

## 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](http://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](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 possible 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	<a href="http://cnum.cnam.fr/redir?4DE89_91">http://cnum.cnam.fr/redir?4DE89_91</a>
LISTE DES VOLUMES	<a href="#">Cours de machines à vapeur</a> <a href="#">Cours des machines précédemment de mécanique appliquée aux arts : année 1907-1908</a> <a href="#">Cours de machines : année 1910-1911 : mesure de la puissance des moteurs : résumé de leçons faites en novembre et décembre 1910</a> <a href="#">Cours de machines : 1ère année du cours : 1913-1914</a>

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	<a href="#">Cours de machines : 1ère année du cours : 1913-1914</a>
Adresse	[Paris] : [Conservatoire national des arts et métiers], [1914]
Collation	1 vol. (12-[4]-8 p.) : ill. ; 31 cm
Nombre de vues	28
Cote	CNAM-BIB 4 De 91 (3)
Sujet(s)	Machines -- Manuels d'enseignement supérieur Moteurs -- Manuels d'enseignement supérieur Énergie mécanique -- Manuels d'enseignement supérieur
Thématique(s)	Histoire du Cnam Machines & instrumentation scientifique
Typologie	Ouvrage
Note	Contient : les documents pour les auditeurs, le Bilan thermique des machines à vapeur et le Résumé des leçons des 9, 12 et 16 février 1914 sur la condensation.
Langue	Français
Date de mise en ligne	20/05/2021
Date de génération du PDF	24/02/2022
Permalien	<a href="http://cnum.cnam.fr/redir?4DE91.3">http://cnum.cnam.fr/redir?4DE91.3</a>

H<sup>o</sup> Deg<sup>3</sup>

# Conservatoire National des Arts et Métiers.

## Cours de Machines

1<sup>re</sup> Année du Cours  
1913-1914



Généralités: Unités de mesure. — Appareils de mesures (indicateurs, dynamomètres). — Constitution générale et classification des machines.

Machines à vapeur. — Mécanique. — Propriétés des vapeurs. — Théorie générale du fonctionnement. — Distribution de la vapeur. — Volants et régulateurs; principaux organes; graissage. — Différents types de machines fixes et locomobiles. — Turbines à vapeur. — Condenseurs.

## Document pour les Auditeurs.

Liste de quelques ouvrages  
et Mémoires à consulter.

### Ouvrages généraux sur les machines

Poncelet. — Cours de mécanique appliquée aux machines, publié par Kretz; Paris 1874.

Boulvin. — Cours de mécanique appliquée aux machines, 8 volumes (1891 à 1899.)

Ouvrage très méthodique avec nombreux croquis schématiques et calculs relativement faciles à suivre (certains volumes ont une 2<sup>e</sup> édition et même une 3<sup>e</sup>)

R. de la Goupillière. — Cours de machines 2 volumes (1886 à 1892) principalement au point de vue théorique et mathématique.

Reuleaux. — Le Constructeur: 1 vol. allemand, traduit en français. Ouvrage fondamental sur la détermination des forces et des proportions de tous les organes de machines.

Bach. Éléments de machines, leur calcul et leur construction, traduction par Desmarais. Un volume et 1 atlas (1901)

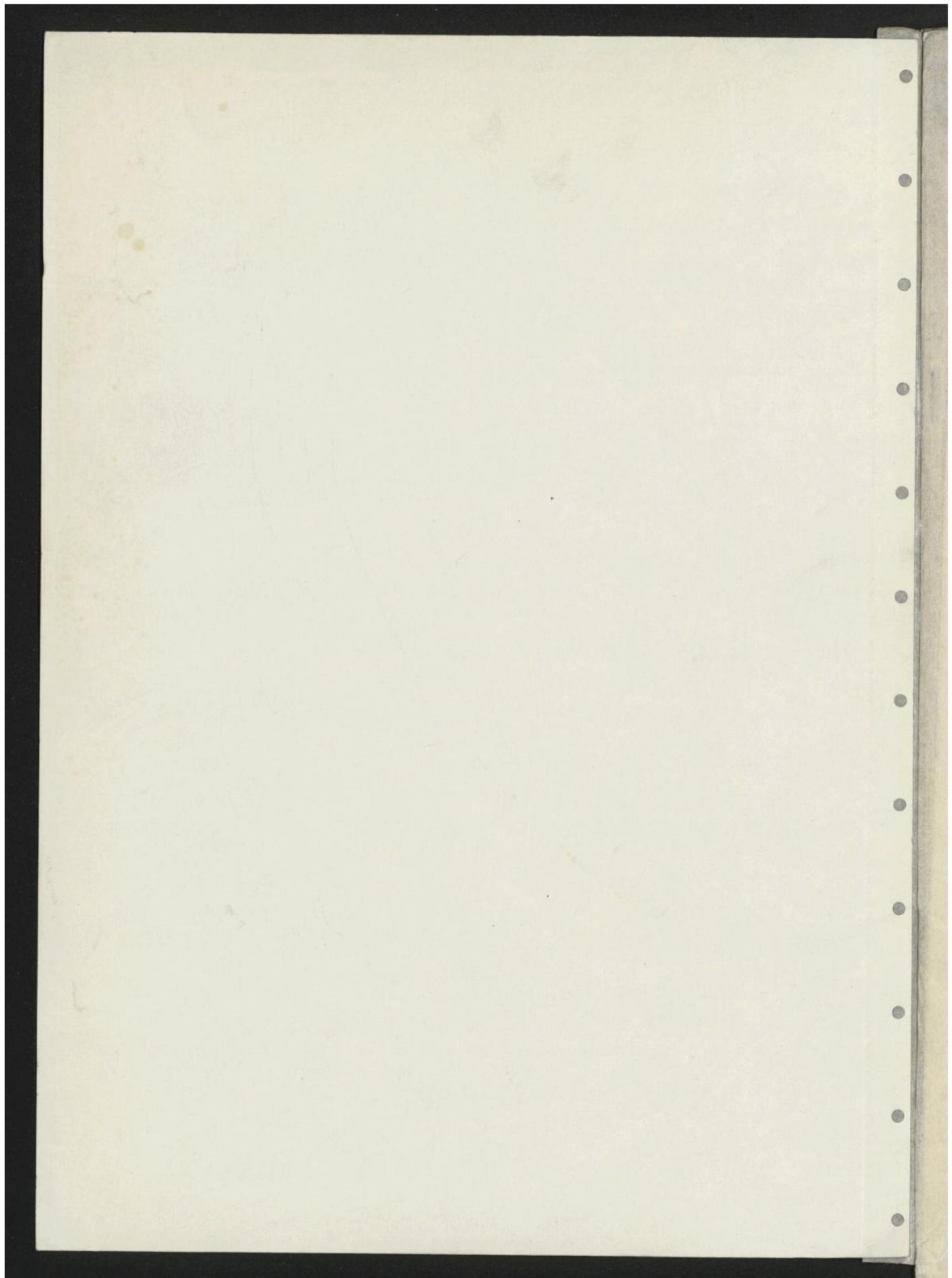
W. Kühlmann. — Allgemeine Maschinenlehre, 5 volumes (1875 à 1902.)

Ouvrage en allemand sur l'histoire des machines, avec illustrations; donnant beaucoup de détails sur toutes sortes d'appareils; nombreuses indications bibliographiques.

Ende. — Histoire documentaire de la Mécanique Française, 1 vol. 1902; description d'appareils avec reproductions d'anciens dessins et notices bibliographiques sur les inventeurs.

Moullan. — Cours de mécanique élémentaire à l'usage de l'Ecole industrielle.

Guillot. — Cours de mécanique, t. I.



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

4<sup>e</sup> De - 91





4<sup>e</sup> Fe - 91 (3)

# Conservatoire National des Arts et Métiers.

## Cours de Machines

1<sup>re</sup> Année du Cours  
1913-1914



Généralités: Unités de mesure. — Appareils de mesure (indicateurs, dynamomètres). — Constitution générale et classification des machines.

Machines à vapeur: Historique. — Propriétés des vapeurs. — Théorie générale du fonctionnement. — Distribution de la vapeur. — Volants et régulateurs; principales organes; graissage. — Différents types de machines fixes et locomobiles. — Turbines à vapeur. — Condenseurs.

## Documents pour les Auditeurs.

Liste de quelques ouvrages  
et Mémoires à consulter.

### Ouvrages généraux sur les machines

Poncelet. — Cours de mécanique appliquée aux machines, publié par Kieitz; Paris 1874.

Boulvin. — Cours de mécanique appliquée aux machines, 8 volumes (1891 à 1899.) Ouvrage très méthodique avec nombreux croquis schématiques et calculs relativement faciles à suivre (certains volumes ont une 2<sup>e</sup> édition et même une 3<sup>e</sup>).

H. de la Goupilliére. — Cours de machines 2 volumes (1886 à 1892) principalement au point de vue théorique et mathématique.

Reuleaux. — Le Constructeur, 1 vol. allemand, traduit en français. Ouvrage fondamental sur la détermination des formes et des proportions de tous les organes de machines.

Bach. Éléments de machines, leur calcul et leur construction, traduction par Desmarais. Un volume et 1 atlas (1901).

W. Kühlmann. — Allgemeine Maschinenlehre, 5 volumes (1875 à 1902.) Ouvrage en allemand sur l'histoire des machines, avec illustrations; donnant beaucoup de détails sur toutes sortes d'appareils; nombreuses indications bibliographiques.

Ende. — Histoire documentaire de la Mécanique Française, 1 vol. 1902; description d'appareils avec reproductions d'anciens dessins et notices bibliographiques sur les inventeurs.

Moullau. — Cours de mécanique élémentaire à l'usage de l'Ecole industrielle.

Guillot. — Cours de mécanique, t. 1.

## Principaux périodiques.

- Révue de Mécanique* (paraît depuis 1897)  
*Bulletin de la Société d'encouragement pour l'Industrie Nationale*.  
*Le Génie Civil*  
*La Technique Moderne* (paraît depuis 1908)  
*Engineering*, (anglais)  
*The Engineer* (anglais)  
*Proceedings of the institution of mechanical engineers* (anglais); mémoires en général assez développés, bien illustrés.  
*Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* (allemand)

## Ouvrages généraux sur la Machine à vapeur.

- Thurston*, traduit par Kirsch. *Histoire de la Machine à vapeur*.  
*Altheilig et Roché*. — *Traité des Machines à vapeur*, 1895 (2 vol.)  
*Demoulin*. — *Traité pratique de la Construction des Machines à vapeur fixes et mobiles* 1895, 1 volume.  
*Kirsch et Delize*. — *Lessons sur les Machines à vapeur 1885-1891*, 2 volumes et 2 atlas; (*Ouvrage non terminé; Traité des propriétés générales des vapeurs et des chaudières*).  
*Sauvage*. — *La Machine à vapeur*, 1896, 2 vol. — *Manuel de la Machine à vapeur*, 1 vol. (1913 2<sup>e</sup> édition).  
*Thurston*. — Traduction par Demoulin, *Traité de la Machine à vapeur*, 1893 (2 vol.).  
*Witz*. — *La Machine à vapeur*, 2<sup>e</sup> édition 1902, 1 volume.  
*Guillot*. — *Cours mécanique* t. III. (*Chaudières à vapeur, machines à vapeur*.)

## Théorie de la Machine à vapeur.

- Madame*. — *La Thermodynamique et ses applications* (*Ouvrage scientifique avec une table détaillée des propriétés physiques de la vapeur d'eau*.)

## Distribution de la Vapeur.

- Madame*. — *Tiroirs et distributeurs de vapeur*  
*"* *Détente variable de la vapeur* 2<sup>e</sup> édition  
*"* *Distribution de la vapeur; épure de régulation*
- |   |                                  |
|---|----------------------------------|
| { | <i>Encyclopédie scientifique</i> |
|   | <i>des Oùde Mémoire</i>          |
| { | <i>(léauté)</i>                  |
- Coste et Maniquet*. — *Traité théorique et pratique des Machines à vapeur au point de vue de la distribution*, 1886, 1 vol. et 1 atlas (*beaucoup de détails pratiques sur le tracé complet des mécanismes de distribution*.)  
*Seidt*. — *Die Steuerungen der Dampfmaschinen* 1900; (*ouvrage allemand avec nombreux croquis*).  
*Zeuner*. — (*Allemand*, traduction par A. Delize et Mériot) *Traité de distributions par tiroir dans les machines à vapeur fixes et les locomotives* (*étude des coulisses Stephenson, Gooch, Allan, etc.*)

## Étude des Machines

- Buchetti*. — *Nouveau guide pour l'essai des moteurs* (4<sup>e</sup> édition 1909).  
*Didebout*. — *Appareils d'essai à froid et à chaud des moteurs à vapeur*.  
*Encyclopédie scientifique des oùde-mémoire* (*léauté*).  
*Von Pichler*, traduit par R. Sequela. *L'indicateur du travail et du*

fonctionnement des machines à piston, à vapeur, à eau, à gaz, etc. et son diagramme).

### Types divers de Machines à Vapeur.

*Brocham.* — Les machines à vapeur des groupes électrogènes à l'Exposition de 1900. Annales des Mines, 9<sup>e</sup> série t. 19, p. 291.

*Eude.* — Les machines à vapeur dans la Mécanique à l'Exposition de 1900.

*Macoc.* — Les pompes

*Davey.* — La machine de Newcomen (en anglais) Proceedings of the institution of mechanical engineers 1903, p. 655 (détails historiques, photographies)

*Walckenaer.* — Exposition Universelle de 1900. Rapport du Jury international.

Class 19. Machines à vapeur. 1<sup>re</sup> vol. 1906.

### Machines rotatives.

*Reuleaux.* — Cinématique (traduit de l'Allemand par Debize.) Contient notamment une étude méthodique sur les mécanismes des machines rotatives.

### Turbines à Vapeur.

*Stodola.* — (Allemand, traduction par E. Hahn) Les turbines à vapeur.

*Sosnowski.* — Roues et turbines à vapeur, 2<sup>e</sup> édition Paris 1904 (Historique détaillé)

*Rateau.* — Théorie élémentaire des Turbines à vapeur; Revue de Mécanique, Septembre 1903, page 213.

*Soothern.* — The marine steam turbine (2<sup>e</sup> édition 1906) en anglais. Description détaillée, turbine Parsons, avec nombreux dessins clairs.

### Machines marines

*Oudot.* — Cours élémentaire de machines marines, 1<sup>re</sup> vol. 1913

*Bertin.* — Machines marines, 1899, 1<sup>re</sup> volume

### Unités.

Unités fondamentales. — Longueur (mètre) Temps (seconde de temps moyen).

Masse (Kilogramme)

Principaux multiples et sous multiples des unités de longueur et de masse avec les abréviations adoptées par convention internationale.

Kilomètre	km	Tonne	t
Mètre	m	Quintal	q
Décimètre	dm	Kilogramme	kg
Centimètre	cm	Gramme	g
Millimètre	mm	Décigramme	dg
Micron (0,001 mm)	μ	Centigramme	cg
		Milligramme	mg

Unités dérivées. — Surfaces et volumes.

Kilomètre carré	km <sup>2</sup>	Mètre cube	m <sup>3</sup>
Mètre carré	m <sup>2</sup>	Décimètre cube	dm <sup>3</sup>
Décimètre carré	dm <sup>2</sup>	Centimètre cube	cm <sup>3</sup>
Centimètre carré	cm <sup>2</sup>	Millimètre cube	mm <sup>3</sup>
Millimètre carré	mm <sup>2</sup>	Litre	l.

## Définitions fondamentales

**Vitesse.** — Dans le mouvement uniforme, la vitesse est le rapport du parcours au temps, ou le parcours dans l'unité de temps, exprimé en mètres par seconde, ou en toutes autres unités, par exemple, en kilomètres à l'heure. Pour changer d'unités, soit par exemple, une vitesse de 72 km à l'heure : c'est  $72 \times 1000 \text{ m}$  en  $1 \times 3600 \text{ secondes}$ ; c'est-à-dire, en mètres par seconde :

$$\frac{72.000}{3.600} = 20 \text{ m} \quad \text{Inversément } 20 \text{ m par seconde c'est } 0,001 \times 20 \text{ km en } \frac{1}{3.600} \text{ heure,}$$

$$\text{ou } \frac{0,02}{\frac{1}{3.600}} = 0,02 \times 3.600 = 72 \text{ km à l'heure.}$$

Dans le mouvement variable, où divise un parcours très petit de  $d$  par le temps (très court)  $d t$ , et la vitesse est la limite du quotient  $\frac{d}{dt}$  quand ces deux termes deviennent infiniment petits.

### Vitesse angulaire.

Quand un rayon tourne uniformément dans un plan autour d'un centre fixe  $O$ , la vitesse angulaire est le rapport de l'angle décrit au temps. L'unité d'angle est le radian, angle qui est mesuré par un arc  $AB$  de longueur égale au rayon  $OA$ .

Une circonference entière, ou un tour complet, correspond à  $2\pi$  radians, environ  $2 \times 3,1416$ .

On donne souvent le nombre  $n$  de tours par minute, correspondant à  $\frac{n}{60}$  tours par seconde, c'est-à-dire une vitesse angulaire de  $2\pi \frac{n}{60} = 6,2832 \frac{n}{60} = 0,1047 n$  radians par seconde.

Inversément, à une vitesse de  $k$  radians par seconde correspond  $\frac{60k}{2\pi} = n$ , nombre de tours par minute.

### Accélération.

Dans le mouvement rectiligne, l'accélération est le rapport de la variation de vitesse à la durée de cette variation. Par exemple, si la vitesse, en une seconde, passe de 4 à 6 mètres par seconde, l'accélération positive sera de  $\frac{6-4}{1} = 2$ , les unités étant le mètre et la seconde. Ceci suppose le mouvement uniformément variable. Sinon, il faut prendre le quotient de la variation infiniment petite de vitesse pendant un temps infiniment court,  $\frac{dv}{dt}$ .

L'accélération est négative quand la vitesse décroît.

Quand un mobile décrit une trajectoire quelconque dans l'espace, l'accélération totale s'obtient en composant l'accélération tangentielle,  $\frac{dv}{dt}$ , dirigée suivant la tangente de la trajectoire au point où se trouve le mobile, à l'instant considéré, et l'accélération centrale,  $\frac{v^2}{R}$ , dirigée suivant la normale à la trajectoire, située dans le plan osculateur.  $R$  est le rayon de courbure de la trajectoire au point considéré;  $v$  la vitesse du mobile en ce point.

**Forces.** — L'unité de force est le poids de la masse d'un kilogramme placée à la surface de la terre, ou plus exactement, en un lieu déterminé tel que l'accélération que la pesanteur communique à un corps tombant dans le vide (représentée par la lettre  $g$ ) soit  $g = 9,80665$  (Unités, mètre et seconde.) La valeur 9,81 suffit souvent.

Le poids de la même masse placée en des points divers de l'espace peut varier.

entre des limites fort étendues : par exemple, à la surface de la lune, il serait environ 6 fois moins grand que sur la terre ; à la surface de Jupiter, il serait 2,26 fois plus grand que sur la terre.

Une simple élévation de 6 mètres à la surface de la terre diminue le poids de la masse du kilogramme d'un milligramme environ ; mais, pour les applications ordinaires de la pratique, les variations de la pesanteur aux divers points de la surface de la terre sont en général négligeables.

**Pression.** — La pression d'un fluide sur une surface (par exemple sur un piston, sur la paroi d'un récipient), est le rapport de la force exercée (perpendiculairement à la surface) à l'étendue de cette surface ; on l'exprime en kg par cm<sup>2</sup>. L'atmosphère exerce à la surface de la terre une pression variable que mesure le baromètre, et qui est d'environ un kg par cm<sup>2</sup>.

L'air comprimé, les vapeurs dans un récipient exercent des pressions qui peuvent différer beaucoup de celle de l'atmosphère ! On compte souvent, notamment dans les chaudières, la pression effective, c'est-à-dire la pression totale ou absolue qui s'exerce à l'intérieur du récipient, diminuée de la pression de l'atmosphère qui s'exerce à l'extérieur.

Dans les liquides en repos, la pression croît proportionnellement à la profondeur, de 1 kg par cm<sup>2</sup> par 10<sup>m</sup> pour l'eau, (en négligeant l'effet de la compressibilité de l'eau, très faible pour des pressions modérées.)

Les pressions se mesurent à l'aide de manomètres à eau, à mercure, métalliques.

**Travail.** — Quand une force tire (ou pousse) un point suivant sa direction, le produit de la force par l'espace parcouru s'appelle le travail accompli.

L'unité est le kilogrammêtre, produit d'une force d'un kg par un parcours d'un mètre.

Par exemple, un poids de 100 kg élevé de 1<sup>m</sup> exige un travail de 100 kilogrammètres. De même, un poids d'un kg élevé à 100<sup>m</sup>. En descendant, le poids produit un travail moteur égal.

Dans les machines, le travail se communique d'une partie à une autre, en se conservant si la machine est théoriquement parfaite. Dans la machine réelle, les frottements et d'autres actions en arrêtent toujours une fraction au passage, fraction qu'on cherche à rendre aussi faible que possible, mais jamais le travail transmis n'est augmenté.

Si la direction de la force est oblique sur celle du mouvement, le travail s'obtient en multipliant l'espace parcouru par la projection de la force sur la direction du mouvement, ou bien la force par la projection de l'espace sur la direction de la force, ce qui donne le même produit.

Par exemple, pour éléver un poids de 100 kg verticalement de 2 mètres suivant un plan incliné (qui peut avoir plusieurs mètres de longueur), il faut, au frottement près,  $100 \times 2 = 200$  kilogrammètres.

**Puissance.** — Le rapport du travail au temps où le travail

produit (uniformément) dans l'unité de temps s'appelle puissance.

L'unité est le cheval-vapeur, de 75 kilogrammètres en une seconde, et aussi le kilowatt (kw) d'environ 102 kilogrammètres par seconde.

Par suite :

$$1 \text{ kw} = 1 \text{ cheval} \times \frac{102}{75} = 1 \text{ cheval} \times 1,36$$

$$1 \text{ cheval} = 1 \text{ kw} \times \frac{75}{102} = 1 \text{ kw} \times 0,735$$

Une puissance d'un cheval pendant une heure est un travail de:

$$75 \times 3.600 = 270.000 \text{ kilogrammètres.}$$

Le cheval-heure est donc une unité de travail. De même, le kilowatt-heure est une unité de travail égale à environ  $102 \times 3.600 = 367.000$  kilogrammètres. L'hectowatt-heure vaut 10 fois moins.

### Propriétés de la vapeur d'eau saturée

Pression en kg. par cm <sup>2</sup>	Température correspondante en degrés centigrades	Nombre de calories nécessaires		Poids d'un m <sup>3</sup> de vapeur saturée sèche en kilogrammes
		pour chauffer 1 kg d'eau depuis zéro jusqu'à la température d'évaporation	pour vaporiser le kg. d'eau à cette température	
1	99,09	99,576	537,146	0,5823
1,5	110,76	111,416	528,867	0,8518
2	119,57	120,369	522,600	1,1161
3	132,80	133,853	513,150	1,6332
4	142,82	144,102	505,958	2,1400
5	150,99	152,480	500,072	2,6412
6	157,94	159,625	495,048	3,1319
8	169,46	171,493	486,692	4,1034
10	178,89	181,243	479,814	5,0607
12	186,94	189,594	473,921	6,0060
14	194,00	196,944	468,726	6,9396

Pour la plupart des applications, il conviendra d'arrondir les nombres, en supprimant les décimales.

La chaleur totale, pour chauffer un kilogramme d'eau depuis 0° jusqu'à θ°, et la vaporiser à cette température θ°, sous la pression correspondante est donnée en calories, par la formule  $606,5 + 0,305\theta$ .

### Exercices.

Recopier l'énoncé du problème. Indiquer la méthode suivie et les calculs successifs avant la solution. Éviter les décimales trop nombreuses. Ce résultat s'obtient spontanément, en faisant usage de la règle à calcul, qui est tout

spécialement recommandée. Laisser un espace blanc pour la correction. D'autant que possible, traiter chaque problème séparément, à la suite des leçons correspondantes, et les remettre à mesure au professeur. Ne pas oublier d'inscrire le nom de l'auteur de la solution et la date.

1°— Quelle est la température exprimée par le même nombre dans les échelles centigrade et Fahrenheit (l'échelle Fahrenheit marque 32° à la glace fondante et 212° à l'ébullition de l'eau) ?

2°— La terre tourne autour de l'axe de ses pôles avec une vitesse uniforme. La durée d'un tour est de 23 heures 56 minutes 4,09 secondes. Quelle est la vitesse angulaire ou radians (fraction de radian) par heure ?

3°— L'accélération d'un mouvement, (uniformément accéléré) est représentée par le nombre 6,5, le mètre et la seconde étant prise pour unités. Quel nombre représentera cette accélération, en prenant pour unités le kilomètre et la minute ?

Remarquer que l'unité de temps intervient deux fois; d'abord dans l'évaluation de la vitesse, puis dans celle de la variation de vitesse, qui est à compter pendant l'unité de temps choisie.

4°— Quelle est la pression exercée sur une surface placée à une profondeur de 2.350 m dans l'eau douce ? Quelle sera la force totale résultant de cette pression sur une surface de 0,026 ?

Même question pour de l'eau de mer pesant 1030 kg par m<sup>3</sup> (on négligera la compressibilité de l'eau).

5°— Quelle est la vitesse angulaire, en radians par seconde, d'un arbre qui fait 260 tours par minute (vitesse uniforme) ?

6°— Les diagrammes relevés à l'indicateur sur les deux côtés du piston d'une machine à vapeur à un cylindre à double effet donnent des ordonnées moyennes, qui sont respectivement de 15 et 16 mm. L'échelle du ressort de l'indicateur est de 4 mm pour un kg. par cm<sup>2</sup>.

Le diamètre du cylindre étant de 650 mm, la course de 950 mm, et le nombre de tours par minute de 115, on demande quelle est la puissance indiquée en chevaux et en kilowatts. On négligera la section de la tige. Calculer aussi la puissance effective en chevaux et en kilowatts, le rendement mécanique de la machine étant de 92 p. 100 (Dans ces calculs, négliger les fractions de chevaux et de kilowatts.)

7°— Une machine compound à deux cylindres de 450 et 750 mm de diamètre, avec une course de 800 mm, commande un arbre qui tourne à 125 tours par minute. Les ordonnées moyennes du diagramme sont sur les deux faces du piston à haute pression, 4,3 et 4,5 kg par cm<sup>2</sup>, et sur les deux faces du piston à basse pression 1,9 et 2,0 kg. par cm<sup>2</sup>. Les tiges du piston ont 70 mm de

diamètre et sont du côté des diagrammes les plus forts.  
Calculer la puissance indiquée en chevaux.

8° — Un frein de Prony, équilibré, monté sur la poulie d'un moteur supporte un poids de 300 kg. à l'extrémité d'un bras de levier de 4 m. Le moteur faisant 110 tours par minute, on demande quelle est sa puissance en chevaux?

9° — Combien de calories faut-il pour transformer en vapeur saturée, sous la pression absolue de 12 kg par cm<sup>2</sup>, un kilogramme d'eau pris à 18°?

10° — Tracer le diagramme de la pression de vapeur dans un cylindre recevant la vapeur, pendant le premier quart de la course du piston, à la pression absolue de 10 kg par cm<sup>2</sup>. Pendant la détente, le produit du volume par la pression reste constant. La contre-pression à l'échappement est de 0,1 kg par cm<sup>2</sup>; chaque espace libre est les 0,05 du volume théorique du cylindre. Enfin on supposera une distribution sans laminage et sans compression.

11° — Déterminer l'ordonnée moyenne du diagramme ainsi tracé.

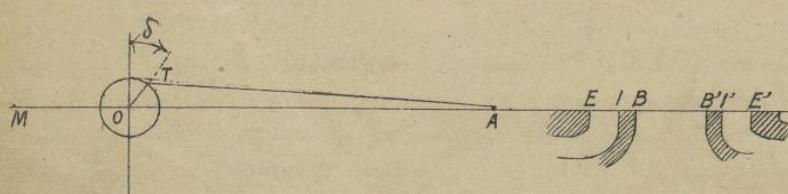
12° — Quelle quantité d'eau par heure pouvait éléver d'une hauteur de 150 m une machine de Newcomen avec cylindre d'un mètre de diamètre et course de 2 m. 50 faisant 7 courses doubles par minute, en supposant que la contre-pression résistante sous le piston soit en moyenne le cinquième de la pression atmosphérique qui agit sur la face supérieure du piston, et qu'on peut supposer égale à un kg par cm<sup>2</sup>, et que le rendement de tout le système soit de 55 p. 100 en eau élevée?

13° — Une machine élévatrice comporte un moteur à vapeur d'une puissance indiquée de 200 chevaux. Le rendement mécanique de ce moteur est 10 p. 100. Il met en marche des pompes dont le rendement (rapport du travail utile, en eau élevée, au travail moteur fourni aux pompes) est de 70 p. 100.

On demande : 1° quelle quantité d'eau sera élevée par heure; la hauteur totale d'élevation y compris les pertes de charges étant de 40 m.

2° — Le moteur consommant 7,5 kg de vapeur par cheval-heure indiqué, et le kg de houille vaporisant 8 kg d'eau, à quelle consommation de houille correspondra l'élevation d'un mètre cube d'eau?

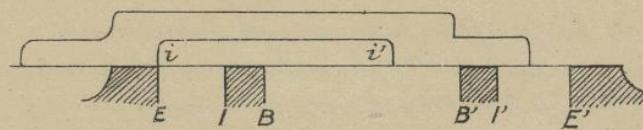
14° — Les lumières du cylindre d'une machine à vapeur ont une largeur



$EI = E'I = 50 \text{ mm}$ . Le rayon de l'excentrique  $OT = 50 \text{ mm}$ . L'angle d'avance  $\delta = 40^\circ$ . la longueur de la barre d'excentrique  $TA = 2 \text{ m}$ . On demande quelle doit être

la somme des recouvrements extérieurs du tiroir pour qu'il n'y ait d'avance linéaire) ni d'un côté ni de l'autre (c'est-à-dire pour que l'admission commence à s'ouvrir juste au moment où le piston est à fond de course)

15°.— Avec les mêmes données, les barrettes  $IB$  et  $I'B'$  ayant une épaisseur de  $25\text{mm}$ , on demande quelle doit être la largeur  $BB'$  de la lumière centrale pour que la distance  $Bi$  soit égale à  $E1$  ( $50\text{mm}$ ) quand le tiroir donne l'ouverture maxima à l'échappement, le tiroir n'ayant pas de recouvrements intérieurs ( $ii'=11'$ )

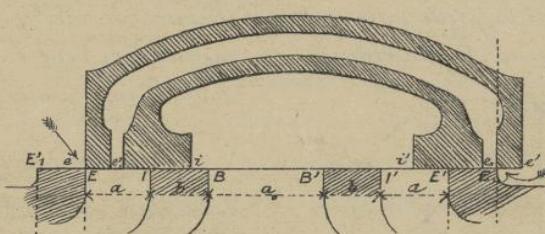


16°.— La longueur de la bielle motrice étant égale à 6 fois le rayon de la manivelle motrice, on demande d'exprimer en centièmes de la course du piston, la longueur des phases de la distribution (admission, détente, échappement, anti-échappement, compression); c'est-à-dire les parcours du piston pendant chacune de ces phases pour les deux faces du piston, avec le mécanisme ci-dessus destiné au 14°.

17°.— Sur le tiroir ci-dessus défini on diminue de  $4\text{mm}$  chacun des recouvrements extérieurs et on le règle en lui donnant de chaque côté des avances linéaires (égales) de  $4\text{mm}$ , sans autre modification. On demande ce que deviennent les phases de la distribution.

18°.— On donne ensuite des recouvrements intérieurs de  $8\text{mm}$  au total ( $4\text{mm}$  de chaque côté) au tiroir. Comment se modifient les phases de la distribution?

19°.— Les éléments d'un tiroir à canal sont les suivants:



aux bords extérieurs du tiroir  $ee' = e, e' = 15\text{mm}$ . On demande: 1° quelle doit être la largeur  $EE' = E'E$  de la partie dressée de la table au delà des bords extérieurs de la lumière? 2° quelle largeur maxima peut-on donner au canal?

20°.— Dresser le tableau des diverses distributions qu'on peut obtenir avec un tiroir, sans recouvrements intérieurs et sans avances linéaires, (c'est-à-dire le tableau des parcours du piston en centièmes pour les diverses phases de la distribution) quand l'avance angulaire varie de  $10$  en  $10^\circ$ , depuis  $0^\circ$  jusqu'à  $90^\circ$ , en négligeant

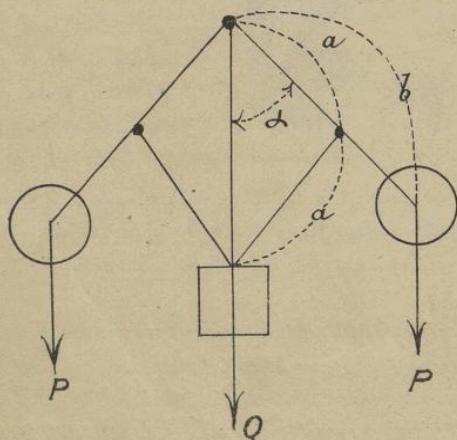
l'effet de l'obliquité des bielles. Les proportions des lumières et du tiroir sont chaque fois appropriées au calage de l'excentrique, mais il est inutile de les indiquer.

21° — Quelle est la puissance (en kgm par seconde et en chevaux vapeur) absorbée par un tiroir plan formant un rectangle de 600 mm sur 400 mm, soumis sur la face supérieure à une pression effective de 10 kg par cm<sup>2</sup>, et sur sa face inférieure à une pression absolue de 0,2 kg par cm<sup>2</sup>, en supposant que ces pressions s'exercent chacune sur toute la superficie du tiroir (c'est-à-dire sur un rectangle de 60x40 cm). La course du tiroir est de 180 mm, le nombre de tours de la machine de 175 par minute, et le coefficient de frottement est supposé égal à 0,04.

22° — Dans une machine à vapeur à un seul cylindre, pendant un tour, la vitesse angulaire passe par deux minima et deux maxima. En passant d'un minimum au maximum suivant, le volant doit emmagasiner 1000 kilogrammètres, qu'il restitue en passant de ce maximum au minimum suivant. La vitesse moyenne est de 120 tours par minute, et on demande que cette vitesse ne varie pas plus de 1/50<sup>e</sup> en plus et en moins. Le diamètre moyen du volant étant de 5 mètres, on demande quel doit être le poids de la jante; (On négligera l'effet du reste du volant.)

Même question pour les écarts de vitesse de 1/100<sup>e</sup> seulement, en plus et en moins. Dans ce problème, comme dans le suivant, on suppose toute la masse concentrée sur la circonference de rayon moyen.

23° — Quel rayon et quel poids faudra-t-il donner à la jante d'un volant pour qu'il restitue un million de kilogrammètres en se ralentissant de la vitesse de 150 tours à la minute à celle de 75. La construction est telle que l'on peut admettre à la jante une vitesse linéaire de 65 m par seconde. Cette considération détermine le maximum du rayon. On peut le prendre plus petit si on le juge convenable.



24° — L'équation d'équilibre du régulateur avec boules de poids  $P$  et manchon de poids  $Q$  est la suivante:

$$\omega^2 = \frac{g}{b \cos \alpha} \left( 1 + \frac{a}{b} \cdot \frac{Q}{P} \right)$$

où  $\omega$  est la vitesse angulaire, en radians par seconde. Les longueurs  $a$  et  $b$  sont données en m,  $P$  et  $Q$  en kg.

Calculer les valeurs de  $\omega$  et les

Nombre de tours correspondants par minute de l'axe du régulateur avec les dimensions suivantes :

$$P = 15 \text{ Kg} \quad Q = 15 \text{ Kg} \quad a = 0^m 4 \quad b = 0^m 6$$

Pour diverses valeurs de l'angle  $L$  de  $5$  en  $5^\circ$  depuis  $20^\circ$  jusqu'à  $50^\circ$ .

Même calcul, avec :

$$P = 10 \quad Q = 60 \quad a = b = 0^m 4$$

25° — Quelle valeur faudrait-il donner au poids  $Q$  du manchon du second régulateur ( $P = 10$ ,  $Q = 60$ ,  $a = b = 0^m 4$ ) pour que les vitesses de rotation fussent doublées, pour une même valeur de l'angle  $L$  ?

26° — La transmission entre l'arbre du moteur et l'axe du régulateur est telle que le régulateur tourne deux fois plus vite que le moteur. Comment faudra-t-il modifier ce rapport de transmission pour que le moteur fut réglé à une vitesse moyenne double ? à une vitesse moyenne moitié ?

27° — La résistance que doit surmonter le manchon pour se déplacer étant de  $3 \text{ Kg}$ , on supposera que chacun des régulateurs ci-dessus définis tourne à une vitesse moyenne telle que l'angle  $L = 40^\circ$ . On demande quel est le maximum et le minimum que peut prendre la vitesse angulaire tanta que cette valeur de  $L$  varie (formules à appliquer)

$$\omega'^2 = \frac{g}{b \cos L} \left( 1 + \frac{a}{b} - \frac{Q+R}{P} \right) \text{ et}$$

$$\omega''^2 = \frac{g}{b \cos L} \left( 1 + \frac{a}{b} - \frac{Q-R}{P} \right) \text{ avec la valeur } R = 3$$

28° — Quelle quantité d'eau prise à la température de  $12^\circ$  faut-il pour condenser un kilogramme de vapeur humide, au titre de  $0,95$  (c'est-à-dire contenant  $950 \text{ g}$  de vapeur et  $50 \text{ g}$  d'eau, à la même température), la pression absolue de la vapeur étant de  $1,5 \text{ kg}$  par  $\text{cm}^2$ . On demande que la température finale du mélange de l'eau de refroidissement et de la vapeur condensée soit de  $40^\circ$ .

## Manipulations

Les Auditeurs munis de cartes d'assiduité sont invités à

exécuter les manipulations suivantes :

- 1°— Examen des pièces d'une machine à vapeur simple (démontage, montage);
- 2°— Essais à l'indicateur et au frein de Prony de la machine à vapeur Compound du Conservatoire; mesure de la surface des diagrammes au planimètre; calcul de la puissance indiquée et de la puissance effective; taçage à froid des ressorts d'indicateur;
- 3°— Réglage d'un tiroir à avances linéaires égales;
- 4°— Relevé du tableau de la distribution Walschaerts, sur le modèle des collections;
- 5°— Tracé de l'épure elliptique d'une distribution par coulisse de Gooch, l'aide d'un modèle;
- 6°— Détermination expérimentale du moment d'inertie d'un rotant, par l'observation de la vitesse qu'il prend sous l'action d'un travail connu; mesure des résistances passives par l'observation du ralentissement.

Les manipulations auront lieu le dimanche matin et le jeudi après-midi aux dates qui seront indiquées. M. M. les Auditeurs munis de cartes d'assiduité qui désirent prendre part à ces manipulations sont priés de donner leur nom au Professeur; ceux qui pourraient être libres le jeudi sont priés de l'indiquer.

## Visites d'usines

On visitera, dans le cours de l'année scolaire, une usine élévatrice à vapeur de la Ville de Paris, et un atelier de construction de machines à vapeur.

Le programme détaillé du Cours a été publié dans le volume "Programme des Cours publics (Conservatoire des Arts et Métiers)"

# Conservatoire National des Arts et Métiers

## Cours de Machines

### Bilan thermique des Machines à vapeur

(Lecçon du 1<sup>er</sup> Décembre 1913)

Une machine reçoit la vapeur à une pression absolue déterminée de  $p_1$  kg par  $\text{cm}^2$  (soit 10) et la laisse échapper dans un condenseur à une pression  $p_2$  (soit 0,1 kg par  $\text{cm}^2$ ). Les températures correspondantes, pour la vapeur saturée, sont  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , soit dans l'exemple choisi  $179^\circ$  et  $45^\circ$ .

L'eau d'alimentation provenant du condenseur à  $45^\circ$  chaque kg de vapeur (saturée sèche) prend à la chaudière.

$$606,5 + 0,305 \{\theta_1 - \theta_2\} \text{ calories}$$

soit, dans l'exemple, 616 calories.

Cette quantité de chaleur se divise en 3 parties.

Une disparaît et se transforme en travail mécanique, produit par le moteur, à raison de 426 Kilogrammètres par calorie;

Un deuxième partie se retrouve dans le condenseur, où elle échauffe un certain poids d'eau de  $\theta_0$  à  $\theta_2$ , soit de  $10^\circ$  à  $45^\circ$ .

Une troisième partie (minime) se dissipe dans l'air autour du moteur.

On peut appeler rendement thermodynamique du moteur, le rapport de la quantité de chaleur utilisée par le moteur à la quantité fournie par la chaudière.

La thermodynamique enseigne (principe de Carnot) que ce

rendement ne peut dépasser le rapport  $\frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_1 + 273}$ , sauf dans l'exemple choisi,  $\frac{1311}{452} = 0.296$ .

( $\theta_1 + 273$  est ce qu'on nomme la température absolue).

Un Kilogramme de vapeur apportant 616 calories utiliserait ainsi  $616 \times 0.296$  ou 182 calories (correspondant à  $182 \times 426 = 77.400$  Kilogrammètres).

Si la vapeur est surchauffée de la température  $\theta_1$  à la température  $\theta'_1$  (soit de 179° à 300°) la quantité de chaleur supplémentaire à fournir par la chaudière à chaque Kg. est approximativement de 0,5 ( $\theta'_1 - \theta_1$ ) calories (soit 60). Le rendement thermodynamique maximum possible augmente un peu, mais le principe de Carnot donnant le rapport  $\frac{\theta'_1 - \theta_2}{\theta'_1 + 273}$  n'est pas applicable, parce que la plus grande partie de la chaleur continue à être fournie à la température  $\theta_1$  (179°).

Pour apprécier la machine réelle, on envisage l'évolution théorique suivante: admission de la vapeur à la pression supérieure  $p_1$  (10 Kg. par  $\text{cm}^2$ ); détente complète de la vapeur jusqu'à la pression finale  $p_2$  (0,1 Kg. par  $\text{cm}^2$ ); échappement pendant le retour du piston à cette pression  $p_2$ . Le cylindre est supposé absolument imperméable à la chaleur (la détente est dite alors adiabatique).

On sait calculer la quantité de chaleur que transformeraient dans cette évolution un Kg de vapeur entre des pressions  $p_1$  et  $p_2$  déterminées, la vapeur étant saturée ou surchauffée; le diagramme de Mollier, par la simple mesure d'une longueur donne cette quantité. Avec les valeurs choisies de 10 à 0,1 Kg. par  $\text{cm}^2$  cette quantité est de 165 calories (70.200 Kilogrammètres), la vapeur étant saturée; elle est légèrement inférieure à ce que donnerait l'évolution idéale suivant le cycle de Carnot qui utiliserait 182 calories. Si la vapeur est surchauffée à 300°, cette quantité est de 186 calories (79.400 Kilogrammètres).

On en déduit immédiatement le poids de vapeur nécessaire

pour produire le cheval-heure, ou 270.000 Kilogrammètres<sup>1)</sup> (correspondant à 635 calories), par application de la règle de trois :  $K$  étant le nombre de Kilogrammètres produits par un Kilogramme de vapeur; c'est  $\frac{270.000}{K}$ , soit dans l'exemple  $\frac{270.000}{70.200} = 3,85$  et  $\frac{270.000}{79.400} = 3,4$ . avec la vapeur surchauffée à 300°.

Il faut remarquer que ce nombre de Kg de vapeur dépensés par cheval-heure ne correspond pas à une unité précise, la quantité de chaleur nécessaire pour produire un Kg de vapeur pouvant varier beaucoup. Ainsi, dans notre exemple, l'eau d'alimentation étant à 45°, il faut par Kg de vapeur 616 et 676 calories, suivant qu'elle est saturée ou surchauffée.

La machine réelle dépense une plus grande quantité de vapeur par cheval-heure; on trouvera par exemple, à l'essai 6,5 Kg au lieu de 3,85 Kg, et 5 Kg au lieu de 3,4 (vapeur surchauffée).

Le rendement de la machine par rapport à la machine parfaite sera alors de :

$$\frac{3,85}{6,5} = 0,59 \quad (\text{vapeur saturée})$$

$$\frac{3,4}{5} = 0,68 \quad (\text{vapeur surchauffée})$$

Il en résulte que la machine réelle n'utilise, par Kg de vapeur, que 98 calories au lieu de 165 (vapeur saturée) ou 127 au lieu de 186 (vapeur surchauffée).

Le travail mécanique qui vient d'être calculé est le travail indiqué que la vapeur exerce sur le piston du moteur. Le travail effectif qu'on utilise est moindre à cause de la part absorbée par les frottements du moteur; on appelle rendement mécanique le rapport du travail effectif au travail indiqué.

En résumé, on dispose d'une certaine quantité de chaleur apportée par la vapeur venant de la chaudière; trois pertes



successives se produisent dans l'utilisation.

La première perte, qui est énorme, résulte de lois physiques inévitables et dépend des températures de fonctionnement. Le moteur théoriquement parfait n'utilise qu'une fraction assez faible de cette chaleur qu'on lui fournit, soit, dans l'exemple (vapeur saturée avec pressions de 10 et 0,1 Kg. par  $m^2$ ), 165 sur 616 ou 27 pour 100.

En second lieu, le moteur réel n'utilise qu'une fraction de la quantité de chaleur utilisable dans le moteur théorique parfait, soit, dans l'exemple, 59 ou 68 p. 100. Cette proportion peut être améliorée par les perfectionnements apportés au moteur.

En troisième lieu, le travail effectif n'est qu'une fraction du travail indiqué, par exemple 85 pour 100.

Par conséquent, la quantité de chaleur effectivement utilisée n'est que :

$0,27 \times 0,59 \times 0,85 = 0,135$  ou 13,5 pour 100, de la chaleur apportée par la vapeur.

Avec la vapeur surchauffée à 300° (second exemple) ces nombres deviennent :

$$0,28 \times 0,68 \times 0,85 = 0,16 \text{ ou } 16 \text{ pour 100.}$$

L'essai complet d'une machine permet la mesure de ces quantités, savoir : quantité de chaleur apportée par la vapeur, quantité de travail produit, quantité de chaleur reçue par le condenseur, quantité de chaleur perdue dans l'air ambiant (estimée plus ou moins exactement).

# Conservatoire National des Arts et Métiers

## Cours de Machines

Résumé des Leçons  
des 9, 12 et 16 Févriers 1914.  
sur la Condensation.

La vapeur saturée, en contact avec l'eau à une pression déterminée pour chaque température, soit :

à 100°	1, 0334 Kg. par cm <sup>2</sup>
à 50°	0, 125
à 40°	0, 075
à 30°	0, 043

Pour amener à la température choisie  $\theta_2$  1 Kg. de vapeur, il faut une quantité d'eau froide qui se calcule comme suit :

Le Kg. de vapeur produite à  $\theta_1$  et condensée à  $\theta_2$ , abandonne  $606,5 + 0,305 \theta_1 - \theta_2$  calories. En réalité, une partie de cette quantité de chaleur, transformée en travail ou dissipée au dehors, n'arrive pas au condenseur, soit 15 p. 100. Le reste échauffe Q Kg. d'eau de condensation de  $\theta_0$  à  $\theta_2$ . Par exemple pour  $\theta_0 = 15^\circ$   $\theta_2 = 40^\circ$   $\theta_1 = 180^\circ$  on a la relation

$$0,85 (606,5 + 0,305 \theta_1 - \theta_2) = Q (\theta_2 - \theta_0), \text{ c'est à dire :}$$

$$25 Q = 527 \text{ ou } Q = 21.$$

On compte en général de 20 à 30 Kg. d'eau par Kg. de vapeur, dans le condenseur à mélange.

Il n'est pas nécessaire que l'eau froide soit envoyée dans le cylindre même où la vapeur a travaillé (ainsi que cela avait lieu dans la machine de Newcomen), mais il suffit qu'elle arrive dans une capacité communiquant librement avec ce cylindre (condenseur).

(séparé de Watt)

Le condenseur renferme, outre l'eau et la vapeur une certaine quantité d'air, provenant notamment de l'eau qui y est injectée. D'après la loi de Dalton les pressions de la vapeur et de l'air, en mélange, s'ajoutent.

Un pompe, dite à air, enlève constamment dans le condenseur l'eau et l'air et les rejette au dehors. Le volume engendré par le piston de cette pompe est compris entre le 10<sup>e</sup> et le 20<sup>e</sup> du volume engendré par le piston du moteur, le piston à basse pression dans le cas de l'expansion multiple.)

La pompe aspire au point le plus bas du condenseur. Les dispositions en sont très variées (simple effet, double effet, piston ordinaire, piston plongeur)

Le condenseur avec sa pompe, est souvent installé sous le moteur dans les vides du massif de fondation, et parfois derrière le cylindre moteur, avec commande directe en laideur de la pompe par une contre-tige de piston.

La pompe Edwards n'a pas de soupapes d'aspiration : le piston y fait le vide et elle communique avec le condenseur par une série d'ouvertures de son cylindre que le piston démasque en fond de course (Dessin dans la Revue de mécanique, Juin 1901 p. 614)

L'eau arrive au condenseur en charge ou par aspiration de quelques mètres. Un excès d'eau est dangereux car elle pourrait pénétrer dans le cylindre du moteur. On munit certains condenseurs d'un robinet dit casse-vide, qui un flotteur ouvre quand le niveau de l'eau s'y élève trop : l'air pénètre alors dans le condenseur et la pression atmosphérique empêche l'aspiration de l'eau.

On munit souvent l'échappement du moteur de deux soupapes, permettant de diriger à volonté la vapeur dans le condenseur ou à l'extérieur dans l'atmosphère. La soupape d'échappement dans l'atmosphère peut être automatique : elle s'ouvre et se ferme quand on manœuvre l'autre.

La pression dans le condenseur est quelquefois mesurée directement par un baromètre tronqué; plus souvent elle est donnée par un indicateur de v.<sup>e</sup>

Cet appareil indique en cm. de mercure de combien la pression est inférieure à celle de l'atmosphère. Par exemple, si l'il indique 65, cela veut dire que la pression dans le condenseur sera de 76-65, si la pression atmosphérique extérieure correspond à 76 cm. de mercure; mais la pression extérieure peut être différente: il faut donc adjoindre un baromètre à l'indicateur de vide si l'on veut connaître exactement la pression dans le condenseur. Dans l'exemple donné  $76 - 65 = 11$  cm. de mercure c'est-à-dire, comme 76 cm. correspondent à une pression de 1.033 Kg. par  $\text{cm}^2$ , la pression cherchée est  $1033 \frac{11}{76} = 0,15$  Kg. par  $\text{cm}^2$ .

Le condenseur ordinaire par mélange est très simple mais il a deux défauts: les pressions de la vapeur et de l'air s'y ajoutent intégralement, et les pompes à air à piston ne permettent pas d'abaisser au minimum la pression de l'air.

Considérons d'abord une pompe à air seul. Après une course de refoulement, l'espace libre de cette pompe est plein d'air à la pression atmosphérique. Pendant la course d'aspiration cet air se détend, et ce n'est que lorsque la pression de l'air descend au-dessous de la faible pression qui règne dans le condenseur que la soupape d'aspiration peut s'ouvrir: la course utile pour l'aspiration s'en trouve notablement réduite. Il peut même arriver, à la limite, qu'une pompe soit complètement paralysée, par une valeur suffisamment basse de la pression dans le récipient où elle aspire.

Avec la pompe mixte, à air et à eau des condenseurs ordinaires, il semble que cet inconvénient n'existe plus l'espace libre en fin de course se trouvant complètement rempli d'eau (ou en profite d'ailleurs souvent pour lui donner un volume très grand). En réalité, cette eau renferme de l'air, qui se dégage et agit comme précédemment au début de la course d'aspiration.

Pour remédier au premier défaut, on sépare l'aspiration de l'eau et de l'air dans le condenseur: l'eau est prise à la partie inférieure, et l'air à la partie supérieure; il importe qu'il soit aspiré aussi froid que possible c'est-à-dire près de l'entrée de l'eau d'injection dans

le condenseur. Dans le condenseur barométrique, au lieu d'employer une pompe à eau on munit le condenseur d'un tube vertical de 10<sup>m</sup> qui plonge dans une bâche, et par lequel l'eau s'écoule; une pompe à air seul prend l'air à la partie supérieure. Il résulte de ces dispositions que les pressions de la vapeur et de l'eau ne s'additionnent plus: dans le bas du condenseur, il n'y a avec l'eau tiède que de la vapeur, ayant la pression qui correspond à la température; en haut, la pression, qui est nécessairement la même, est celle de l'air avec la pression de vapeur correspondant à la température d'entrée de l'eau.

Quelques dispositions de détail sont nécessaires pour la bonne marche de l'appareil, notamment pour empêcher l'entraînement de l'eau avec l'air, qui se produit dans certaines circonstances.

Pour corriger le second défaut on remplace la pompe à air à piston par une trompe à eau où un courant rapide d'eau froide entraîne l'air. La trompe ordinaire se compose d'une tuyère convergente suivie d'une tuyère divergente qui débouche à l'extérieur. L'aspiration se fait au raccordement des deux tuyères, et on peut obtenir en ce point des pressions très-faibles.

Dans le condenseur Westinghouse Leblanc on fait usage d'une trompe spéciale, où l'eau est envoyée en nappes séparées par une pompe centrifuge qui débite sur une partie de sa circonference seulement: cette eau aspire l'air très-raréfié et l'envoie dans un divergent qui débouche au dehors. Cette trompe est très-efficace et permet de beaucoup abaisser la pression de l'air pris dans ce condenseur à la partie supérieure.

Pour l'extraction de l'eau on préfère au tube barométrique une pompe aspirant dans le bas du condenseur. Cette pompe est centrifuge, et montée sur le même arbre que la pompe de la trompe. Les deux sont commandées par un moteur électrique ou par une turbine à vapeur. On peut estimer à 3 p. 100 de la puissance du moteur desservi celle qu'elles consomment. (Voir dessin Revue de mécanique, Décembre 1906, p. 551)

On calcule comme il suit le volume d'air qu'on doit extraire d'un

condenseur pour y maintenir une pression déterminée. Pour un Kilogramme d'air, on a la relation  $p.v = 29,28 t$  entre la pression  $p$ , exprimée en Kg. par  $m^2$  (soit 10000 fois la pression en Kg. par  $cm^2$ ) le volume  $v$  en mètres cubes et la température absolue  $t$  (centigrade + 273).  $t$  étant donnée, on en déduit immédiatement le volume  $v$  nécessaire pour obtenir la pression  $p$  voulue. Par exemple, avec l'air à  $15^\circ$ ,  $t = 15 + 273 = 288$ , soit 500 la valeur de  $p$  demandée (0,05 Kg. par  $cm^2$ ); la relation donne  $v = 16,9$ , environ 17 mètres cubes. Il faut donc que la pompe soit réglée pour aspirer, ces 17  $m^3$  pendant la durée qui correspond à l'entrée d'un Kilogramme d'air dans le condenseur. La formule montre clairement l'avantage d'aspirer l'air à une température  $t$  aussi basse que possible.

— Dans le condenseur à surface on sépare l'eau de 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 couvrant 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 qu'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  $0,1 m^2$  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 a 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 dégage 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'au 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 à leurs deux bouts, dans les plaques percées de trous qui ferment le condenseur, par une garniture plastique, serrée par un presse-garniture (fig. 737, p. 247, t. II de la machine à vapeur, par E. Sauvage), à travers laquelle ils peuvent glisser quand ils se dilatent.

Pour assurer la bonne répartition de l'eau de circulation, on divise les tubes en plusieurs faisceaux successivement parcourus. Cette disposition augmente la vitesse de l'eau dans les tubes, condition favorable à la transmission de la chaleur.

Pour que la vapeur à condenser pénètre librement dans le condenseur, il importe que les tubes ne soient pas trop serrés du côté de l'arrivée de vapeur : on ménage dans le faisceau tubulaire des passages qui répartissent la vapeur dans tout ce faisceau.

On améliore le condenseur à surface comme le condenseur à mélange, par l'emploi d'une bonne pompe à air, notamment en aspirant l'air par la trompe Leblanc, l'eau étant enlevée d'autre part. Comme la quantité d'eau à extraire est relativement faible, elle peut aussi sans grand inconvénient être enlevée par la trompe en même temps que l'air.

L'eau de condensation a l'inconvénient d'être mélangée de matières grasses, qu'on sépare autant que possible dans des filtres à éponges. Cet inconvénient n'existe pas quand la vapeur sort d'une turbine, où elle ne se trouve en contact avec aucune partie graissée.

Dans le condenseur à surface de Hall, construit 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, le condenseur à surface n'ayant pas l'inconvénient du dégagement d'air de l'eau réfrigérante. Cependant il semble qu'aujourd'hui les types perfectionnés de condenseur à mélange donnent d'aussi bons résultats.

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 manchait 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.

Quelques documents à consulter sur la condensation :

Étude de la condensation par Weiss, traduction par Hannebique ;  
Les Condenseurs, par Nadal dans la Revue de mécanique,  
années 1901 et 1902 ;

Notes sur la condensation par M. M. Leblanc (Extraits du Bulletin de l'Association technique maritime, 1910).

La condensation par mélange système Westinghouse Leblanc, à la fosse Lambrecht des mines d'Auzin, dans le Génie civil du 17 Juillet 1909.

21 Février 1914

Gd. Sauvage.

