière faite récemment pour un manufacturier de Châlons-sur-Saône, dont les dimensions prescrites étaient les mêmes, sauf les communications de vapeur et d'eau, que celle du *Citis*, qui a résisté à une épreuve de 10 atmosphères et puis fonctionné régulièrement.

Plus loin, M. Schneider dit que la tension de la vapeur, dans la chaudière du *Citis*, n'avait pas atteint certainement trois atmosphères, quelques instants avant l'explosion, puisque les soupapes de sûreté chargées seulement à trois atmosphères n'avaient pas levé, et que d'ailleurs MM. Schneider et Bourdon venaient de vérifier eux-mêmes sur le MANOMÈTRE, quelques instants avant l'explosion, que la pression n'atteignait pas deux atmosphères.

En conséquence, M. Schneider aîné dit que l'explosion ne peut provenir que de la cause déjà signalée dans la note de MM. Schneider et Bourdon, savoir : un vide d'eau et un espace rempli de vapeur qui se serait formé dans l'intérieur du bouilleur, par suite de l'insuffisance et de la mauvaise position de la tubulure destinée à évacuer la vapeur formée dans ce bouilleur; le retour de l'eau sur les parois rougies ou fortement échauffées, et la formation rapide d'une grande quantité de vapeur dans l'intérieur du bouilleur, ce qui aurait produit une augmentation subite de tension et la rupture de la chaudière dans la partie la moins résistante.

M. Schneider conclut que l'épreuve à froid, très-utile ordinairement, n'est cependant pas une garantie en certains cas, et notamment dans celui dont il s'agit, et qu'il y aurait peut-être lieu, en conséquence, d'assujettir à un examen spécial les formes et dispositions intérieures des chaudières à vapeur, et particulièrement de celles qui sont destinées à la navigation.

Observations.

Il résulte de la lettre de M. Schneider aîné, que la chaudière du *Citis* était pourvue d'un mano-

mètre, qui n'indiquait pas, quelques instants avant l'explosion, une pression de plus de 2 atmosphères. Cette indication était omise dans les premiers documents transmis à la commission.

Il en résulte aussi que les armatures de la chaudière consistaient en deux fers d'angle qui reliaient les fonds plats aux deux cylindres, et un troisième fer d'angle placé vers le milieu de la partie plane, rivé et armé de tirants qui reliaient les deux fonds. La lettre n'indique pas le nombre des tirants; mais il paraîtrait, d'après le dessin de la chaudière joint au rapport de la commission de surveillance (*Pl. V*), qu'il y en avait deux, et que la déchirure du fond plat antérieur a eu lieu suivant une ligne située au-dessous des points d'attache de ces tirants et du fer d'angle, de sorte qu'après l'explosion, les tirants sont demeurés entiers, et attachés au corps de la chaudière lancé en arrière par la poussée de la vapeur.

Le rapporteur ne peut s'empêcher de faire remarquer que ces tirants longitudinaux étaient peu propres à renforcer la chaudière, parce qu'ils n'opposaient qu'un faible obstacle à la flexion du cylindre intérieur perpendiculairement à son axe, et ne diminuaient pas l'énorme traction qui a dû se développer, même par une faible pression intérieure, sur les contours par lesquels ce cylindre se rattachait aux deux fonds plats.

Il eût été évidemment plus convenable de renforcer la chaudière par deux ou trois systèmes de tirants, disposés dans des plans parallèles aux fonds plats, et reliant le cylindre-enveloppe au cylindre intérieur, qui aurait été en outre muni de cercles en fer forgé, aux points d'attache des tirants. Ceux-ci auraient alors soutenu la pression de la

vapeur sur le cylindre intérieur, en supportant une traction longitudinale, et auraient ainsi déchargé les fonds plats de la traction exercée par le contour du cylindre intérieur. Les tirants, tels qu'ils étaient établis, ont dû être pressés dans le sens de leur longueur, qui était fort grande; eussent-ils même résisté complètement à cette pression, cela n'empêchait pas les fonds plats de fléchir et de se déchirer entre les points d'attache de ces tirants et le contour du cylindre intérieur.

M. Schneider aîné dit qu'on a essayé au Creusot des chaudières de forme semblable et qu'elles ont résisté à l'épreuve. Cet argument ne paraît pas concluant. Il est peu probable que la parité fût complète, et il faut remarquer que dans les chaudières de la forme de celle qui était à bord du *Citis* la longueur est l'élément qui influe le plus sur la résistance à la rupture, quand il n'y a pas d'armatures disposées, ainsi qu'il a été dit précédemment.

Il n'y a donc rien, dans les nouvelles observations de M. Schneider, qui établisse l'in vraisemblance de la rupture ou plutôt de la déformation de la chaudière du *Citis* sous la pression d'épreuve prescrite par les ordonnances, et qui soit de nature à modifier sur ce point le premier avis de la commission.

M. Schneider insiste sur la disposition vicieuse du bouilleur intérieur et des communications établies entre le bouilleur et le cylindre : c'est là, suivant lui, la véritable cause de l'explosion qui a eu lieu. Il voudrait que l'on assujettît à un examen spécial les formes et les dispositions intérieures des chaudières à vapeur, et particulièrement de celles qui sont destinées à la navigation.

Le rapporteur, sans accorder que, dans le cas particulier dont il s'agit, l'explosion ait eu pour cause nécessaire celle qui est indiquée par M. Schneider, partage entièrement l'avis de cet habile manufacturier sur les vices essentiels que présentaient les dispositions de la chaudière du *Citis*. La commission des machines à vapeur avait déjà, dans son premier avis, signalé *l'insuffisance et la mauvaise position de la tubulure unique destinée à conduire dans la partie supérieure de la chaudière la vapeur formée dans le bouilleur*. A cela il faut ajouter que le bouilleur recevait l'action de la flamme principalement à la partie supérieure et à l'extrémité la plus éloignée de la tubulure. Certes, si l'on ne savait pas que le bateau était en repos, que le feu était allumé seulement depuis vingt-cinq minutes, que la chaudière était en conséquence bien remplie d'eau; qu'on avait eu soin de porter du lest à l'avant du bateau, pour que les axes du bouilleur et de la chaudière ne fussent pas inclinés vers l'arrière; enfin que tout était parfaitement en ordre une minute avant l'explosion, ainsi que cela a été constaté par MM. Schneider et Bourdon, la commission aurait admis l'explication de la catastrophe donnée par ces messieurs. Les circonstances qui ont précédé l'explosion ont rendu plus vraisemblable pour elle un défaut de résistance que l'épreuve aurait pu manifester.

Le rapporteur persiste dans cette opinion; mais il estime que la commission des machines à vapeur, en maintenant son premier avis et les motifs qui l'ont déterminé, doit engager M. le sous-secrétaire d'état à rappeler aux commissions de surveillance des bateaux à vapeur qu'elles sont

investies du droit et qu'elles ont le devoir de s'assurer, avant de donner leur avis sur les délivrances des permis de navigation provisoires ou définitifs, que les chaudières de bateaux ne présentent pas, en raison de leurs formes ou de leurs dispositions intérieures, des causes particulières de dangers. Les conclusions définitives de la commission seraient en conséquence arrêtées comme il suit.

Conclusions.

1° Il y a lieu, de la part de M. le sous-secrétaire d'état des travaux publics, de signaler à MM. les préfets des départements de la Haute-Saône et de Saône-et-Loire l'inexécution des mesures prescrites par les ordonnances royales des 29 octobre 1823 et 7 mai 1828, en ce qui concerne l'épreuve préalable de la chaudière du bateau à vapeur *le Citis*, confectionnée à Pont-sur-l'Oignon (Haute-Saône) et essayée à Châlons-sur-Saône, et de leur faire remarquer qu'il est probable que cette chaudière, en raison de sa forme et du défaut d'armatures intérieures convenablement placées, n'aurait pas supporté l'épreuve d'une pression intérieure de 9 atmosphères, prescrite par les réglemens, sans être déformée, ce qui aurait peut-être prévenu l'explosion dont plusieurs personnes ont été victimes le 17 janvier dernier.

2° Il y a lieu, de la part de M. le sous-secrétaire d'état, d'appeler l'attention de MM. les préfets et des commissions de surveillance des bateaux à vapeur sur les dangers particulièrement graves que présentent certaines formes de chaudières, notamment celles qui ont des faces planes et sont munies de larges tubes intérieurs, et celles dont

les bouilleurs ne sont pas mis en communication avec le corps principal de la chaudière par plusieurs tubulures larges, situées à la partie supérieure de ces mêmes bouilleurs, et assez près des points qui reçoivent le plus directement l'action du foyer et de la flamme du combustible.

Les chaudières à faces planes et à larges tubes intérieurs ne peuvent résister à une forte pression interne que par un système d'armatures convenablement disposées.

Il est indispensable de leur faire subir avec une attention toute particulière l'épreuve de la pression triple voulue par les réglemens, et de n'en autoriser l'emploi et la mise dans le commerce, qu'après s'être assuré qu'elles n'ont éprouvé pendant l'épreuve aucune déformation permanente, et qu'elles n'ont accusé par aucun signe apparent un défaut de résistance qui devrait les faire prohiber immédiatement.

Les chaudières dont les bouilleurs ne communiqueraient avec le corps de la chaudière que par des tubulures étroites, adaptées ailleurs que sur le dôme des bouilleurs, ou même trop loin des points qui reçoivent le plus directement l'action du foyer, offrent un danger très-grave, en ce qu'il peut se former, par suite de la viscosité de l'eau ou de l'inclinaison des bouilleurs, qui est accidentellement variable dans les machines de bateaux, des espaces vides d'eau et remplis de vapeur à la partie supérieure des bouilleurs. Les parois peuvent ainsi être facilement suréchauffées par l'action du foyer, le métal perd une grande partie de sa ténacité, et le retour de l'eau sur les parois suréchauffées peut déterminer une explosion.

Les commissions de surveillance sont investies du droit et ont le devoir d'examiner dans tous ses détails le bateau et l'appareil moteur pour lequel on sollicite un permis de navigation, et elles ne doivent proposer aux préfets de délivrer les permissions, qu'autant qu'elles se sont assurées d'abord que les prescriptions des ordonnances en vigueur ont été accomplies, et ensuite qu'aucune cause particulière de danger ne peut provenir de la forme et de la disposition de la chaudière.

La commission des machines à vapeur, dans sa séance du 24 avril courant, a entendu la lecture du présent rapport, et elle en a adopté les conclusions définitives.

RAPPORT*Sur l'explosion d'une chaudière du bateau
à vapeur la Bretagne.*

Par M. COMBES, Ingénieur en chef des mines.

Exposé des faits constatés par la commission de surveillance des bateaux à vapeur instituée à Nantes.

La commission de surveillance de Nantes se rendit, le 6 mars 1841, à bord du bateau à vapeur *la Bretagne*, construit par M. Jollet, pour examiner ce bateau, et l'appareil moteur fourni par M. Alliot.

Le bateau était muni de deux machines de la puissance de 95 chevaux, ayant chacune deux cylindres oscillants.

Chaque machine avait deux pompes alimentaires mues par des excentriques.

En outre, une petite machine de la puissance d'un cheval, placée à bâbord près de la muraille du navire, était installée pour faire mouvoir au besoin deux pompes alimentaires particulières.

La vapeur était produite par deux chaudières en tôle, placées des deux côtés du navire.

Chaque chaudière était formée d'un générateur cylindrique en tôle contenant dix-neuf tubes, pour la circulation de la flamme, avec foyer intérieur sur le devant, et d'un réservoir cylindrique à fonds hémisphériques, établi immédiatement au-dessus du générateur.

Les dimensions de la chaudière de tribord, qui a fait explosion, étaient les suivantes :

	mèt.
Longueur totale du générateur.	8,39
Longueur du foyer.	2,55
Diamètre intérieur du tube cylindrique contenant le foyer.	1,05
Diamètre de l'enveloppe cylindrique du générateur.	1,35
Diamètre de chacun des 19 tubes.	0,16
Longueur des tubes.	4,84
Longueur du récipient de la cheminée.	1,10
Diamètre intérieur de chacune des tubulures qui mettent en communication le générateur et le réservoir.	0,65
Diamètre du réservoir.	1,10
Longueur totale du réservoir	4,90
(Il est établi au-dessus de la moitié anté- rieure du générateur.)	
Distance des centres des deux tubulures.	2,90
Distance des bords des tubulures.	2,25
Distance verticale des trois tubes les plus élevés à la partie supérieure du générateur.	0,25
Surface de chauffe 42,23 mètres carrés.	
Épaisseur de la tôle.	0,012

Chaque réservoir était muni de six robinets indicateurs étagés et d'un manomètre.

Dans sa visite du 6 mars, la commission s'assura que les chaudières et les cylindres avaient été éprouvés par M. l'ingénieur des mines, pour la pression ordinaire de 5 atmosphères;

Que les machines étaient d'une bonne construction ;

Que toutes les mesures prescrites par les ordonnances des 29 octobre 1823, 7 et 25 mai 1828, avaient été prises ;

Que le bateau était solidement construit, et qu'après l'addition de quelques pièces consolidatrices, il présenterait toutes les garanties de solidité désirables pour supporter la mer.

Dans la soirée du 6 mars, au moment où le paquebot allait partir pour se rendre devant le

chantier de M. Jollet, la chaudière de tribord fit explosion. Le réservoir de cette chaudière fut séparé du générateur, et lancé à une distance d'environ 150 mètres (1).

Le 8 du même mois de mars, la commission, qui s'était adjoint M. Lorieux, ingénieur en chef des mines, se rendit à bord du navire, pour constater les circonstances de l'accident du 6.

Elle reconnut :

1° Que les deux tubulures de communication entre le générateur et le réservoir de la chaudière de tribord, au lieu d'être fixées avec des rivets, comme dans la chaudière de bâbord, étaient simplement réunies à emboîtement, avec mastic ferrugineux, et que cet assemblage était consolidé par deux barres de fer, réunies par deux boulons à vis et écrou, dont l'une portait sur la partie rentrante de la tubulure du réservoir, tandis que l'autre s'appuyait en dedans du générateur, sur son enveloppe cylindrique (*Pl. VI, fig. 1*).

2° Que lorsque le réservoir s'était séparé du générateur, la barre supérieure de chaque système s'était recourbée à ses deux extrémités, de manière à prendre la forme d'un croissant qui avait pu se dégager de la tubulure du réservoir ;

3° Que les six tubes supérieurs en cuivre du générateur de tribord avaient été brûlés près du foyer, et se trouvaient déchirés ;

4° Qu'il s'était formé à l'enveloppe du foyer de la chaudière de bâbord (qui n'avait pas fait explosion), et sous la tubulure de l'avant, une dépression intérieure longue de 8 centimètres, ayant une flèche d'environ 2 centimètres ;

(1) Cette explosion a coûté la vie à trois personnes.

5° Que les machines étaient en bon état et n'avaient point souffert de l'explosion.

Le 10 mars, le réservoir projeté dans la rivière fut retiré de l'eau, et la commission constata que ce réservoir avait perdu la forme cylindrique.

Il s'était allongé dans le sens du diamètre aboutissant aux tubulures, et s'était aplati dans le sens du diamètre perpendiculaire.

Un dessin joint au rapport de la commission indique le genre et l'étendue de cette déformation (*fig. 3, 4 et 5*).

L'enquête à laquelle s'est livrée la commission, a appris :

1° Que le réservoir et la chaudière de tribord avaient été d'abord réunis autour des tubulures au moyen de rivets; mais que, lorsque cette chaudière avait été mise à bord de *la Bretagne*, on avait coupé les tubulures et substitué des assemblages à emboîtement aux assemblages à rivets, afin de rapprocher le réservoir du générateur, et de pouvoir loger la chaudière dans l'espace compris entre les carlingues et les barrotins du pont.

La chaudière de bâbord étant un peu plus petite, il n'avait pas été nécessaire de faire cette réparation.

2° Que l'épreuve de la chaudière à la pompe de pression avait été faite dans les ateliers du constructeur M. Rocher, après l'établissement du joint mastiqué, mais que depuis l'épreuve, le mastic de la tubulure de l'arrière ayant donné des inquiétudes, on l'avait renouvelé trois jours avant l'explosion.

3° Qu'avant l'explosion, le joint de ladite tubulure avait laissé l'eau s'échapper en quantité notable.

4° Que le jour de l'explosion, on avait d'abord chauffé la chaudière de bâbord remplie préalablement d'eau; que par elle, on avait mis en mouvement la petite machine d'un cheval, pour remplir la chaudière de tribord, et puis qu'on avait chauffé celle-ci.

Le mécanicien et les gens du bord ont déclaré qu'ils avaient souvent renouvelé l'épreuve des robinets indicateurs du niveau, de manière à pouvoir affirmer que le niveau de l'eau dépassait le sixième robinet lorsque l'explosion a eu lieu; qu'à ce moment la petite machine d'alimentation fonctionnait depuis trois heures, et que le manomètre accusait une pression de 3 atmosphères.

Observations.

Il est évident que l'explosion de la chaudière du paquebot à vapeur *la Bretagne* a eu lieu parce que la pression intérieure tendant à séparer le réservoir de la chaudière l'a emporté sur la résistance des assemblages par lesquels le réservoir était joint au générateur.

Ces assemblages étaient faits avec du mastic ferrugineux, et consolidés par les armatures que la commission de surveillance a décrites avec beaucoup de soin (*Pl. VI, fig. 1 et 2*).

Le masticage de la tubulure de l'arrière avait été renouvelé récemment, trois jours avant l'explosion, postérieurement à l'épreuve de la chaudière prescrite par les règlements. Ce joint était mal fait, car il perdait de l'eau en quantité notable.

Les armatures devaient résister presque seules

aux forces qui tendaient à séparer le réservoir du générateur.

Il est donc important de calculer la résistance des armatures qui étaient évidemment en fer doux de très-bonne qualité, puisqu'elles ont plié, sans se rompre, dans l'acte de l'explosion.

La commission de surveillance de Nantes a entrepris ce calcul, et conclu avec juste raison que les armatures étaient beaucoup trop faibles.

J'ai refait ces mêmes calculs, et je trouve une résistance encore plus faible que celle qui a été indiquée par la commission de surveillance.

La traverse supérieure appuyée sur les bords de la tubulure du réservoir était un barreau de fer carré de 0^m,04 de côté.

La distance entre les deux points d'appui de cette barre sur les rebords de la tubulure évasée du réservoir, était de 0^m,82 (mesurée sur le dessin envoyé par la commission).

Les axes des boulons qui reliaient cette barre à la barre inférieure contenue dans le générateur étaient distants entre eux de 0^m,48.

La distance de chacun de ces boulons au milieu de la barre était donc de 0^m,24.

La distance du même boulon au point d'appui, de 0^m,17.

Il résulte évidemment de la disposition de la barre, que la pression sur chaque point d'appui est égale à la tension de chacun des boulons, et que la barre peut être considérée comme encastree en son milieu, et sollicitée par deux forces égales et de sens contraire, appliquées la première à une distance de 0^m,24, et la seconde à une distance de 0^m,41 du point d'encastrement. Chacune de ces

forces est égale à l'effort de traction de l'un des boulons, et par conséquent à la moitié de la pression totale de la vapeur sur une surface circulaire de 0^m,65 de diamètre. Soit P cette force.

Soit E le moment d'élasticité de la barre, r son rayon de courbure, dans l'un quelconque des points compris entre le milieu et le point d'attache des boulons.

Le moment des forces de compression et d'extension développées par la flexion, sur une section transversale de la barre, au point où le rayon de courbure est r, est exprimé par $\frac{E}{r}$. Ce moment doit être égal à la somme algébrique des moments des deux forces P, par rapport à la section que l'on considère. Comme ces deux forces sont égales et forment un couple, il en résulte que le moment demeure invariable, et égal au moment du couple, quel que soit le point que l'on considère, et qu'en conséquence, on a l'équation :

$$\frac{E}{r} = P(0,41 - 0,24) = P \times 0^m,17;$$

$$\text{d'où} \quad r = \frac{E}{P \times 0,17}.$$

Ainsi le rayon de courbure est constant entre les deux points d'attache des boulons, tant que la flexion de la barre est assez petite pour que l'on puisse considérer les forces naissantes de la tension des boulons, comme conservant une direction verticale, et la courbe de la barre entre ces points d'attache est une circonférence de cercle, dont le rayon est égal au moment d'élasticité divisé par $P \times 0,17$.

Si l'on désigne par t le module d'élasticité du

fer, on aura pour la valeur du moment d'élasticité E :

$$E = t \frac{a^4}{12},$$

a étant égal au côté de la section transversale de la barre.

M. Navier conclut des diverses observations faites sur la flexion du fer forgé, que le module $t = 20,000,000,000$.

Que d'un autre côté, une charge de 13,000,000 de kilogrammes par mètre carré est la plus grande traction que l'on puisse faire supporter au fer sans altérer son élasticité, ce qui revient à dire que le plus grand allongement ou le plus grand raccourcissement que l'on doive faire subir aux fibres d'une barre de fer doit être égal à la fraction 0,00065 de la longueur primitive.

On conclut facilement de là, que le rayon de courbure minimum d'une barre de fer de 0^m,04 de hauteur verticale est donné par l'équation :

$$\frac{0,02}{r} = 0,00065, \quad \text{d'où } r = \frac{0,02}{0,00065} = 31 \text{ mètr.}$$

remplaçant, dans la valeur de E, t par 20.000.000.000 kilogrammes, et a par 0^m,04, on a pour le moment d'élasticité de la barre

$$E = 4267;$$

Puis remplaçant, dans l'équation

$$r = \frac{E}{P \times 0,17}$$

r par 31 mètres, E par 4267, on en tire pour la tension maximum des boulons :

$$P = \frac{4267}{0,17 \times 31} = 809 \text{ kilogrammes.}$$

La pression d'une seule atmosphère sur une surface circulaire de 0^m,65 de diamètre est de 3427 kilogrammes dont la moitié = 1718 kilogrammes.

Il résulte évidemment de cet aperçu que les barres avaient des dimensions beaucoup trop faibles pour venir en aide avec quelque efficacité à l'insuffisance de l'adhérence produite par le mastic, et qu'une fois cette adhérence détruite, la séparation et la projection du réservoir par la pression interne de la vapeur étaient inévitables.

Les calculs de la commission de surveillance l'ont conduite aux mêmes résultats, bien qu'elle ait évalué trop haut, suivant nous, la force de résistance des barres.

Ainsi donc, l'explosion de la chaudière du paquebot *la Bretagne* a eu pour cause immédiate la mauvaise construction, le défaut de résistance des parties de la chaudière.

Cependant cette chaudière avait résisté antérieurement à la pression d'épreuve de 12 atmosphères, triple de la pression effective, maximum pour lequel la chaudière avait été construite, et quadruple de la pression effective au moment de l'explosion, qui, d'après l'enquête, n'était que de trois atmosphères.

Cela vient, ainsi que l'a observé la commission de surveillance, de ce que le mastic avait résisté lors de l'épreuve légale, qui avait peut-être elle-même commencé à détériorer le masticage. On s'était en effet aperçu que le joint était défectueux, puisqu'on l'avait refait à neuf, et renouvelé le mastic, trois jours avant l'explosion, de sorte que le joint du jour de l'explosion n'était réellement pas le même que celui du jour de l'épreuve.

Enfin, il faut le répéter, le joint mastiqué de

la tubulure postérieure perdait l'eau en quantité notable avant l'explosion.

Il nous reste à examiner les faits accessoires que la commission de Nantes a signalés avec soin, et qui sont en effet d'une haute importance.

Ces faits sont :

1° La projection du réservoir de la chaudière à 150 mètres de distance, et la déformation de ce réservoir.

2° L'état des six tubes supérieurs du générateur de tribord, qui *avaient été brûlés près du foyer et se trouvaient déchirés.*

(Termes du rapport de la commission).

3° La dépression de l'enveloppe cylindrique du foyer de la chaudière de bâbord au-dessous de la tubulure antérieure du réservoir.

Projection du réservoir.

Le poids du réservoir projeté est, d'après le rapport de la commission de surveillance, 1566^{kil.},60.

Sa capacité est de 4^{m.c.},306.

En le supposant à moitié rempli d'eau, au moment de la rupture, il devait contenir 2153 kilogrammes d'eau.

Supposons que le réservoir ait été projeté à 150 mètres de distance horizontale. Si l'on néglige la résistance de l'air, on sait que l'amplitude du jet d'un projectile est, en désignant par V la vitesse initiale, par α l'angle que la direction de cette vitesse fait avec le plan horizontal, par g la gravité, exprimée par :

$$\frac{V^2 \sin. 2\alpha}{g}$$

Pour une amplitude donnée, la vitesse initiale

V est un minimum, quand l'angle $\alpha = 45^\circ$; dans ce cas on a $\sin 2\alpha = 1$, et l'amplitude du jet est égale au carré de la vitesse initiale divisé par la gravité.

On conclut de là que, pour qu'un projectile lancé sous un angle de 45° aille tomber à une distance de 150 mètres, sur un sol horizontal, il faut que sa vitesse initiale soit, abstraction faite de la résistance de l'air, de 38 mètres par seconde, en nombres entiers.

A cette vitesse, et à la masse du réservoir qui pèse 1567 kilogrammes, correspond une demi-force vive égale à :

$$\frac{1567}{2g} \times 38^2 \quad (g \text{ est la gravité} = 9,81.)$$

D'où $2g = 19,62$.

On a donc pour cette demi-force vive :

$$\frac{1567}{19,62} \times 38^2 = \frac{150 \times 1567}{2} = 117525.$$

Ce nombre est aussi l'expression du travail moteur nécessaire pour imprimer au réservoir la vitesse initiale capable de le lancer à 150 mètres, ce travail étant exprimé en kilogrammes élevés à un mètre.

Ce travail moteur peut venir de la force élastique de la vapeur d'eau contenue dans le réservoir, au moment où il s'est détaché du générateur, ou de la vapeur développée dans le générateur, avant que le réservoir fût détaché.

Bornons-nous à examiner l'effet de l'eau chaude contenue dans le réservoir même.

Les 2153 kilogrammes d'eau contenus dans ce réservoir devaient être à une température de

145°,4 centigrades, puisque la tension accusée par le manomètre était de 3 atmosphères effectives, ce qui fait 4 atmosphères de pression totale. Lorsque le réservoir a été détaché du générateur, l'eau a pu sortir par les deux larges tubulures qui ont été découvertes. La pression sur ces orifices d'écoulement a été réduite à la simple pression atmosphérique, et à mesure que l'eau s'écoulait d'une part, l'espace qu'elle délaissait dans l'intérieur du vase était rempli par de la vapeur formée aux dépens de la chaleur emmagasinée dans cette eau. Si nous prenons l'excès de chaleur contenu dans la masse d'eau, au-dessous du terme de 100° qui correspond à la vapeur d'eau, sous la pression d'une atmosphère, nous trouverons un excès de $2153 \times 45,4 = 97746$ unités de chaleur, qui suffisent pour vaporiser $\frac{97746}{550} = 177,7$ kilogrammes d'eau, en supposant que la vapeur contienne 550 unités de chaleur latente. Or 177 kilogrammes d'eau réduits en vapeur à la pression de 4 atmosphères, doivent occuper un espace d'environ 87 mètres cubes (1), et chaque mètre cube de vapeur, à 4 atmosphères, est susceptible, en se formant sous un piston qui supporterait sur sa face opposée une pression d'une atmosphère, de développer un travail moteur de 30000 kilogrammes élevés à un mètre. Les 87 mètres cubes de vapeur qui peuvent se former aux dépens de la chaleur contenue dans l'eau au-dessous de 100°, sont donc capables d'un

(1) Je prends, d'après la table calculée par M. de Pambour, le volume de la vapeur à 4 atmosphères comme égal à 490 fois le volume d'eau.

travail moteur de 2.610.000 kilogrammes élevés à un mètre.

Ce chiffre est égal à plus de vingt-deux fois le travail moteur nécessaire pour imprimer au réservoir la vitesse totale de 38 mètres.

Mais il faut observer, d'une part, que la totalité du travail moteur dû à la formation de la vapeur d'eau se partage entre l'eau liquide, qui jaillit par les tubulures, et le réservoir qui est repoussé en arrière; que l'eau conserve en sortant une température toujours supérieure à 100°; qu'ainsi tout l'excès de chaleur n'est pas employé à former de la vapeur; qu'enfin nous avons négligé les résistances de l'air et celles que le réservoir a dû rencontrer dans le trajet, et que nous avons pris pour l'inclinaison de la vitesse initiale, celle qui correspond à l'amplitude maxima du jet.

Qu'aussi, d'autre part, la vapeur, indépendamment du travail moteur développé par sa formation, peut donner lieu à un travail moteur, par sa détente, de 3 atmosphères à 1 atmosphère; que le réservoir pouvait contenir plus d'eau liquide que nous ne l'avons supposé; que déjà ce réservoir avait pu acquérir une vitesse comparable à celle de 38 mètres, dans le temps où il se séparait du générateur, et où la vapeur produite par l'eau du générateur agissait encore sur lui (1).

Je conclus de cette discussion que l'on conçoit très-bien la projection du réservoir à une distance d'environ 150 mètres, comme ayant été produite par la seule action de la vapeur qu'a pu former,

(1) Voyez, quant à ces effets de projection, l'article relatif à l'explosion de la chaudière d'Avrillé, p. 26 et suiv.

en raison de sa température, l'eau contenue dans le réservoir au moment de la séparation du réservoir et du générateur, et qu'il n'est pas nécessaire, pour l'expliquer, de supposer que la vapeur a pris dans la chaudière, par le contact avec des parois rougies, un excès de tension qui aurait déterminé l'explosion.

Quant à la déformation du réservoir, j'estime qu'elle est le résultat des pressions fort inégales de la vapeur qui ont eu lieu sur les divers points de la paroi interne du réservoir, pendant et après la séparation du réservoir et du générateur.

Cette déformation même semble fournir un nouveau motif de croire que le réservoir contenait beaucoup d'eau au moment de l'explosion, ainsi que l'ont affirmé les gens du bord et le mécanicien.

Déchirure des tubes.

Les six tubes supérieurs du générateur ont été trouvés brûlés et déchirés près du foyer.

La commission de surveillance croit qu'on doit attribuer ce fait à l'action du feu sur les tubes non recouverts d'eau après l'explosion. Le rapporteur partage complètement cette opinion qui est justifiée par toutes les circonstances indiquées dans le rapport de la commission de surveillance. Ces tubes ont été en effet déchirés et brûlés et non écrasés, comme cela aurait eu lieu nécessairement s'ils avaient été découverts d'eau avant l'explosion, et s'ils avaient rompu lors de l'explosion par l'effet de la pression intérieure. D'ailleurs la déclaration unanime des gens du bord est que l'eau ne manquait pas dans la chaudière.

Peut-être aussi ces tubes ont-ils commencé à être déchirés, aussitôt après l'explosion, par le

changement subit de forme qu'a dû prendre tout le système du générateur, lorsque la pression effective de trois atmosphères s'est trouvée presque subitement réduite à 0, par l'ouverture des deux larges tubulures qui joignaient le générateur au réservoir.

Dépression de l'enveloppe du foyer sous la tubulure antérieure de la chaudière de bâbord.

La commission de surveillance s'exprime ainsi au sujet de cette dépression.

« Cette particularité ne paraît avoir aucune » relation avec l'événement arrivé à la chaudière » de tribord. On doit cependant remarquer que » la première chaudière était neuve, et que par » suite la dépression qui s'y est formée ne peut » pas être antérieure au 6 mars. »

Je regarde comme certain que la dépression observée à la chaudière de bâbord est le résultat de la rupture de l'autre chaudière. En effet, les deux chaudières étaient en communication, et lorsque celle de tribord s'est rompue, une très-large issue a été ouverte à la vapeur survenue dans le réservoir de la chaudière de bâbord. La pression de la vapeur sur la surface de l'eau contenue dans ce réservoir ayant été tout à coup supprimée, la masse d'eau liquide a été soulevée par la tension de la vapeur toute formée qu'elle contenait, et celle qui était dans le générateur s'est précipitée avec une énorme vitesse sur les deux tubulures supérieures. Or, il est évident que, pendant que ces effets se sont produits, les parois internes du générateur ont été soumises à des pressions très-inégaux, et que les parties de ces parois qui étaient opposées aux orifices d'écoulement supportaient

des pressions beaucoup plus considérables que les autres.

Le dôme de l'enveloppe cylindrique du foyer dans la partie placée directement au-dessous de la tubulure devait supporter une pression énorme, parce que les filets liquides affluant de toutes parts avec de grandes vitesses, étaient déviés presque à angle droit dans l'espace situé au-dessous de la tubulure dans laquelle ils se précipitaient; il en résultait donc sur l'enveloppe cylindrique du foyer une pression presque égale à la quantité totale du mouvement de la masse liquide, qui s'écoulait par l'ouverture supérieure, dans l'unité de temps, pression qui agissait dans le sens de la dépression observée.

Si ces aperçus sont justes, on en tirera cette conséquence qu'il s'en est peut-être fallu de très-peu que la rupture de la chaudière de tribord fût immédiatement suivie de l'explosion de la chaudière de bâbord.

Plusieurs cas d'explosions consécutives dans des circonstances analogues, ont été signalés dans le journal américain de l'institut de Franklin. Un fait analogue observé à la mine d'étain de Polgooth est cité dans la notice de M. Arago, publiée dans l'Annuaire du bureau des longitudes pour 1830.

Résumé.

L'explosion de la chaudière de tribord du bateau à vapeur *la Bretagne*, survenue le 6 mars, est évidemment le résultat du défaut de résistance des joints mastiqués des larges tubulures qui mettaient en communication le réservoir et le générateur de vapeur.

Les armatures par lesquelles le constructeur avait voulu renforcer les assemblages de ces tubulures et suppléer à l'adhérence du mastic étaient hors de toute proportion avec les efforts qu'elles devaient soutenir.

Toutes les circonstances de cette explosion peuvent s'expliquer par l'action de la vapeur, sans qu'il soit nécessaire d'admettre qu'il y ait eu, à aucune époque, un vide d'eau dans la chaudière ou une tension de la vapeur supérieure à cinq atmosphères que la chaudière aurait dû pouvoir supporter d'après l'épreuve légale d'une pression d'eau de douze atmosphères, triple de la pression effective. Elle avait bien soutenu cette pression d'épreuve; mais le joint mastiqué d'une des tubulures avait été refait depuis, et par conséquent les conditions de solidité n'étaient point identiques le jour de l'épreuve et le jour de l'explosion; d'ailleurs l'adhérence du mastic est certainement une force très-peu constante qui peut être modifiée par le temps et par beaucoup de circonstances accidentelles.

La déchirure des six tubes supérieurs paraît être le résultat de l'action du feu sur ces tubes après l'explosion, ou de la déformation brusque qui a immédiatement suivi la projection du réservoir.

Il est fort peu probable qu'elle ait eu lieu antérieurement à l'explosion.

La dépression observée à la chaudière de bâbord est le résultat de la rupture de la chaudière de tribord avec laquelle elle était en communication, et peu s'en est fallu que la chaudière de bâbord ne fit explosion immédiatement après celle de tribord.

Conclusions.

Le rapporteur partage l'avis de la commission de surveillance de Nantes, et estime que les joints au mastic ferrugineux offrent des dangers très-graves, principalement dans les chaudières des bateaux à vapeur, où les tubulures de communication entre les diverses parties dont se compose la chaudière sont et doivent être très-larges.

L'adhérence produite par l'emploi du mastic ferrugineux ne peut être appréciée exactement. Elle varie avec la manière dont le mastic est fait et appliqué.

Enfin les parties voisines des joints au mastic ferrugineux s'oxydent très-rapidement, perdent leur ténacité, et il peut en résulter des ruptures de chaudières après un usage assez court.

Si on l'emploie dans certains cas, ce ne peut être que comme lut ou remplissage pour prévenir les fuites, et non comme résistant par lui-même à la rupture et à la séparation des parties ainsi mastiquées.

Le rapporteur est donc d'avis qu'il y a lieu de la part de M. le sous-secrétaire d'état des travaux publics, de faire connaître le plus tôt possible à MM. les préfets et aux commissions de surveillance des bateaux à vapeur :

1° Que l'explosion arrivée à bord de *la Bretagne* le 6 mars 1841, a eu pour cause le défaut de résistance des armatures, et du mastic ferrugineux employé mal à propos pour lier les tubulures du générateur au réservoir.

2° Que les parties des chaudières des appareils

à vapeur placées à bord des bateaux doivent être toujours réunies au moyen de rivets ou d'armatures d'une force suffisante, et que le mastic ferrugineux, s'il en est fait usage, ne doit servir qu'à remplir les interstices des joints pour prévenir les fuites d'eau, et qu'on ne doit pas compter sur son adhérence pour prévenir les disjonctions des pièces entre lesquelles il est interposé.

3° Que l'emploi de ce mastic présente, même quand il est employé simplement pour garnir un joint, l'inconvénient très-grave d'être une cause d'oxydation, de ruine prompte pour la chaudière, et plus tard d'une explosion, si l'on n'a pas soin de faire en temps utile les réparations convenables en renouvelant les pièces oxydées; qu'il serait en conséquence à désirer que les joints fussent rendus étanches sans y avoir recours, et que les chaudières où on en fait usage doivent être l'objet d'une surveillance spéciale.

4° Que les joints au mastic ferrugineux peuvent résister à la pression d'épreuve faite à froid, et céder sous une pression beaucoup moindre, quand la chaudière fonctionne; soit parce que le degré d'adhérence varie avec la température, soit plutôt parce que le mastic s'altère rapidement, se brise par les chocs ou par les changements de température: qu'ainsi l'épreuve légale ne donne dans ce cas aucune garantie de solidité, et que les commissions de surveillance doivent s'assurer directement, par une visite minutieuse, du mode et de la solidité des assemblages des diverses parties de la chaudière, avant de proposer à MM. les préfets de délivrer des permis de navigation.

5° Que dans le cas où un bateau à vapeur contient deux chaudières distinctes et deux appareils

moteurs, comme cela avait lieu à bord de *la Bretagne*, il serait à désirer que les deux groupes de chaudières et d'appareils moteurs fussent entièrement isolés l'un de l'autre, attendu que la rupture d'une des chaudières peut être une cause déterminante de rupture de l'autre.

Enfin le rapporteur pense que la commission doit saisir cette occasion pour rappeler à M. le sous-secrétaire d'état des travaux publics la proposition qu'elle a eu l'honneur de lui faire dans son dernier rapport sur l'explosion survenue à bord du *Citis*, de faire connaître aux préfets et aux commissions de surveillance, qu'indépendamment des épreuves légales prescrites par les ordonnances, les chaudières placées à bord des bateaux doivent être l'objet d'un examen minutieux, et que les permis de navigation ne doivent être délivrés que dans le cas où il est reconnu que ces chaudières ne présentent aucune cause particulière de danger, provenant soit du système général de leur construction, soit de la disposition relative ou de la jonction des diverses parties entre elles.

La commission des machines à vapeur, dans sa séance du 21 juin 1841, a approuvé le présent rapport et ses conclusions. Considérant ensuite qu'on ne saurait donner trop de publicité aux renseignements qu'il renferme, elle a été d'avis qu'il y avait lieu de proposer à M. le sous-secrétaire d'état des travaux publics, de faire imprimer ce rapport dans les *Annales des mines* et dans les *Annales des ponts et chaussées*.

UNIVERSITY OF CHICAGO
PHYSICS DEPARTMENT
CHICAGO, ILLINOIS
MAY 19 1950
TO THE DIRECTOR
OF THE UNIVERSITY OF CHICAGO
FROM THE PHYSICS DEPARTMENT
RE: [Illegible]

RAPPORT

Sur l'explosion d'une chaudière à vapeur de la machine d'extraction établie sur la fosse d'Azincourt, près d'Abscon (Nord).

Par M. COMBES, Ingénieur en chef des mines.

La machine d'extraction de la fosse d'Azincourt, d'une force de 30 à 40 chevaux, recevait la vapeur de quatre chaudières, dont trois en fonte et une en tôle de fer. Les trois chaudières en fonte étaient posées sur un même massif de maçonnerie, renfermé dans un bâtiment isolé de l'emplacement de la machine et de la quatrième chaudière. Chacune d'elles consistait en un cylindre terminé par deux calottes hémisphériques, et deux bouilleurs également en fonte, dont chacun communiquait avec le cylindre principal par une tubulure unique placée à l'avant.

Le diamètre de ce cylindre était de 0^m,84; sa longueur totale de bout en bout, y compris les deux calottes, de 2^m,64. L'épaisseur de la fonte n'était pas uniforme et variait de 3 à 5 centimètres.

Le 23 juillet 1841, l'une des chaudières en fonte, celle qui était placée au milieu du massif de maçonnerie, fit explosion. Le directeur-gérant de l'exploitation, M. Lanvin, ne prévint M. l'ingénieur en chef des mines du département du Nord de l'accident qui était arrivé que le 29 du même mois, et, le 7 août suivant, M. Conte, ingénieur chargé du service des machines à vapeur, se rendit sur les lieux pour dresser le pro-

cès-verbal d'enquête, qui a été renvoyé par M. le sous-secrétaire d'état des travaux publics à la commission des machines à vapeur.

A l'arrivée de M. Conte, toutes les traces de l'explosion avaient disparu; les fragments de la chaudière rompue avaient été cassés et transportés dans une fonderie. L'ingénieur a donc dû se borner à consigner dans son procès-verbal les circonstances de l'accident, telles que les lui ont rapportées les personnes qui en avaient été témoins, ou qui s'étaient empressées de porter secours aux blessés. Ces circonstances sont d'ailleurs fort simples.

La chaudière fit explosion vers 6 heures du soir. Elle contenait la vapeur sous une tension habituelle de 2 à 3 atmosphères, et les soupapes étaient chargées en conséquence. Elle était munie de deux rondelles fusibles et d'un manomètre. Elle recevait l'eau d'alimentation par un tuyau qui traversait le dôme à 0^m,43 de distance de l'extrémité postérieure, et descendait jusqu'à une distance de 5 centimètres du fond. La vapeur n'était point condensée; après avoir agi sur le piston de la machine, elle était rejetée directement dans la cheminée, et l'eau d'alimentation arrivait, sans avoir été préalablement échauffée, par le tuyau dont il a été parlé.

Au moment de l'explosion, la machine était arrêtée depuis dix minutes ou un quart d'heure, parce qu'on chargeait de bois la tonne qui allait descendre dans le puits: le manomètre accusait une tension qui ne dépassait pas 3 atmosphères, et les soupapes soufflaient avec force.

La rupture de la chaudière eut lieu suivant un plan presque exactement perpendiculaire à l'axe et passant au point où venait déboucher le tuyau

d'alimentation. Ce plan laisse, d'un côté, la chaudière presque tout entière, et, de l'autre, l'extrémité formée presque uniquement de la calotte hémisphérique postérieure. Cette partie fut lancée contre le mur du bâtiment, traversa une fenêtre C (*Pl. VII, fig. 1*), dont le seuil était à peu près au niveau du dôme de la chaudière, et alla tomber au dehors, à 11 mètres de distance de son emplacement primitif. L'autre partie de la chaudière ayant 2^m,17 de longueur, à laquelle les deux bouilleurs restèrent attachés, fut arrachée du massif de maçonnerie, et renversée en tournant sur le fond hémisphérique antérieur, de telle sorte que ce fond resta appuyé et posé sur le massif de maçonnerie, tandis que les bords de la section circulaire de rupture vinrent s'appuyer sur le mur du bâtiment faisant face à la porte du foyer, et dans lequel était pratiquée la porte d'entrée D. Les parties antérieure et postérieure du massif de maçonnerie du fourneau ne furent point démolies : toutes les poutres de la toiture furent enlevées avec les tuiles, et l'eau bouillante jaillit à une hauteur verticale d'environ 13 mètres, suivant la déclaration du directeur M. Lanvin. Quatre ouvriers qui se trouvaient, au moment de l'explosion, dans le local des chaudières, furent atteints par la chute des débris de la toiture et brûlés par l'eau chaude. Leurs blessures n'ont point eu de gravité, et ils étaient tous à peu près complètement rétablis le 11 août, dix-huit jours après l'accident. Il paraît que le chauffeur était occupé à charger du combustible sur la grille de la chaudière qui a fait explosion, et qu'il s'est trouvé placé, après que celle-ci a eu lieu, sous le tronçon principal appuyé, comme on l'a dit, sur le massif des fourneaux et sur le mur D, circon-

stance qui l'a protégé contre la chute des matériaux de la toiture.

M. Lanvin, dans sa lettre du 29 juillet à M. l'ingénieur en chef Blavier, déclare que la chaudière avait une fissure d'environ 30 centimètres de longueur, dans sa concavité et au-dessous de l'orifice du tuyau d'alimentation. M. Conte dit, dans son procès-verbal, que la preuve de l'existence de cette fissure antérieurement à l'explosion, résulte de ce que les bords des parties séparées, dans la section de rupture, étaient recouverts d'une couche d'oxyde de fer sur une longueur qui occupait environ $\frac{1}{5}$ de la circonférence entière, et de ce que l'un des bouilleurs présentait à sa surface extérieure des traces d'oxydation, que l'on a dû attribuer à l'action de l'eau sortie par la fissure, et qui décollait sur la partie ainsi oxydée. Cette fissure n'avait point été remarquée, parce que le dessous de la chaudière était masqué par une voûte sous laquelle étaient enfermés les bouilleurs.

M. Conte pense que l'explosion est le résultat de cette fissure, probablement assez ancienne, dont il explique l'origine par l'arrivée de l'eau froide amenée par le tuyau alimentaire tout près de la paroi du fond, qui recevait sur sa face extérieure l'action directe de la flamme.

M. l'ingénieur en chef Blavier, admettant cette opinion comme plausible, ajoute cependant que, d'après les renseignements qu'il a reçus lui-même du directeur d'une exploitation voisine, qui s'était rendu sur les lieux et avait vu les fragments de la chaudière une heure après l'accident, les sections de rupture ne présentaient sur aucun point des traces d'oxyde, ni aucun autre indice d'une fissure ancienne.

Ces assertions contradictoires font regretter que

M. Lanvin, directeur de l'établissement, n'ait pas prévenu MM. les ingénieurs des mines aussitôt après l'accident du 23 juillet, et avant d'avoir enlevé et dénaturé les fragments de la chaudière. Les explosions d'appareils à vapeur, pouvant occasionner la mort de plusieurs personnes, engagent la responsabilité des propriétaires et mécaniciens, qui doivent être poursuivis devant les tribunaux, s'il ne résulte pas de l'examen de la chaudière et des circonstances de l'explosion que les mesures de sûreté prescrites par les règlements ont été observées, et qu'il n'y a eu ni imprudence ni négligence dans la conduite de l'appareil. Ce n'est donc qu'après le procès-verbal des ingénieurs, ou, à leur défaut, des maires ou commissaires de police, que l'on doit se permettre de faire disparaître les traces de l'explosion et de changer l'état des lieux.

Au surplus, dans le cas particulier dont il s'agit, il ne paraît pas que l'on ait failli à l'observation des règlements, ou que l'on ait manqué de prudence dans la conduite de l'appareil. La chaudière était en effet pourvue de tous les appareils de sûreté prescrits, et avait été soumise à la pression d'épreuve voulue par l'ordonnance du 29 octobre 1823.

Revenant aux circonstances détaillées dans le rapport de M. Conte, il résulte des faits exposés, que, sans aucun doute, la rupture de la chaudière a commencé par la partie du fond concave située au-dessous de l'orifice du tuyau alimentaire, au point où le directeur déclare qu'il existait une ancienne fissure; il paraît même certain qu'une issue assez large a été ouverte à l'eau et à la vapeur, en ce point, avant que la rupture ait été complète, et que les deux parties de la chaudière aient été tout à fait disjointes. En effet, aussitôt après l'ouverture de cette issue, la chau-

dière s'est trouvée sollicitée par une force verticale résultant de la réaction sur la paroi opposée, force qui agissait de bas en haut, et dont la direction était très-éloignée du centre de gravité. Cette force a donc soulevé la chaudière, en même temps qu'elle lui a imprimé un mouvement de rotation; elle a été ainsi arrachée du massif de maçonnerie, par son fond postérieur d'abord. Dès que celui-ci a été tout à fait dégagé, la calotte hémisphérique postérieure s'est séparée complètement du tronçon antérieur et a été projetée par la fenêtre C. L'eau s'est précipitée en même temps par l'extrémité ouverte du tronçon, et la force de réaction dirigée maintenant suivant l'axe de la chaudière, passant encore au-dessus du centre de gravité du corps entier, à cause des deux bouilleurs qui sont demeurés adhérents à la chaudière, a entrete nu et accéléré le mouvement de rotation en vertu duquel l'axe de la chaudière a atteint et ensuite dépassé la position verticale, de sorte que celle-ci est venue s'appuyer sur le mur où était pratiquée la porte D, tandis que son fond est resté posé sur le massif des fourneaux. C'est pendant que l'axe de la chaudière se trouvait vertical, ou à peu près, que l'eau chaude a jailli à une grande hauteur. Si l'on supposait que la rupture eût eu lieu de prime abord sur le contour entier de la circonférence, les mouvements imprimés aux deux parties de la chaudière eussent été tout différents, et les extrémités du massif des fourneaux auraient été probablement démolies. Nous regardons par conséquent comme indubitable que la chaudière a rompu d'abord par le fond, et tout porte à croire qu'une ou plusieurs fissures antérieures, déterminées peut-être par l'arrivée de l'eau froide alimentaire, existaient déjà dans cette par-

tie, ainsi que l'a déclaré M. Lanvin. Il est fâcheux qu'on ne se soit pas assuré, en rapprochant les fragments de la chaudière, après la rupture, si un éclat de fonte assez large n'a pas été détaché du fond concave, au-dessous du débouché du tuyau alimentaire.

Résumé et conclusions.

1° L'explosion de la chaudière d'Azincourt, survenue le 23 juillet 1841, est le résultat d'une ou plusieurs fissures probablement anciennes, qui se sont faites dans le métal du cylindre, à sa partie concave, au-dessous du débouché du tuyau d'alimentation.

2° L'arrivée de l'eau froide alimentaire à une petite distance de la paroi en fonte chauffée extérieurement par la flamme, a pu déterminer la formation de ces fissures, ainsi que le pense M. Conte.

3° Il ne paraît pas qu'il y ait eu inobservation des règlements, ni imprudence, ni défaut de surveillance, de la part du propriétaire ou du mécanicien.

4° Néanmoins M. Lanvin, directeur-gérant des mines d'Azincourt, a eu le tort grave de ne prévenir que tardivement MM. les ingénieurs des mines, et de faire disparaître les traces de l'explosion et les fragments de la chaudière, avant la visite des lieux par eux ou par les autres agents de l'autorité administrative.

5° Les chaudières en fonte offrent un danger particulier dont l'explosion d'Azincourt est un nouvel exemple. Elles sont sujettes à se fissurer par des chocs, à cause de la nature cassante du métal, ou par des variations rapides de température, à cause de leur forte épaisseur; ces fissures, quand elles demeurent inaperçues, peuvent ame-

ner une explosion. La commission pourrait aller jusqu'à proposer à M. le sous-secrétaire d'état des Travaux publics la prohibition absolue des chaudières en fonte, si leur usage ne devenait pas journellement plus rare dans l'industrie, par la raison qu'elles coûtent beaucoup plus cher que des chaudières en tôle de même capacité, et sont moins favorables à l'économie du combustible, par suite de la forte épaisseur qu'on est obligé de leur donner (1). Aussi ne construit-on plus de chaudières neuves en fonte, de dimensions un peu considérables. Quant aux anciennes chaudières de cette nature, elles doivent être l'objet d'une surveillance spéciale de la part de MM. les ingénieurs chargés du service des machines à vapeur, et j'estime qu'il y a lieu de proposer à M. le sous-secrétaire d'état des Travaux publics, d'inviter MM. les ingénieurs à soumettre fréquemment (une fois par an au moins) ces anciennes chaudières à la pression d'épreuve quintuple de la pression effective de la vapeur, prescrite par l'ordonnance royale du 29 octobre 1823.

Approuvé par la commission des machines à vapeur, dans sa séance du 24 novembre 1841.

(1) N. L'usage des chaudières en fonte et en laiton est prohibé par le nouveau règlement prussien, en date du 6 mai 1838. L'article 14 de ce règlement autorise cependant l'emploi des tubes bouilleurs, et des tuyaux destinés à conduire la flamme et la fumée, en laiton et en fonte de fer, jusqu'à un diamètre intérieur de 4 pouces du Rhin (7^{cent.}, 8) pour les tubes en laiton, et de 18 pouces (47 centim.) pour les tubes en fonte de fer. CH. C.

PARIS. — IMPRIMERIE DE FAIN ET THUNOT,
 IMPRIMEURS DE L'UNIVERSITÉ ROYALE DE FRANCE,
 rue Racine, n° 28, près de l'Odéon.

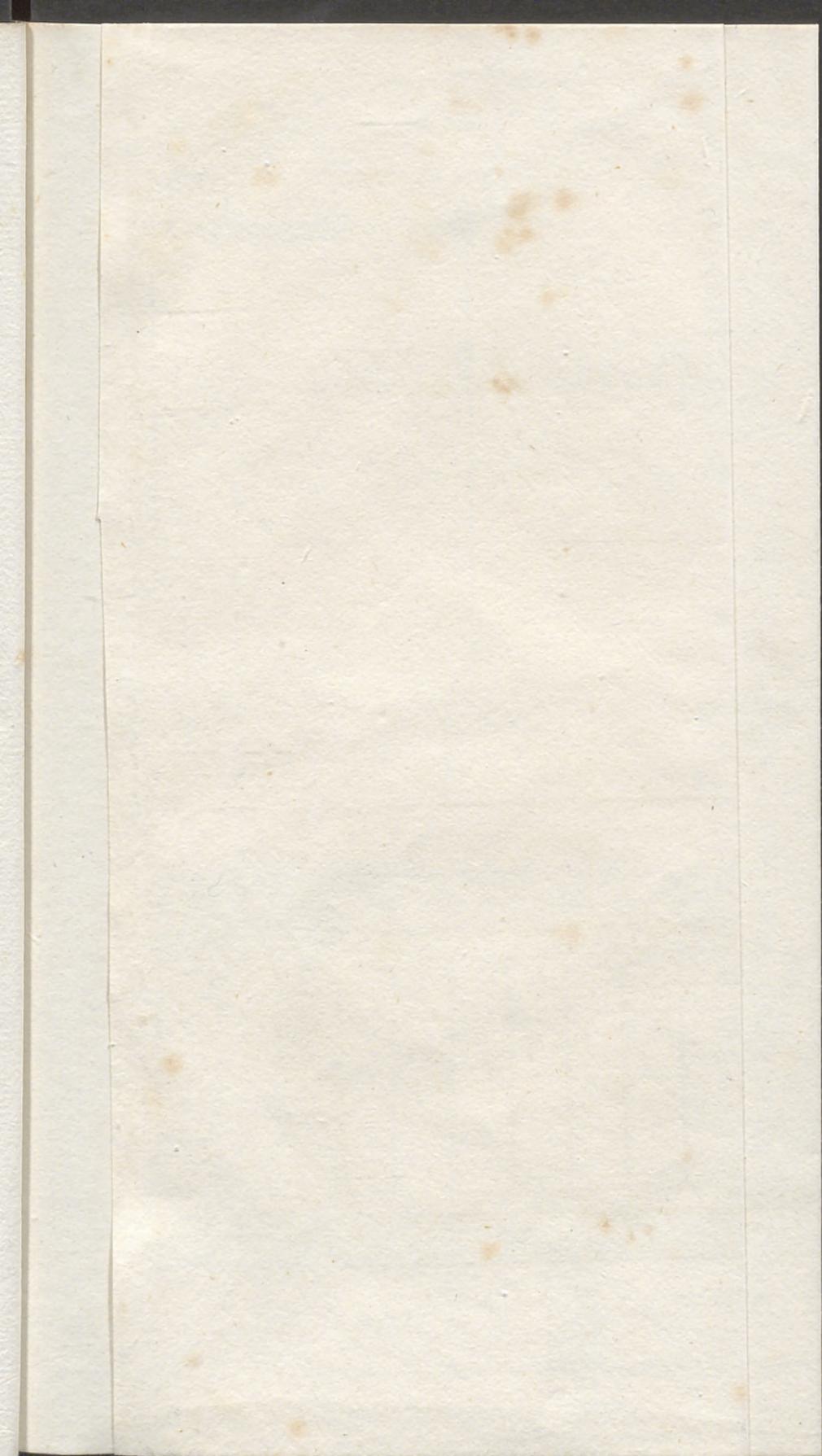


Fig. 2. Coupe transversale.

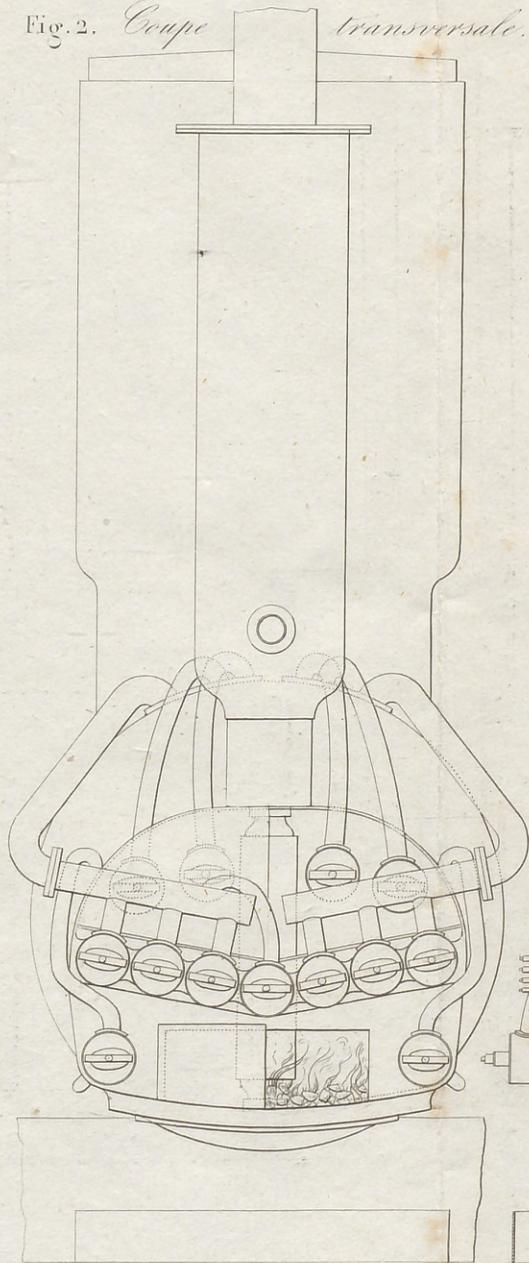
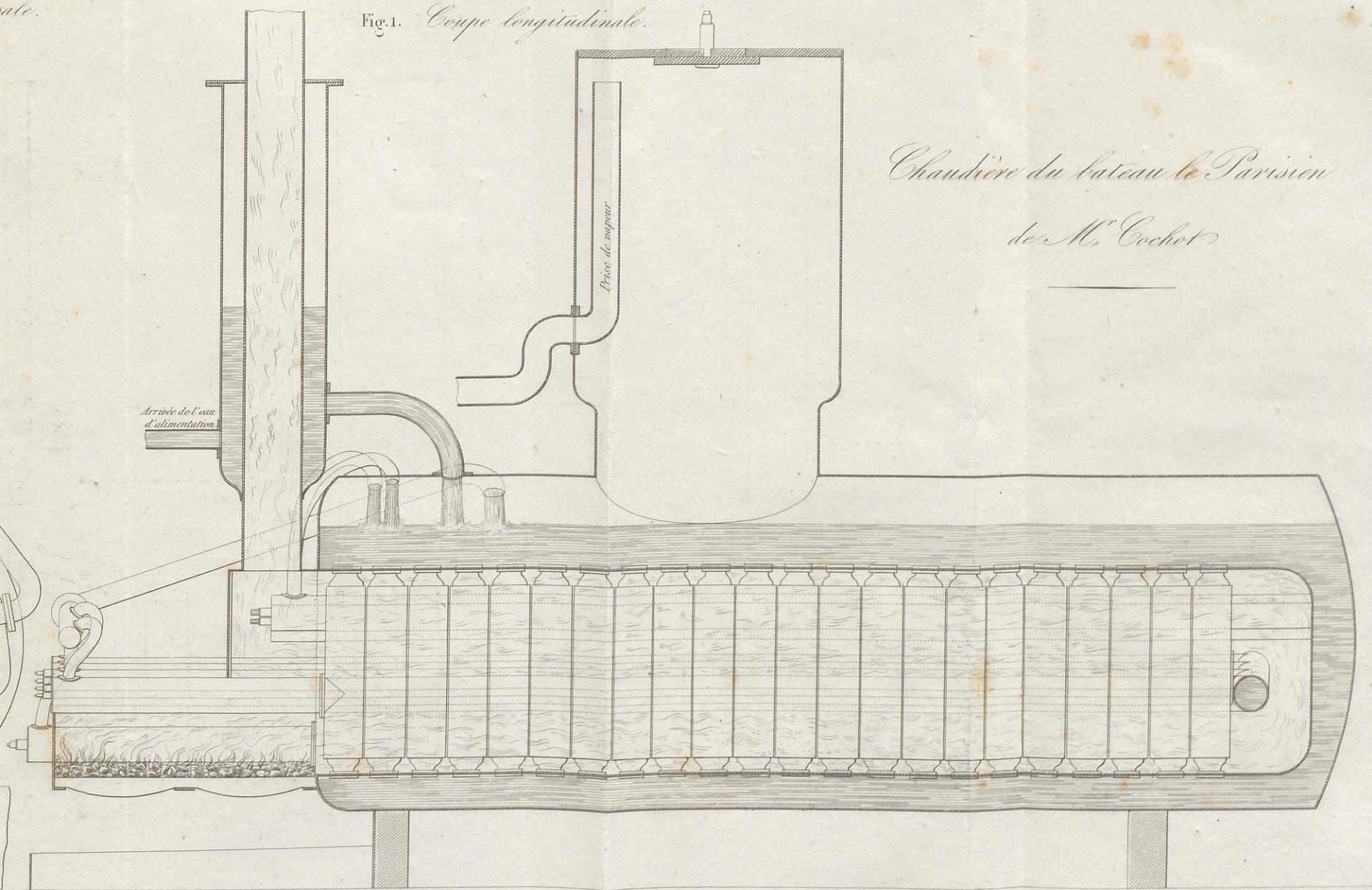
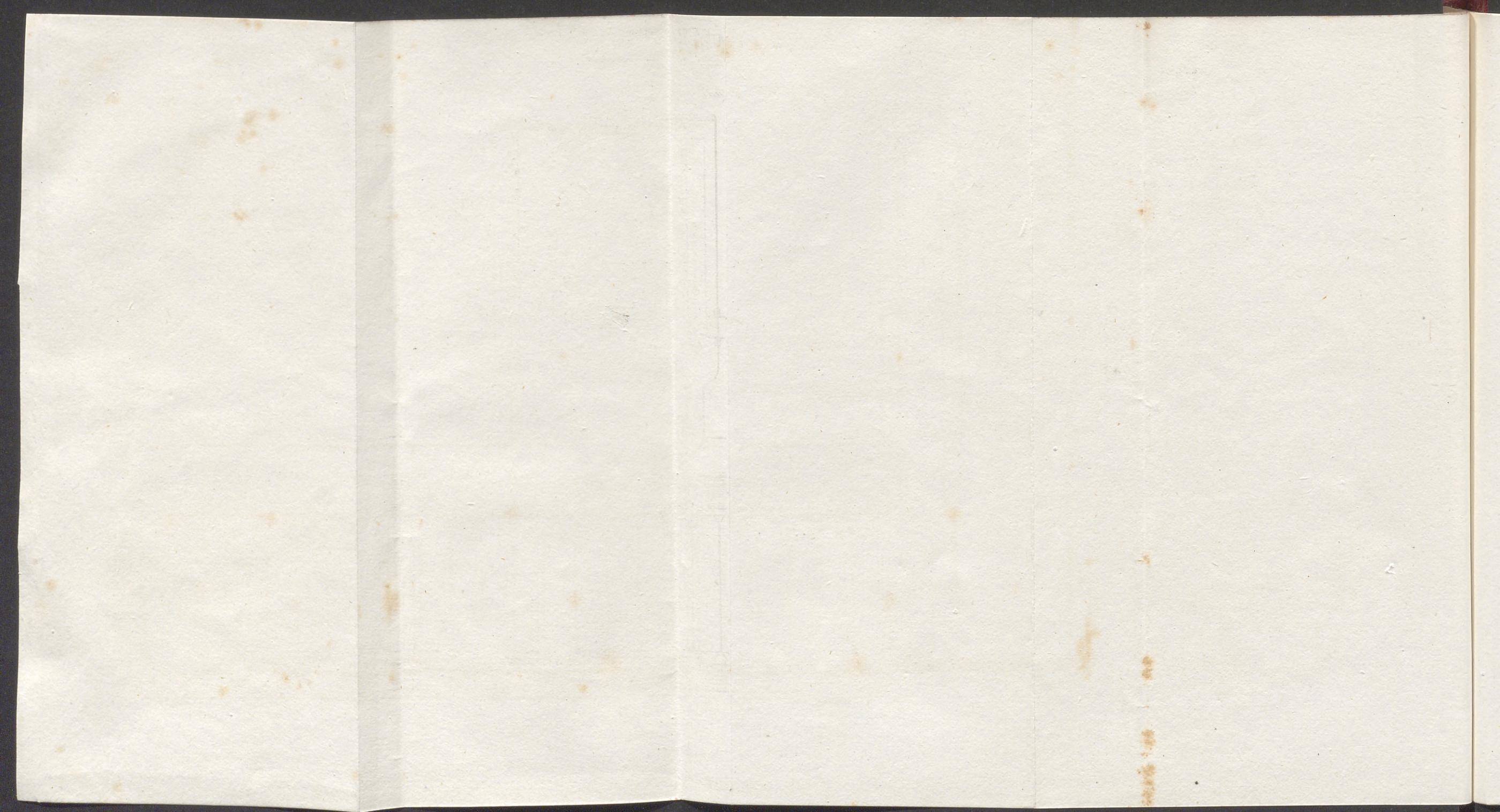


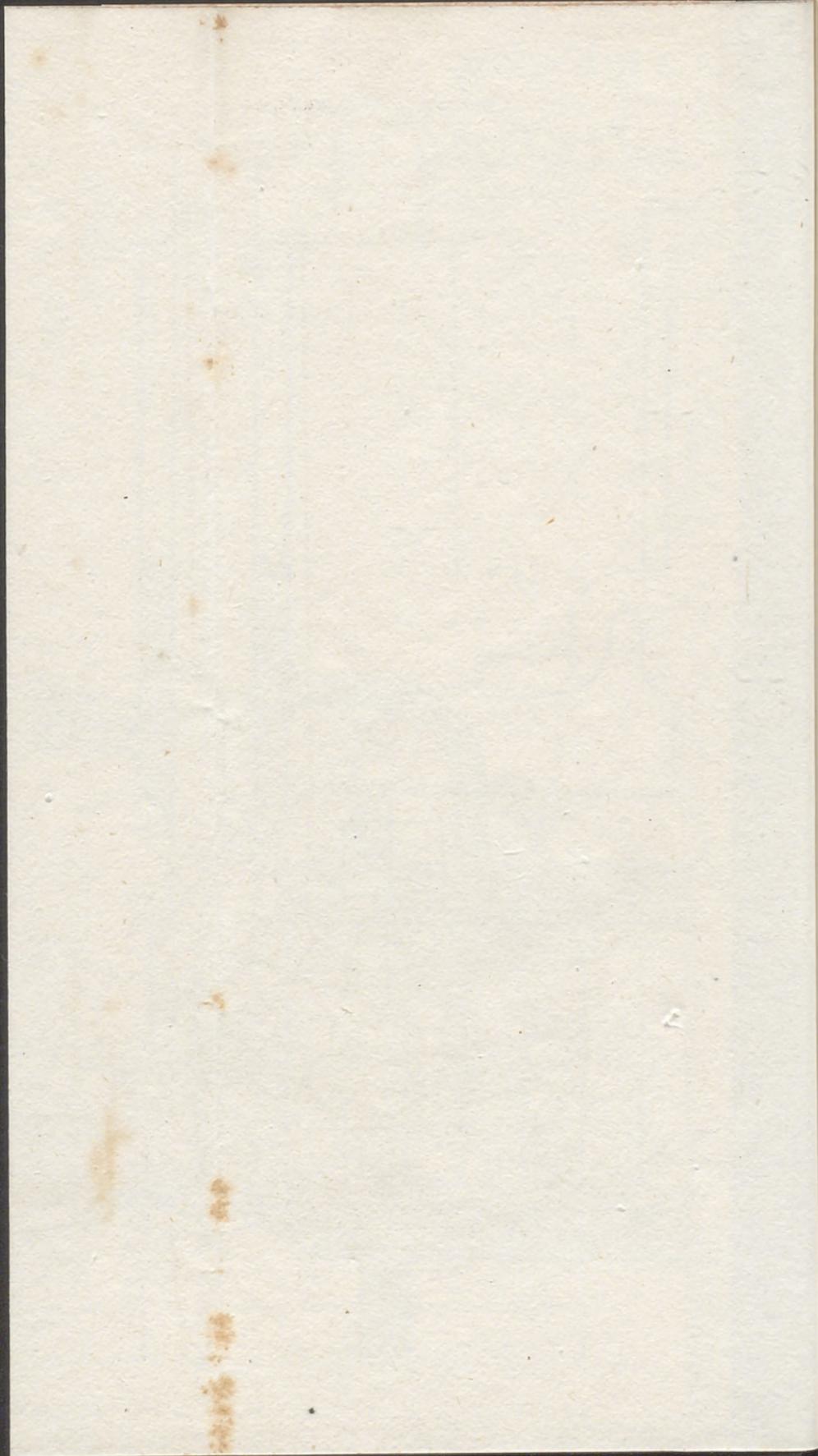
Fig. 1. Coupe longitudinale.

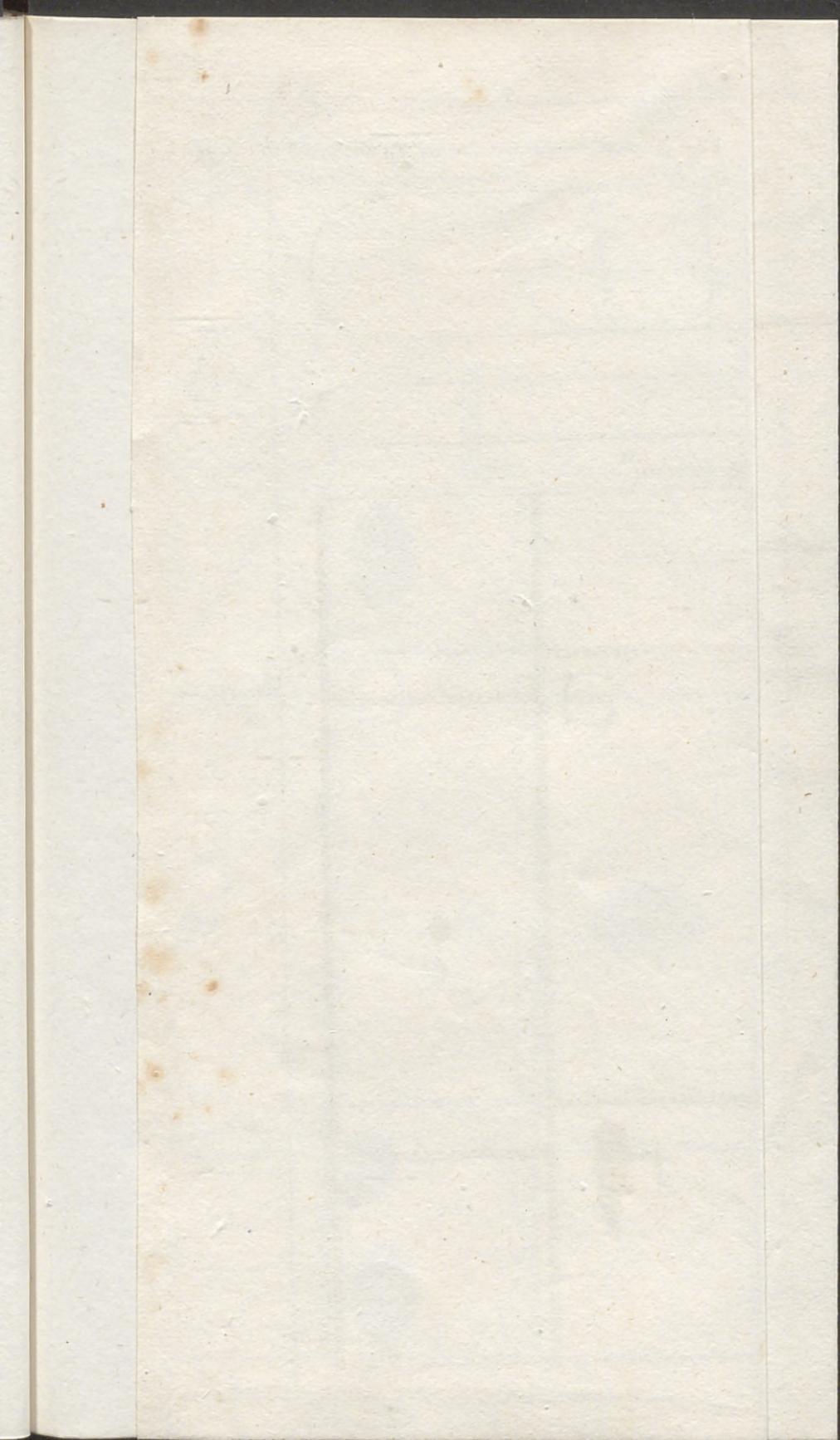


*Chaudière du bateau le Parisien
des M^r Cochet*

0 1 2 3 mètres.







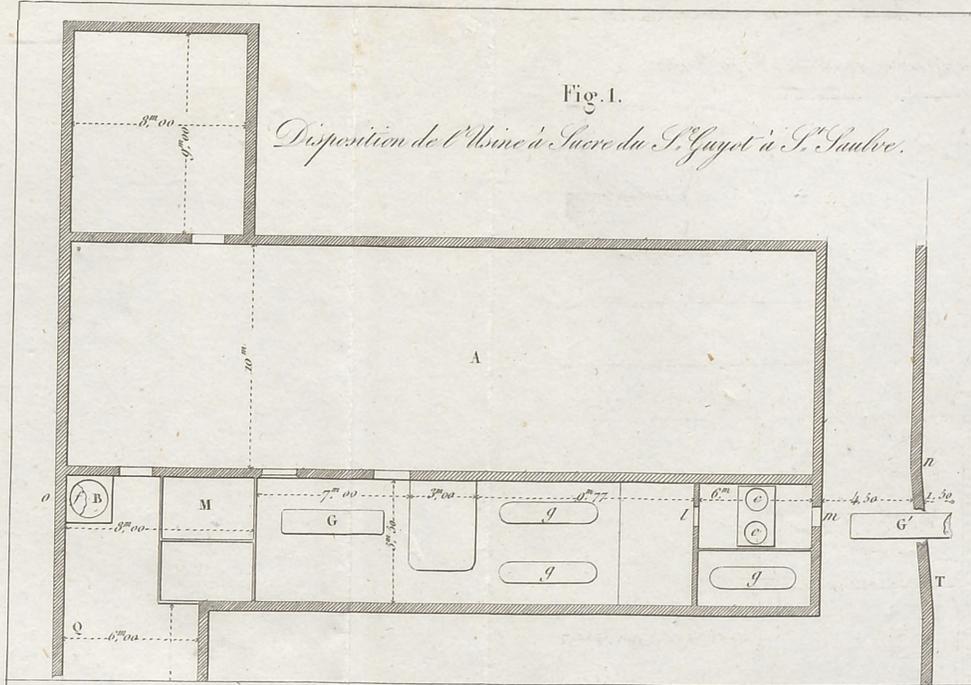


Fig. 1. Disposition de l'Usine à Sucre du P. Gayot à P. Saulve.

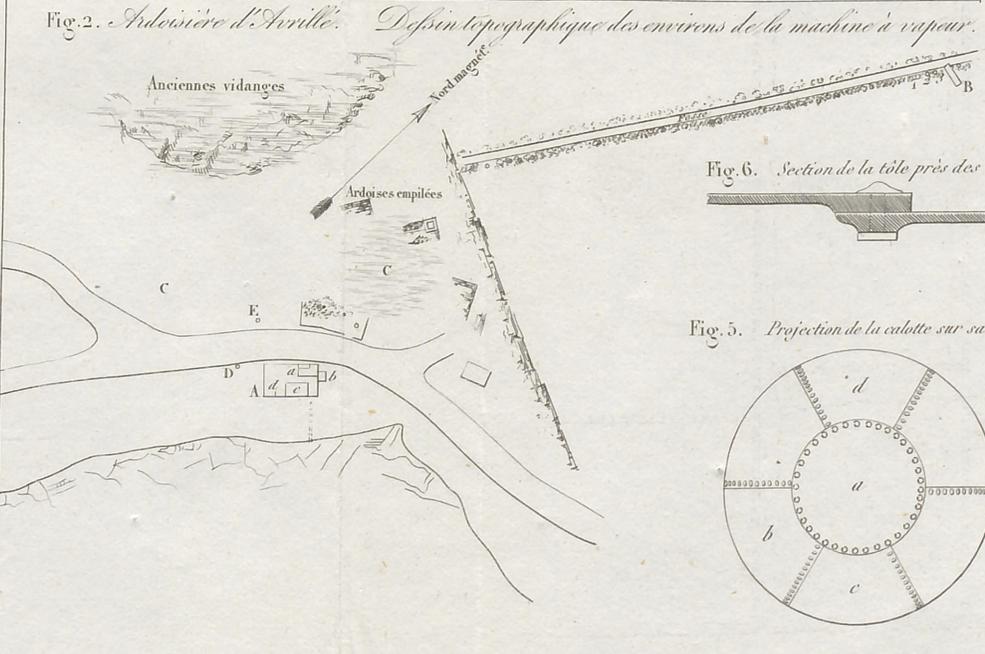


Fig. 2. Ardoisière d'Arville. Dessin topographique des environs de la machine à vapeur.



Fig. 6. Section de la tête près des rivets.

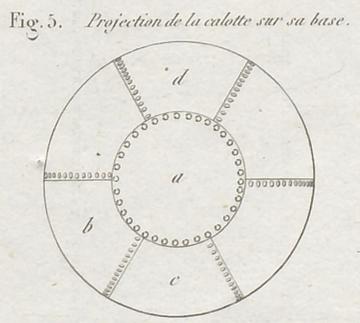


Fig. 5. Projection de la calotte sur sa base.

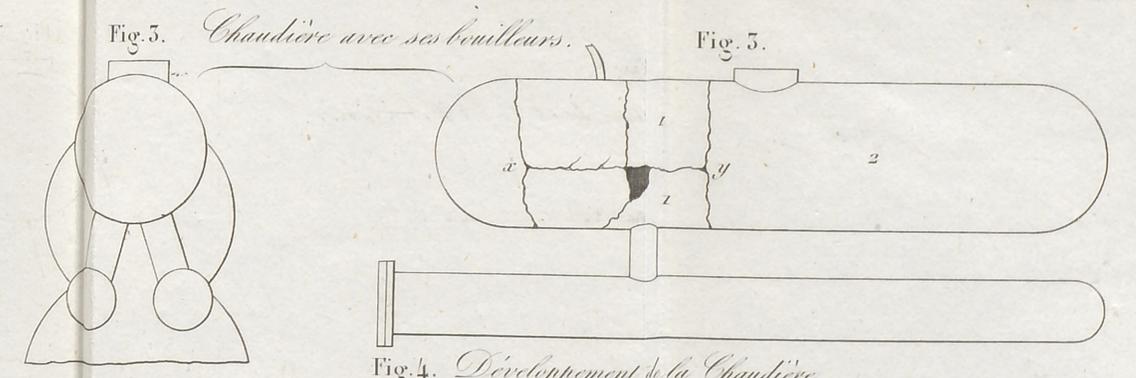


Fig. 5. Chaudière avec ses bouilleurs. Fig. 5.

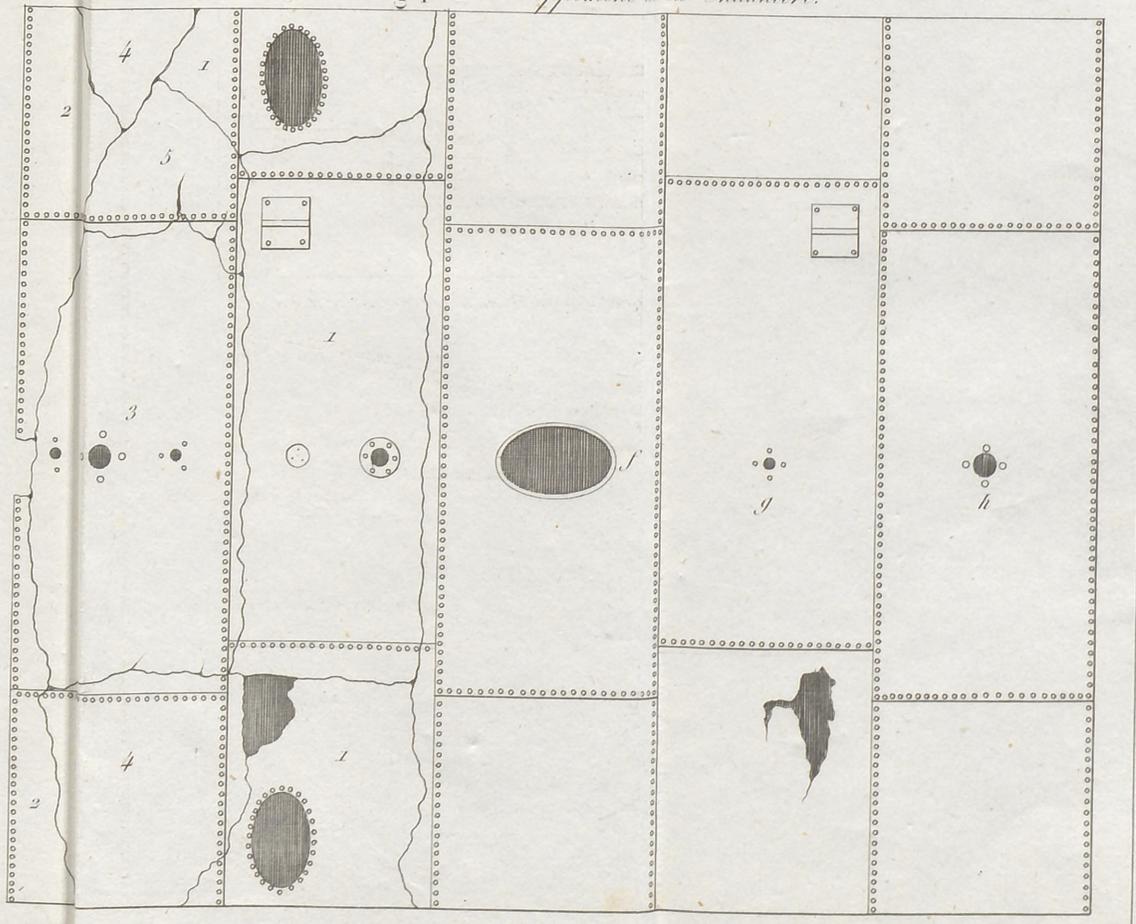
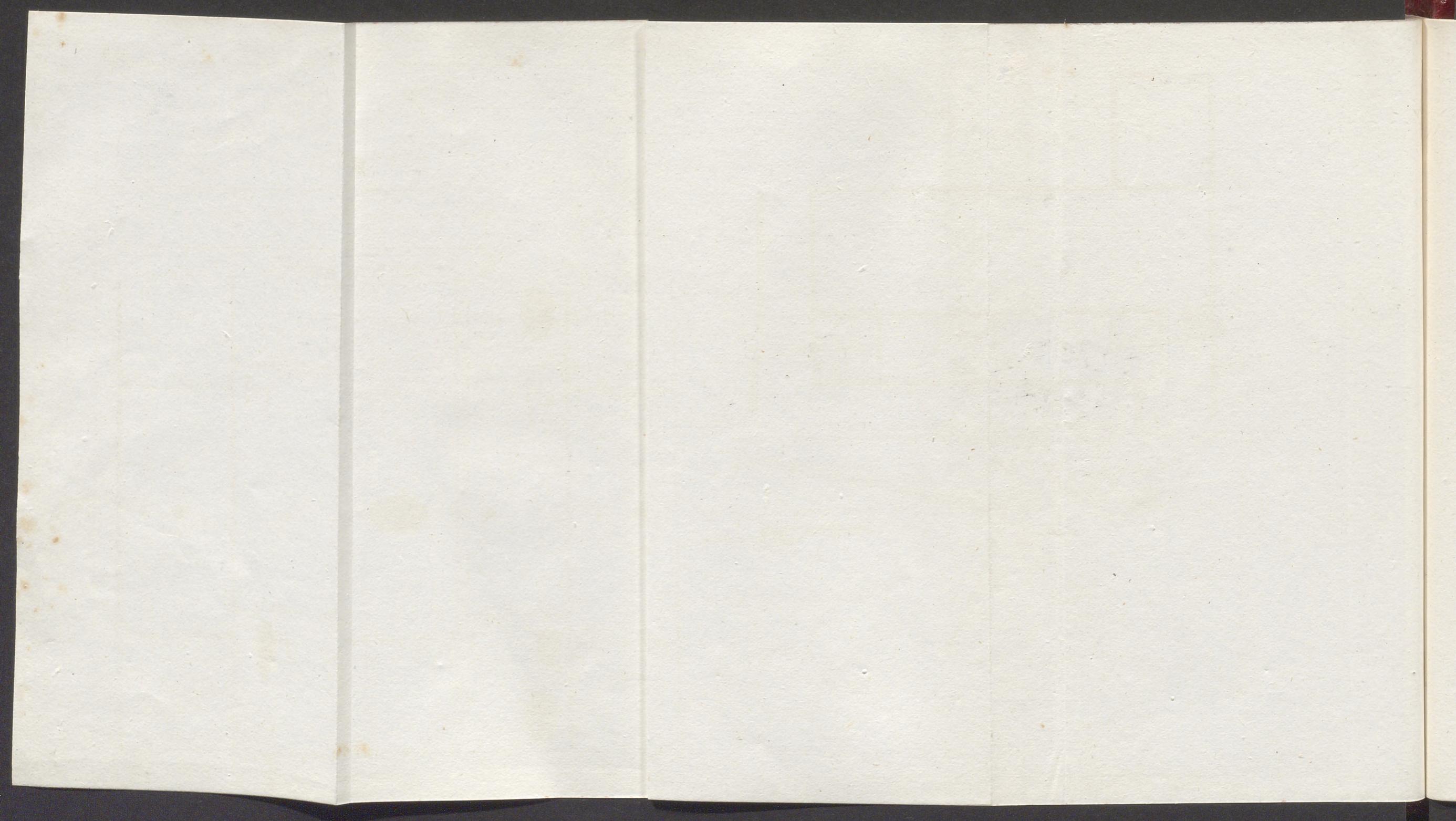
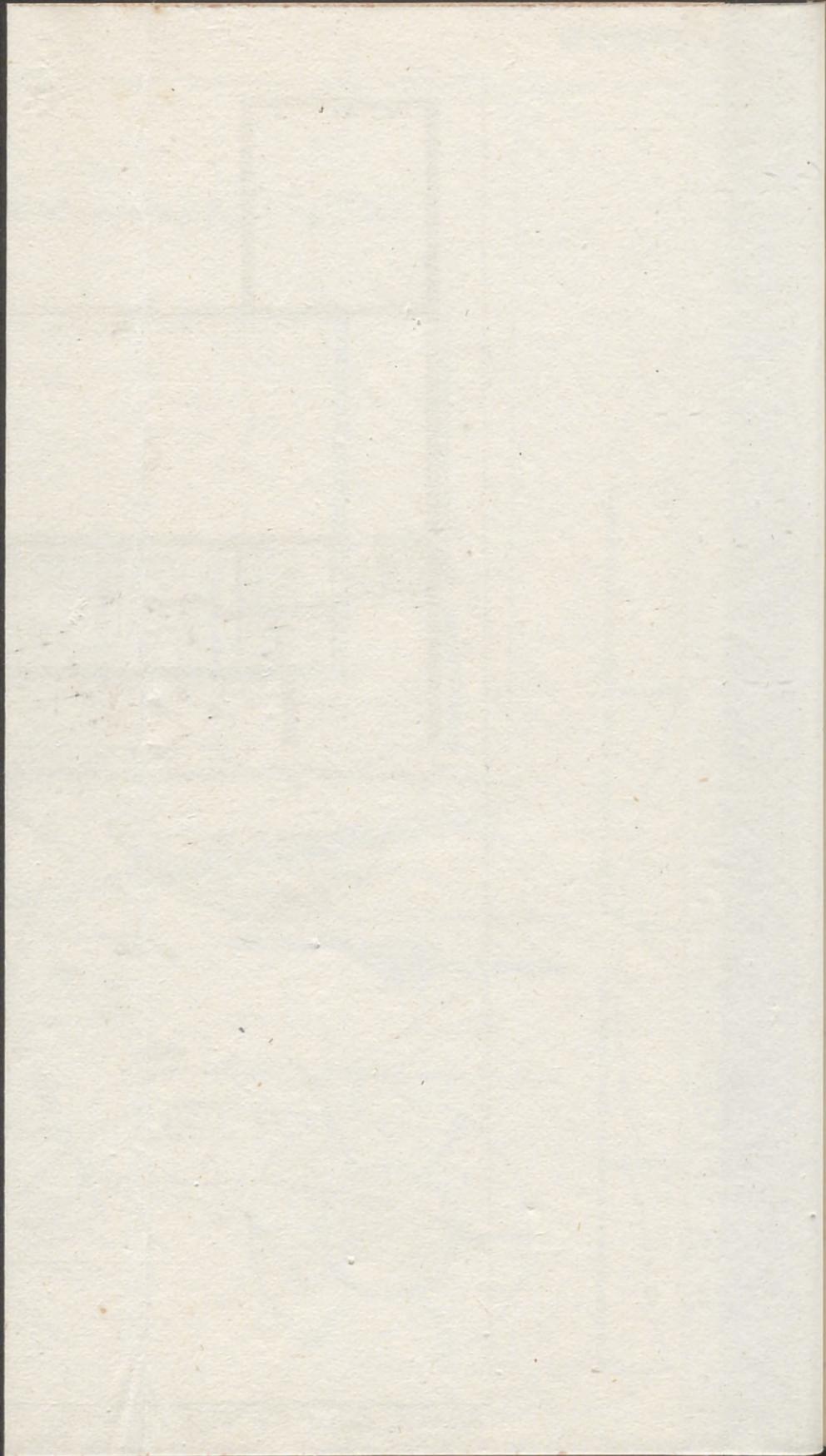
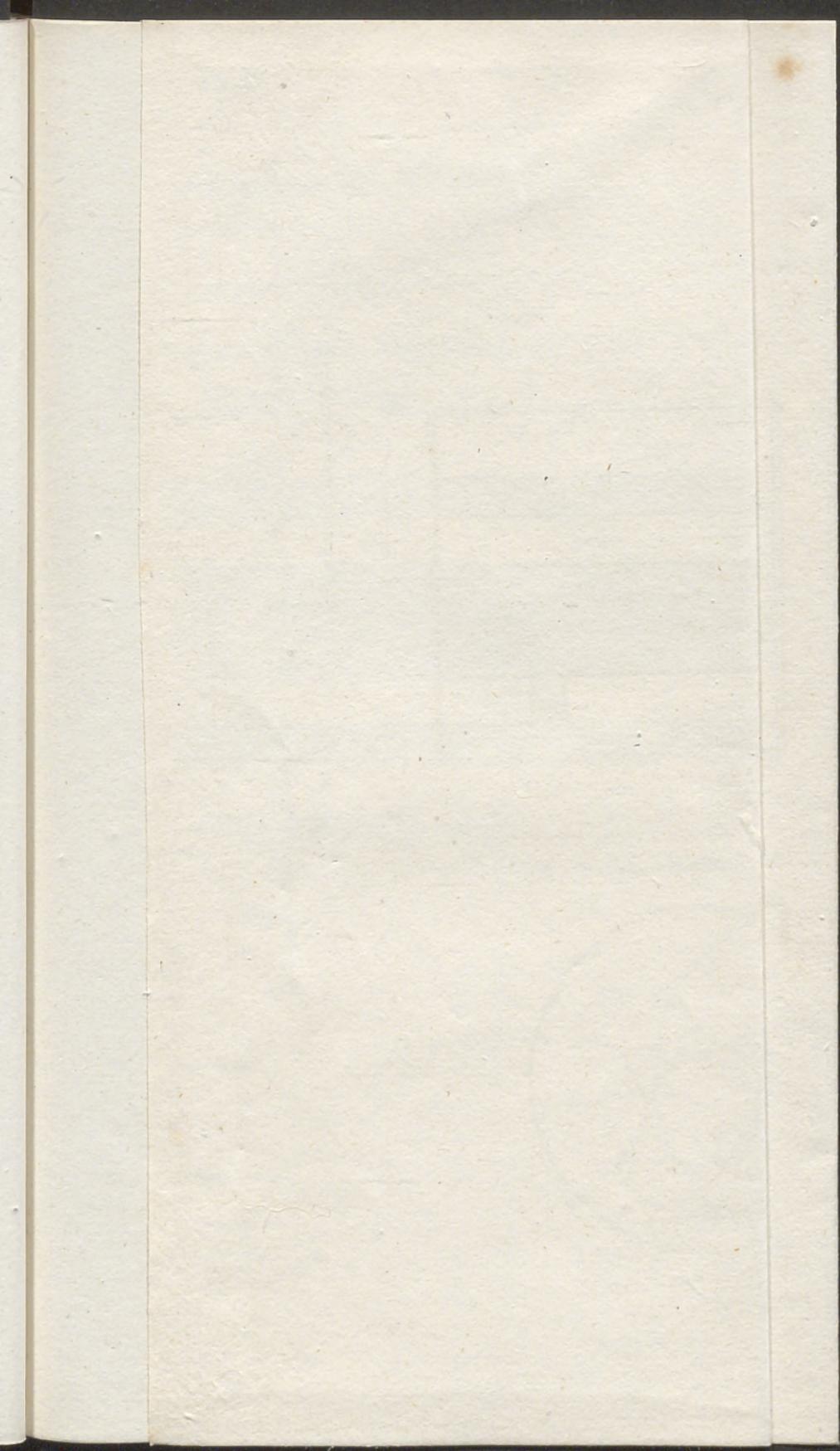


Fig. 4. Développement de la Chaudière.







Chaudière du bateau à vapeur le Cituel.

Etat de la chaudière avant l'explosion.

Fig. 2. *Coupe transversale.*

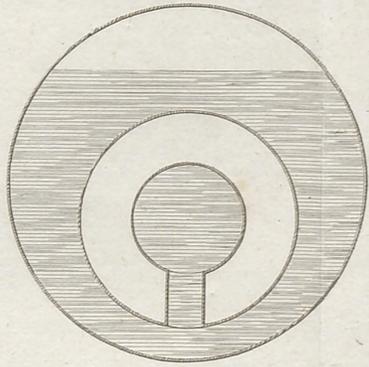


Fig. 1. *Coupe longitudinale.*

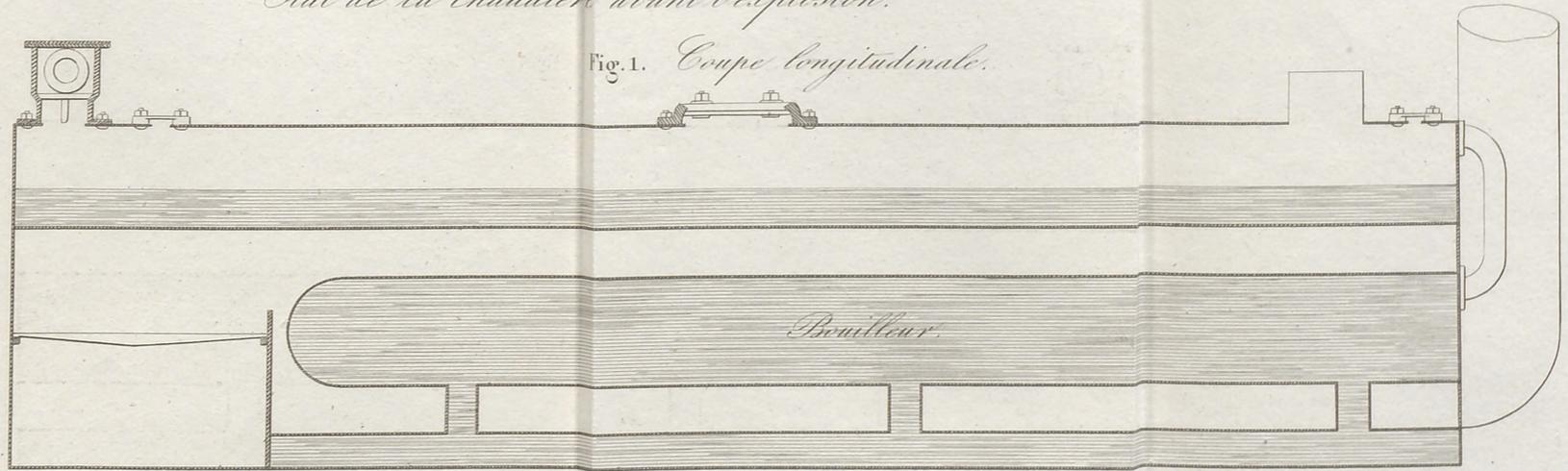
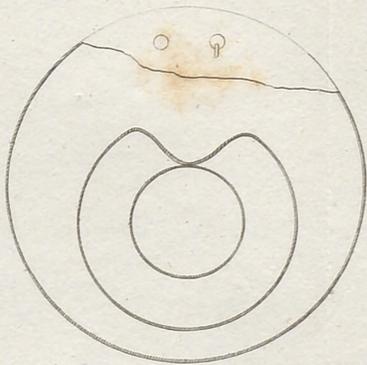


Fig. 4. *Elevation sur AB.*



Etat de la chaudière après l'explosion.

Fig. 5. *Coupe longitudinale.*

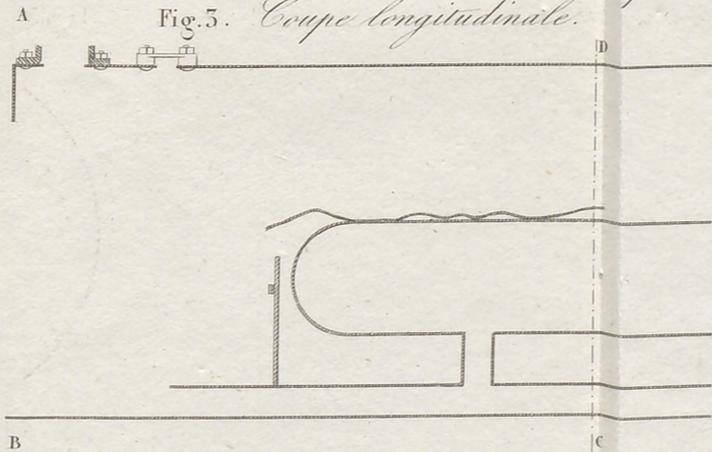
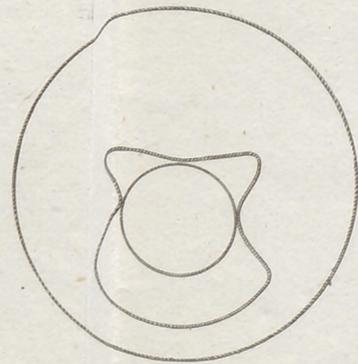
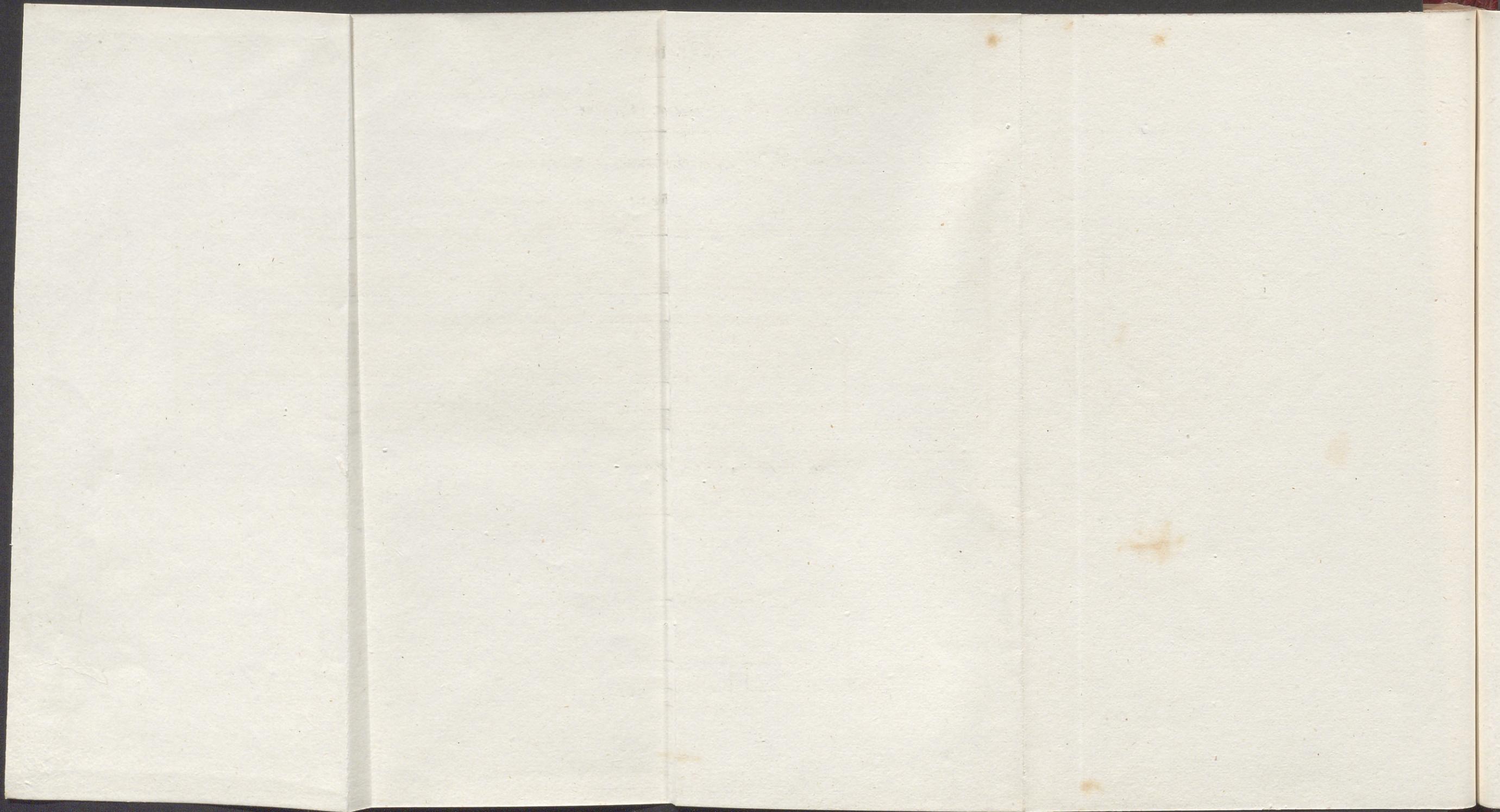
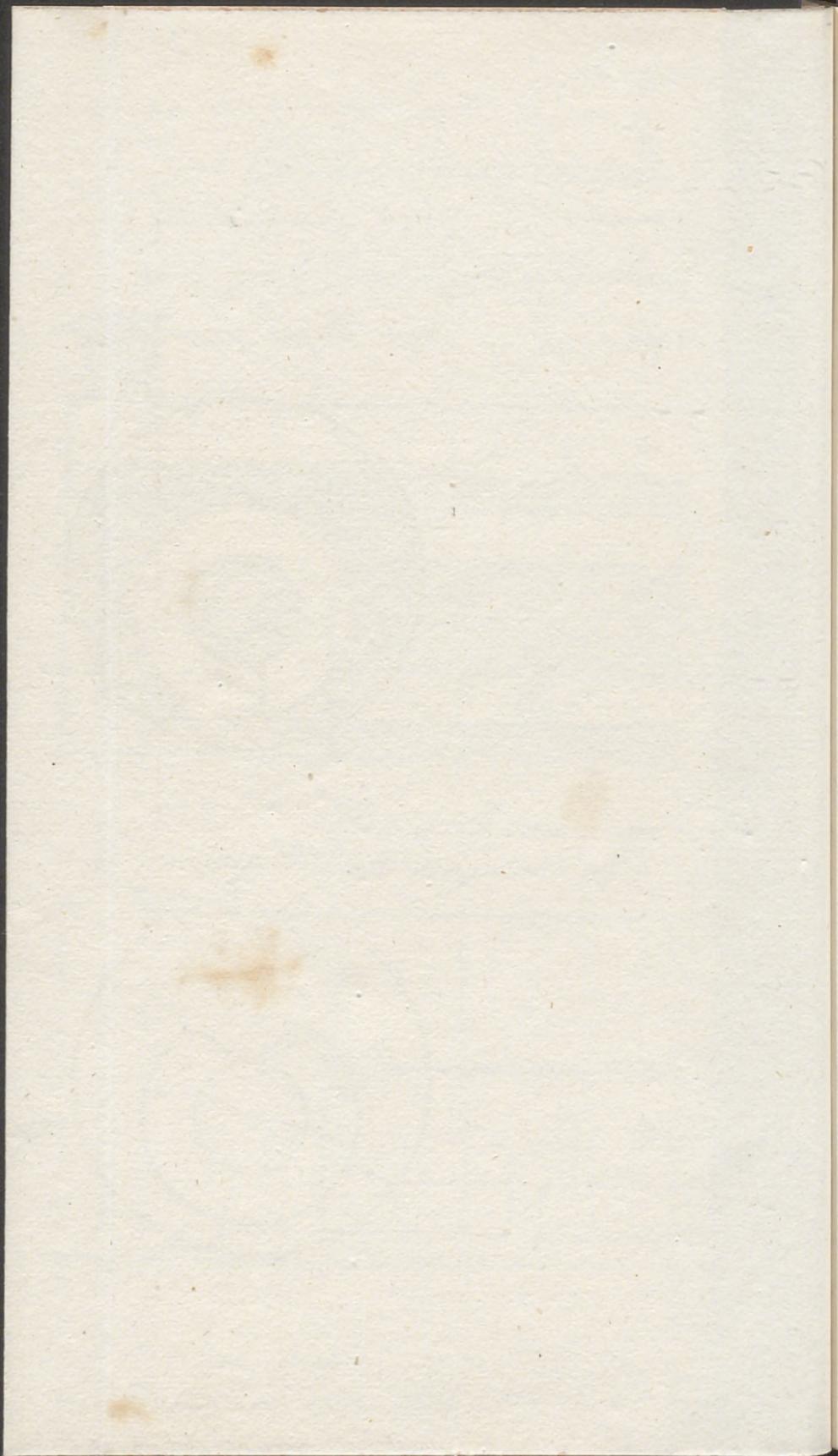
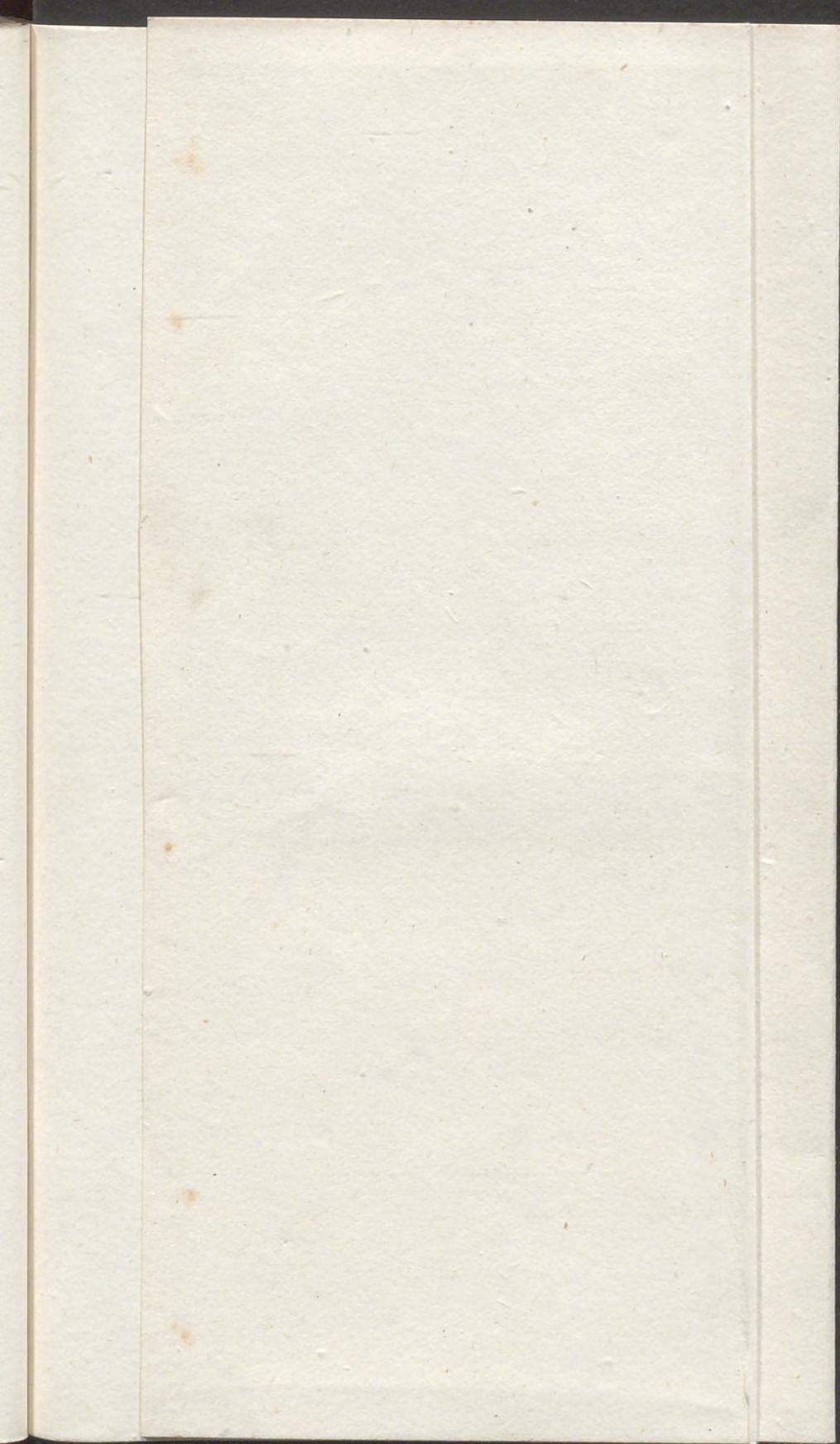


Fig. 5. *Coupe sur CD.*









Chaudière de tribord du paquebot la Bretagne.

Fig. 2. Coupe sur la ligne AB.

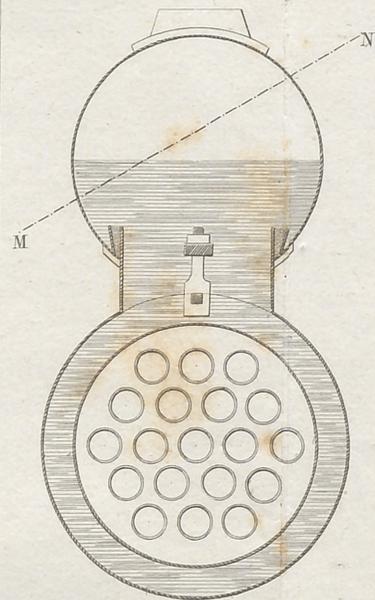


Fig. 1. Coupe longitudinale de la Chaudière.

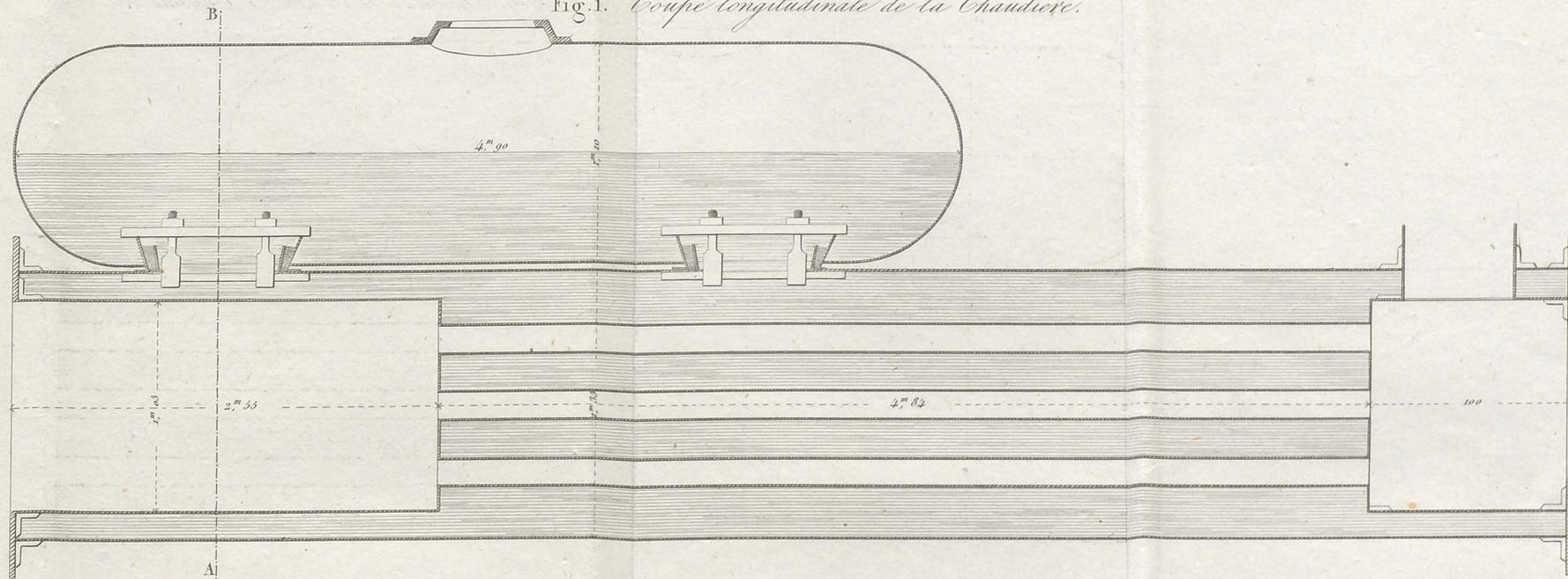


Fig. 4. Coupe sur la ligne CD de Fig. 3.

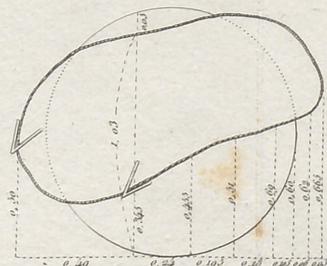
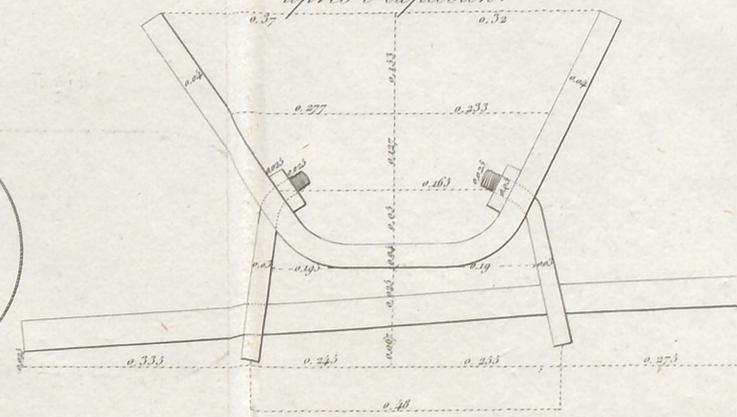


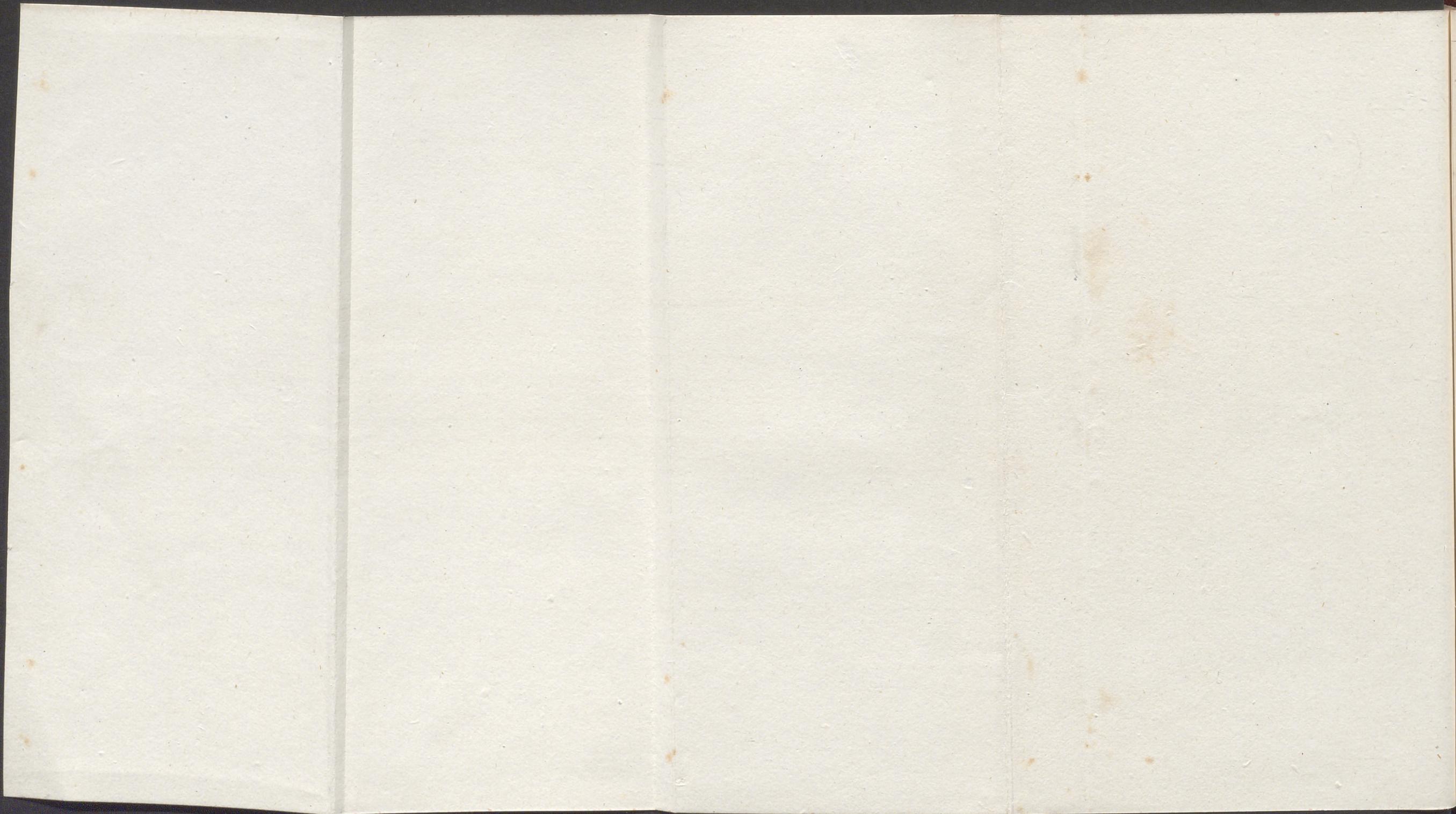
Fig. 5. Coupe du réservoir après l'explosion, suivant MN de Fig. 2.



Fig. 5. Elevation de l'un des systèmes de barrettes après l'explosion.

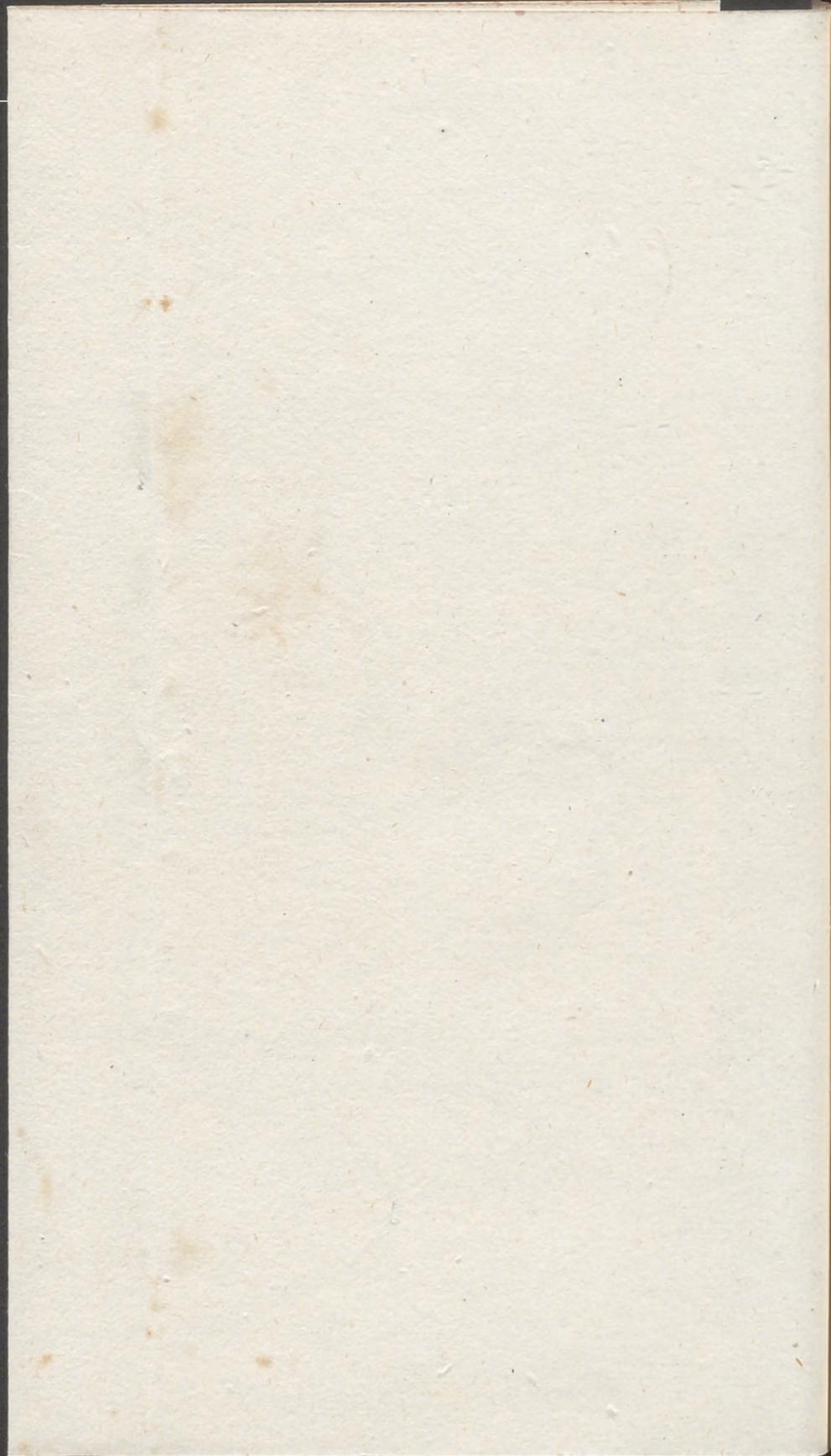


2 mètres.



Part of the adjacent page is visible on the right edge, showing a table with columns and rows of text. The word "Annales" is visible at the bottom of the page.

Annales



Chaudière à vapeur d'Anincourt. Fig. 1, 2, 5.

Fig. 5. *Coupe longitudinale de la Chaudière.*

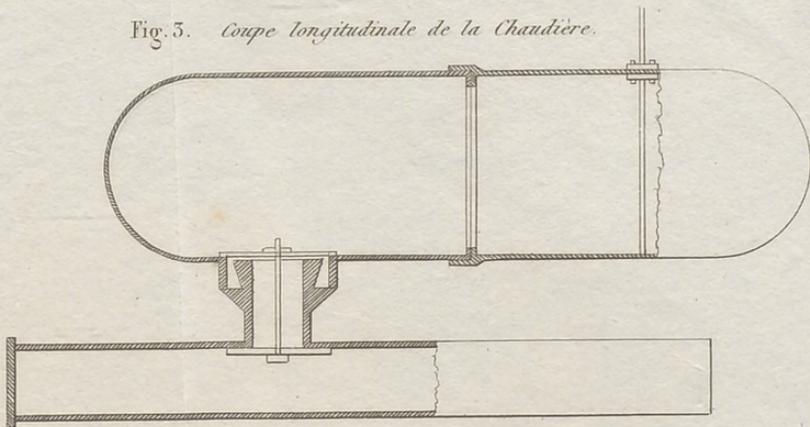


Fig. 2. *Plan du loeil de la Chaudière.*

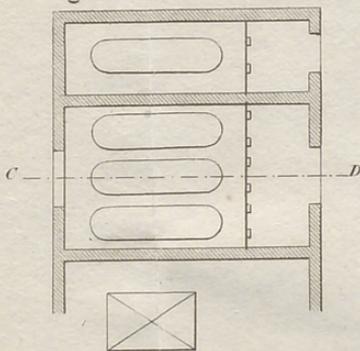


Fig. 1. *Coupe sur CD du Plan.*

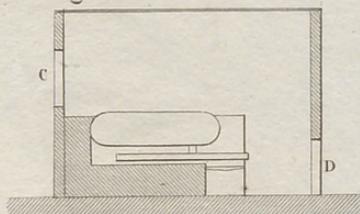


Fig. 4. *Chua-assiette d'essai pour l'amalgamation.*

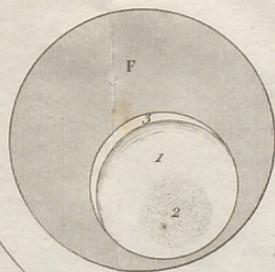


Fig. 6.

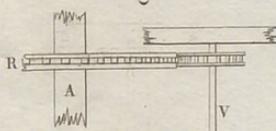


Fig. 8.

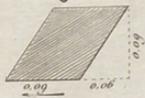


Fig. 7. *Plan de la pièce m.*

Fig. 9.



Fig. 5.



