

Conditions d'utilisation des contenus du Conservatoire numérique

1- [Le Conservatoire numérique](#) communément appelé [le Cnum](#) constitue une base de données, produite par le Conservatoire national des arts et métiers et protégée au sens des articles L341-1 et suivants du code de la propriété intellectuelle. La conception graphique du présent site a été réalisée par Eclydre (www.eclydre.fr).

2- Les contenus accessibles sur le site du Cnum sont majoritairement des reproductions numériques d'œuvres tombées dans le domaine public, provenant des collections patrimoniales imprimées du Cnam.

Leur réutilisation s'inscrit dans le cadre de la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978 :

- la réutilisation non commerciale de ces contenus est libre et gratuite dans le respect de la législation en vigueur ; la mention de source doit être maintenue ([Cnum - Conservatoire numérique des Arts et Métiers - http://cnum.cnam.fr](#))
- la réutilisation commerciale de ces contenus doit faire l'objet d'une licence. Est entendue par réutilisation commerciale la revente de contenus sous forme de produits élaborés ou de fourniture de service.

3- Certains documents sont soumis à un régime de réutilisation particulier :

- les reproductions de documents protégés par le droit d'auteur, uniquement consultables dans l'enceinte de la bibliothèque centrale du Cnam. Ces reproductions ne peuvent être réutilisées, sauf dans le cadre de la copie privée, sans l'autorisation préalable du titulaire des droits.

4- Pour obtenir la reproduction numérique d'un document du Cnum en haute définition, contacter [cnum\(at\)cnam.fr](mailto:cnum(at)cnam.fr)

5- L'utilisateur s'engage à respecter les présentes conditions d'utilisation ainsi que la législation en vigueur. En cas de non respect de ces dispositions, il est notamment passible d'une amende prévue par la loi du 17 juillet 1978.

6- Les présentes conditions d'utilisation des contenus du Cnum sont régies par la loi française. En cas de réutilisation prévue dans un autre pays, il appartient à chaque utilisateur de vérifier la conformité de son projet avec le droit de ce pays.

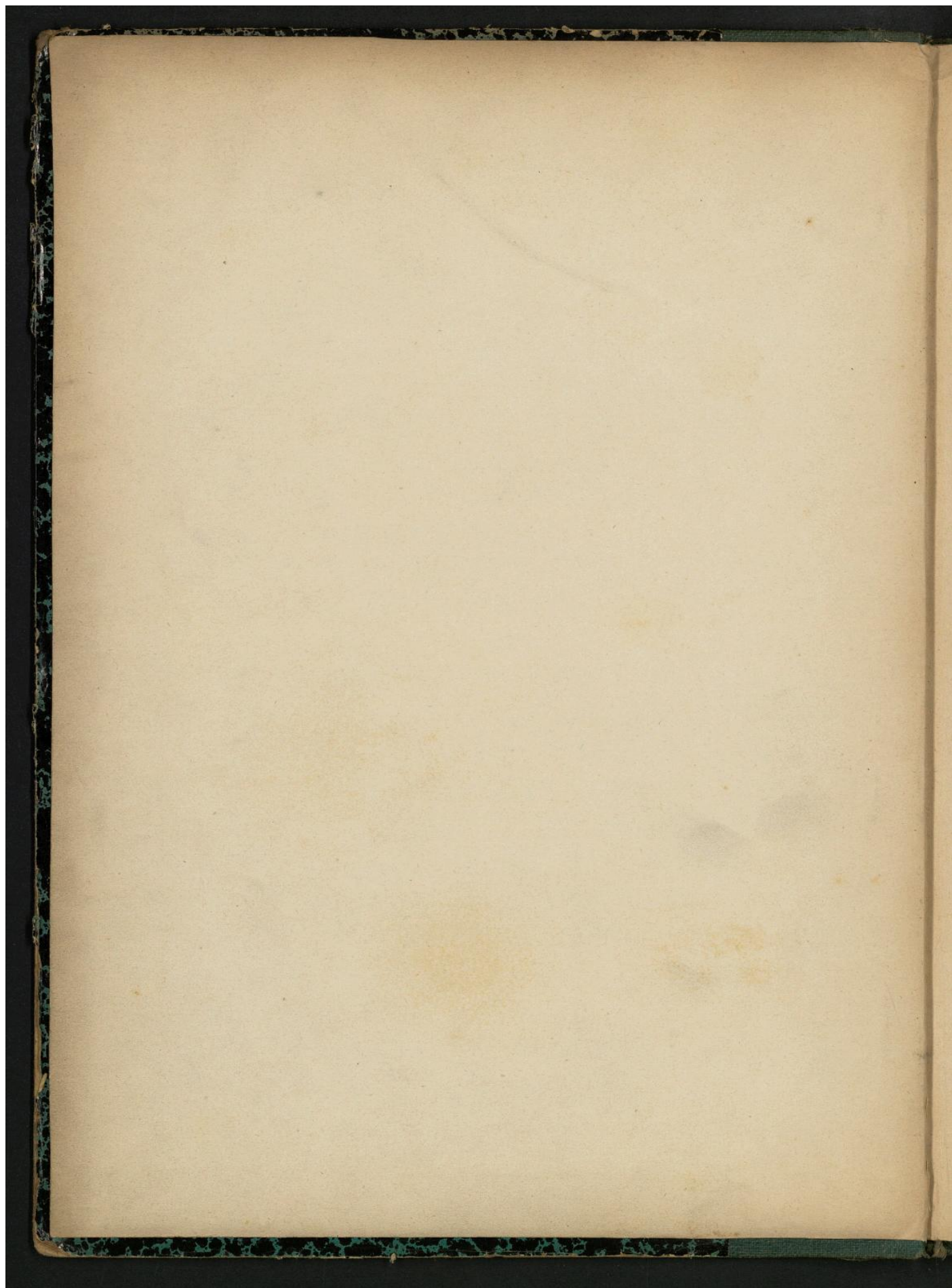
NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

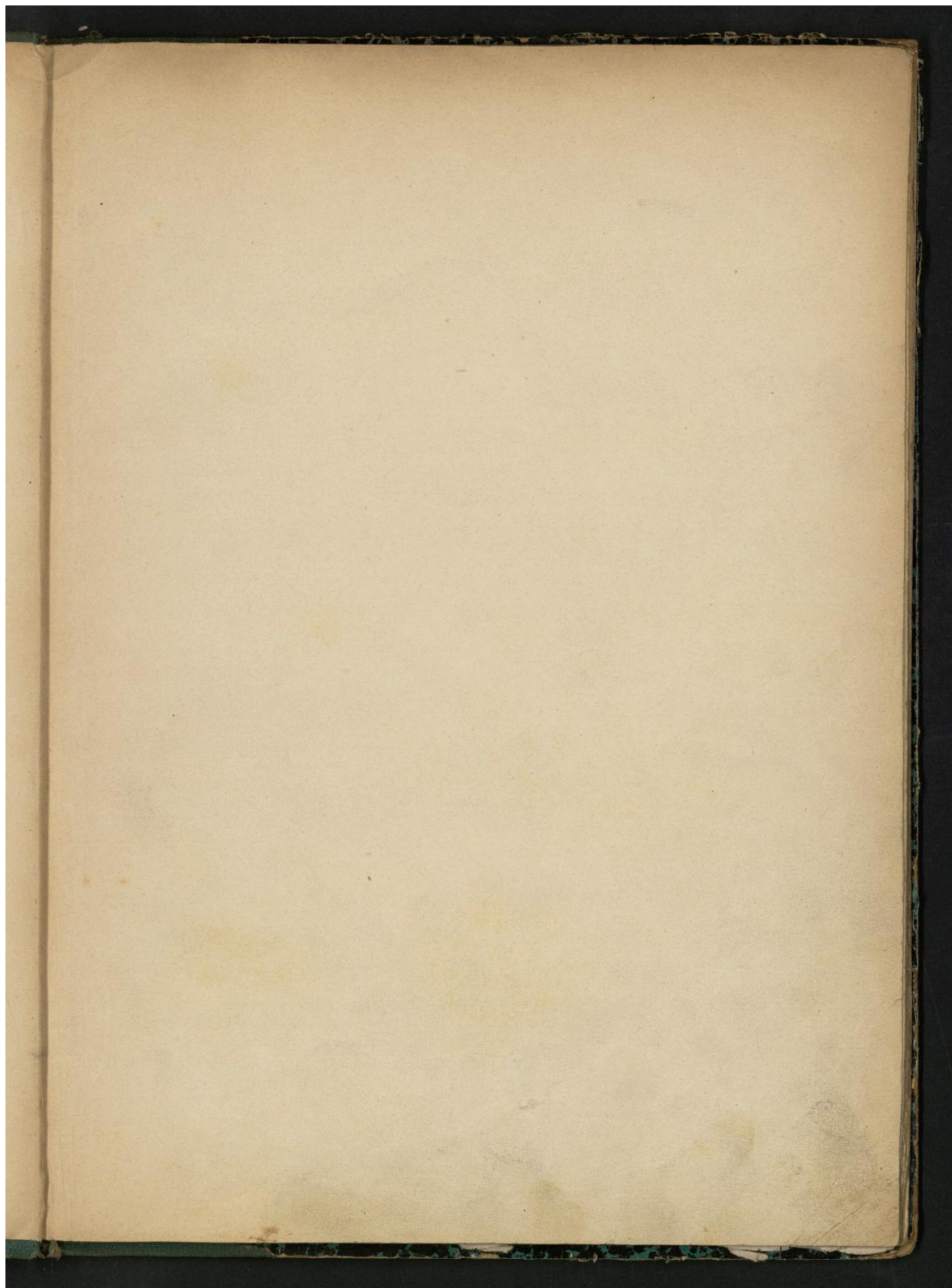
NOTICE DE LA GRANDE MONOGRAPHIE	
Auteur(s) ou collectivité(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard
Auteur(s)	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Auteur(s) secondaire(s)	Conservatoire national des arts et métiers (France)
Titre	Cours de machines
Adresse	[Paris] : [Conservatoire national des arts et métiers], 1907-1914
Collation	4 vol.
Nombre de volumes	4
Sujet(s)	Machines -- Manuels d'enseignement supérieur
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?4DE89_91
LISTE DES VOLUMES	
	Cours de machines à vapeur
	Cours des machines précédemment de mécanique appliquée aux arts : année 1907-1908
	Cours de machines : année 1910-1911 : mesure de la puissance des moteurs : résumé de leçons faites en novembre et décembre 1910
	Cours de machines : 1ère année du cours : 1913-1914

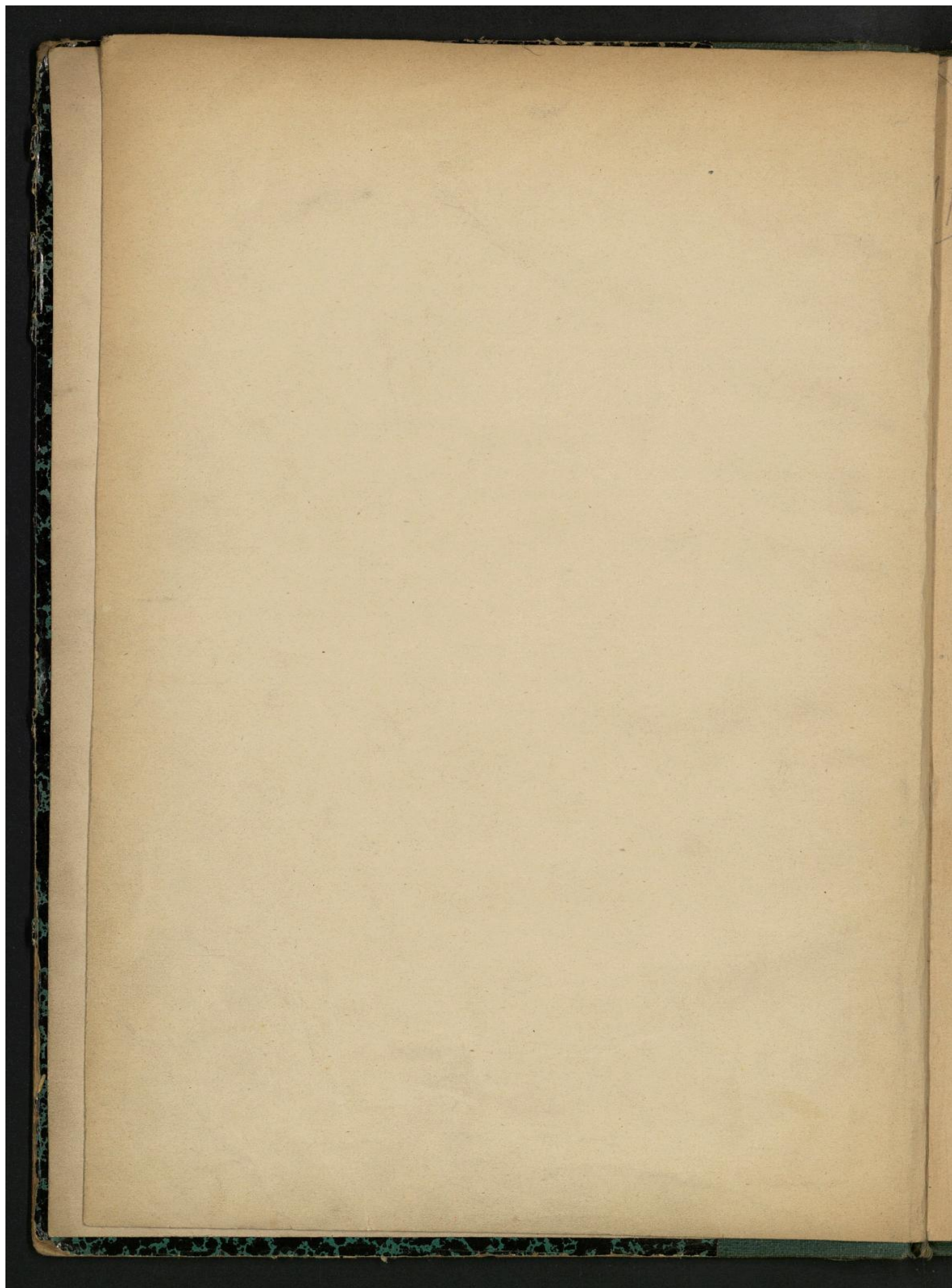
NOTICE DU VOLUME	
Auteur(s) volume	Sauvage, Louis Auguste Édouard (1850-1937)
Auteur(s) secondaire(s) volume	Conservatoire national des arts et métiers (France)
Titre	Cours de machines
Volume	Cours des machines précédemment de mécanique appliquée aux arts : année 1907-1908 : résumé des leçons sur les turbines à vapeur et sur la condensation
Adresse	[Paris] : [Conservatoire national des arts et métiers], 1908
Collation	1 vol. (34 p.-[1] f. de pl.) : ill. ; 31 cm
Nombre de vues	48
Cote	CNAM-BIB 4 De 91 (1)
Sujet(s)	Condensation -- Manuels d'enseignement supérieur Machines -- Manuels d'enseignement supérieur Turbines à vapeur -- Manuels d'enseignement supérieur
Thématique(s)	Histoire du Cnam Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Langue	Français
Date de mise en ligne	20/05/2021
Date de génération du PDF	24/02/2022
Permalien	http://cnum.cnam.fr/redir?4DE91.1











in 4^e carré De 91. (1)

1/2 toile

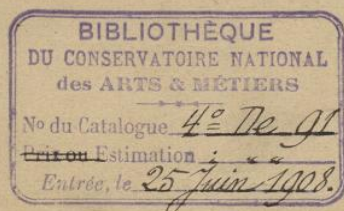
Conservatoire National des Arts & Métiers.

Cours des Machines
précédemment
de Mécanique appliquée aux Arts
Année 1907-1908.

Résumé des leçons sur les Turbines à vapeur
et sur la Condensation.

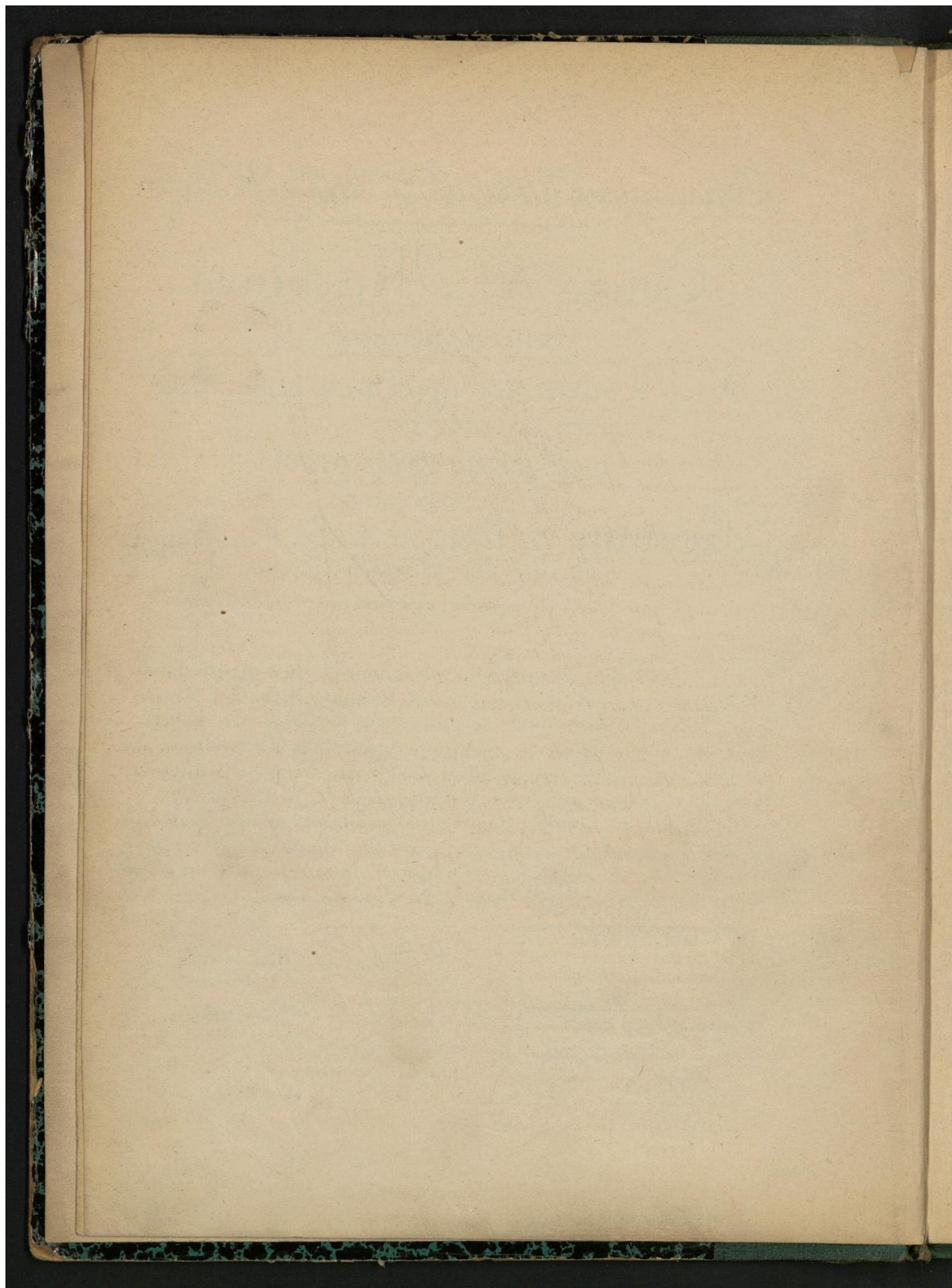
Le Cours de machines de l'année 1907-1908 ayant été interrompu, par force majeure, à la suite de la 29^e leçon, faite le 24 Février 1908, le professeur a rédigé la partie du cours qui a été ainsi supprimée, pour suppléer autant que possible aux leçons manquantes. Ces leçons devaient traiter des turbines à vapeur et de la condensation de la vapeur.

Il a toutefois laissé aux auditeurs, à titre d'exercice, le soin de compléter ce résumé par des calques ou des croquis exécutés d'après des figures indiquées dans quelques ouvrages existant à la Bibliothèque du Conservatoire.



Paris, 20 Mai 1908.

Ed. Sauvage.



Turbines à Vapeur.

Généralités.

Les turbines à vapeur ont une certaine analogie de principe avec les moulins à vent, surtout les moulins américains à ailes nombreuses. Mais les proportions sont bien différentes : les aubes sont bien plus petites et en plus grand nombre, et le courant qui agit sur ces aubes est beaucoup plus rapide que les vents les plus violents, puisque, dans certains cas, il a une vitesse de plus d'un kilomètre par seconde.

Ce courant est produit par la vapeur qui s'échappe d'une chaudière, où elle est produite à une pression P (en général de 10 à 14 Kg. effectifs par cm^2), et s'écoule dans un condenseur, où est entretenue une faible pression p (par exemple 0,1 Kg. par cm^2). Le courant de vapeur est dirigé convenablement, par les aubes fixes d'un distributeur, sur les aubes de la partie tournante, ou turbine proprement dite, qu'il actionne. On verra un peu plus loin qu'il y a lieu de distinguer deux variantes dans la production et l'utilisation de ce courant de vapeur.

Les projets de turbines à vapeur sont fort anciens ; c'est même la première forme de moteur à vapeur qui ait été proposée.

Le pl. 25, p. 25, de l'ouvrage Italien de G. Branca, la machine, publié à Rome en 1629, représente une roue à aubes sur lesquelles agit un jet de vapeur s'échappant d'une petite chaudière. De nombreux trains d'engrenages ralentissent la vitesse de cette roue, et actionnent finalement des pilons. Il est certain que la disposition figurée n'aurait pu donner aucun résultat en pratique, mais l'auteur s'était rendu compte que la roue motrice tournerait très vite.

Beaucoup plus ancien est l'éclypile d'Héron d'Alexandrie (Voir fig. 1, p. 6, dans les roues et turbines à vapeur de Souonowski), où une sphère creuse montée sur pivots reçoit la vapeur, qui s'échappe par deux tuyaux recourbés : la réaction de la vapeur qui s'écoule repousse les tuyaux et fait tourner la sphère.

Un très grand nombre de projets de turbines à vapeur

4

plus ou moins fantaisistes, quelques-uns fort ingénieux, ont paru dans le cours du XIX^e siècle. (voir l'ouvrage de Sosnovski, roues et turbines à vapeur). Mais ce n'est que vers la fin du siècle que des machines capables de fonctionner en pratique ont été créées par de Laval et Parsons. D'assez nombreux types ont été réalisés par d'autres ingénieurs et constructeurs, et depuis un petit nombre d'années, la turbine à vapeur a pris une grande importance dans l'industrie.

Au point de vue théorique, on a vu dans le cours qu'étant données les pressions absolues initiale et finale P et p une machine à piston supposée parfaite consommerait par cheval heure une quantité déterminée de vapeur, qu'on peut calculer par la formule

$$0,85 + \frac{6,95 - 0,92 \log P}{\log P - \log p}$$

$\log P$ et $\log p$ étant les logarithmes des pressions P et p , exprimées en Kg. par cm². Pour produire le même travail, la machine à vapeur réelle exige une quantité de vapeur plus grande qui ne descend guère en-dessous de 1,5 fois la quantité théorique. On démontre qu'avec les mêmes pressions extrêmes P et p , la turbine supposée parfaite exigerait précisément autant de vapeur par cheval heure que la machine à piston théorique; la consommation des meilleures turbines réelles est également majorée dans le même rapport, de 1 à 1,5.

C'est une équivalence très remarquable au point de vue des consommations de vapeur. Cette équivalence rigoureuse dans les machines parfaites théoriques ne se retrouve plus qu'approximativement dans les machines réelles, la consommation étant variable d'une machine à une autre, même pour des machines à peu près semblables.

2) En ce qui concerne le mode d'action du jet de vapeur sur la turbine, certains appareils sont disposés pour produire, dans le distributeur fixe, le jet de vapeur avec toute la vitesse qu'il peut prendre par suite de la différence des pressions P et p : la pression dans ce jet de vapeur est tombée à la valeur minima p , pression du condenseur, au moment où il vient agir sur les aubes mobiles. C'est ce qu'on appelle le fonctionnement à impulsion.

Les vitesses ainsi réalisées sont très grandes: ainsi, avec une pression initiale absolue P de 10 Kg. par cm² et une

5

pression finale de $0,2 \text{ Kg. par cm}^2$, elle est de 1180^m par seconde; avec une pression finale de 1 Kg. par cm^2 , c'est à dire avec l'échappement dans l'atmosphère, la vitesse est de 870^m par seconde. La vitesse est encore grande avec une faible pression initiale P , si la pression finale p est suffisamment basse, ainsi avec $P = 1 \text{ Kg. par cm}^2$ et $p = 0,1 \text{ par cm}^2$, la vitesse est de 820^m par seconde.

Quand la vapeur, à la pression initiale P , est en outre surchauffée, les vitesses sont encore plus grandes.

Pour que ces vitesses puissent être réalisées, la vapeur doit s'écouler par un conduit, dit tuyère ou ajutage, de forme convenable. Pour lancer un jet d'eau avec une grande vitesse, on emploie un ajutage légèrement convergent (lance d'arrosage), mais pour la vapeur, toutes les fois que la pression finale p est plus petite que la moitié de la pression initiale P (ce qui est le cas pour les pressions considérées ci-dessus), l'ajutage doit avoir une forme plus compliquée, et surprenante à première vue: il est d'abord convergent, puis divergent, suivant des proportions déterminées dans chaque cas. Il semblerait que la forme divergente doive diminuer la vitesse de sortie: cela serait vrai pour l'eau, mais pour la vapeur, à mesure que la pression s'abaisse, le volume spécifique (volume occupé par 1 Kg.) augmente, de sorte que, malgré l'épanouissement de la veine, la vitesse augmente, parce que le fluide devient de moins en moins dense. Au moment où la vapeur quitte la tuyère, la pression est descendue à la valeur finale p , qui règne dans l'enceinte où elle s'écoule, et on réalise la plus grande vitesse possible.

Cette forme de tuyère se voit dans divers appareils, notamment dans la turbine de Laval.

Comment utiliser le jet de vapeur ainsi obtenu? Si on la faisait agir en la dirigeant perpendiculairement sur des palettes radiales disposées autour d'une roue, l'utilisation serait défectueuse, d'une part parce que le choc entraîne une perte de travail importante et d'autre part parce que la vapeur, après son action sur la roue conserverait une vitesse encore assez grande, égale à la vitesse linéaire des palettes.

Soit v la vitesse de la vapeur (par exemple 600^m par seconde), soit u la vitesse à la circonférence de la roue (soit 300^m par seconde, valeur moitié la plus favorable. L'énergie

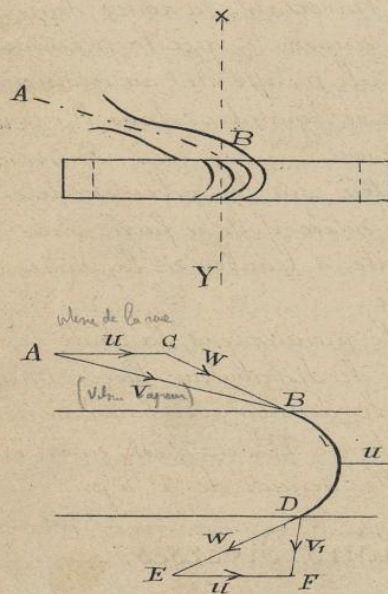
disponible dans le jet, pour un Kilogramme, est $\frac{1}{9,81 \times 2} v^2$, soit 18.400 Kilogrammètres. (force vive, moitié du produit de la masse $\frac{1}{9,81}$ par le carré de la vitesse). Le choc entraîne une perte d'au moins $\frac{1}{9,81 \times 2} (v-u)^2$, soit ici 4600 Kilogrammètres, ou le quart de l'énergie totale; la vitesse avec laquelle le fluide est rejeté fait qu'il possède encore une force vive assez grande $\frac{1}{9,81 \times 2} u^2$, soit encore 4600 Kgm. ou encore un quart de l'énergie totale. On utiliserait donc seulement la moitié de la puissance disponible et, en réalité, le tiers seulement, à cause de diverses pertes inévitables en pratique.

Il faut donc faire agir la vapeur sur une aube disposée de telle sorte qu'il n'y ait pas de choc à l'entrée, et qu'elle soit abandonnée avec une faible vitesse. Cela est possible en dirigeant convenablement la vapeur par le distributeur fixe (ou l'ajutage) sur des aubes courbes.

Les aubes sont disposées à la circonférence de la roue qui tourne autour de l'axe XY. Le jet de vapeur est envoyé suivant la direction AB avec une vitesse v (par exemple 600 m. par seconde).

Sur la partie inférieure de la figure cette vitesse est représentée par la longueur AB. Par suite du mouvement de rotation, la circonférence de la roue est animée de la vitesse $u = AC$ (par exemple 300 m. par seconde). En conséquence, la vitesse relative dont paraîtrait être animée la vapeur pour un observateur entraîné par la roue avec la vitesse u , est représentée par le troisième côté du triangle, CB, en direction et en grandeur (comme exemple de vitesse relative, examiner la direction des gouttes de pluie sur la vitre d'une voiture de chemin de fer). Pour qu'il n'y ait pas de choc, l'aube BD doit être tangente en B à la direction CB.

Le jet de vapeur glisse sur la concavité de l'aube où il conserve à peu près la vitesse relative (w); de sorte qu'en D, à l'extrémité de l'aube, cette vitesse, qui est dirigée suivant la tangente en D, est représentée par la longueur DE égale à CB. Mais cette vitesse relative se combine avec la vitesse de la roue;



3.10.100
18 out

V_r
 $9.81 \times r$

7

EF (égal à AC) et le côté DE du triangle DEF représente la vitesse absolue avec laquelle la vapeur quitte la roue. On voit que si les longueurs DE et EF , c'est-à-dire si les vitesses w et u diffèrent peu, et si elles font un angle suffisamment petit, la longueur DE , c'est-à-dire la vitesse absolue de sortie de la vapeur peut être très notablement réduite.

Dans ces conditions la roue peut recueillir une grande partie du travail disponible, sous forme de force vive, dans le jet de vapeur lancé par le distributeur.

2) Tel est en principe le fonctionnement de la turbine dite à impulsion. Dans la turbine à réaction, le fonctionnement n'est pas tout à fait le même. Il y a bien encore des directrices fixes qui envoient la vapeur sur les aubes tournantes : mais la pression de la vapeur, au moment où elle quitte ces directrices fixes, n'est pas encore descendue à la valeur finale p et, par suite, la valeur absolue de la vitesse est moins grande. C'est en traversant la roue, dans les passages formés par les aubes, que la pression s'abaisse jusqu'à la pression finale p , atteinte au moment où la vapeur quitte la roue pour se répandre dans l'enceinte à faible pression (p) où elle tourne.

Les conditions d'entrée sur les aubes et de sortie sont d'ailleurs les mêmes : l'entrée doit se faire sans choc, la vitesse relative étant tangente à l'aube, et la sortie se faire avec une faible vitesse absolue.

En résumé dans le premier cas, la chute de pression totale (de P à p) se fait dans le distributeur fixe. Dans le second cas la pression dans le distributeur baisse seulement de P à une valeur intermédiaire P' , et c'est en traversant les aubages de la roue qu'elle descend de P' à p .

Dispositions diverses.

L'admission est dite partielle quand elle se fait par une seule tuyère, ou par plusieurs orifices distributeurs ne formant pas une circonférence entière.

Elle est totale quand les orifices distributeurs forment une circonférence entière, et par suite déversent en même temps la vapeur sur toute la circonférence de la roue.

La direction générale du mouvement de la vapeur

est celle qui a été indiquée ci-dessus, où la vapeur reste toujours à peu près à égale distance de l'axe de rotation; c'est la disposition dite parallèle ou hélicoïde. Dans les turbines hydrauliques, qui ont beaucoup d'analogies de principe avec les turbines à vapeur, on emploie aussi beaucoup la disposition radiale, où le distributeur et la roue sont concentriques, mais cette disposition n'est guère usitée pour les turbines à vapeur. Dans ce cas, les vitesses linéaires, de la roue au point d'entrée et de sortie du fluide ne sont plus les mêmes.

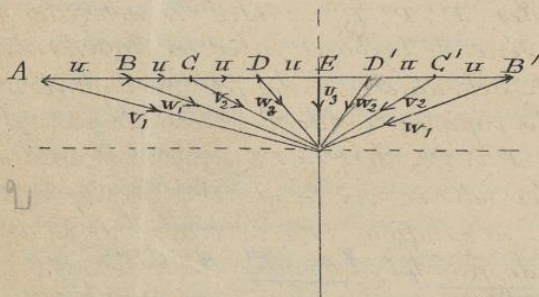
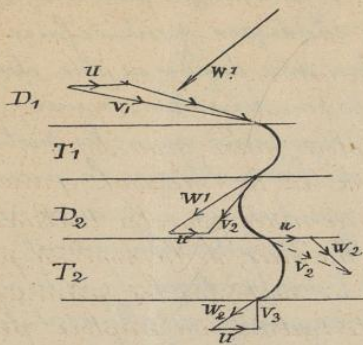
Au lieu d'une seule turbine, on emploie presque toujours des turbines multiples montées sur un arbre unique, tournant ensemble et successivement traversées par le courant de vapeur. Si on considère une série d'enceintes successives, intercalées sur le trajet de la vapeur, et où s'établissent des pressions décroissantes $P', P'', P''', \dots$ entre les extrêmes P et p , en installant une série de turbines entre ces diverses enceintes, ces turbines seront actionnées par des jets de vapeur moins rapides, puisque la vapeur s'écoulera successivement de la pression P à P' , de P' à P'' , de P'' à P''' , etc. Or il est avantageux de réduire les vitesses car la vitesse à la circonférence de la turbine est en relation avec la vitesse de la vapeur; ce qui conduit à de grandes difficultés de construction.

Chacune de ces turbines successives peut fonctionner, suivant sa construction, à impulsion ou à réaction.

Il n'est pas nécessaire d'ailleurs que ces enceintes intermédiaires aient une grande capacité; souvent on les réduit à rien, en plaçant le distributeur fixe d'une turbine immédiatement contre la turbine précédente, de sorte qu'à la sortie d'une turbine, la vapeur entre immédiatement dans le distributeur suivant.

On crée ainsi une série d'étages de pression, souvent en grand nombre (80 par exemple) entre les extrêmes P et p .

Une autre disposition de turbine multiple est celle des étages de vitesse, applicable avec le fonctionnement à impulsion pour réduire la vitesse de la turbine. Le premier distributeur D_1 laisse échapper la vapeur à la pression inférieure p , avec la vitesse maxima v_1 . La vitesse u de la turbine étant relativement faible, la vitesse relative w , est grande; elle se retrouve à la sortie de la première turbine T_1 ,



$$\begin{aligned} BE &= EB' \\ CE &= EC' \\ DE &= ED' \end{aligned}$$

par le même poids de vapeur. Mais à mesure que la pression diminue, le volume occupé par ce poids constant devient de plus en plus grand, si bien que les sections de passage doivent être de plus en plus larges. (Ces sections dépendent aussi de la vitesse : à égalité de pression, la section doit croître aussi, à mesure que la vitesse diminue). L'augmentation de section de passage est obtenue de trois manières différentes qui peuvent être combinées ensemble :

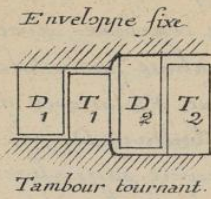
1° les diamètres des turbines successives peuvent être de plus en plus grands.

2° avec le même diamètre, on peut augmenter la largeur des ailes, comptée dans la direction du rayon (voir ci-après) ;

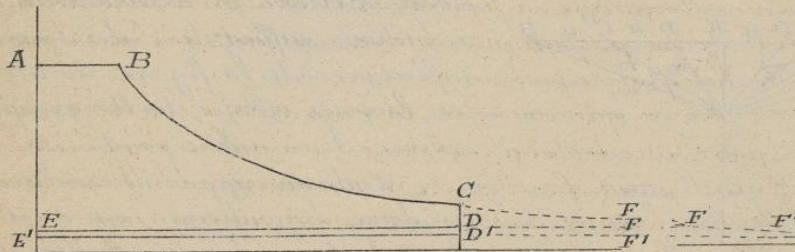
et se combine avec la vitesse u de la turbine pour donner une vitesse absolue v_2 encore grande. Le second distributeur D_2 , est tracé de manière à recevoir sans choc le jet de vapeur animé de la vitesse v_2 , et le conduit, en changeant la direction sur la seconde turbine T_2 . Cette vitesse v_2 donne une vitesse relative w_2 , qui se retrouve à la sortie de la turbine T_2 , et, combinée avec u , donne une vitesse absolue v_3 suffisamment réduite. Sinon, avec un troisième distributeur et une troisième turbine, on arriverait à une réduction suffisante. La partie inférieure de la figure montre les diverses vitesses, toutes groupées autour d'un même point.

Certains appareils combinent les deux dispositions : on a une série d'étages de pression avec étages de vitesse entre deux pressions successives.

Toutes les turbines successives sont traversées dans le même temps



Axe de Rotation.



le rectangle $EDD'E'$, dont la hauteur est très faible. La turbine à vapeur utilise au contraire toute la détente, c'est-à-dire le diagramme $ABFE$, dont le point F est très éloigné vers la droite. L'amélioration du vide donne $ABF'E'$, et ajoute une bande de même hauteur que précédemment, mais beaucoup plus longue, plus une pointe, de F à F' .

Comme la plupart des autres moteurs, la turbine est munie d'un régulateur automatique qui lui permet de prendre une certaine vitesse moyenne déterminée, et limite les écarts de part et d'autre de cette vitesse moyenne, quand la charge résistante varie. A cet effet, la turbine porte un régulateur à force centrifuge, qui agit sur un organe de réglage. Cet organe de réglage peut être, comme dans beaucoup de moteurs à pistons, une soupape équilibrée ou un appareil équivalent, qui réduit plus ou moins, par laminage, la pression de la vapeur à l'admission. D'autres fois le régulateur modifie le nombre d'orifices distributeurs ouverts à la

3^o L'admission partielle, sur des turbines identiques, peut se faire suivant des arcs de plus en plus étendus.

La condensation a une très grande importance pour les turbines à vapeur et il importe que la pression dans le condenseur soit aussi réduite que possible. Un petit abaissement de cette pression (amélioration du vide au condenseur) augmente notablement la vitesse de la vapeur et le travail donné par la turbine : l'effet est beaucoup plus sensible

Soit un moteur à piston, marchant à condensation, et donnant le diagramme $ABCDE$; on améliore un peu le vide du condenseur, et on obtient le diagramme $ABCD'E'$, qui donne un supplément de travail représenté par

vapeur, qui conserve entière sa pression à l'entrée de chacun de ces orifices. Enfin la turbine. Passons à un procédé de réglage très particulier, l'interruption périodique (150 à 200 fois par minute) plus ou moins prolongée du courant de vapeur qui l'alimente, d'où résultent des laminages périodiques plus ou moins longs.

La vitesse de rotation des premières turbines était excessive; on est arrivé à la ramener à des valeurs plus commodes pour l'application. Souvent des turbines commandent des alternateurs pour la production du courant électrique triphasé. Comme on demande souvent que le courant ait 50 périodes par seconde, cela conduit à une vitesse de 3000 tours par minute (50 tours par seconde) pour un alternateur à 2 pôles, une période correspondant au passage d'un point de l'induit devant les deux pôles; avec un alternateur à 4 pôles, la vitesse doit être réduite à 1500 tours par minute, vitesse souvent réalisée dans les turbines de grande puissance.

En ce qui concerne la puissance, un moteur est établi pour une certaine puissance normale. En général il faut qu'il puisse fonctionner à puissance réduite, et aussi qu'il puisse fournir occasionnellement une puissance plus forte. Il s'agit d'écartés importants, par exemple la moitié ou le tiers de la puissance normale, et une augmentation de moitié en sus, et non des légers écartés inevitables dans presque toutes les applications.

La consommation de vapeur par cheval-heure sera généralement la moindre dans la marche normale; mais il est désirable que cette consommation par cheval-heure ne devienne pas exagérée à puissance réduite et en surcharge. C'est une qualité d'un moteur, très appréciée pour certains usages de donner de grandes variations de puissance sans trop d'écartés dans la dépense par cheval-heure.

La plupart des turbines à vapeur se prêtent à la marche à puissance réduite; certaines sont disposées aussi pour des surcharges, avec des augmentations de dépenses par cheval-heure assez variables suivant les types, comparables cependant dans l'ensemble à ce que donnent les machines à piston.

Les principales caractéristiques des turbines à vapeur,

comparées aux moteurs à piston, sont les suivantes :

Consommations de vapeur, à peu près équivalentes dans les essais des deux genres d'appareils.

L'usure des turbines paraît être lente, elle ne peut guère porter, en ce qui concerne les organes principaux, que sur les paliers et les tourillons de l'arbre, et sur les aubes, que le frottement de la vapeur peut user. L'effet de l'usure admissible augmentera peut-être moins la consommation qui avec les moteurs à piston, on les fuites sont plus à craindre.

Le service est facile, puisqu'il n'y a guère que des paliers (souvent deux seulement) à graisser, et le graissage est fréquemment assuré mécaniquement. Pour ce motif, la dépense d'huile n'est pas très élevée.

La turbine se prête bien à l'installation d'unités très puissantes, de 500 à 10000 Kilowatt.

Les vitesses de rotation, bien que moins grandes qu'au début, pour les grands appareils sont encore souvent de 1500 ou de 750 tours par minute, c'est-à-dire supérieures à celles des machines à pistons extra-rapides et à fortiori à celles des grands moteurs, qui ne dépassent guère 100 à 120 tours. Pour la commande directe, qui s'impose, il faut donc des dispositions nouvelles des appareils commandés (alternateurs, compresseurs, pompes centrifuges).

La surchauffe et la très bonne condensation donnent tout leur effet avec les turbines; il n'y a pas de difficultés de graissage avec la surchauffe, puisque la vapeur n'est en contact avec aucun organe graissé.

Les turbines donnent facilement une grande régularité de marche.

Elles sont peu encombrantes.

Ces motifs expliquent la faveur avec laquelle elles ont été accueillies depuis quelques années pour les grandes installations, malgré la défiance que peut inspirer tout appareil nouveau quand il exige des dépenses très élevées de premier établissement.

Description de quelques types de Turbines.

Turbine de Laval.

La turbine de Laval est à roue unique ; elle fonctionne à impulsion, avec admission partielle. La vitesse à la circonférence de la roue est environ le tiers de la vitesse de la vapeur à la sortie de l'ajutage distributeur, et peut s'approcher de 350 m. par seconde : il faut un disque d'une solidité exceptionnelle pour résister à cette vitesse.

La puissance est généralement petite ou moyenne ; elle ne dépasse guère 300 chevaux.

La roue tourne dans une chambre en communication avec le condenseur : elle reçoit la vapeur d'un ajutage divergent ; on emploie aussi plusieurs ajutages, agissant sur la roue unique, pour augmenter la puissance.

On trouvera des dessins de la turbine de Laval dans la Revue de Mécanique, Février 1901, p. 153 et 154. Il en existe une aux collections du Conservatoire. On remarquera sur les dessins le peu d'espace occupé, dans l'ensemble de l'appareil, par le disque moteur et la chambre qui le contient.

La vitesse linéaire très grande, combinée avec le diamètre restreint du disque, conduit à une énorme vitesse de rotation (15.000 tours par minute, et même plus). Il est nécessaire de réduire cette vitesse. A cet effet, l'arbre de la turbine porte un pignon qui commande des roues dentées à denture hélicoïdale, d'une exécution très remarquable. La vitesse est réduite au dixième.

La régularisation est obtenue par un régulateur à force centrifuge qui commande une soupape à double siège sur l'arrivée de vapeur, dont la pression se trouve plus ou moins réduite par laminage.

Pour éviter une réduction excessive de pression, qui empêche la bonne utilisation de la vapeur, on dispose, dans les grandes turbines à plusieurs ajutages, ces ajutages pour qu'ils se ferment successivement quand la puissance

doit diminuer. A cet effet, ils sont munis d'une soupape qu'un ressort tend à fermer, mais que la pression de la vapeur maintient ouverte. Lorsque cette pression laisse, par suite du laminage de vapeur produit par la soupape - à double-siège, un ajutage se referme et les autres travaillent sans que la pression s'abaisse davantage.

Un intéressant détail de construction est l'emploi d'un arbre flexible, très mince, sur lequel est calé le disque tournant. Cet arbre flexible a la propriété de se centrer automatiquement quand il tourne à grande vitesse tandis que le moindre balourd, difficilement évitable, soumettrait un arbre rigide à des vibrations destructives.

Les aubes, en acier, sont rapportées à la jante du disque; elles s'ajustent à l'intérieur d'alvéoles découpées dans cette jante. On en trouvera le dessin dans "les turbines à vapeur" par Stodola, traduction par Mahu, p. 203.

La consommation de vapeur par cheval-heure effectif des bonnes turbines de Laval est de 6,5 à 7 Kg., consommation comparable à celle d'une bonne machine compound à pistons.

Turbine Zoelly.

La turbine Zoelly comporte un nombre restreint d'éléments (souvent une dizaine); elle fonctionne à impulsion. Les éléments successifs sont formés de disques calés sur l'arbre, chaque élément est précédé de son distributeur fixe, qui reçoit la vapeur d'échappement de l'élément précédent (voir Stodola, ouvrage cité, p. 357). Ces distributeurs sont fixés à l'intérieur du tambour qui enveloppe la machine: pour éviter autant que possible les fuites de vapeur, ces distributeurs sont prolongés par des disques fixes - qui s'avancent jusqu'à l'arbre. Ces disques forment une série de chambres ou cellules, dans chacune desquelles tourne un des disques mobiles. De là vient le nom de disposition multicellulaire. Chaque cellule est remplie de vapeur à la pression d'échappement de la turbine qu'elle renferme, et cette vapeur s'écoule par le distributeur suivant; une fuite ne peut se produire qu'entre la cloison fixe et l'arbre, c'est-à-dire par une fente circulaire de petit diamètre.

Le diamètre extérieur des disques tournants reste constant, mais les aubes vont en s'élargissant suivant le rayon, de manière à augmenter progressivement la section nécessaire pour le passage de la vapeur.

La régularisation, automatique, se fait par la diminution de la vapeur.

Turbine Curtis.

La turbine Curtis, telle qu'elle est construite aujourd'hui par la General Electric Co aux Etats-Unis, comporte de deux à quatre étages de pression, avec deux ou trois étages de vitesse pour chaque étage de pression (ces nombres peuvent varier).

Chaque roue porte à sa jante deux ou trois couronnes d'aubages (fig. 248, p. 367 de l'ouv. cité de Stodola), séparées par deux distributeurs fixes, fixés au tambour extérieur enveloppe; il y en a en outre un premier distributeur avant la roue, où la vapeur prend toute la vitesse correspondant à la chute de pression. Deux ou plusieurs roues analogues (fig. 253, p. 371 et 254, p. 372 de l'ouvrage cité de Stodola), montées sur le même arbre, tournent dans des chambres cloisonnées. Les aubes vont en s'élargissant suivant la direction du rayon, pour offrir à la vapeur les sections croissantes nécessitées par la diminution de la vitesse et de la pression.

Une particularité de construction est la position verticale de l'arbre, qui porte à sa partie supérieure la partie tournante de la dynamo commandée. L'encombrement en plan est ainsi des plus réduits.

À sa partie inférieure l'arbre repose sur un pivot lourdement chargé, pour lequel on a adopté la solution imaginée par Girard: donner à la surface du pivot un rayon assez grand, et injecter sous pression une mince couche d'huile entre cette surface et la surface fixe correspondante d'appui (fig. 263, p. 377, Stodola). Une pompe assure la circulation d'huile, refroidie dans un réfrigérant à circulation d'eau. On a même dans certains cas employé l'eau au lieu d'huile, comme avait fait Girard.

La régularisation est obtenue par la fermeture

d'un nombre plus ou moins grand d'orifices du premier distributeur. Les distributeurs des étages subséquents de pression n'ont pas de réglages et par conséquent l'admission partielle pour la première roue reste totale pour les suivantes. Le régulateur, à force centrifuge, agit sur la fermeture de ces orifices.

Turbine Rateau.

La turbine Rateau est une turbine à impulsion à éléments multiples. (une vingtaine). La disposition est multicellulaire, chaque turbine tournant dans une chambre fermée par des cloisons qui s'étendent du tambour extérieur à l'arbre. Un joint dit en labyrinthe, formé de collets sur l'arbre entre lesquels se logent des anneaux sortis dans les diaphragmes, assure l'étanchéité.

Les roues forment trois groupes de diamètres croissants (fig. 301, p. 394 de Rodola, *ouv. citée*).

Le régulateur agit sur un tiroir qui lamine plus ou moins la vapeur; en outre, un régulateur de sûreté ferme la soupape d'admission dès que la vitesse dépasse une valeur déterminée.

Turbine Parsons.

La turbine Parsons, une des plus anciennes, a reçu de nombreuses applications. Elle fonctionne à réaction avec un grand nombre d'éléments successifs (par exemple 80). Les 80 roues forment trois groupes de diamètres différents: dans chaque groupe, les aubes tournantes sont fixées à la périphérie d'un tambour cylindrique, tandis que les aubes fixes des distributeurs sont portées par l'enveloppe extérieure. Le schéma ci-joint représente ces trois groupes, mais il y a lieu de remarquer que le nombre des éléments figurés est inférieur au nombre réel. En outre, le schéma ne montre pas que, dans chaque groupe, la hauteur des ailes suivant le rayon va en augmentant, pour tenir compte de l'accroissement du débit en volume de la vapeur à mesure que la pression diminue, les tambours étant cylindriques, l'accroissement de hauteur est pris sur l'enveloppe extérieure; dans d'autres cas cet accroissement de

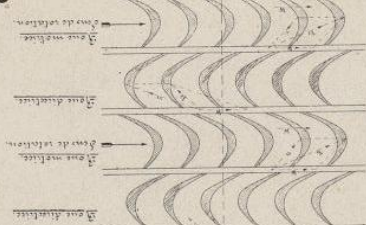
COUPE SCHEMATIQUE D'UNE TURBINE A VAPEUR SYSTEME "BROWN-BOVERI-PARSONS"

CH^E ELECTRO-MECANIQUE.

LE BOURGET (SEINE)

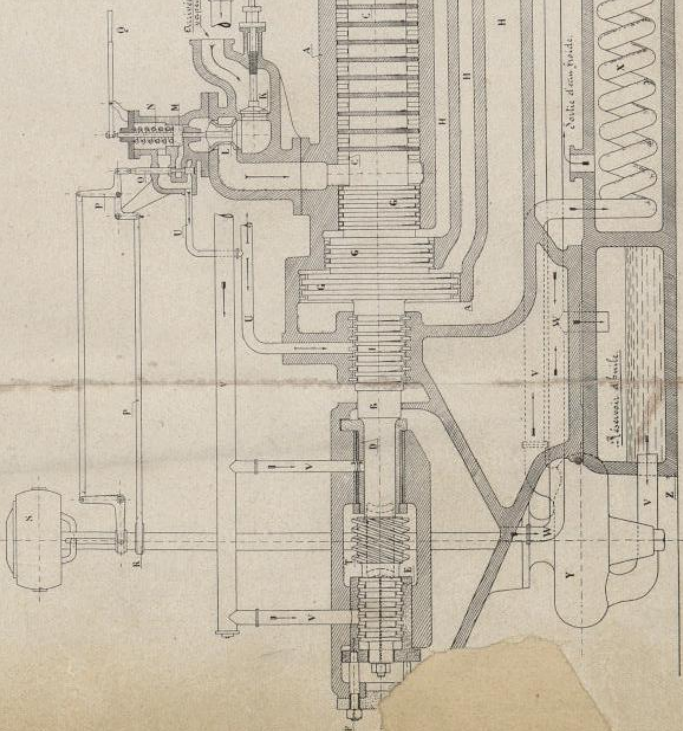


Tout est fait et sous surveillance, commandant
des installations et les pompes à vapeur.
V. Tous les détails de la machine à vapeur.
W. Tous les détails de la machine à vapeur.
X. Tous les détails de la machine à vapeur.
Y. Tous les détails de la machine à vapeur.
Z. Tous les détails de la machine à vapeur.
AA. Tous les détails de la machine à vapeur.

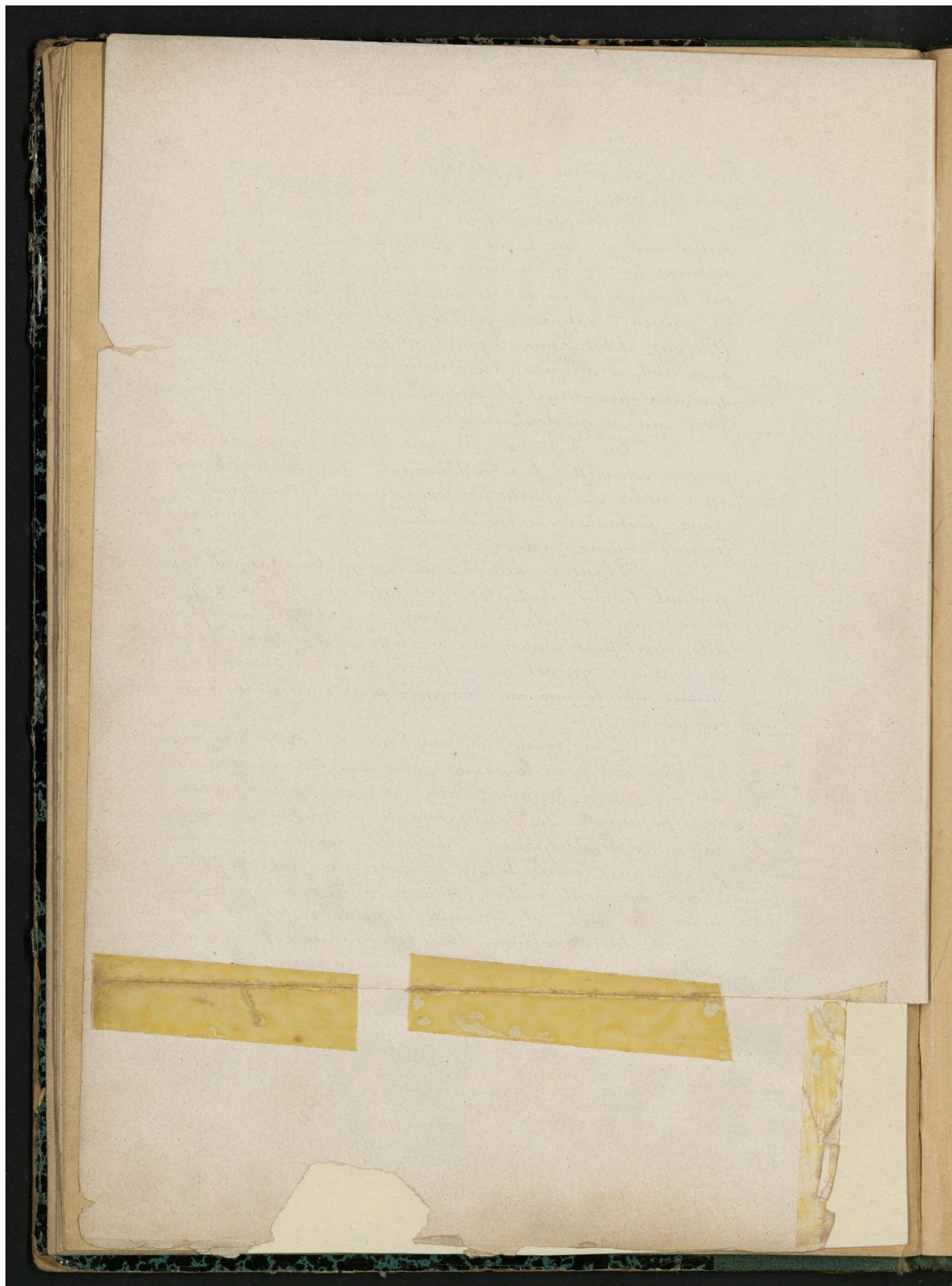


Transmission

A. L'arbre
B. L'arbre
C. L'arbre
D. L'arbre
E. L'arbre
F. L'arbre
G. L'arbre
H. L'arbre
I. L'arbre
J. L'arbre
K. L'arbre
L. L'arbre
M. L'arbre
N. L'arbre
O. L'arbre
P. L'arbre
Q. L'arbre
R. L'arbre
S. L'arbre
T. L'arbre
U. L'arbre
V. L'arbre
W. L'arbre
X. L'arbre
Y. L'arbre
Z. L'arbre
AA. L'arbre



BIB
CNAM



hauteur est obtenu à la fois sur le tambour et sur l'enveloppe. (voir fig. 316, p. 408 de l'ouv. cité de Stodola).

Pour éviter les fuites de vapeur, il convient que les aubes mobiles soient aussi près que possible des aubes directrices fixes; néanmoins un certain jeu est nécessaire, et sur le rayon et en longueur, pour que les parties touchantes ne puissent frapper les parties fixes par suite des vibrations, flexions, dilatations de pièces ou par suite de l'usure. L'usure doit d'ailleurs être strictement limitée, et des calibres spéciaux permettent de surveiller à cet égard les deux paliers qui supportent l'arbre.

En définitive, l'appareil se compose de deux parties essentielles, l'arbre tournant avec les tambours garnis d'aubes et la partie fixe comprenant l'enveloppe extérieure portant les aubes directrices, et les deux paliers dans lesquels tourne l'arbre.

Plusieurs détails sont à signaler. Les paliers, supportant l'arbre, sont placés à l'extérieur de l'enveloppe fixe, de sorte que l'huile de graissage ne peut pénétrer dans cette enveloppe. La vapeur est donc complètement exempte de matières grasses et, condensée dans un condenseur à surface, donne une eau très pure pour l'alimentation des chaudières.

L'arbre sort de l'enveloppe à travers des joints dits en labyrinthe (voir le schéma), constitué par une série de collets sur l'arbre tournant dans des rainures de l'enveloppe sans frottement. Les deux extrémités de l'arbre tournant dans la vapeur d'échappement, à la faible pression du condenseur p , c'est une rentrée de l'air extérieur qui tend à se produire. Pour éviter cette rentrée, un tuyau amène la vapeur vers le milieu du joint: il en résulte de petites fuites de vapeurs, surtout du côté intérieur dans le condenseur, fuites qui sont préférables à la rentrée d'air, qui élève la pression p .

Les coussinets sont montés à l'intérieur de douilles cylindriques concentriques, qui permettent un jeu très léger de l'arbre, pour obtenir un bon centrage. Ils sont abondamment alimentés d'huile par une pompe, qui établit un courant continu; l'huile est refroidie dans un serpentier entouré d'eau froide.

Le dernier palier à gauche sur le schéma est un palier de butée, destinés à résister à la poussée axiale de l'arbre; d'ailleurs fort réduite comme on le verra plus loin. Le palier de butée contient un arbre à collets qui portent dans des gorges des coussinets.

La pression de la vapeur sur les aubes mobiles et sur le plat des tambours produit une forte poussée de l'arbre suivant son axe: pour équilibrer cette poussée, on a monté sur l'arbre trois pistons d'équilibre, G, G, G. On remarquera que ces pistons sont pressés respectivement par la vapeur entrant dans chacun des trois groupes: cette disposition a pour objet d'obtenir l'équilibre quelles que soient les variations de ces pressions, ce qu'on obtiendrait pas avec un piston unique, pressé par la vapeur à son entrée dans la turbine.

Les joints de ces pistons contre l'enveloppe dans laquelle ils tournent sont également du système en labyrinthe.

La régularisation est obtenue par une admission intermittente variable de vapeur. La soupape équilibrée T est ouverte et fermée (150 à 200 fois par minute) par le jeu d'une commande actionnée par l'arbre de la turbine (engrenage à vis sans fin T); ce mécanisme de commande n'est pas figuré dans le schéma. L'action du régulateur est de faire varier la durée d'ouverture, qui est diminuée quand la vitesse de rotations augmente. Il en résulte que la pression de la vapeur admise dans la turbine est soumise à des fluctuations périodiques; et la valeur moyenne de la pression est d'autant plus faible que la puissance à produire est moindre.

Pour la marche en surcharge, on admet la vapeur de la chaudière en B, directement au second groupe d'éléments. Le premier groupe devient alors inactif, et l'utilisation est moins bonne.

L'enveloppe fixe est en deux parties assemblées par boulons; une fois la partie supérieure démontée, toute la partie tournante est apparente, et peut être enlevée.

Grâce au grand nombre d'éléments, la vitesse à la circonférence des tambours est suffisamment réduite, et le nombre de tours par minute n'est pas trop grand. Pour une même vitesse linéaire à la circonférence, ce nombre décroît quand le rayon augmente, c'est-à-dire dans les machines puissantes.

Applications diverses des turbines à vapeur.

Outre la production des courants électriques, application principale des turbines à vapeur, on les emploie aussi à la commande de pompes, de machines soufflantes, et de compresseurs d'air. On a créé des appareils spéciaux pour ces applications disposés pour la commande directe par la turbine savoir : des pompes centrifuges à haute pression et des turbo compresseurs.

Une application intéressante des turbines est leur emploi pour utiliser la vapeur d'échappement (à la pression de l'atmosphère) de certaines machines, notamment des machines d'extraction des mines et des machines de laminaires. Ces machines ont une marche intermittente, par courtes périodes; elles se prêtent mal à l'emploi de la condensation et le fonctionnement à échappement libre est peu économique. La turbine, au contraire, est très propre à utiliser la vapeur à basse pression (celle de l'atmosphère), s'échappant dans un condenseur.

La turbine à vapeur d'échappement est employée habituellement à la production d'électricité.

Pour parer à la marche intermittente des machines qui l'alimentent, on fait usage d'accumulateurs de vapeurs, grands récipients contenant de l'eau présentant une grande surface de contact avec la vapeur, par exemple par l'emploi d'un grand nombre de plateaux à rebords superposés. L'accumulateur reçoit la vapeur d'échappement par intermittences, et cette vapeur chauffe l'eau; d'autre part, cette eau, en se refroidissant légèrement alimente un courant continu de vapeur envoyé à la turbine.

Depuis quelques années, on emploie beaucoup la turbine à vapeur pour la propulsion des navires à la place des machines piston à pistons, notamment dans les plus grands paquebots. Les avantages des turbines peuvent être : la réduction des vibrations du navire, un peu moins de poids et d'encombrement, une moindre dépense de vapeur. Tous ces avantages ne sont pas parfaitement établis; toutefois les applications deviennent de plus en plus nombreuses et importantes.

Pour cette application il fallait d'abord approprier les hélices motrices des navires à la vitesse de rotation plus

grande que leur donnent les turbines. On fait usage généralement de trois hélices, une médiane et deux latérales, chacune commandée par une turbine à vapeur. La turbine médiane reçoit la vapeur de la chaudière, puis l'envoie aux deux turbines latérales qui l'évacuent au condenseur.

Un autre point important est la nécessité d'obtenir une marche arrière, que ne donne pas la turbine ordinaire. A cet effet, on installe sur l'arbre même de la turbine normale de marche avant une seconde turbine, dont les aubes distributrices et motrices sont disposées pour produire une rotation en sens inverse; pendant la marche normale cette turbine est en communication avec le condenseur, et ses aubes tournent dans la vapeur à la très faible pression du condenseur.

Comme la marche arrière n'est qu'accidentelle, on ne dispose de turbines de marche arrière que sur les deux arbres latéraux d'hélices, et non sur l'arbre médian et on les fait aussi petites que possible. Il en résulte que les facultés d'arrêt (pour lesquelles on emploie la marche arrière) et de manœuvre de certains navires à turbines laissent un peu à désirer.

L'hélice du navire produit une poussée suivant l'axe, qui est reçue par un palier de butée; d'autre part, la turbine produit aussi une poussée axiale. On a soin d'y opposer ces deux poussées l'une à l'autre pour les équilibrer, et les pistons d'équilibre de la turbine Larsson sont supprimés.

Condensation.

La condensation de la vapeur était indispensable dans les machines primitives, où la vapeur était produite seulement à la pression de l'atmosphère : l'échappement dans l'atmosphère aurait donné une contre-pression résistante égale à la pression motrice, et n'est devenu possible qu'avec l'emploi de vapeur à pression plus élevée. Mais, même avec la vapeur à haute pression, la condensation augmente notablement le travail produit, puisque pendant le retour du piston elle substitue à une pression résistante de plus de 1 kg. par cm^2 une pression de 0,1 à 0,2 kg. par cm^2 : on gagne ainsi à peu près 1 kg. par cm^2 , ce qui supprime une force résistante de près de 2000 kg. pour un piston de 500^{mm} de diamètre, force agissant pendant le retour du piston.

Pour bien saisir les phénomènes de la condensation, il faut se rappeler les lois simples qui régissent la transformation de l'eau en vapeur et le phénomène inverse du passage de la vapeur à l'état liquide. Quand la vapeur est saturée, c'est-à-dire en contact avec l'eau qui la produit, la pression dépend de la température. Pour transformer un kg. d'eau en vapeur à une température donnée, qui ne change pas pendant la vaporisation, et sous la pression correspondante, il faut une quantité de chaleur relativement grande, dite chaleur latente. Inversement, la condensation du kg. de vapeur dans les mêmes conditions de température et de pression, met en liberté cette même quantité de chaleur.

Le tableau qui suit, donne les températures, pressions et chaleurs latentes correspondantes, à considérer dans les condenseurs.

Tableau.

Température centigrade.	Pression en Kg par cm ²	Chaleur de Vaporisation d'un Kg en calories.
100°	1 Kg 0334	536,50
80°	0,4822	550,62
60°	0,2023	564,66
55°	0,1597	568,17
50°	0,1251	571,66
45°	0,0971	575,16
40°	0,0747	578,65
38°	0,0670	580,05
36°	0,0601	581,44
34°	0,0538	582,84
32°	0,0481	584,23
30°	0,0429	585,62
28°	0,0382	587,02
25°	0,0320	589,11
20°	0,0236	592,59

Condenseur par mélange. — Dans les machines de Newcomen, la condensation se faisait par injection d'eau froide dans le cylindre moteur même. Un grand progrès, dû à Watt, est le condenseur séparé, récipient qui reçoit l'injection d'eau froide, et qui on met en communication avec le cylindre moteur pour en condenser la vapeur. C'est le condenseur par mélange, tel qu'il est encore usité aujourd'hui.

Ce condenseur est une caisse en fonte qui reçoit la vapeur d'échappement à condenser, et l'eau d'injection, finement divisée. Le poids de l'eau est de 20 à 30 Kg pour condenser un Kg. de vapeur.

Supposons qu'il s'agisse de condenser un Kg. de vapeur saturée sèche à la pression absolue de 11 Kg par cm², et qu'on envoie dans le condenseur 25 Kg. d'eau, prise à la température de 15°. Voici comment on calcule la température qui s'établira dans le condenseur. En comptant les quantités de chaleur à partir de 0°, le Kg. de vapeur apporte au condenseur 662 calories (185,5 calories pour chauffer l'eau,

476,5 pour la vaporiser); les 25 Kg à 15° apportent $25 \times 15 = 375$ calories, soit au total 1037 calories, qu'on retrouve dans les 26 Kg d'eau tiède obtenus: chaque Kg tient donc $\frac{1037}{26} = 40$ (à peu près) calories; la température finale est donc de 40°.

En réalité, la quantité de chaleur apportée par la vapeur est un peu moindre, parce qu'elle s'est en partie condensée en travaillant dans la machine: à peu près 10 p. 100 de sa chaleur s'est transformé en travail mécanique et s'est perdu par rayonnement extérieur. La température de l'eau tiède du condenseur sera un peu inférieure à 40°.

Connaissant la température de l'eau, on en déduit, en consultant la table, la pression de la vapeur, qui est, pour 40°, de 0,0747 Kg. par cm² (ou à peu près 75 g). Mais en réalité, la contrepression résistante est toujours plus forte, parce qu'il pénètre un peu d'air dans le condenseur, et la pression de cet air s'ajoute à celle de la vapeur. Cet air peut venir, avec la vapeur de la chaudière, où il est entré avec l'eau d'alimentation: il peut entrer dans le cylindre par la garniture de tige, pendant la période d'échappement; enfin il est amené, en quantité relativement assez grande, pour l'eau d'injection qui le tient en dissolution, comme toutes les eaux naturelles. Dans le condenseur, par suite de la diminution de pression et de l'élévation de température, cet air dissous se dégage.

Pour que le condenseur puisse fonctionner, il faut constamment en extraire l'eau et l'air, à l'aide d'une pompe spéciale, dite pompe à air. Pendant l'aspiration du piston de cette pompe, les clapets d'aspiration s'ouvrent et l'eau, puis l'air du condenseur, pénètrent dans le corps de pompe. Pendant le refoulement du piston, les clapets d'aspiration se referment, l'air est comprimé jusqu'à la pression atmosphérique; alors les clapets de refoulement s'ouvrent et l'air, puis l'eau, sont refoulés au dehors. L'aspiration de la pompe à air doit s'exercer à la partie inférieure du condenseur, pour que toute l'eau puisse en sortir.

Les dispositions des pompes à air sont assez variées. Elles peuvent avoir un piston ordinaire ou un piston plongeant, et fonctionner à simple ou à double effet; enfin elles sont horizontales ou verticales.

La fig. 1, p. 609, de la Revue de Mécanique, Juin 1901, représente un condenseur avec pompe à air verticale à

piston ordinaire creux, à simple effet : on remarquera qu'il y a trois séries de clapets, tandis que deux suffiraient à la rigueur ; cette disposition a pour but d'augmenter l'étanchéité. La pompe de la fig. 3, p. 610, *Revue de Mécanique*, Juin 1901, est horizontale, à piston ordinaire et à double effet. Un seul des quatre clapets est représenté sur la figure.

La fig. 722, p. 232, t. II de la machine à vapeur par E. Sauvage est une pompe à piston plongeur à simple effet, les fig. 4 et 5 p. 611, *Revue de Mécanique*, Juin 1901, une pompe à piston plongeur à double effet. Ces pistons plongeurs peuvent marcher plus vite que les pistons ordinaires, qui donnent plus facilement lieu à des chocs. Il y a lieu de remarquer que sur les figures 1, 3, 4 et 5 la quantité d'eau représentée dans les appareils est trop grande et ne permettrait pas l'aspiration de l'air.

Souvent les moteurs à vapeur sont munis de leur condenseur, et commandent la pompe à air. Le condenseur peut être logé en dessous de la machine, dans un vide des fondations : la pompe est commandée par un balancier ou une équerre de renvoi. Sur les machines horizontales, on place parfois le condenseur derrière le cylindre moteur, et la contre-tige du piston commande directement, en tandem, le piston de la pompe.

Dans certains cas, la pompe à air est commandée par un moteur spécial, et un condenseur peut desservir plusieurs machines voisines.

Les clapets ou les soupapes d'aspiration doivent fonctionner sous des différences de pression très faibles, et offrir une large section de passage. On emploie souvent les disques Corliss fig. 724 p. 234, t. II de la machine à vapeur par E. Sauvage, léger et de petite dimension ou en monte un nombre suffisant. La rupture ou le défaut de fermeture d'un de ces organes nuit à l'entretien de la basse pression dans le condenseur. Certaines pompes à air n'ont pas de clapets d'aspiration : le piston fait le vide pendant sa course d'aspiration, puis, vers la fin de cette course, démasque des ouvertures par lesquelles l'eau et l'air du condenseur se précipitent dans le corps de pompe. C'est la pompe Edwards, (fig. 9, p. 614, *Revue de Mécanique*, Juin 1901), dont le piston fait le vide dans le corps de pompe pendant sa course descendante. La pompe horizontale à double effet des fig. 14-15, p. 620, *Revue de mécanique*, Juin 1901, aspire dans le

condenseur par les orifices placés au milieu du cylindre: le piston fait le vide pendant la moitié de sa course et ne commence la compression de l'air que pendant la seconde moitié de sa course de retour; en n'utilise en somme que la moitié de la course du piston de chaque côté du cylindre.

Comme dimensions d'une pompe à air, on lui donne, quand elle est à double effet et directement commandée par le cylindre moteur, un volume compris entre le 10^e et le 20^e de ce cylindre, ou du cylindre à basse pression si la machine est à expansion multiple. Si la course est la même, la section du piston de la pompe est comprise entre le 10^e et le 20^e de celle du piston moteur, c'est-à-dire que le diamètre est compris entre les 0,22 et 0,31 de celui du piston moteur.

La mise en marche de la pompe à air absorbe une certaine quantité de travail, qui on estime souvent à 3p. 70 du travail fourni par le moteur: cette dépense de travail vient en déduction du travail supplémentaire fourni par la condensation.

L'eau froide peut être amenée au condenseur en charge, c'est-à-dire avec une pression telle qu'elle y pénètre même quand il est plein d'air, à la mise en marche; ou bien elle peut être aspirée sur une hauteur de quelques mètres; avec une pression de 0,2 Kg par cm². L'eau peut s'élever sous l'effet de la pression atmosphérique, à 8^m de hauteur. La mise en marche est un peu plus difficile quand l'eau est aspirée, puisqu'au début elle ne pénètre pas dans le condenseur; on peut faire usage d'une petite injection supplémentaire d'eau en charge. Dans les deux cas, un robinet de réglage permet de faire varier suivant les besoins la quantité d'eau admise: il faut avoir soin de le refermer pendant l'arrêt de la machine et de réduire beaucoup la quantité d'eau admise en cas de marche très lente, pour éviter que le condenseur ne se remplisse d'eau, qui pourrait refluer au cylindre et en amener la rupture. Ce danger est moindre avec les condenseurs en contre bas et l'aspiration d'eau. On munit quelquefois le condenseur d'un robinet dit casse-vidé, qui est commandé par un flotteur et s'ouvre, en laissant rentrer l'air, quand le niveau de l'eau s'élève d'une manière anormale.

En augmentant la proportion d'eau injectée, on abaisse la température de condensation, et par suite la



pression résistante de la vapeur; mais en même temps on augmente la quantité d'air dégagée par cette eau d'injection, et par suite la pression de cet air, qui s'ajoute à celle de la vapeur. Si bien que, au-dessus d'une certaine quantité d'eau, la pression totale, qui est celle qui oppose une résistance au piston moteur, irait en augmentant. En outre, la pompe à air, ayant plus d'eau à extraire, enlève moins d'air, ce qui est encore une cause d'augmentation de pression. Pour ces motifs, on ne dépasse guère la proportion indiquée de 25 à 30 Kg. d'eau pour 1 Kg. de vapeur.

Les machines à condensation sont souvent munies également d'un tuyau d'échappement direct dans l'atmosphère, pour la marche sans condenseur; par exemple si l'eau vient à manquer. Un jeu de soupapes permet de diriger la vapeur d'échappement, soit vers le condenseur, soit vers l'échappement libre; ces soupapes donnent souvent lieu à des rentrées d'air.

Mesure de la pression. — La pression dans le condenseur est quelquefois donnée par un baromètre à mercure qui peut avoir son tube réduit à une faible hauteur, puisqu'une colonne de mercure de 74 mm mesure une pression de 0,1 Kg. par cm². Le plus souvent, on se sert d'un manomètre métallique dit indicateur de vides qui ne donne qu'une mesure indirecte de la pression. Cet indicateur marque la différence qui existe entre la pression de l'atmosphère et celle du condenseur; et la donne en centimètres de mercure: si le vide indiqué est de 68, et si la pression barométrique est de 76, cela veut dire que la pression dans le condenseur est mesurée par une colonne de mercure de 76-68, ou 8 cm de hauteur: cette pression serait de 0,11 Kg par cm².

Pour avoir une indication exacte, il est donc nécessaire d'ajouter à l'indicateur de vide un baromètre ordinaire, pour connaître la pression atmosphérique, qui est variable. Une correction spéciale plus importante est à faire si une machine est installée à une altitude élevée, où la pression atmosphérique moyenne correspond à une colonne de mercure fort inférieure à 76 mm.

Il est utile d'installer un thermomètre dominant la température de l'eau tiède rejetée par la pompe à

air : de l'indication de ce thermomètre, on déduit la pression correspondante de la vapeur, et en le déduisant de la pression totale dans le condenseur, on connaît la pression de l'air, qui se trouve ainsi contrôlée.

L'eau tiède du condenseur peut être avantageusement employée à l'alimentation des chaudières : elle a seulement l'inconvénient de renfermer un peu de matières grasses, provenant du graissage des tiroirs et pistons. On la purifie à l'aide de filtres ; il est bon aussi de prendre l'eau au fond de la bêche, les matières grasses se rassemblant à la surface.

Condenseurs barométriques. — On installe souvent aujourd'hui, notamment dans les grandes stations centrales électriques, des condenseurs indépendants, qui peuvent desservir plusieurs moteurs.

Ces appareils ont reçu divers perfectionnements. On s'est préoccupé de séparer autant que possible l'air, dégagé par l'eau d'injection, de la vapeur à faible tension qui remplit le condenseur, afin de diminuer la pression totale résistante. A cet effet, le condenseur est formé par un cylindre vertical : la vapeur à condenser entre la partie inférieure l'eau d'injection vers la partie supérieure, et des chicaneaux l'empêchent de tomber trop rapidement au fond. L'eau tiède est culée à la partie inférieure, et l'air est aspiré à la partie supérieure par une pompe à air seul. Pour éviter l'emploi d'une pompe spéciale pour l'eau, on la fait écouler par un tube de 10 m. environ de hauteur, plongeant dans une bêche : ce tube constitue une espèce de baromètre à eau, où le niveau ne peut pas s'élever au-dessus de celui qui correspond à la différence entre la pression atmosphérique extérieure et celle du condenseur, soit 9^m environ. Il suffit pour cela d'élever le condenseur à une hauteur suffisante au-dessus du canal d'écoulement de l'eau : le seul inconvénient est qu'il faut élever l'eau d'injection à cette hauteur, ce qui exige souvent une pompe spéciale. Toutefois il faut remarquer que le vide même du condenseur produit l'aspiration de l'eau, ce qui diminue le travail que doit fournir la pompe.

L'eau froide d'injection, en entrant dans le condenseur,

laisse dégager l'air qu'elle tient en dissolution, dans le voisinage même de l'aspiration de la pompe à air seul; en ce point du condenseur, la température est peu élevée, de sorte que la pression de vapeur, qui s'ajoute à celle de l'air, est très basse. A la partie inférieure l'eau est plus chaude, la tension de vapeur est un peu plus forte, mais il y a très peu d'air. Bien entendu, la pression est la même dans toute l'étendue du condenseur, mais au lieu d'ajouter les pressions de l'air et de la vapeur, à la température la plus élevée du condenseur, comme dans l'appareil ordinaire, on les sépare dans une certaine mesure; en haut il y a prédominance de l'air, en bas, c'est la vapeur.

En outre, l'air sort à une température basse, à peu près celle de l'eau d'injection à son entrée, ce qui rend plus efficace l'action d'une pompe à air de dimension donnée: un même volume aspiré pèse un peu plus s'il est plus froid.

Toutes ces dispositions paraissent simples et logiques: cependant la réalisation de l'appareil a donné lieu à des difficultés: il arrivait souvent que des entraînements d'eau se produisaient par l'orifice d'aspiration de l'air, malgré la position de cet orifice en haut du condenseur, et venaient troubler le fonctionnement de la pompe à air.

On trouvera la description des dispositions de détail, qui ont assuré le bon fonctionnement des appareils, dans le traité de la condensation, par Weiss, traduit par Haubiquet.

Un autre inconvénient peut se produire dans les condenseurs desservant des machines qui fonctionnent par à-coups, de sorte que l'arrivée de vapeur est irrégulière: la colonne barométrique d'eau peut se mettre à osciller et remonter jusqu'à l'arrivée de vapeur. On évite facilement cet inconvénient en munissant la partie inférieure du tube barométrique d'un clapet qui s'ouvre vers l'extérieur, mais empêche le retour en sens inverse.

Cet exemple montre qu'il ne faut pas se presser de condamner un organe qui à première vue, peut paraître inutile dans une machine: ce sont souvent des difficultés pratiques imprévues, qui ont conduit à l'ajouter.

Lorsque la quantité de vapeur à condenser est très variable d'un moment à l'autre, il est bon de faire

varier le débit d'eau de condensation : On dispose aussi les chicanes dont est muni le condenseur de manière à ce qu'elles emmagasinent une assez grande masse d'eau, qui régularise l'action.

Refroidissement de l'eau de condensation. —

La condensation a l'inconvénient d'exiger beaucoup d'eau. Lorsqu'elle est rare ou chère, on peut la refroidir pour l'employer de nouveau. Il faut la mettre finement divisée en contact avec l'air, qui en abaisse la température par conductibilité et surtout par évaporation d'une fraction de liquide. Le liquide se refroidit en fournissant la chaleur de vaporisation de cette fraction. La proportion d'eau ainsi perdue par évaporation est moindre que la quantité de vapeur condensée, c'est en moyenne les 0,7 de cette quantité, de sorte que finalement la dépense d'eau est moindre que si on marchait à échappement libre.

Le refroidisseur est une construction en bois ou en métal qui porte une série de rigoles superposées. L'eau élevée à la partie supérieure, tombe en pluie de rigoles en rigoles, et se rassemble dans un bassin inférieur. Cet appareil est encombrant et fort gênant par les buées qu'il dégage de toute part.

On l'améliore en l'entourant d'une enveloppe, souvent en bois, surmontée d'une hotte : l'air entre à la partie inférieure, s'échauffe et produit un tirage dans l'appareil, les buées se dégagent à la partie supérieure.

On peut enfin réduire les dimensions de l'appareil en activant le passage de l'air par l'emploi d'un ventilateur. On arrive ainsi à des refroidisseurs assez restreints pour être d'une installation facile, et assez élevés pour ne pas gêner le voisinage.

L'eau que donne le refroidisseur n'est pas très froide ; elle a souvent 25° environ, mais elle peut cependant servir pour la condensation.

Ejecto-condenseur.

L'ejecto-condenseur, ou condenseur ejecteur, est un appareil simple qui effectue la condensation par mélange sans pompe à air. Dans certaines conditions, avec de l'eau bien

froide, il fonctionne bien, mais d'une manière générale la marche en est délicate et cet appareil ne s'est pas beaucoup répandu jusqu'à présent.

L'éjecto-condenseur (fig. 4, p. 543, Revue de mécanique, Juin 1902) est un appareil à entraînement analogue aux injecteurs. La vapeur arrive par la gauche, en A, l'eau en H et s'échappe par la tuyère B. En D les fluides se mélangent et la condensation se produit, puis l'eau s'échappe par le divergent E et le tuyau G aboutissant à l'extérieur. La soupape placée en A sur l'arrivée de vapeur est normalement ouverte: elle se referme en cas de retour occasionnel de l'eau vers le cylindre du moteur.

Quand la proportion de vapeur baisse, la vitesse du jet dans l'appareil diminue, et il peut se désamorcer. On y a remédié dans certains cas par l'emploi d'un jet supplémentaire de vapeur prise directement à la chaudière, ce qui est une solution dispendieuse. Mais en faisant arriver l'eau avec une charge de 6^m au moins, en employant un tuyau d'évacuation G de quelques mètres de longueur, plongeant dans une bêche et produisant ainsi une aspiration, M. Râteau a rendu l'appareil stable sans emploi de vapeur fraîche.

Consultez sur ces appareils le mémoire de M. Râteau dans la revue de mécanique, Juin 1902, p. 533.

Condenseur à surface.

Dans le condenseur à surface on sépare l'eau du refroidissement de l'eau provenant de la vapeur condensée. On l'emploie principalement sur mer, afin de conserver l'eau douce pour l'alimentation des chaudières, l'emploi de l'eau de mer ne convenant pas pour les chaudières à haute pression.

Le condenseur consiste en un récipient de forme cylindrique ou autre traversé par un grand nombre de petits tubes parcourus par la circulation d'eau. La vapeur, pénétrant dans ce récipient, se trouve en contact avec une grande surface métallique froide sur laquelle elle se condense.

La quantité d'eau de circulation à employer est plus grande que celle qui en emploie dans le condenseur par mélange parce qu'elle sort des tubes à une température moins élevée que celle de l'eau de condensation, à l'intérieur.

du condenseur. On compte souvent 50 Kg. d'eau pour condenser 1 Kg. de vapeur.

Pour un bon fonctionnement, il faut que la surface métallique soit suffisamment étendue. On admet souvent qu'elle doit être de $0,1 \text{ m}^2$ par cheval, en supposant qu'on dépense par cheval 8 Kg. de vapeur à l'heure.

Il faut encore une pompe à air, mais elle est beaucoup moins à extraire, et peut être plus petite. Elle prend en effet seulement l'eau qui vient de la condensation et non plus toute l'eau de refroidissement, et l'air qui pénètre accidentellement dans le condenseur et non plus celui que dégager l'eau de refroidissement. Mais il faut en plus une pompe de circulation pour faire passer dans l'appareil l'eau nécessaire. On estime qu'en total la puissance consommée par ces pompes reste à peu près la même, environ 3 p. 100 de la puissance du moteur qu'elles desservent.

Les tubes ont un diamètre extérieur de 18 à 20 mm, et sont épais de 1 mm. Ils sont en laiton souvent étamés. Ils sont assemblés en deux bouts dans les plaques percées de trous qui ferment le condenseur, par une garniture plastique, serrée par un presse-garnitures (fig. 737, p. 247, t. II de la machine à vapeur, par E. Sauvage), à travers laquelle ils peuvent glisser quand ils se dilatent.

Ces tubes étant souvent au nombre de plusieurs milliers, on conçoit qu'il est difficile d'éviter que quelques joints ne perdent, et ne laissent entrer dans le condenseur un peu d'eau de circulation, qui se mêle à l'eau de condensation : c'est ainsi qu'un peu d'eau de mer peut pénétrer dans les chaudières marines.

Pour assurer la bonne répartition de l'eau de circulation, on divise les tubes en plusieurs faisceaux successivement parcourus. Les tubes ne doivent pas obstruer le débouché du tuyau qui amène la vapeur d'échappement à condenser.

L'eau de condensation a l'inconvénient d'être mêlée de matières grasses, qu'on sépare autant que possible dans des filtres à éponges.

Dans le condenseur à surface de Mall, constant

en 1837, la disposition était inverse: l'eau circulait en dehors des tubes, que traversait la vapeur. La circulation de l'eau est ainsi moins régulière. Cet appareil devançait du reste les besoins et a été abandonné comme peu pratique. Ce n'est que beaucoup plus tard qu'on l'a repris, et il est aujourd'hui indispensable sur mer.

Certaines machines fixes, à terre, sont munies de condenseurs à surface, soit pour la même raison que les navires, parce que l'eau disponible est impropre à l'alimentation des chaudières, soit pour obtenir un meilleur vide. Un bon condenseur à surface, avec une abondante circulation d'eau froide et une surface suffisamment étendue, abaisse en effet la pression plus qu'un condenseur à mélange, parce qu'on peut employer beaucoup d'eau réfrigérante sans avoir l'inconvénient du dégagement dans le condenseur de l'air qu'elle tient en dissolution. Notamment avec les turbines à vapeur, il y a intérêt à avoir une bonne condensation, donnant une pression aussi faible que possible.

Condenseurs à arrosage.

Le condenseur à arrosage est une sorte de condenseur à surface formé de tubes exposés à l'air, dans lesquels on envoie la vapeur à condenser. Ces tubes sont en outre arrosés d'eau, qui s'évapore en partie; le reste retombe dans un bassin, d'où une pompe le ramène en haut de l'appareil.

Ces tubes sont horizontaux ou verticaux et présentent une série de cannelures et de protubérances destinées à ralentir la descente de l'eau.

L'intérieur des tubes est en relation avec une pompe à air qui extrait l'eau et l'air.

Ces appareils, assez usités en Angleterre, permettent de condenser la vapeur avec une faible dépense d'eau.

Consulter à ce sujet la Revue de mécanique, Mai 1899 p. 524.

Condenseur à air.

Un simple courant d'air, suffisamment intense, peut condenser la vapeur envoyée dans un faisceau tubulaire. L'air est soufflé par un ventilateur, qui enverra par exemple 80 m^3 d'air par Kg. de vapeur à condenser. La puissance absorbée par ce ventilateur est assez grande et la pression

dans le condenseur n'est pas très basse, ou, comme on dit, le vide n'est pas très bon.

On applique ce système surtout quand on a besoin de l'air chaud qu'il donne, soit pour des chauffages d'atelier, soit pour la dessiccation de certains produits.

Effet de la Condensation.

On a indiqué, au commencement de ces notes sur la condensation, l'augmentation de travail moteur qui résultait de la condensation, qui réduit d'environ 1 Kg. par cm^2 la contre-pression résistante sur le piston : c'est une augmentation de près de 1 Kg. sur l'ordonnée moyenne du diagramme. En évaluant cette pression résistante il y a lieu de remarquer que la pression dans le cylindre est toujours un peu plus forte que dans le condenseur ; de même, avec l'échappement libre elle est un peu supérieure à celle de l'atmosphère, ce qui maintient la différence.

Cette évaluation s'applique aux machines dont l'échappement est ouvert pendant la course de retour presque entière du piston, telles que les machines Corliss. Avec les machines donnant une période de compression un peu longue à la suite de l'échappement, telles que les machines à tiroir, le travail résistant de la compression devient beaucoup plus faible avec la condensation, et l'augmentation de puissance est encore un peu plus grande que dans le cas précédent ; il est vrai qu'on dépense un peu plus de vapeur pour remplir l'espace libre. L'examen des diagrammes permet de calculer dans chaque cas le bénéfice de la condensation.

Il faut, bien entendu, en déduire la puissance consommée par la pompe à air et les autres appareils accessoires qui peuvent être nécessaires pour la condensation.

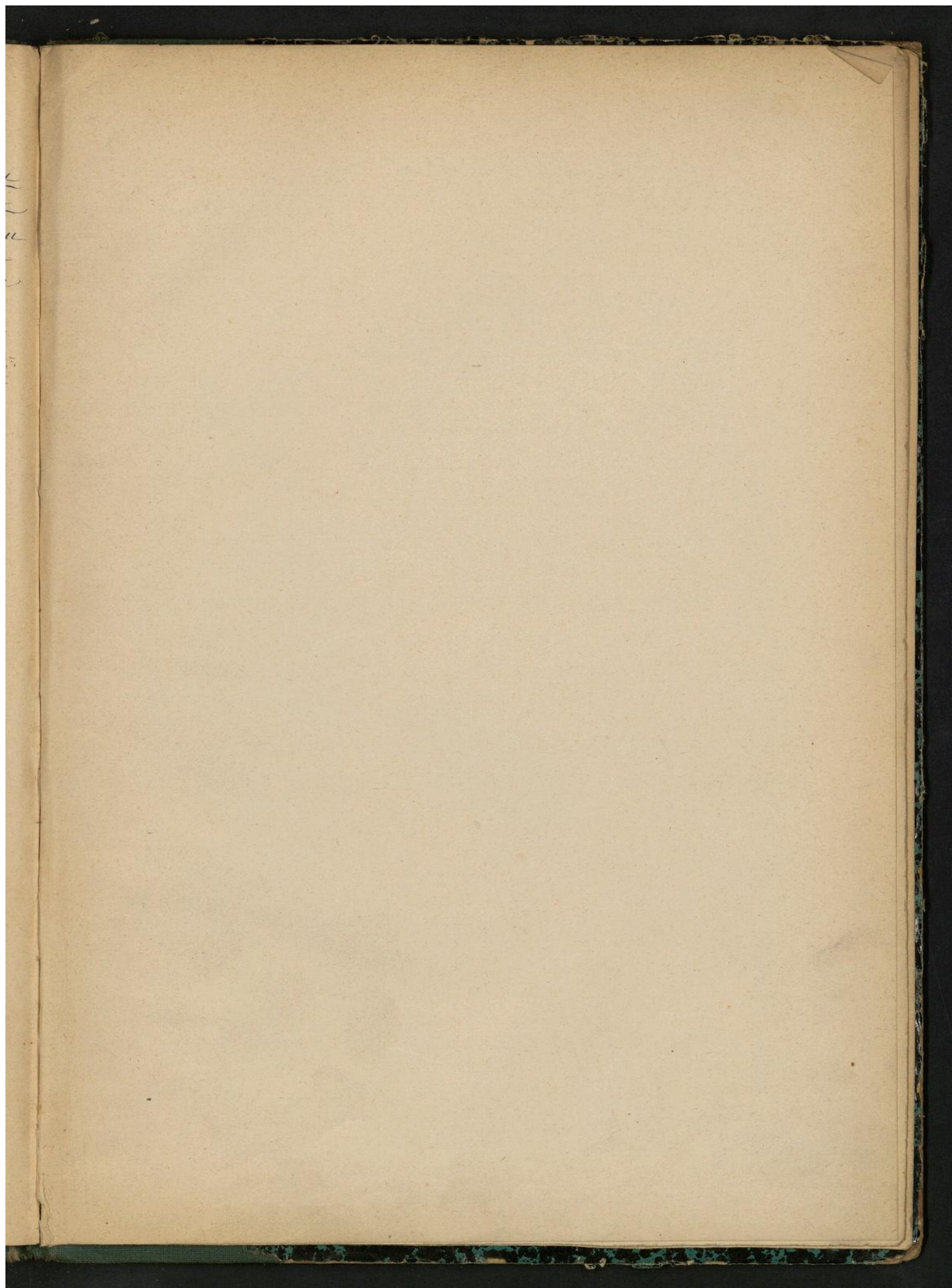
Cette comparaison ne tient compte que de la puissance produite pour une certaine consommation de vapeur. Au point de vue pratique c'est la dépense en argent qui est intéressante : il faut tenir compte des frais d'installation du condenseur et de ses accessoires, des frais d'entretien, et surtout de la dépense d'eau qui, dans certains cas, peut être excessive et absorber tout le bénéfice de

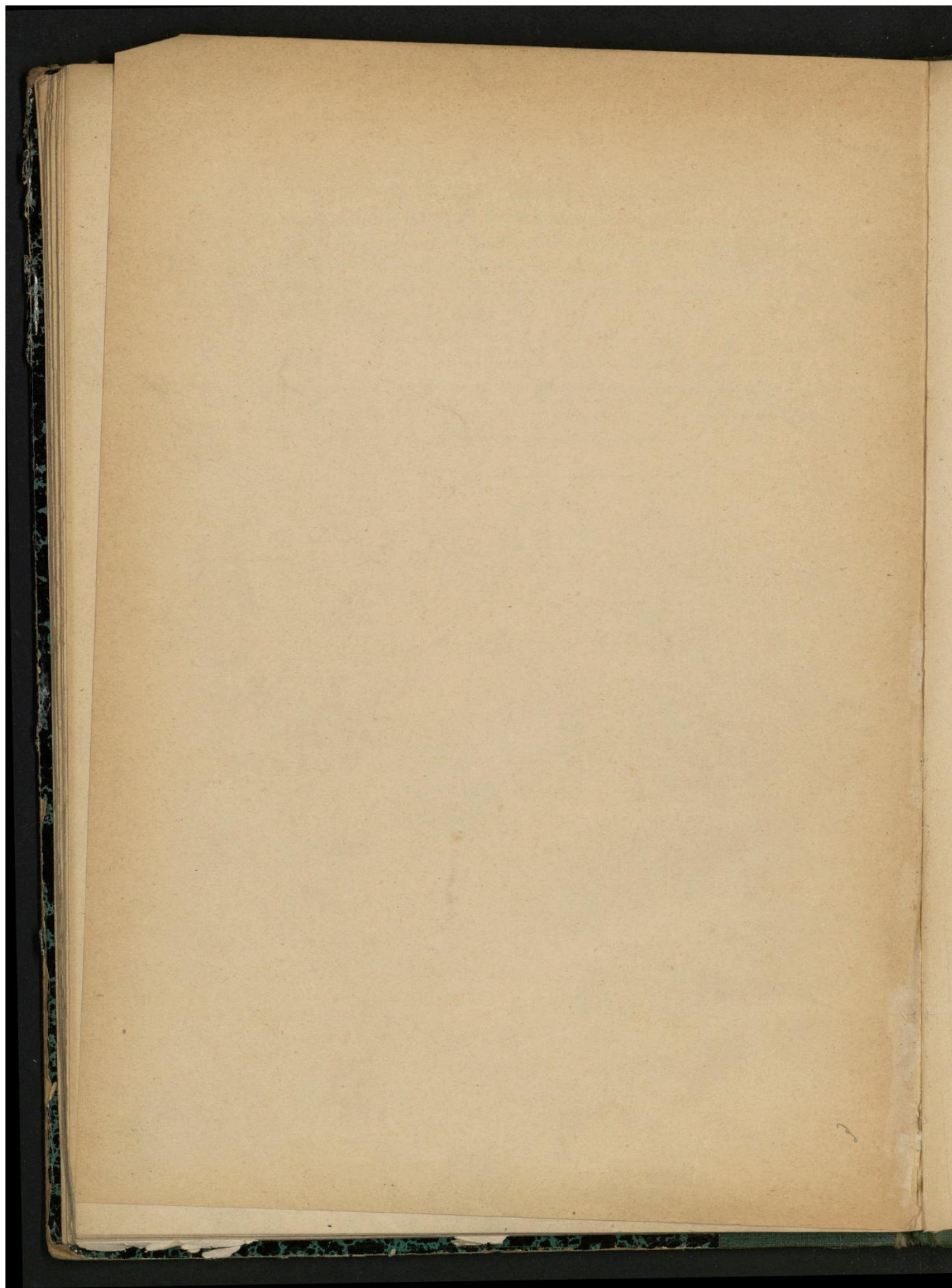
la condensation.

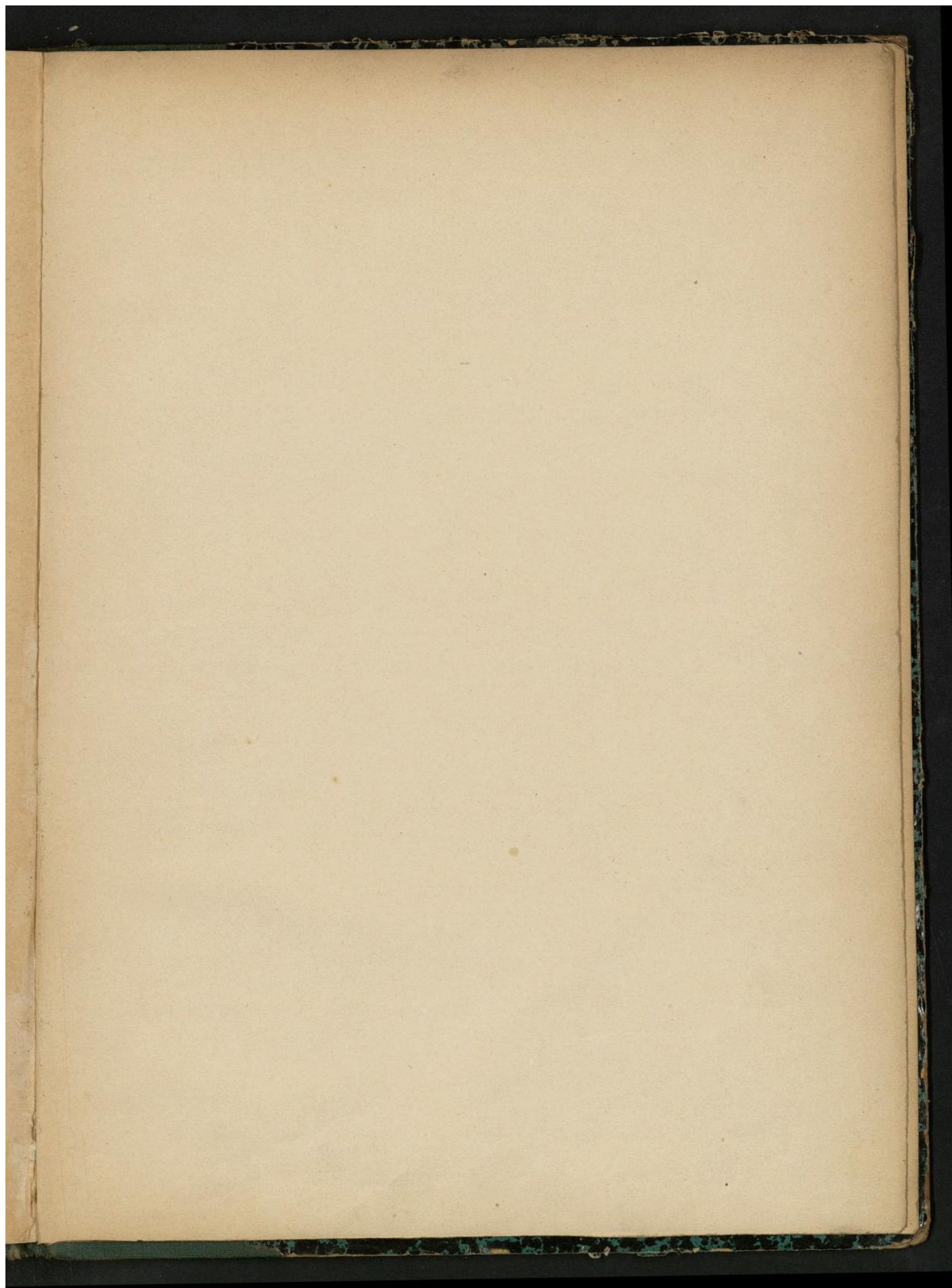
En faisant la comparaison des machines avec et sans condenseur, il faut remarquer qu'avec l'échappement libre on peut assez facilement installer un appareil qui réchauffe l'eau d'alimentation jusqu'à près de 100° , avec la vapeur d'échappement perdue, et on compense ainsi en partie le désavantage de l'échappement libre.

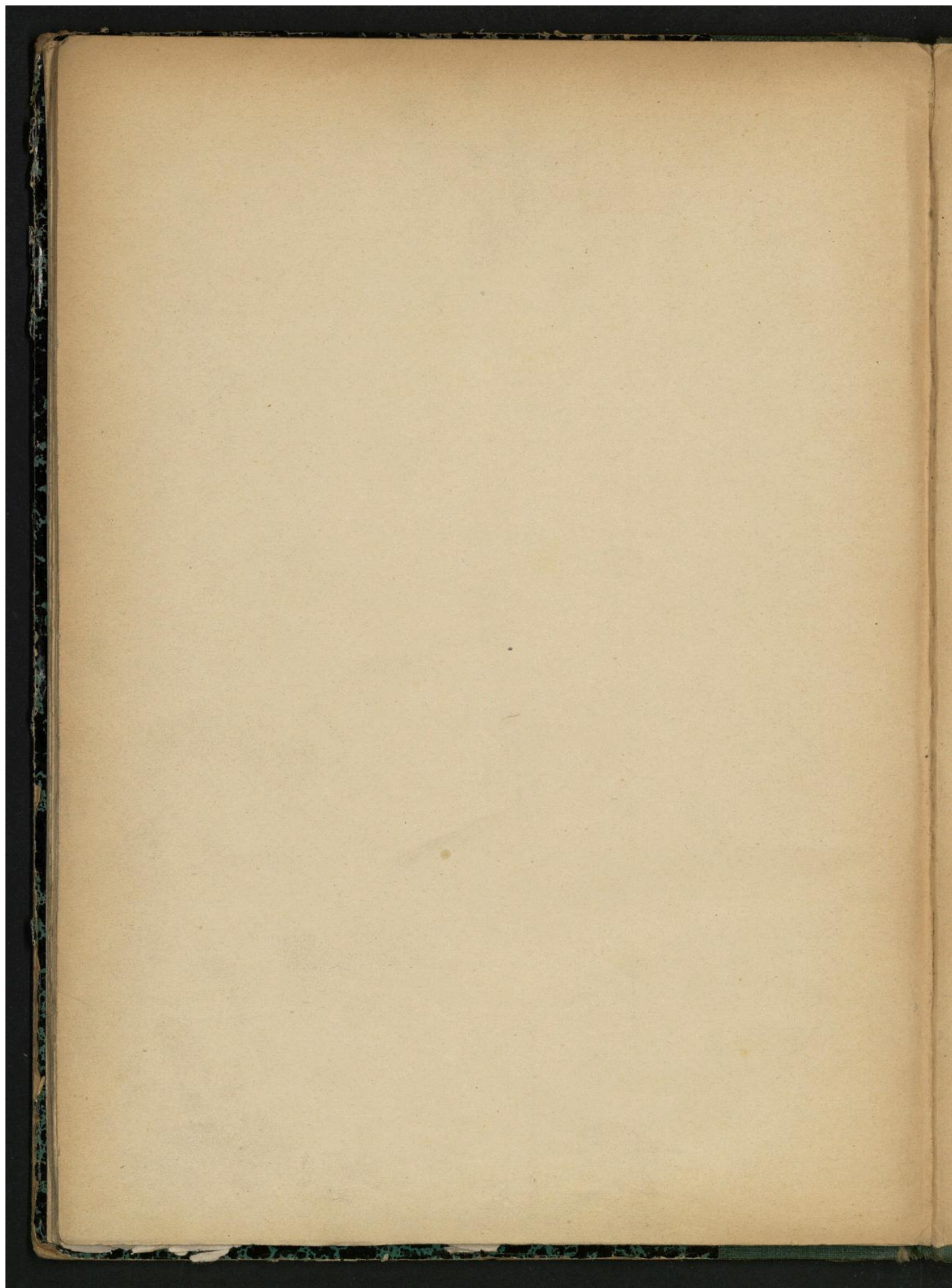
Toutefois on peut dire que dans les grandes installations où on recherche l'économie la plus grande, la condensation est en général avantageuse. Elle est particulièrement utile pour les turbines à vapeur, dont elle augmente la puissance plus que celle des moteurs à piston.

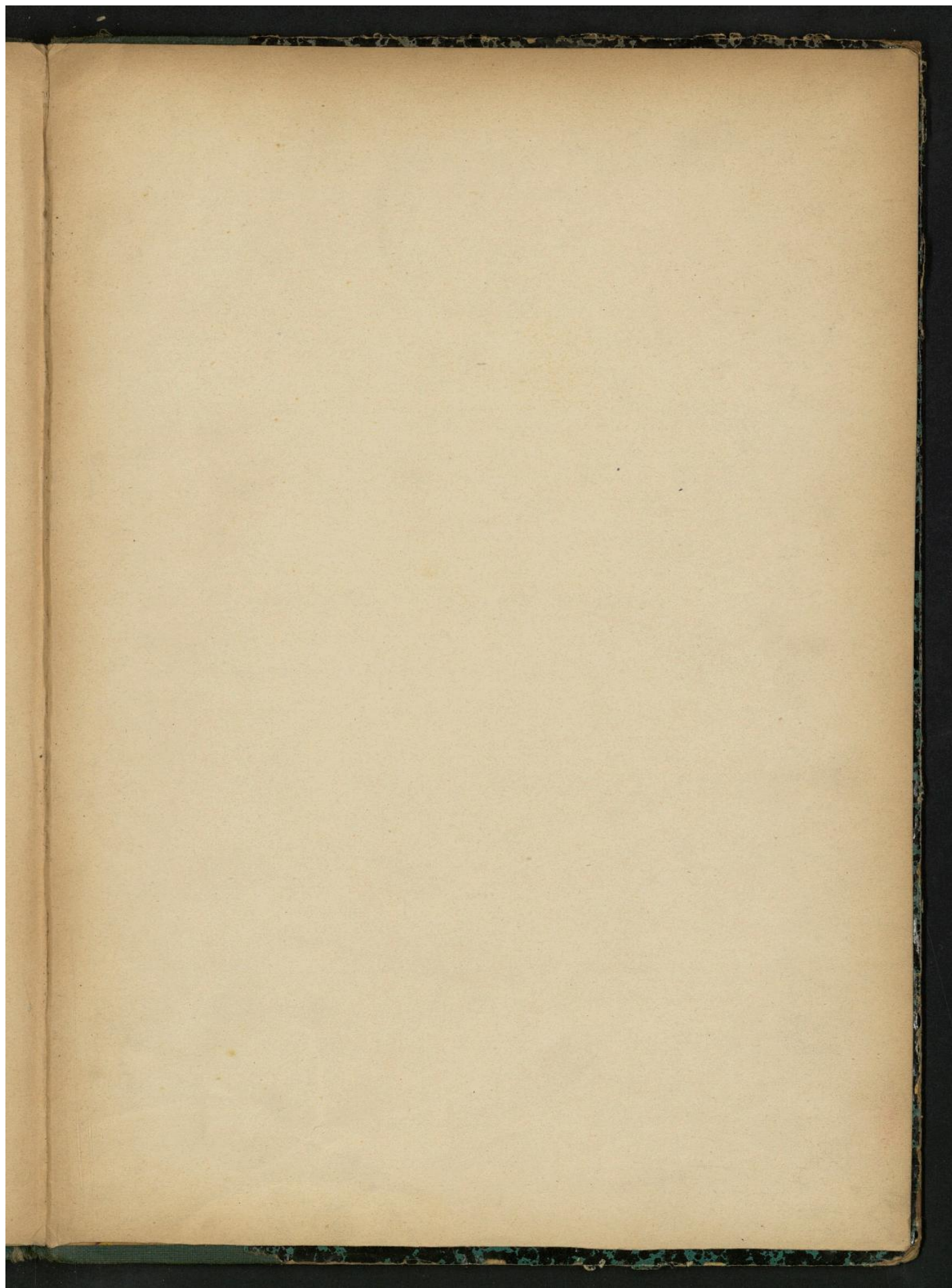


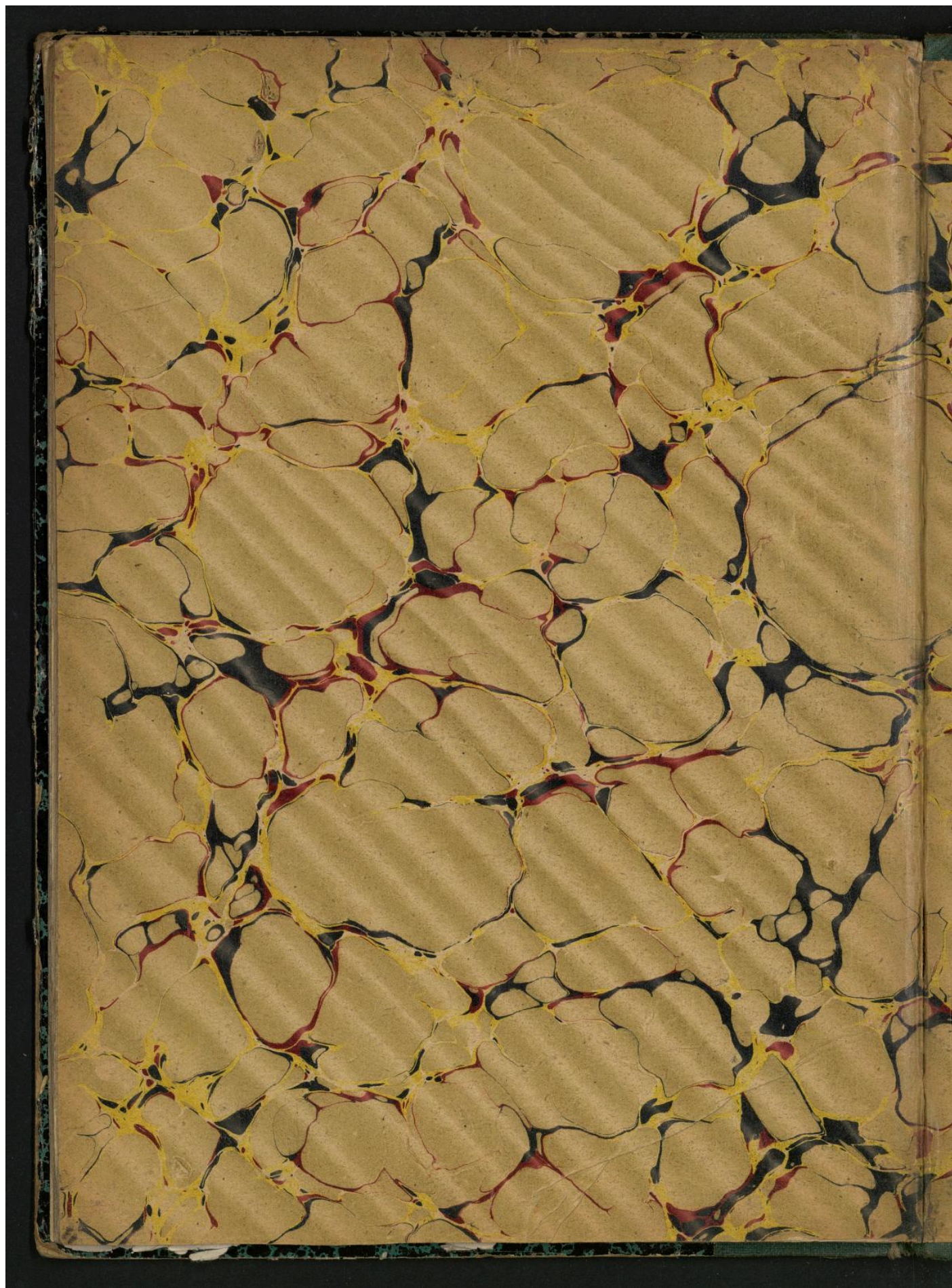












Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires



Droits réservés au [Cnam](#) et à ses partenaires