



HAL
open science

Essor de la pratique expérimentale dans l'étude et l'enseignement de la Thermodynamique Appliquée à l'Université de Liège de 1868 à 1914

Vincent Lemort

► **To cite this version:**

Vincent Lemort. Essor de la pratique expérimentale dans l'étude et l'enseignement de la Thermodynamique Appliquée à l'Université de Liège de 1868 à 1914. Histoire. 2023. dumas-04558946

HAL Id: dumas-04558946

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04558946>

Submitted on 25 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

École d'Histoire de la Sorbonne

Master Histoire des sciences, Histoire des techniques

Mémoire de Master

Essor de la pratique expérimentale dans l'étude et l'enseignement de la
Thermodynamique Appliquée à l'Université de Liège de 1868 à 1914

Vincent Lemort

**Sous la direction de
Mme Valérie Nègre**

Année académique 2022-2023

Je tenais à remercier Madame Valérie Nègre pour m'avoir encouragé dans cette direction de recherche et pour ses conseils judicieux.

Je remercie aussi Madame Céline Ruess pour l'opportunité qu'elle m'a offerte de découvrir l'histoire de Victor Dwelshauvers-Dery et du Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège. Merci aussi à Messieurs Philippe Tomsin et Kenneth Bertrams pour les conseils de lecture qui m'ont permis de démarrer ce travail. Beaucoup de personnes ont pris le temps de répondre à mes questions, notamment Eric Geerkens. Je leur en suis reconnaissant. Les échanges avec Robert Hanlon ont également été très enrichissants.

Je remercie aussi les archivistes et bibliothécaires-documentalistes de l'Université de Liège pour leur aide et pour leur disponibilité.

Enfin je remercie ma famille qui m'a laissé passer de nombreuses heures à suivre des séminaires et à réaliser ce travail.

INTRODUCTION	11
1.1 CONTEXTE	11
1.2 QUESTIONS ABORDÉES.....	12
1.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LE SUJET	14
1.4 INTÉRÊT POUR LE SUJET	15
1.5 DESCRIPTION DES SOURCES ÉTUDIÉES	16
1.6 ORGANISATION DU MANUSCRIT	17
CHAPITRE 1 LE CONTEXTE DE LA CRÉATION DU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE	19
1.1 INTRODUCTION	19
1.2 LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE DANS LA RÉGION LIÉGEOISE (DE LA FIN DU XVIII ^E SIÈCLE À CA. 1850)	20
1.2.1 <i>La révolution industrielle dans l'industrie métallurgique.....</i>	<i>21</i>
1.2.1.1 L'industrie métallurgique avant sa révolution industrielle	21
1.2.1.2 Les différentes phases de la révolution industrielle de l'industrie métallurgique.....	21
1.2.2 <i>La révolution industrielle dans l'industrie charbonnière.....</i>	<i>25</i>
1.2.2.1 L'exploitation de la houille avant la révolution industrielle	25
1.2.2.2 Les différentes phases de la révolution industrielle de l'industrie charbonnière	25
1.3 DE LA PREMIÈRE À LA SECONDE RÉVOLUTION INDUSTRIELLE (DE CA. 1850 À LA FIN DU XIX ^E SIÈCLE)	27
1.3.1 <i>L'industrie charbonnière.....</i>	<i>29</i>
1.3.2 <i>La métallurgie et le secteur mécanique.....</i>	<i>31</i>
1.3.3 <i>Relations économiques et techniques entre la région liégeoise et l'Allemagne.....</i>	<i>32</i>
1.4 LA DÉCONSTRUCTION DE LA NOTION DE RÉVOLUTION INDUSTRIELLE	33
1.5 LA MACHINE À VAPEUR	34
1.5.1 <i>Bref historique du développement des machines à vapeur aux XVIII^e et XIX^e siècles.....</i>	<i>34</i>
1.5.2 <i>La machine à vapeur à la fin du XIX^e siècle</i>	<i>37</i>
1.5.3 <i>L'amélioration des performances des machines à vapeur à la fin du XIX^e siècle</i>	<i>39</i>
1.6 LA FORMATION DES INGÉNIEURS À LIÈGE DEPUIS LA CRÉATION DE L'UNIVERSITÉ JUSQUE CELLE DE SA FACULTÉ TECHNIQUE.....	40
1.7 CONCLUSIONS.....	42
CHAPITRE 2 LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE LA CRÉATION DU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE 43	
2.1 INTRODUCTION	43
2.2 LE PARCOURS DE VICTOR DWELSHAUVERS-DERY AVANT LA CRÉATION DU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE.....	43
2.3 LES LABORATOIRES DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE EN ACTIVITÉ DANS LA SECONDE MOITIÉ DU XIX ^E SIÈCLE	45
2.4 L'ENSEIGNEMENT PRATIQUE DE LA MÉCANIQUE À L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE AVANT 1870.....	51
2.5 DE L'INTÉRÊT DES LABORATOIRES POUR L'ENSEIGNEMENT ET LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DE LA MÉCANIQUE APPLIQUÉE	53

2.5.1	<i>Des Laboratoires pour l'enseignement</i>	54
2.5.2	<i>Des Laboratoires pour la recherche dans le domaine de la mécanique appliquée</i>	55
2.5.3	<i>Des Laboratoires pour se rendre indépendant d'un site industriel ou d'un atelier de fabrication de machines</i>	56
2.5.4	<i>Synthèse</i>	58
2.6	PREMIÈRES SOLlicitATIONS ET DÉMARCHES POUR LA CRÉATION D'UN LABORATOIRE DE MÉCANIQUE POUR L'ENSEIGNEMENT (1870-1879).....	59
2.7	LA PREMIÈRE MACHINE DU LABORATOIRE ET L'EXPOSITION NATIONALE DE BRUXELLES EN 1880	61
2.8	A LA RECHERCHE D'UN LOCAL POUR Y INSTALLER LA MACHINE À VAPEUR (1879-1885)	63
2.9	INSTALLATION DU LABORATOIRE DANS LA MAISON BEER À JEMEPPE (1887).....	63
2.10	LE LABORATOIRE DE JEMEPPE (1887-1890).....	64
2.11	TRANSFERT DU LABORATOIRE DE JEMEPPE DANS LES MURS DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE EN 1892	69
2.12	HERMAN HUBERT ET LA DIVERSIFICATION DES ACTIVITÉS DU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE AU DÉBUT DU XX ^E SIÈCLE.....	73
2.12.1	<i>Le parcours d'Herman Hubert</i>	73
2.12.2	<i>L'étude des moteurs à gaz</i>	74
2.12.3	<i>L'enseignement des machines frigorifiques</i>	76
2.13	LE NOUVEAU LABORATOIRE DE THERMODYNAMIQUE (VERS 1937)	77
2.14	CONCLUSIONS.....	78
CHAPITRE 3 LE FONCTIONNEMENT DU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE		81
3.1	INTRODUCTION	81
3.2	RÔLES JOUÉS PAR LES DIFFÉRENTS INTERVENANTS DANS LE LABORATOIRE, Y COMPRIS LES ÉLÈVES ...	81
3.2.1	<i>Le répétiteur et l'assistant</i>	81
3.2.2	<i>Le machiniste et le préparateur</i>	82
3.2.3	<i>Les élèves</i>	82
3.2.4	<i>Le Professeur</i>	85
3.3	DONNÉES FINANCIÈRES DU LABORATOIRE	85
3.3.1	<i>Évolution des salaires et du coût de la vie en Belgique dans la deuxième moitié du XIX^e siècle et premier quart du XX^e siècle</i>	85
3.3.2	<i>Salaires des membres du Laboratoire</i>	91
3.3.3	<i>Matériel du Laboratoire de mécanique</i>	96
3.3.4	<i>Missions à l'étranger</i>	98
3.4	CONCLUSIONS.....	98
CHAPITRE 4 ÉTUDE ET ENSEIGNEMENT DES MACHINES THERMIQUES AU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE		101
4.1	INTRODUCTION	101
4.2	LES MACHINES THERMIQUES À LA FIN DU XIX ^E SIÈCLE	102
4.2.1	<i>Définitions et aspects essentiels des machines</i>	102

4.2.2	<i>L'état des connaissances sur les machines thermiques au Congrès international de mécanique de Liège en 1905</i>	106
4.2.2.1	L'organisation du Congrès.....	107
4.2.2.2	Les moteurs thermiques.....	108
4.2.2.3	Les machines frigorifiques.....	109
4.3	L'ÉMERGENCE DE L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE AUX MACHINES THERMIQUES (1868 à 1913).....	109
4.3.1	<i>L'objet des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle</i>	110
4.3.2	<i>Les notes de cours de mécanique appliquée et de physique industrielle : un indicateur des connaissances en thermodynamique appliquée aux machines thermiques</i>	110
4.3.3	<i>L'enseignement de la mécanique appliquée avant 1868 (Jean-Baptiste Brasseur)</i>	112
4.3.4	<i>L'enseignement de la mécanique appliquée et de la physique industrielle de 1868 à 1904 (Victor Dwelshauvers-Dery)</i>	113
4.3.4.1	Le cours de Mécanique appliquée fait à l'école des mines de Liège (1868-1869).....	113
4.3.4.2	Le programme du cours de mécanique appliquée et de physique industrielle (1876).....	114
4.3.4.3	Les manuscrits du cours de mécanique appliquée (vers 1890).....	115
4.3.4.4	Les manuscrits du cours de physique industrielle (vers 1890).....	119
4.3.5	<i>L'enseignement de la mécanique appliquée et de la physique industrielle de 1905 à 1914 (Herman Hubert)</i> 123	
4.3.5.1	Les manuscrits des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de 1905-1907.....	123
4.3.5.2	Les cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de 1910.....	124
4.3.5.3	Les cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de 1913.....	124
4.3.6	<i>Vers un enseignement de la thermodynamique appliquée aux machines et systèmes thermiques</i> . 124	
4.4	ÉTAT DES CONNAISSANCES EN THERMODYNAMIQUE APPLIQUÉE À LA FIN DU XIX ^E SIÈCLE.....	125
4.4.1	<i>Le théorème des forces vives, une forme encore incomplète du principe de conservation de l'énergie</i> 126	
4.4.2	<i>L'application du théorème des forces vives à l'étude des machines à vapeur</i>	127
4.4.3	<i>Régulateurs accumulateurs et volants d'inertie</i>	130
4.4.4	<i>De l'équivalent mécanique de la chaleur à la conservation de l'énergie</i>	136
4.4.5	<i>De la performance maximale des moteurs à l'entropie</i>	140
4.4.5.1	L'œuvre de Carnot.....	140
4.4.5.2	Le cycle de Carnot dans la formation des ingénieurs liégeois.....	145
4.4.5.3	Du cycle réversible de Carnot au cycle de la machine réelle en passant par le cycle de Rankine.....	146
4.4.5.4	Du Théorème de Rankine à la performance maximale des moteurs.....	148
4.4.5.5	L'analogie (encore) entre le moteur thermique et le moteur hydraulique.....	150
4.4.5.6	Entropie, diagramme entropique et les bases de de la future approche exergetique.....	153
4.4.6	<i>Les propriétés des fluides au tout début du XX^e siècle</i>	156
4.4.6.1	Le comportement des gaz.....	156
4.4.6.2	Le comportement des vapeurs.....	157
4.4.7	<i>Unités et nomenclature</i>	162
4.4.7.1	Unités.....	162
4.4.7.2	Nomenclature.....	164

4.5	UNE CONTROVERSE SCIENTIFIQUE DE LA FIN DU XIX ^E SIÈCLE : LA QUERELLE EAU CONTRE MÉTAL ...	164
4.6	LES REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DES MACHINES	168
4.6.1	<i>Croquis, dessins et représentations schématiques des machines</i>	169
4.6.2	<i>Les diagrammes pour la représentation des cycles</i>	174
4.6.3	<i>La représentation des performances</i>	178
4.6.4	<i>Les modèles</i>	178
4.7	L'ÉVOLUTION DES MACHINES ENTRE LA FIN DU XIX ^E ET LE DÉBUT DU XX ^E SIÈCLE.....	182
4.7.1	<i>Machines et sciences</i>	182
4.7.2	<i>Les séries évolutives des machines et leur concrétisation</i>	183
4.7.3	<i>Régulation et automatisation des machines, relation hommes-machines</i>	186
4.7.4	<i>La non-obsolescence des mécanismes</i>	189
4.8	CONCLUSIONS.....	190
CHAPITRE 5 LA PRATIQUE EXPÉRIMENTALE AU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE.....		193
5.1	INTRODUCTION	193
5.2	LES INSTRUMENTS ET TECHNIQUES DE MESURES POUR LES ESSAIS DE MACHINES À VAPEUR	193
5.2.1	<i>Mesure du diagramme pression-volume (indicateur)</i>	194
5.2.2	<i>Mesure du travail à l'arbre</i>	199
5.2.2.1	Principe de fonctionnement d'un Frein de Prony	199
5.2.2.2	Utilisation du frein de Prony dans les différents laboratoires (de 1888 à 1937).....	201
5.2.2.3	Étude calorimétrique du frein.....	205
5.2.2.4	Autres utilisations du frein	206
5.2.3	<i>La mesure du travail des résistances passives</i>	206
5.2.4	<i>La mesure des pressions au moyen d'un manomètre</i>	206
5.2.5	<i>La mesure des températures</i>	208
5.2.6	<i>La mesure des débits en volume</i>	209
5.2.6.1	La mesure du débit d'eau de refroidissement du frein	209
5.2.6.2	La mesure du débit d'eau de refroidissement du condenseur	213
5.2.6.3	La mesure du temps	215
5.3	ANALYSES D'ESSAIS DE MACHINES À VAPEUR DE LA FIN DU XIX ^E SIÈCLE.....	215
5.3.1	<i>Les essais du Laboratoire de Jemeppe</i>	215
5.3.2	<i>Les essais du Laboratoire de Liège</i>	220
5.3.3	<i>Confrontation avec des méthodes d'analyse contemporaine</i>	222
5.4	LES MESURES DE TEMPÉRATURES PAR COUPLES THERMO-ÉLECTRIQUES.....	224
5.5	CONCLUSIONS.....	230
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		233
SOURCES		241
5.6	SOURCES MANUSCRITES	241
5.7	SOURCES IMPRIMÉES.....	243
5.8	SOURCES MATÉRIELLES	246

5.9	SOURCES ICONOGRAPHIQUES.....	246
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		247
ANNEXES		249
A.	CHRONOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT DES MACHINES À VAPEUR.....	249
B.	CHRONOLOGIE DE LA VIE DE VICTOR DWELSHAUVERS-DERY.....	254
C.	VUES EN PLAN ET EN ÉLÉVATION DE LA MACHINE À VAPEUR DE BEER INSTALLÉE AU LABORATOIRE DE MÉCANIQUE.....	257
D.	ÉVOLUTION DES PRIX DE DÉTAILS EN BELGIQUE (MICHOTTE, 1937).....	260
E.	SALAIRE NOMINAUX ET COÛT DE LA VIE DE 1835 À 1939	262
F.	LEXIQUE.....	264
G.	MÉMOIRES PRÉSENTÉS AU CONGRÈS INTERNATIONAL DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE DE LIÈGE EN 1905....	265
H.	TABLES DES MATIÈRES DES DIFFÉRENTS COURS DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE ET DE PHYSIQUE INDUSTRIELLE	270
RÉSUMÉ		274

Introduction

1.1 Contexte

La thermodynamique est la branche de la physique qui étudie les conversions entre chaleur et travail, dans un sens comme dans l'autre. La thermodynamique appliquée s'intéresse à l'étude des machines qui réalisent ces conversions. Au XVIII^e et XIX^e siècle, il s'agissait principalement de la machine à vapeur, qui convertissait une partie de la chaleur libérée par la combustion du charbon en travail mécanique (utilisé pour actionner une pompe, faire tourner une poulie, etc.). Plus tard sont arrivées d'autres machines thermodynamiques motrices (produisant du travail) : le moteur à combustion interne, la turbine à gaz, etc. Les machines réalisant la conversion inverse (conversion du travail en chaleur ou en froid) sont apparues plus tard, principalement dans le dernier quart du XIX^e siècle (même si Carnot avait déjà mentionné en 1824 l'inversion du cycle moteur). Charles Tellier fabriquera en France, en 1856 une machine frigorifique à l'ammoniac. Vingt ans plus tard, un navire (appelé *Le Frigorifique*) rapportera d'Argentine de la viande en bon état de conservation après plus de 100 jours de traversée. Les machines frigorifiques se sont principalement développées au XX^e siècle, d'abord pour la conservation des aliments et pour des procédés agroalimentaires (notamment dans des brasseries) et plus tard pour la climatisation et le chauffage (avec des pompes à chaleur) de bâtiments et de véhicules.

Au XIX^e siècle, la machine à vapeur à piston devient ainsi le support technique pour comprendre cette conversion entre chaleur et travail. Nous assistons alors au développement de la thermodynamique appliquée (ou thermodynamique technique) comme discipline scientifique. Carnot publie un ouvrage unique (il mourra jeune) en 1824, ouvrage dont on n'appréciera la portée qu'après sa mort. Il y indique que le rendement maximal d'un moteur thermique ne dépend que de la température de la source chaude et de celle de la source froide et est indépendant du fluide moteur dans la machine. Vers 1835, Clapeyron comprend que le rendement de la machine à vapeur augmentera si la vapeur est portée à très haute température en entrée d'expansor, ce qui oriente la recherche technique¹. « *Désormais, technologie de la vapeur et physique de la chaleur sont inextricablement liées* »². Contribueront au XIX^e siècle, entre autres, à « *la construction de cette nouvelle branche de la science, d'origine clairement technicienne* »³ Mayer, Joule, von Helmholtz, Rankine, Hirn, Thomson et Clausius (dont « *le travail va achever la constitution de la thermodynamique* »⁴). Les lois de la thermodynamique, qui sont à présent connues,

¹ Jean C. BAUDET, *Histoire des techniques De l'outil au système*, Vuibert, 2016.

² *Ibid.*

³ *Ibid.*

⁴ *Ibid.*

orienteront les ingénieurs dans leurs développements des machines thermiques. C'est pourtant principalement à l'occasion du développement des moteurs Diesel que la connaissance de la thermodynamique jouera un rôle important dans le développement des moteurs à combustion interne⁵. Avant cela, l'amélioration des performances des machines à vapeur s'est faite de façon relativement empirique.

Les premiers *laboratoires de thermodynamique appliquée*, que l'on appelait *laboratoires d'essais de machines thermiques*, et qui étaient la plupart du temps des composantes de *laboratoires de mécanique* (qui comprenaient aussi des *laboratoires d'essais de résistance de matériaux*), ont pourtant utilisé principalement la machine à vapeur comme objet technique d'étude. La plupart de ces laboratoires sont apparus dans le dernier quart du XIX^e siècle à l'aube de la deuxième révolution industrielle qui allait propulser le développement des moteurs électriques et des moteurs à combustion interne (Diesel, etc.).

1.2 Questions abordées

Dans ce contexte, ce travail propose de suivre la carrière d'un enseignant-chercheur en thermodynamique appliquée, Victor Dwelshauvers-Dery, à la fin du XIX^e siècle, en s'intéressant particulièrement à la création (non sans difficultés) et au fonctionnement de son laboratoire d'essais d'une machine à vapeur et à la portée scientifique et technique de son travail. Le choix de Victor Dwelshauvers-Dery pour apporter un éclairage sur le développement des laboratoires de thermodynamique appliquée est justifié par l'héritage qu'on lui reconnaît dans ce domaine. Ainsi, en 1937, on pouvait lire dans une édition de la Revue Universelle des Mines consacrée au centenaire de l'École des Mines que « *Dwelshauvers-Dery est considéré, à juste titre, comme un des pionniers dans la création des laboratoires de thermodynamique appliquée* »⁶. De manière à bien comprendre la contribution de Victor Dwelshauvers-Dery, nous proposons également de nous intéresser aux parcours de son prédécesseur (Jean-Baptiste Brasseur) et de son successeur (Herman Hubert).

⁵ Bertrand GILLE (dir.), *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard, 1978, p. 1137. Selon Bertrand Gille, même la création des premiers moteurs à combustion interne (moteur à gaz de Lenoir en 1860 et moteur d'Otto en 1876) « ne doit rien à la thermodynamique ».

⁶ Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'École des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », *Édition de la Revue Universelle des Mines*, Liège, 1937, p. 196.

Au travers d'une étude de cas particulière, le parcours et la contribution scientifique et technique de Dwelshauvers-Dery, les questions auxquelles ce travail tente de fournir des éléments de réponse sont nombreuses⁷. Il s'agit tout d'abord de questions liées à l'histoire économique et sociale des techniques :

- Comment fonctionnait un laboratoire de thermodynamique appliquée (appelé « Laboratoire de Mécanique appliquée ») à la fin du XIX^e/début du XX^e siècle ?
- Qui étaient les personnes actives dans le laboratoire, quels étaient leurs statuts et leurs rôles ? Comment le laboratoire était-il financé ?
- Quels étaient ses liens avec le monde des entreprises et avec les autres laboratoires ?
- Comment le laboratoire contribuait-il aux missions d'enseignement ?

D'autres questions concernent principalement l'histoire des sciences et des savoirs et visent à compléter l'historiographie de la thermodynamique appliquée. Dans cette branche nouvelle de l'ingénierie,

- Quelle était la complémentarité entre la recherche expérimentale et théorique à la fin du XIX^e/début du XX^e siècle ?
- Quelle était l'importance de la mobilité et du rayonnement international d'un enseignant chercheur à la fin XIX^e/début du XX^e siècle ?
- Comment les connaissances scientifiques et techniques étaient-elles diffusées ? Par exemple, comment et à quel rythme les connaissances en thermodynamique générées en France, en Angleterre et en Allemagne ont-elles été assimilées dans l'enseignement liégeois ?
- Quels étaient les liens entre la recherche (et l'enseignement) en thermodynamique et celle dans le domaine encore plus récent de l'électrotechnique ?
- Y a-t-il eu des controverses majeures qui ont fait progresser la science ?

Enfin, nous souhaiterions répondre à une série de questions qui ont trait à l'histoire « plus technique » des techniques :

- Quelles ont encore été les innovations apportées aux machines à vapeur en ce dernier quart du XIX^e siècle (ce type de moteurs existant depuis plus d'un siècle) ? Comment le développement de la thermodynamique comme science expérimentale a-t-il contribué à ces innovations ?
- Quelles étaient les techniques expérimentales de l'époque ?
- Comment la recherche expérimentale et théorique sur les machines thermiques apparues ou déployées plus massivement à la fin du XIX^e siècle (notamment les moteurs à gaz et les

⁷ « L'histoire n'est pas une pêche au filet ; l'historien ne lance pas son chalut au hasard, pour voir s'il prendra des poissons, et lesquels. On ne trouve jamais la réponse à des questions qu'on ne s'est pas posées... ». Voir Antoine PROST, *Douze leçons sur l'histoire*, Paris, Éditions du Seuil, 2014 (Edition augmentée, 1^e éd. 1996, Coll. Points), p. 75.

machines frigorifiques) a bénéficié des connaissances acquises avec l'étude des machines à vapeur ?

- Quels mécanismes influencent l'évolution des machines et de leur morphologie ?

1.3 Travaux antérieurs sur le sujet

L'historiographie des Laboratoires dans les Écoles d'ingénieurs, et encore plus précisément celle des Laboratoires de mécanique à la fin du XIX^e siècle, est relativement limitée. Cependant, certaines des questions que nous avons listées plus haut, notamment celles liées à l'histoire économique et sociale des techniques, ont été abordées par plusieurs travaux que nous considérons comme majeurs pour notre propre étude. Ainsi, les travaux de Kenneth Bertrams⁸ et ceux de Robert Fox et Anna Guagnini⁹ abordent entre autres le cas du Laboratoire de Mécanique de Dwelshauvers-Dery en s'intéressant particulièrement à sa création dans le contexte socio-économique de l'époque, tout en situant cette création par rapport à celles d'autres laboratoires similaires à l'étranger. Nous considérerons ces références comme un point de départ de notre travail et nous espérons pouvoir compléter les réponses qu'elles ont fournies. Claudine Fontanon a également fait l'histoire du Laboratoire de mécanique du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris¹⁰. Ce travail est d'autant plus intéressant que le Laboratoire de Liège entretenait des liens avec celui du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris. Aussi, le fonctionnement du Laboratoire de Paris nous a semblé différent de celui de Liège, car il est tourné vers des activités de prestation au service d'industriels.

Le domaine de l'histoire de la thermodynamique appliquée ou technique semble peut-être couvert. L'ouvrage récent de Robert Hanlon¹¹ (qui traite avant tout de l'histoire de la thermodynamique classique) nous est apparu comme une référence de premier plan dans l'historiographie de la thermodynamique.

⁸ Kenneth BERTRAMS, *Universités & entreprises : milieux académiques et industriels en Belgique 1890-1970*, Bruxelles, Le Cri édition, 2006.

⁹ Robert FOX et Anna GUAGNINI. "Laboratories, Workshops, and Sites. Concepts and Practices of Research in Industrial Europe, 1800-1914." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 29, n° 1, University of California Press, 1998.

¹⁰ Claudine FONTANON, « Le laboratoire expérimental de mécanique », dans : Michel Le Noel et Raymond Saint-Paul (dir.), *Le Conservatoire National des Arts et Métiers au cœur de Paris : 1794-1994*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Délégation à l'Action Artistique de la Ville de Paris, 1994, p. 171-176.

¹¹ Robert T. HANLON, *Block by block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*. Oxford University Press, 2020.

1.4 Intérêt pour le sujet

Ce travail, nous l’espérons aussi, devrait permettre de mieux comprendre la structure et le fonctionnement actuel des laboratoires de thermodynamique (ou de manière générale de thermique ou d’énergétique) dont certains ont également été créés au XIX^e siècle. On pourrait se poser la question de savoir si certaines caractéristiques très fortes des laboratoires actuels, mais aussi de la carrière de l’enseignant-chercheur, n’ont pas été héritées des premiers laboratoires : les liens entre l’enseignement et la recherche, les liens avec le monde industriel, la mobilité internationale, le rayonnement scientifique, le financement de la recherche, le rôle des techniciens de laboratoires, etc.

L’époque considérée dans ce travail (approximativement le dernier quart du XIX^e siècle et le premier quart du XX^e siècle, soit la fin du long XIX^e siècle (1800-1914)¹²) correspond à la transition vers la seconde révolution industrielle. La chimie et l’électricité donneront lieu à de nouvelles technologies dans le domaine de l’énergie (comme le moteur à combustion interne et le moteur électrique) qui concurrenceront le moteur à vapeur (même si celui-ci a encore été utilisé longtemps au XX^e siècle). Si on accepte un phasisme dans l’histoire de l’énergie¹³, il s’agirait du passage du *Paléotechnique* vers le *Néotechnique* de Mumford, que nous synthétisons au Tableau 0-1.

Tableau 0-1: Phases définies par Mumford pour décrire l’évolution de la technique moderne

	Éotechnique	Paléotechnique	Néotechnique
Période	c. an mil à 1750	c. 1750 – c. 1850	A partir de c. 1850
Source d’énergie	Le cheval, ensuite l’eau et le vent (moulins à eau et à vent). Énergies aléatoires ;	Charbon	Électricité, combustible fossiles liquides
Disponibilité de l’énergie	Aléatoire, intermittente et dépendant de localisations géographiques	Disponible à la demande	Disponible à la demande et compacité (le poids du moteur est lié au poids du carburant et non plus à

¹² Nicolas Offenstadt rappelle que l’*“on fait souvent commencer le XX^e siècle en 1914”*. Voir Nicolas OFFENSTADT (dir.), *Les mots de l’historien*, Presses Universitaires du Mirail, 2009, p. 85.

¹³ Fressoz déconstruit cette notion de phasisme de Mumford. Pour lui, les âges matériels ne disparaissent jamais. Ils se renforcent même. Il défend *« une histoire non de phases et d’âges, mais d’empilement de stratification et de symbioses »*. Ainsi, pour Fressoz, le récit de Mumford comprend des *« affirmations étranges »*. Par exemple, l’électricité est néotechnique, alors que les centrales électriques consomment à son époque énormément de charbon. Voir Jean-Baptiste FRESSOZ, *« The age of »* et ses problèmes. Du phasisme matériel dans l’écriture de l’histoire », *Revue d’histoire du XIX^e siècle*, 64, 2022, p. 184, 185 et 188.

			la masse d'eau à emporter)
Matériaux	Bois (outils, constructions), verre	Fer	Nouveaux alliages, terres rares et métaux légers (aluminium), composés synthétiques (ex : bakélite, matériaux organique recréés par la chimie (caoutchouc)

Dans ce contexte, la thermodynamique appliquée a-t-elle bénéficié de l'essor des nouvelles branches de l'ingénierie ou est-ce l'inverse ? La période que nous vivons actuellement est elle-même une période de transition (nous aurions entamé la troisième révolution industrielle) caractérisée elle-même par des nouvelles technologies et des nouvelles disciplines techniques. Dans ce contexte, l'histoire peut-elle nous aider à comprendre comment évoluera la thermodynamique appliquée dans le futur ?

1.5 Description des sources étudiées

Les sources que nous avons étudiées ont été principalement réunies à partir des archives et collections de l'Université de Liège. Il s'agit de manuscrits de Dwelshauvers-Dery et de ses collaborateurs, ses publications scientifiques imprimées, quelques sources iconographiques (des photographies d'époque du Laboratoire de mécanique), quelques sources matérielles (des modèles de mécanismes issus des collections de la Mécanique appliquée de l'Université de Liège) et des instruments de mesure ayant très probablement été utilisés par Dwelshauvers-Dery. De manière à bien comprendre la contribution scientifique de Dwelshauvers-Dery, nous avons complété ces sources par des publications liées à Brasseur (son prédécesseur) et à Hubert (son successeur). Parmi ces sources, un corpus que nous étudierons en détail au Chapitre 4 est constitué des notes des cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle des trois professeurs (couvrant une période allant de 1868 à 1913). Nous avons également largement consulté des archives administratives de l'Université de Liège, en lien avec les carrières de Dwelshauvers-Dery et Hubert.

Concernant l'entreprise industrielle de la région liégeoise avec laquelle Dwelshauvers-Dery a collaboré (la Maison Beer), nous avons consulté des archives à l'Institut d'histoire ouvrière, économique et sociale (Seraing).

Enfin, nous avons également consulté des sources à Paris, aux Archives de l'Académie des Sciences, aux Archives du Conservatoire National des Arts et Métiers et aux Archives de l'Ecole des Mines.

1.6 Organisation du manuscrit

Le premier chapitre présente le contexte dans lequel se situe la création du Laboratoire de Mécanique de Dwelshauvers-Dery. Nous aborderons la première et la seconde révolutions industrielles dans la région liégeoise, fournirons un bref descriptif de l'histoire des machines à vapeur et présenterons l'histoire de la création de la Faculté technique de l'Université de Liège.

Dans le deuxième chapitre, les différentes étapes de la création du Laboratoire seront décrites, en faisant tout d'abord un état des lieux des laboratoires de mécanique en fonctionnement dans d'autres pays et un état des lieux de l'enseignement pratique de la mécanique appliquée à Liège.

Le troisième chapitre s'intéressera au fonctionnement du laboratoire. On y décrira le rôle joué par les différents intervenants, leurs statuts et qualifications. On analysera également quelques données financières liées à la création et au fonctionnement du laboratoire.

Le quatrième chapitre tente de dresser un état de l'art des connaissances en thermodynamique appliquée aux machines sous le professorat de Dwelshauvers-Dery. On suivra l'évolution des connaissances entre le début et la fin de sa carrière. La machine est un objet central de ce chapitre. On l'abordera sous différents angles : sa définition, son évolution et sa représentation graphique.

Le cinquième chapitre traitera de la pratique expérimentale au Laboratoire de mécanique. On abordera les instruments et méthodes de mesures. On verra comment la pratique expérimentale a enrichi les connaissances théoriques.

Finalement, nous concluons ce travail en soulignant les observations principales que nous avons pu faire et nous proposons quelques pistes de travaux futurs.

CHAPITRE 1 Le contexte de la création du Laboratoire de Mécanique

1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le contexte historique dans lequel s'est inscrit le long processus de création du Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège, qui fut dans les premières décennies de son existence un laboratoire d'essais de machines à vapeur (ou du moins d'une machine spécialement conçue par un industriel de la région), ayant pour vocation la formation des élèves ingénieurs et la recherche. Dès lors, il nous a paru important d'aborder à la fois des aspects *économiques* (en présentant l'histoire industrielle de la région liégeoise), mais aussi *techniques* (en retraçant très brièvement l'histoire du développement des machines à vapeur), mais aussi des aspects *pédagogiques* (en présentant l'histoire du cadre direct du laboratoire, c'est-à-dire l'École d'ingénieurs de l'Université de Liège¹⁴). Nous aurions pu aussi aborder des aspects liés à l'histoire des sciences (la mécanique, la thermodynamique), mais nous choisissons de les aborder dans un chapitre ultérieur.

Nous verrons aussi que l'histoire industrielle de la région est largement liée au déploiement des machines à vapeur et nous tenterons autant que possible de fournir des informations quantitatives, telles que des nombres de machines en service ou des puissances installées (« force motrice »). Donnons déjà quelques ordres de grandeur qui permettent de comprendre le choix de la machine à vapeur comme sujet d'étude expérimentale du nouveau Laboratoire. Par exemple, au moment des premières démarches pour la création du Laboratoire de Mécanique (vers 1870), la Belgique figurait parmi les pays d'Europe les mieux équipés en machines à vapeur. Ainsi, en 1870, la puissance totale installée des machines à vapeur (en chevaux vapeur, CV) par millier d'habitants était de 47,6 en Grande-Bretagne, 34,5 en Belgique, 22,1 en Allemagne, 9,1 en France et 2,3 en Russie¹⁵. Aussi, le développement des machines à vapeur au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle a été très important en Belgique, puisque la puissance installée

¹⁴ Il ne s'agit pas de son intitulé exact. Nous verrons que cette École changera de noms plusieurs fois et nous restons délibérément génériques dans son appellation.

¹⁵ René LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle d'histoire industrielle (1873-1973). Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, industrialisation et sociétés*. Éditions Sedes, 1998, p.17. Les auteurs reprennent eux-mêmes un article d'Anne Van Eck.

était de 50.000 CV en 1850 et dépassa les 500.000 CV 50 ans plus tard¹⁶. A titre indicatif, la machine à vapeur dont il sera question plus tard dans ce travail affichait une puissance de 30 CV.

Ce chapitre commence par un historique de l'industrie en Belgique, en insistant autant que possible sur la Région liégeoise, de la fin du XVIII^e siècle au dernier quart du XIX^e siècle. Cet historique est présenté en deux temps, en considérant la période *avant* et celle *après* la moitié du XIX^e siècle. D'une part, la période vers 1850 constitue la fin de la révolution industrielle. On notera que « *vers le milieu du XIX^e siècle, la Belgique est le seul pays européen à atteindre un niveau de développement et d'industrialisation proche de la Grande-Bretagne, berceau de la révolution industrielle* »¹⁷. D'autre part, cette distinction permet de couvrir séparément la période proche de celle qui nous intéresse dans ce travail (de ca 1870 à ca 1904). Aussi, nous aborderons uniquement les secteurs de l'industrie en lien avec le futur Laboratoire de Mécanique appliquée : industrie charbonnière, industrie textile, industrie sidérurgique (métaux ferreux et non ferreux) et l'industrie des constructions mécaniques. Nous avons également essayé de faire apparaître autant que possible l'évolution de la puissance motrice installée des machines à vapeur en Belgique, en Wallonie ou en région liégeoise (« Pays de Liège »).

1.2 La révolution industrielle dans la région liégeoise (de la fin du XVIII^e siècle à ca. 1850)

La machine à vapeur étant un objet technique central dans ce travail, nous avons voulu retracer l'historique de son utilisation en région liégeoise depuis ses origines. Cet historique est bien évidemment lié à celui de la révolution industrielle. L'ouvrage de Lebrun, Bruwier, Dhondt et Hansotte¹⁸ a constitué la source d'informations principale pour dresser cet historique depuis la fin du XVIII^e siècle jusqu'approximativement 1850. Les auteurs distinguent et décrivent successivement la révolution industrielle dans l'industrie du textile, celle dans l'industrie métallurgique et celle dans l'industrie charbonnière, tout en montrant les liens entre ces trois industries et leurs révolutions. Nous nous concentrerons principalement sur les deux dernières.

¹⁶ Anne VAN NECK, « Les débuts de la machine à vapeur dans l'industrie belge : 1800-1850 », dans *Bulletin de la Classe des lettres et des sciences morales et politiques*, t. 68, 1982. p. 265. Les chiffres du Tableau 1-2 indiquent plutôt que la puissance dépasse le million de chevaux vapeur à la fin du siècle.

¹⁷ René LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés*, op. cit., p. 18.

¹⁸ Pierre LEBRUN, Marinette BRUWIER, Jan DHONDT et Georges HANSOTTE, « Essai sur la révolution industrielle en Belgique 1770-1847 » (t. II, vol. 1.), dans *Histoire Quantitative et Développement de la Belgique au XIX^e Siècle*. Bruxelles, Palais des Académies, 2^e ed., 1981.

1.2.1 La révolution industrielle dans l'industrie métallurgique

1.2.1.1 L'industrie métallurgique avant sa révolution industrielle¹⁹

La métallurgie du fer existe en région liégeoise depuis le XVII^e siècle. Avant cela, au XV^e siècle, cette industrie est localisée au sud de Liège dans le massif géologique de l'Ardenne. On emploie alors des petits fourneaux au charbon de bois et des martinets entraînés à la force hydraulique des ruisseaux pour affiner la fonte.

Dès la seconde moitié du XVI^e siècle, l'emploi de soufflets de plus grandes tailles permet d'augmenter la température des foyers, d'utiliser des minerais moins fusibles, d'agrandir les fourneaux, de produire une fonte de meilleure qualité et de diversifier l'usage du fer. Les hauts fourneaux se construisent près des rivières proches de la vallée de la Meuse qui produisent une plus grande force hydraulique. Cette activité est également plus proche du centre économique qu'offre la ville de Liège²⁰.

La métallurgie liégeoise du XVIII^e siècle se situe encore en dehors mais à proximité de la vallée de la Meuse, sur des affluents exploitant l'énergie hydraulique et est plutôt spécialisée (clous, armes portatives, quincaillerie). Les usines fabriquent des produits semi-finis. Le finissage est réalisé dans des petites forges familiales. Les métallurgistes reçoivent eux-mêmes la matière première de marchands. Nous sommes face à une industrie de nature traditionnelle.

1.2.1.2 Les différentes phases de la révolution industrielle de l'industrie métallurgique

La révolution industrielle dans la métallurgie liégeoise bénéficie de trois inventions techniques : le haut fourneau au coke, le puddlage et la machine à vapeur²¹. Elle s'est opérée en 3 phases²² :

- 1795-1815 : un climat propice à la révolution s'instaure, grâce au rattachement au marché français et à l'exemple de l'industrie du textile. Des modifications techniques et économiques se mettent en place.
- 1815-1834 : un petit nombre d'entreprises créent à Liège un bouleversement et une nouvelle physionomie du bassin liégeois. Elles sont caractérisées par de nouveaux équipements techniques, des dimensions et une production plus grandes.
- 1834-1847 : consolidation de la révolution, avec de nouveaux établissements créés qui imitent l'exemple des précédents.

¹⁹ Pierre LEBRUN, Marinette BRUWIER, Jan DHONDT et Georges HANSOTTE, « Essai... sur la révolution 1770-1847 », *op. cit.*, p. 261-265.

²⁰ Rappelons que la ville de Liège est traversée par la Meuse.

²¹ *Ibid.*, p. 295.

²² *Ibid.*, p. 294.

Nous détaillons ces différentes phases afin de faire apparaître quelques informations pertinentes sur l'utilisation de la machine à vapeur. On soulignera que la machine à vapeur a permis de produire de l'énergie en plus grande quantité et là où on en a besoin (à l'inverse de l'énergie hydraulique)²³. Ainsi, l'industrie a quitté les petits cours d'eau en s'affranchissant de l'énergie hydraulique et est venue se concentrer dans la vallée de la Meuse²⁴.

Période 1795-1815²⁵

Vers 1795, dans le pays de Liège annexé à la République française, l'industrie artisanale de la clouterie et de l'armurerie stagne. Au contraire, appuyé par les pouvoirs publics et une législation française plus propice (notamment à l'exploitation minière de grandes tailles), la révolution industrielle dans le domaine de la métallurgie est favorisée. Afin de surmonter le déclin de l'industrie métallurgique traditionnelle, on assiste aussi au développement des laminoirs à cylindres, pour la fabrication de tôles, bien qu'initialement entraînés hydrauliquement (25 laminoirs créés entre 1790 et 1815 sur des rivières proches de Liège). La révolution industrielle favorisera l'essor de l'industrie de la tôle dans le bassin métallurgique liégeois. Toujours afin de redévelopper, une activité métallurgique en déclin, on redéveloppe en 1803 une *Fonderie de canons*, alimentée par des fourneaux (utilisant du bois comme énergie primaire) et utilisant des soufflets à pistons. On travaille l'acier à Liège pour la première fois en 1802. En 1804, la Fonderie de canons est équipée de quatre machines à vapeur Perrier, pour une force motrice totale toutefois limitée de 32 CV. Cela constitue une première en Belgique pour une industrie métallurgique.

La révolution industrielle est imminente, mais l'utilisation de la force hydraulique limite l'énergie disponible et donc le volume de production.

Période 1815-1834

John Cockerill, son père et son frère²⁶

En 1815, alors que le pays de Liège n'appartient plus à l'Empire français, on ne peut pas encore dire que la révolution industrielle de la métallurgie s'est produite. Il faudra attendre la période hollandaise (période pendant laquelle Liège appartient au Royaume des Pays-Bas) et précisément

²³ Pierre LEBRUN, Marinette BRUWIER, Jan DHONDT et Georges HANSOTTE, « Essai... sur la révolution 1770-1847 », *op. cit.*, p. 295. Nous mentionnons tout de même ici la thèse avancée par Andreas MALM qu'en Grande-Bretagne, la machine à vapeur n'a ni permis de produire de l'énergie à un moindre coût ni de manière plus abondante, mais a permis un meilleur contrôle de la main d'œuvre en investissant dans des moyens de production situés dans des zones idéales et en contrôlant le rythme de travail. Voir Andreas MALM, *FOSSIL CAPITAL The Rise of Steam Power and the Roots of Global Warming*, London et New York, Verso, 2016.

²⁴ Pierre LEBRUN, Marinette BRUWIER, Jan DHONDT et Georges HANSOTTE, « Essai... sur la révolution 1770-1847 », *op. cit.*, p. 265.

²⁵ *Ibid.*, p. 266-271.

²⁶ *Ibid.*, p. 270-276.

l'année 1817²⁷ qui correspond à l'installation de la famille Cockerill à Seraing. A cette époque, la révolution industrielle avait atteint l'industrie textile de la ville de Verviers voisine de Liège grâce à la mécanisation des machines textiles²⁸. Le développement des ateliers de construction mécanique a permis le passage de la révolution industrielle du domaine du textile à celui de la métallurgie. Parmi les entrepreneurs du textile, un mécanicien venu d'Angleterre, William Cockerill associera son nom à l'histoire liégeoise²⁹. C'est avec la famille Cockerill que la révolution industrielle passe du textile à la métallurgie (vers 1759-1832).

Dès 1809, la firme Cockerill, gérée par le père et ses fils, devient importante à Liège et engage plus de 200 personnes. Ils exportent leurs constructions mécaniques en France, en Allemagne, en Italie³⁰. Vers 1815, les établissements Cockerill, dirigés à présent par les deux fils Charles-James et John (le père William s'étant retiré) quittent la construction de machines textiles pour fabriquer des machines à vapeur (systèmes Watt, Woolf et Evans). Il est probable que les Cockerill aient bénéficié des nouvelles bonnes relations avec l'Angleterre pour acquérir des machines à vapeur et s'en approprier la connaissance technique. En 1816 et 1817, ils livrent ainsi des machines dans des usines de Verviers. En 1817, les Cockerill s'installent dans l'ancien château (et parc) des Prince-Évêques à Seraing. Ils y développent une industrie « *intégrée* », du « *minerai à la machine* » : ils exploitent des concessions de minerais dans la région, des charbonnages, construisent un haut fourneau au coke (1820), une fabrique de fer (installation d'affinage de la fonte) (finalisée en 1825). En 1825, les Établissements Cockerill utilisent 8 machines à vapeur pour une puissance totale de 216 CV (5 autres entreprises métallurgiques liégeoises réunies utilisent également 8 machines pour un total de 89 CV). Les établissements fabriquent des machines textiles, des presses mécaniques, des moteurs à vapeur pour des bateaux (15 entre 1823 et 1827) et des machines à vapeur stationnaires (15% des machines installées dans les provinces belges du Royaume des Pays-Bas entre 1816 et 1830, ce qui a contribué à propager la révolution industrielle). Nous reviendrons sur les liens entre Cockerill et l'Université de Liège lorsque nous parlerons des essais sur des moteurs au gaz.

Le père et le fils Orban³¹

Le père et le fils Orban (Joseph-Michel et Henri-Joseph) sont également des pionniers de la métallurgie moderne dans la région de Liège. Dès 1810, ils exploitent des charbonnages. Dans une houillère liégeoise (à Saint-Walburge), ils introduisent la première machine d'extraction utilisée dans le

²⁷ 1817 correspond aussi à l'année de création de l'Université de Liège.

²⁸ *Ibid.*, p. 268. Leboutte *et al.* rappellent que le secteur demande beaucoup de machines (machines à vapeur, machines textiles, ainsi que des chaudières). Voir René LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés*, *op. cit.*, p.18.

²⁹ Pierre LEBRUN, Marinette BRUWIER, Jan DHONDT et Georges HANSOTTE, « Essai... sur la révolution 1770-1847 », *op. cit.*, p. 268.

³⁰ *Ibid.*, p. 270.

³¹ *Ibid.*, p. 277-278.

bassin liégeois (une machine de Perrier de 13 CV). Dans les années 1820, ils acquièrent fourneaux, forges et laminoirs. En 1822, ils créent la première usine d'affinage de la fonte utilisant le procédé de puddlage. En 1823, ils installent une machine de Cockerill de 30 CV. En 1831, ils construisent eux-mêmes 2 machines de 19 et 45 CV.

*Les Lamarche*³²

En 1829, Gilles-Antoine Lamarche et ses frères achètent un atelier de construction mécanique alors déjà équipé depuis 1821 d'une machine à vapeur de 6 CV qui actionne des tours. Avec un technicien anglais, Richard Braine, les Lamarche y construisent de 1829 à 1836 des machines à vapeur dont une douzaine était encore en fonctionnement en 1838.

Période 1834-1847³³

La révolution industrielle se consolide dans la métallurgie liégeoise dans les années 1830 et 1840 par le développement de chemins de fer en Belgique et ailleurs en Europe, mais aussi par l'accroissement de la demande de fonte de grande qualité et bon marché à l'étranger. De nombreux pays d'Europe ainsi que la Russie étendent en effet leurs réseaux ferroviaires. Cette extension bénéficie aussi au marché des locomotives : en 1845, Cockerill exporte 70 locomotives. Dans la décennie 1841-1850, on n'assiste plus à la création d'importantes entreprises métallurgiques, mais à la consolidation d'entreprises existantes.

Alors que la première machine à vapeur (de 32 CV) utilisée dans la métallurgie liégeoise avait équipé la Fonderie de canons en 1804, on recense une puissance installée de 2072 CV en 1848.

Avec la révolution industrielle, on assiste donc à l'accroissement de la production et à la modernisation de l'outillage (que l'on ne retrouve pas dans les entreprises qui restent traditionnelles et qui continuent à exploiter la force hydraulique). Le bassin métallurgique se déplace des vallées de la Vesdre et de l'Ourthe (des rivières) à celle de la Meuse (un fleuve).

En 1847, les Établissements Cockerill dépassent en taille les plus grandes usines françaises de l'époque, avec 4200 ouvriers, une force motrice de 1050 CV et un produit brut de 17,000,000 francs³⁴.

³² *Ibid.*, p. 280.

³³ *Ibid.*, p. 281-290.

³⁴ Nous nous attardons sur le cas de la société Cockerill de Seraing étant donné son impact considérable sur l'économie de la région liégeoise. Pourtant nous n'avons pas trouvé de trace de travaux réalisés par Dwelshauvers-Dery et cette société. Par contre, son successeur, le Prof. Herman Hubert, essaya le premier moteur à gaz de haut fourneau en 1895 à la société Cockerill de Seraing. Voir Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'École des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », Edition de la Revue Universelle des Mines, Liège, 1937.

Afin de se faire une idée de l'importance de l'activité métallurgique en Belgique vers le milieu du XIX^e siècle³⁵, la production de fonte constitue un bon indicateur, car il est représentatif de la construction de machines de production (machines à vapeur, machines pour textile) et de composants et machines pour le transport (rails, locomotives, bateaux). Ainsi, en 1840, la Belgique produit 0,45 kg de fonte par habitant, ce qui est inférieur à la Grande-Bretagne (1 kg par habitant) et supérieur à la France (0,25 kg par habitant) et à la moyenne pour l'Europe continentale (0,1 kg par habitant).

1.2.2 La révolution industrielle dans l'industrie charbonnière

1.2.2.1 L'exploitation de la houille avant la révolution industrielle³⁶

Au XVIII^e siècle, la houille liégeoise est utilisée dans les foyers domestiques, mais aussi dans « *les usines de transformation du fer (platineries, fenderies, laminoirs, martinets, forges à canons)* »³⁷ dans les vallées autour de Liège, dans les forges cloutières, les distilleries et les briqueteries. Elle est également exportée dans les Provinces-Unies.

Le problème principal de l'exploitation minière est l'exhaure des puits des houillères (l'épuisement). Au XVIII^e siècle, ceux-ci, creusés dans des collines qui bordent la Meuse, peuvent atteindre 200 m de profondeur. Une pompe (« engin ») entraînée par un moulin hydraulique ou un moulin à vent peut être utilisée, mais elle dépend de la présence d'un cours d'eau ou de la météo. La pompe à feu ou machine de Newcomen³⁸ offre la solution. Elle apparaît en grande Bretagne en 1711. En 1720, la première machine à vapeur du continent sera construite à Tilleur près de Liège et introduite à Stolberg (Allemagne actuelle) en 1723. Toutefois, la machine de Newcomen ne sera que peu utilisée dans les charbonnages liégeois : en 1812, sur 140 charbonnages, seul 10 utilisaient un appareil à vapeur. Cela s'explique par le droit minier local qui empêche la création de vastes exploitations minières qui pourraient justifier l'intérêt financier d'une installation d'exhaure de forte puissance.

1.2.2.2 Les différentes phases de la révolution industrielle de l'industrie charbonnière

Tout comme pour la révolution dans l'industrie métallurgique, Lebrun et ses co-auteurs distinguent 3 phases dans la révolution industrielle dans la « houillerie » liégeoise :

- A partir de 1791 : la loi de 1791 qui favorise la création de grandes exploitations charbonnières

³⁵ René LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés*, op. cit., p. 19. En ce qui concerne les chiffres liés à la production de fonte, Leboutte et al. font référence à Jean-Charles ASSELAIN, *Histoire économique. De la révolution industrielle à la première guerre mondiale*, Paris, 1991, p. 45-46.

³⁶ Pierre LEBRUN, Marinette BRUWIER, Jan DHONDT et Georges HANSOTTE, « Essai... sur la révolution 1770-1847 », op. cit., p. 312-315.

³⁷ *Ibid.*, p. 315.

³⁸ Nous aborderons son fonctionnement à la section 1.4.

- Entre 1810 et 1840 : la loi de 1810 et rôle des ingénieurs des mines ; entre 1820 et 1840, le rapprochement entre industrie métallurgique et minière (la première exploitant la seconde)
- Après 1840 : période de « consolidation » qui voit la généralisation de la mécanisation et la concentration des houillères.

Période 1791-1810³⁹

La modernisation des houillères liégeoises est donc freinée par le régime juridique qui ne facilite pas l'utilisation de la machine de Newcomen. La révolution industrielle ne sera donc possible que si le droit minier évolue. L'annexion du pays de Liège à la République française en 1795 y instaura la loi française des mines (loi de 1791). Des entreprises plus importantes peuvent alors être créées. Certaines entreprises utilisent des machines d'exhaure à vapeur de type Newcomen : en 1812, on recense 10 charbonnages sur 140 utilisant ce type de machines, mais fournissant 52% de la production de charbon. On retrouve en 1810 la première machine d'extraction⁴⁰ du bassin liégeois (13CV) dans un charbonnage des Orban.

Période 1810-1840⁴¹

La loi de 1810 remplace la législation de 1791, donnant un rôle important aux ingénieurs des mines pour la « *création, la surveillance et la modernisation des charbonnages* ». Ils moderniseront les mines⁴².

Dans les années 1830-1840, la demande intérieure de charbon devient fort importante (alors que dans les décennies précédentes, une partie importante était exportée). En effet, les machines à vapeur se répandent un peu partout (tissage, filatures, moulins, locomotives et bateaux à vapeur). La métallurgie devient un important consommateur. Elle consomme en effet du charbon dans des hauts fourneaux. On compte 17 hauts fourneaux en 1847 (dont les machines à vapeur consomment elles-mêmes du charbon). Elle en consomme aussi dans ses fours à puddler et ses cubilots.

En 1846, la métallurgie liégeoise est dotée de 2072 CV (hors des 10024 CV au total), soit 112 des 413 machines à vapeur de la région. Cela en fait le plus important consommateur d'énergie après la « houilleries » elle-même.

³⁹ Pierre LEBRUN, Marinette BRUWIER, Jan DHONDT et Georges HANSOTTE, « Essai... sur la révolution 1770-1847 », *op. cit.*, p. 315-318.

⁴⁰ L'extraction du charbon n'est pas à confondre avec l'exhaure, même si une machine à vapeur unique peut réaliser les deux fonctions.

⁴¹ *Ibid.*, p. 320-323.

⁴² *Ibid.*, p. 334: l'École des Mines est créée à l'Université de Liège en 1825.

Période après 1840⁴³

Dans les années 1840, on peut distinguer 3 types de houillères : celles qui n'ont ni machine d'épuisement, ni machine d'extraction ; celles qui ont une seule machine qui combine les deux fonctions ; et les plus développées qui ont deux machines séparées. On remarque aussi que les houillères les plus productives sont celles associées à la métallurgie

L'industrie charbonnière a réalisé l'essentiel de sa révolution industrielle. On passe dans une phase de consolidation, dans laquelle la mécanisation se généralise à tous les établissements. A présent, l'extraction se fait au moyen de machines à vapeur qui entraînent des cages : on remonte plus vite le charbon, mais aussi les ouvriers. En 1849, on compte 44 ou 45 machines d'épuisement pour une puissance de 4500 CV. En 1896, la puissance installée dans les charbonnages liégeois est de 31500 CV.

1.3 De la première à la seconde révolution industrielle (de ca. 1850 à la fin du XIX^e siècle)

Nous ne pouvons pas nous arrêter à la moitié du XIX^e siècle puisque notre étude s'intéresse à une période qui couvre principalement le dernier quart de ce siècle. Nous avons donc poursuivi la description du contexte économique en nous appuyant sur le livre de René Leboutte, Jean Puissant et Denis Scuto, *Un siècle d'histoire industrielle (1873-1973). Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, industrialisation et sociétés*⁴⁴. Même si le livre aborde davantage la Belgique que la région liégeoise, il fournit un aperçu de l'activité industrielle au moment de la création du Laboratoire de Mécanique.

Commençons par un aperçu général⁴⁵, avant de nous intéresser au cas particulier de plusieurs industries que nous avons déjà abordées dans la section précédente⁴⁶. Le taux de croissance de la Belgique entre 1842 et 1872 est de 5.2%, ce qui constitue un record en Europe. De 1848 à 1878, les exportations de fonte et de fer ouvré sont multipliées par 8 et l'industrie lainière est en pleine essor. S'ensuit alors une grande dépression de 1874 à 1895. L'industrie belge doit faire face à de nouveaux défis : révolution de l'acier⁴⁷, épuisement des gisements de minerais, coût de revient de la production de charbon élevé (ce qui ne favorise évidemment pas les exportations), bassins industriels qui se

⁴³ *Ibid.*, p. 326-330.

⁴⁴ Plus précisément sur le Chapitre I de René LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés, op. cit.*, Ch. 1 « Belgique. Crises et Rebondissements », p. 31-108.

⁴⁵ Pour rédiger cette section, nous nous sommes basés sur René LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés, op. cit.*, p. 31-40.

⁴⁶ Nous n'aborderons pas les industries du bois, des carrières, des tanneries et de l'agriculture, qui semblent moins liées aux activités du service de Mécanique appliquée que nous décrirons plus tard.

⁴⁷ Utilisation massive de l'acier au lieu de la fonte et du « fer puddlé ».

développent dans d'autres pays (la Ruhr en Allemagne, Nord pas de Calais en France, et dans différentes régions d'Angleterre).

Le coût de revient des produits de la sidérurgie augmente (car le prix du charbon augmente) mais le prix sur le marché diminue en raison de la concurrence (qui vient même des Etats-Unis). La situation est donc assez difficile pour l'industrie charbonnière et pour la sidérurgie. On assiste aussi à une chute du taux de croissance des constructions mécaniques

L'industrie textile est également touchée. Ainsi l'industrie de la laine, qui avait montré une grande expansion sur la période 1850-1870, subit une concurrence très forte et doit mécaniser le tissage et procéder au regroupement des petites entreprises.

Ainsi, les industriels diminuent la consommation de combustibles et de matières premières, mais surtout les salaires pour diminuer les coûts de revient. La mécanisation et l'innovation technique permettent aussi aux industriels d'améliorer la qualité des produits et de diminuer les coûts de revient. C'est le cas dans l'industrie charbonnière (on obtient un charbon d'aussi bonne qualité que celui de la Ruhr) et dans la sidérurgie (on doit s'adapter à la révolution de l'acier). Parmi les innovations, on peut citer le moteur à gaz⁴⁸ de Lenoir (mis au point en 1859), les turbines à vapeur et la dynamo électrique (de Gramme). Les moteurs électriques sont construits de manière industrielle dès 1875-1880.

On exporte de moins en moins de produits bruts comme la fonte (les pays voisins possèdent leurs industries lourdes). On importe de plus en plus de matière premières (en raison du gaspillage passé des charbonnages et de l'épuisement des gisements de minerais).

L'État a pourtant investi dans les charbonnages et la sidérurgie, mais pas dans les nouvelles industries comme la fabrication métallique, l'électricité et la chimie.

Il faut attendre 1895-1896 pour que l'industrie redevienne prospère (jusqu'en 1914). Les grands holdings de l'industrie électrique se développent aussi à la toute fin du siècle. La période 1895-1914 est donc une période de croissance. L'industrie charbonnière se maintient avec une croissance de la demande intérieure (et donc une demande d'importations), mais la Belgique n'exporte plus. La métallurgie se renforce avec les nouveaux aciers, la construction mécanique (matériel ferroviaire, cycles, motocyclettes, voitures (notamment à Liège), la construction métallique). La verrerie re-progresse et

⁴⁸ Herman Hubert, qui succédera à Victor Dwelshauvers-Dery dotera le Laboratoire de mécanique d'un moteur à gaz. Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'Ecole des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », Edition de la Revue Universelle des Mines, Liège, 1937, p. 196.

l'industrie textile se porte bien, surtout en Flandre. Les secteurs de la seconde révolution industrielle (chimie, électricité) sont également bien actifs.

Notons aussi que la population belge augmente de 96% entre 1831 et 1910. Cette évolution est similaire à celle de l'Allemagne et du Danemark, inférieure à celle de l'Angleterre, mais supérieure à celle de la France.

Les voies de communication et leur coût subsidiés ont facilité le déplacement de la main d'œuvre, mais freiné le développement de vastes agglomérations industrielles. On retrouve en effet des lignes de chemin de fer dans des zones rurales. Par exemple, la société Cockerill recrutait sa main d'œuvre dans un rayon de 20 km à la fin du XIX^e siècle.

1.3.1 L'industrie charbonnière⁴⁹

L'industrie charbonnière subit un essor considérable entre 1850 et 1873 (Figure 1-1 et Tableau 1-1). La croissance de la demande de charbon s'explique par la croissance de l'industrie consommatrice de charbon (sidérurgie, verrerie, construction mécanique), par « l'étonnante multiplication des machines à vapeur », et par le développement des chemins de fer et des bateaux à vapeur. Vers 1850, on compte 4000-5000 CV additionnels par an en machines à vapeur stationnaires et mobiles. Au début des années 1870, on compte 30000 CV additionnels par an. En 1873, le « parc des machines industrielles représente près de 200000 CV, les chemins de fer et la navigation plus de 240000 CV ». Le Tableau 1-2 compare la puissance installée des machines à vapeur en Belgique à celle d'autres pays d'Europe. Les années 1880 et 1896 couvrent une période très proche de celle associée à notre étude (ca 1868-1904).

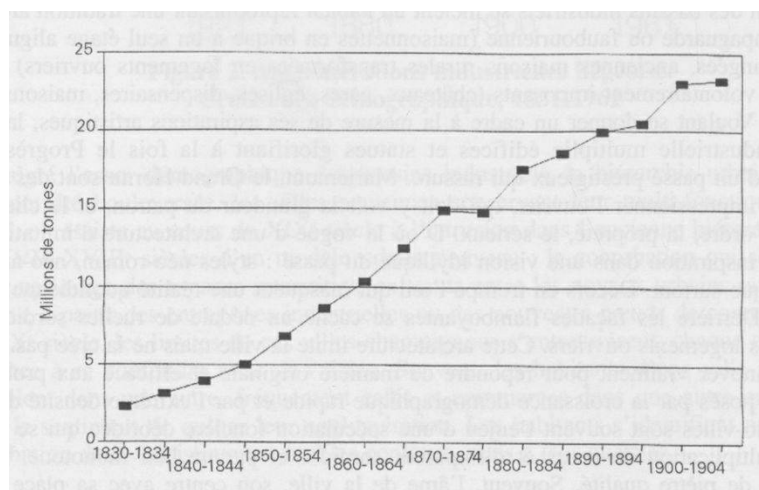


Figure 1-1 : « Production charbonnière en Belgique : 1830-1834 à 1905-1909 ». Dans René LEBOUTTE, Jean PUISSANT et Denis SCUTO, *Un siècle d'histoire industrielle (1873-1973). Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, industrialisation et sociétés*. Éditions Sedes, 1998, p. 46.

⁴⁹ René LEBOUTTE, Jean PUISSANT et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés*, op. cit., p.46-51.

Tableau 1-1: « L'industrie charbonnière en Wallonie dans la seconde moitié du XIX^e s ». René, LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle d'histoire industrielle (1873-1973). Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, industrialisation et sociétés*. Éditions Sedes, 1998, p. 47⁵⁰.

	Ouvriers en milliers	Force motrice en milliers de CV	Production en millions de tonnes
1846	46	20	5
1860	/	40	10
1880	94	100	17
1896	116	130	21
1910	140	210	24

Tableau 1-2: « Distribution des pays industrialisés suivant la puissance totale des machines à vapeur, 1840-1896 (en milliers de chevaux-vapeur) ». René, LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle d'histoire industrielle (1873-1973). Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, industrialisation et sociétés*. Éditions Sedes, 1998, p. 47⁵¹.

Pays	1840	1860	1880	1896
Royaume-Uni	620	2450	7600	13700
Allemagne	40	850	5120	8080
France	90	1120	3070	5920
Belgique	40	160	610	1180
Pays-Bas	-	30	250	600
Italie	10	50	500	1520

Dans les années 1840-1880, près de 1/3 du charbon wallon est exporté (principalement en France). Dès les années 1860, apparaît une concurrence avec le charbon anglais et allemand (de la Ruhr). Le développement du charbon allemand dès 1874 fait chuter le prix de vente sur le marché. Les conditions géologiques (la plus grande force physique nécessaire pour l'extraire), le caractère ancien des installations et le morcellement des concessions font que le charbon wallon est peu rentable par rapport au charbon allemand, français, et anglais.

De 1875 à 1890, l'industrie charbonnière engendre des bénéfices faibles, voire nuls. La prospérité revient à partir de 1890 après avoir modernisé les installations et regroupé des concessions. Il faut aussi améliorer la qualité des produits des années 1850-1860 pour affronter la concurrence.

Nous relevons également que « l'industrie du charbon est une activité de main d'œuvre » : près de 60% du prix de revient est lié aux salaires pendant tout le XIX^e siècle. Il s'agit également d'une industrie malsaine et dangereuse, même si les conditions de travail s'améliorent progressivement dans la seconde moitié du XIX^e siècle.

⁵⁰ Leboutte *et al.* ont eux-mêmes repris ce tableau de Marinette BRUWIER, « La prépondérance de la grande industrie », dans H. Hasquin (éditeur), *La Wallonie. Le pays et les hommes. Histoire-économies-sociétés*, t. II, *De 1830 à nos jours*, Bruxelles, 1976, p. 95.

⁵¹ Leboutte *et al.* ont eux-mêmes repris ce tableau de David S. LANDES, *The Unbound Prometheus. Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*, Cambridge, 1969, p. 221.

1.3.2 La métallurgie⁵² et le secteur mécanique⁵³

De 1830 à 1850, la sidérurgie wallonne bénéficie de la création des chemins de fer (en Belgique et à l'étranger), du développement des charbonnages et des ateliers de construction mécanique et du textile (ces trois derniers secteurs commandent du matériel). La Wallonie exporte de la fonte brute vers la Ruhr, qui n'a pas de haut fourneau au coke avant 1849 (elle possède uniquement des fabriques de fer).

A partir de la moitié du XIX^e siècle, la sidérurgie limite les exportations de fonte brute et augmente l'exportation de produits finis ou semi-finis.

Sur la période 1850-1873, la capacité des hauts fourneaux augmente. Aussi, les usines se concentrent par regroupement. Dès 1870, la production de minerais de fer diminue et on doit importer des minerais notamment avec la « révolution de l'acier ».

La seconde moitié du XIX^e siècle voit donc une croissance exceptionnelle de la production de fonte, malgré le ralentissement observé pendant la dépression de 1873-1890. En 1880, les hauts fourneaux wallons sont les plus performants avec ceux d'Angleterre. Ils seront ensuite devancés par les Allemands

Dans les années 1860, la révolution de l'acier menace toutes les entreprises sidérurgiques wallonnes, qui doivent se reconvertir (on doit abandonner le puddlage). Aussi le minerai pour l'acier n'est pas présent en Belgique. En 1863, la société Cockerill se dote d'un Convertisseur Bessemer pour la fabrication d'acier (qu'elle produisait jusque-là en petite quantité au moyen de creusets). Le bassin liégeois s'équipe peu à peu de tels convertisseurs. C'est ainsi que dans les années 1870-1895, le bassin liégeois domine le secteur de la production de rails de chemin de fer en acier (qui prouve sa supériorité par rapport au fer). La difficulté reste l'importation de minerai basque et de fonte non phosphoreuse d'Angleterre ; ainsi que l'investissement dans des nouveaux équipements en période de récession (1873-1886). Le convertisseur basique de Thomas-Gilchrist (mis au point en 1879) offrira la solution.

Dans le domaine des métaux-non ferreux, on doit citer l'industrie du zinc, pour laquelle la Belgique occupe une position prépondérante. Dans les années 1860, près de la moitié de la production mondiale est assurée par quelques entreprises liégeoises (Vieille Montagne, Nouvelle Montagne, Usines d'Ougrée et de Prayon). La production augmente continuellement de 1845 à 1913.

⁵² René, LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés*, op. cit., p. 53-59.

⁵³ *Ibid.*, p. 59-58.

Dans le domaine des constructions mécaniques, Leboutte et al.⁵⁴ soulignent la construction de locomotives. La Société des Ateliers de la Meuse à Liège (créée en 1835) devient le plus grand producteur et exportateur (200 machines par an). Viennent ensuite Cockerill et Carels à Gand.

Les auteurs rappellent⁵⁵ que l'industrie mécanique a adopté tard les moteurs à gaz, électrique et Diesel. Il faut attendre les années 1890 pour voir le secteur électromécanique émerger avec la fabrication de tramways (destinées à l'étranger). Le secteur électromécanique se développe aussi en raison de la demande croissante d'électricité en Belgique. La consommation augmente en effet de 3.5% par an entre 1881 et 1898. En 1886 est créée la Société Électrique à Charleroi et en 1904 les Ateliers de constructions électriques de Charleroi (ACEC).

Les auteurs citent⁵⁶ aussi le développement de l'industrie des machines agricoles pour l'agro-alimentaire et celui de l'armurerie liégeoise qui existe depuis longtemps et donne lieu à l'apparition de l'industrie de l'armement en région liégeoise en 1889 avec la Fabrique nationale d'armes de guerre d'Herstal.

Leboutte et ses co-auteurs déclarent⁵⁷ tout de même que mis à part quelques cas limités, la plupart des secteurs de l'industrie mécanique belge sont restés liés au passé en 1913 et sont dépassés par les industries suisse et suédoise.

1.3.3 Relations économiques et techniques entre la région liégeoise et l'Allemagne

Un passage⁵⁸ de l'ouvrage de Leboutte qui a également retenu notre attention donne de nombreuses informations sur les relations économiques et techniques entre la région liégeoise et l'Allemagne. Nous avons jugé utile de le mentionner étant donné les nombreuses références à l'Allemagne que nous avons pu relever dans les sources en lien avec les travaux de Dwelshauvers-Dery (liens avec des Écoles d'Ingénieurs allemandes, calibration d'instruments de mesure par un institut allemand, etc.).

Ainsi, Leboutte et ses coauteurs déclarent que les Liégeois ont contribué au développement du bassin métallurgique de la Ruhr. Ils y introduisent le puddlage à l'anglaise dans les années 1840-1850. Des ouvriers wallons partent travailler à Dortmund et dans la Sarre. Des wallons créent des usines, des hauts fourneaux, des laminoirs, des charbonnages à Duisburg et Essen. Ils fondent des laminoirs de rails,

⁵⁴ René, LEBOUTTE, Jean PUISSANT, et Denis SCUTO, *Un siècle... sociétés*, op. cit., p. 59.

⁵⁵ *Ibid.*, p. 59-60.

⁵⁶ *Ibid.*, p. 60-61.

⁵⁷ *Ibid.*, p. 60.

⁵⁸ *Ibid.*, p. 68-70

de tôles et des fabriques de tubes en Rhénanie. Ils citent également le cas d'un Wallon qui prend la direction du premier haut fourneau au coke de la Ruhr et celui d'un autre Liégeois qui met en fonctionnement un haut fourneau en 1853 à Oberhausen. Aussi, le plus grand haut fourneau d'Allemagne est créé sur base du modèle d'une usine liégeoise (en 1854). Dans les années 1850-1860, les Belges créent des aciéries et des laminoirs en Allemagne. Des puddleurs et lamineurs de la région liégeoise sont engagés de l'autre côté de la frontière, parfois même des directeurs techniques d'usines métallurgiques (à Düsseldorf, Duisbourg, Minden-sur-Weser). Le premier cartel associant mines et usines sidérurgiques est créé à Aachen⁵⁹ (Ruhr) en 1852. Une colonie de 300 ouvriers wallons vit à Duisbourg en 1855. En 1860, un Sérésien⁶⁰ dirige la construction d'un convertisseur Bessemer à Sterkrade (Oberhausen). La firme liégeoise Piedeboeuf s'installe à Aachen en 1831-1833 (tout d'abord avec une chaudronnerie pour chaudière de machines à vapeur puis avec une usine de puddlage avec laminoir et martinet en 1845). Elle s'installe ensuite à Neuss et Düsseldorf (où elle crée un atelier de fabrication de chaudières à vapeur en 1863 et de tubes en 1873). Dans les années 1870, d'autres Liégeois et Sérésiens installent des chaudronneries (notamment spécialisées dans la fabrication des fours à coke) à Düsseldorf, Cologne et Deutz. Dans les années 1840-1870, des industriels wallons participent aussi à la mise en exploitation des charbonnages de Rhénanie-Westphalie. La liste de cas est certainement encore plus longue.

1.4 La déconstruction de la notion de Révolution industrielle

Depuis une quinzaine d'années la notion de Révolution industrielle a tendance à être déconstruite par les historiens, philosophes et économistes⁶¹. Notamment, car des nouvelles sources liées à l'artisanat et au monde rural (et pas seulement à l'industrie) sont à présent prises en compte. Aussi, le mot « révolution » fait penser à un changement brutal, et ne représente pas bien un changement qui a eu lieu sur le long cours. En effet, même si l'industrialisation occidentale s'est produite d'environ 1750 à 1870, l'innovation technique et la mécanisation remontent à la fin de la Renaissance et on retrouve déjà des grandes manufactures dans le domaine artisanal au XVII^e siècle (l'industrie drapière par exemple). Aussi, les définitions de l'industrie sont multiples. Enfin, la notion de Révolution industrielle s'attache trop à des notions de territoires géographiques (les vainqueurs et les vaincus). L'industrialisation doit plutôt être abordée à la fois de façon régionale et globale.

⁵⁹ Non loin de Liège.

⁶⁰ Seraing est une commune de l'agglomération liégeoise, reprenant actuellement Jemeppe.

⁶¹ Nous reprenons les informations qui suivent de *évolutions industrielles*, journal d'exposition à l'occasion de l'exposition « Évolutions industrielles » présentée à la Cité des sciences et de l'industrie (Paris) du 14 juin 2022 au 5 mars 2023.

1.5 La machine à vapeur

Dans ce travail, comme nous l'avons évoqué, la machine à vapeur occupe une place centrale. Nous verrons plus tard que c'est en effet l'acquisition d'une machine à vapeur qui mènera finalement, non sans efforts, à la construction d'un laboratoire pour la tester. Nous verrons également que Dwelshauvers-Dery défendra son idée de création d'un laboratoire d'essais de machines à vapeur en décrivant les installations similaires de plusieurs de ses contemporains à l'étranger.

Le présent travail s'intéresse principalement à des événements qui ont eu lieu dans le dernier quart du XIX^e siècle et au tout début du XX^e siècle. Nous verrons que les démarches pour la création d'un laboratoire remontent à 1870-1875 pour finalement aboutir à la création d'un premier laboratoire en 1887, peut-être remplacé par un second en 1901. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la machine à vapeur est bien plus ancienne, puisqu'elle a joué un rôle majeur dans la révolution industrielle dès le XIX^e siècle.

Il nous a donc semblé nécessaire de tracer un historique technique du développement de cette machine depuis le XVIII^e siècle jusqu'à la période qui nous intéresse afin de comprendre l'intérêt qu'il pouvait encore exister à l'époque de Dwelshauvers-Dery à étudier une machine dont l'exploitation industrielle datait de plus d'un siècle.

1.5.1 Bref historique du développement des machines à vapeur aux XVIII^e et XIX^e siècles

La thèse d'Anne Van Neck nous fournit une description chronologique des principaux types de machines à vapeur utilisées principalement pendant la première moitié du XIX^e siècle⁶². Nous tentons de le résumer ci-dessous.

Sous le régime hollandais, les machines à vapeur étaient majoritairement des *pompes à feu* de Newcomen (1663-1729) utilisées pour l'exhaure des mines et des carrières. Dans ce type de machines⁶³, la vapeur produite par une chaudière (en contre-bas) entre dans le cylindre, y soulève le piston, ce qui fait descendre la tige de la pompe au moyen d'un balancier. L'alimentation en vapeur est ensuite fermée et l'alimentation en eau ouverte. De l'eau est alors injectée dans le cylindre, provoquant la condensation de la vapeur et créant ainsi une dépression. La pression atmosphérique agissant sur la face extérieure du piston force celui-ci à descendre et la tige de la pompe monte. L'eau de refroidissement vient d'un réservoir (en hauteur). La machine de Newcomen présente toutefois deux problèmes : d'une part, l'eau

⁶² Anne VAN NECK, *Les débuts de la machine à vapeur dans l'industrie belge (1800-1850)* (Unpublished doctoral dissertation). Université libre de Bruxelles, Faculté de Philosophie et Lettres, Bruxelles, 1975, p. 73-99.

⁶³ Nous reprenons la description de Anne VAN NECK, *Les débuts...*, *op. cit.*, p. 74.

injectée refroidit les parois du cylindre provoquant la condensation d'une partie de la vapeur entrante (au détriment du travail) ; d'autre part, la consommation d'eau froide pour la condensation est importante.

La machine de Watt⁶⁴ vient palier ces 2 problèmes en employant une condensation externe au cylindre. Un condenseur séparé est donc utilisé. L'utilisation d'une chemise autour du cylindre (remplie de vapeur) permet aussi de réduire les pertes par condensation. Autre différence, la surface extérieure du piston est à présent en contact avec la vapeur de la chemise et non plus avec l'atmosphère (même si la vapeur y est à une pression proche de la pression atmosphérique). Le piston monte sous l'effet de la pression de la vapeur et il redescend sous l'action de son poids en chassant la vapeur vers le condenseur. La machine entraîne toujours la tige d'une pompe via un balancier. Notons que le condenseur est équipé d'une pompe pour évacuer condensats et l'air.

Un tournant important dans le développement des machines à vapeur est marqué par l'« utilisation de la détente de la vapeur »⁶⁵. La puissance produite par la machine est réduite mais son rendement est augmenté.

Après 1800, les brevets de Watt tombent dans le domaine public, ce qui entraîne une expansion importante de la construction des machines à vapeur.

Ces machines sont caractérisées par :

- Des pressions d'admission élevées (grâce à des chaudières adaptées)
- L'utilisation du principe de la détente, dans un ou deux cylindres
- La suppression du balancier, l'amélioration des systèmes de distribution de la vapeur, l'amélioration des garnitures des pistons
- L'utilisation presque exclusive du métal en lieu et place du bois

Anne Van Neck rapporte aussi⁶⁶ que de nouveaux types de chaudières permettent l'utilisation de la haute pression. Ces chaudières présentent de nouvelles formes (cylindriques), sont construites en fer et non plus en cuivre ou en fonte. Elles emploient des tubes (aquatubulaires et ignitubulaires).

Jonathan Hornblower⁶⁷, un concurrent de Watt, dépose un brevet sur la machine « compound » (à double cylindre) en 1781. Sa machine ne s'avère pas plus efficace que celle de Watt, mais l'idée est reprise plus tard, notamment par Woolf en 1804, dans des machines à haute pression. Vers 1811, une

⁶⁴ Nous reprenons la description d'Anne VAN NECK, *Les débuts...*, *op. cit.*, p. 75.

⁶⁵ *Ibid.*, p. 79.

⁶⁶ *Ibid.*, p. 81-82.

⁶⁷ *Ibid.*, p. 83.

de ses machines compound montre une économie de 50% en combustible par rapport à celle de Watt. Les machines compound sont ensuite devenues populaires et ont été largement utilisées en Belgique⁶⁸.

Les machines à balancier (Figure 1-2) évoluent par la suite en remplaçant les poutres et colonnes en bois qui supportaient le balancier par des éléments métalliques⁶⁹.

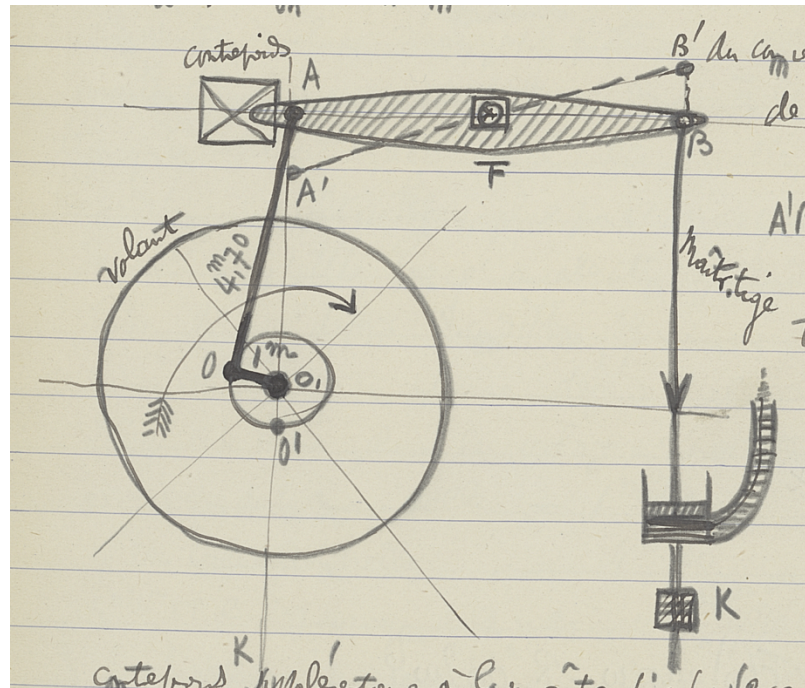


Figure 1-2 : Schéma de fonctionnement d'un balancier. Dessiné par Omer De Bast. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4490, ca. 1890.

Sont ensuite apparues différentes technologies de machines sans balancier, les machines avec balanciers étaient fort encombrantes. Le cylindre pouvait être vertical ou horizontal. La machine horizontale, quoique réalisée pour la première fois par Symington en Angleterre en 1802, doit attendre les années 1840 pour être adoptée en Angleterre puis en France. En effet, on lui reprochait à tort une ovalisation du cylindre sous le poids du piston⁷⁰.

On améliore ensuite les garnitures d'étanchéité des pistons en remplaçant le chanvre par des garnitures en métal, ce qui permet de réduire les frottements et les fuites (augmentant ainsi la performance de la machine, i.e. l'économie de combustible)⁷¹.

⁶⁸ *Ibid.*, p. 88.

⁶⁹ *Ibid.*

⁷⁰ *Ibid.*, p. 94.

⁷¹ *Ibid.*, p. 96.

Les systèmes de distribution (c'est-à-dire les systèmes de contrôle des phases d'admission et d'émission (ou échappement) de la vapeur) se perfectionnent ensuite. Dans la première moitié du XIX^e siècle, on remplace les systèmes à robinets par des systèmes à tiroir et à soupapes. Ces systèmes furent utilisés pendant tout le XIX^e. Le système de Corliss (1867) utilise 4 obturateurs cylindriques commandés par un même excentrique, ce qui permet d'ouvrir et fermer brusquement les orifices d'admission et émission (et non progressivement comme avec les tiroirs). On peut alors augmenter la vitesse de translation des pistons et ainsi la puissance de la machine à vapeur. Des vitesses moyennes de piston de 3-4 m/s étaient courantes vers 1890⁷².

Le Tableau A-3 en annexe propose une vue synthétique de la chronologie de développement de certaines des machines à vapeur les plus remarquables⁷³. Il présente aussi leurs caractéristiques principales. De manière à faire apparaître l'innovation technique, chaque incrément d'innovation est souligné. Le Tableau 1-3 montre l'évolution de la performance des machines à vapeur au fur et à mesure des innovations.

Tableau 1-3: Évolution de la performance des machines à vapeur (en kg de charbon par cheval vapeur- heure)⁷⁴.

Newcomen	8,40
Watt	2,90
Trevithick (haute pression)	1,50
Compound	0,90
Surchauffe	0,325

(Source : Bertrand GILLE (dir.), *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard, 1978, p. 791.)

1.5.2 La machine à vapeur à la fin du XIX^e siècle

Au début du XX^e siècle, le moteur à vapeur à piston présentait typiquement la configuration représentée schématiquement à la Figure 1-3. Le moteur comprenait les composants suivants, décrits dans le cours de Mécanique appliquée de Hubert et André⁷⁵ :

1. Un générateur de vapeur (G), aussi appelé chaudière comprenant un foyer de combustion, un réservoir partiellement rempli d'eau et capable de résister à la pression de la vapeur et une cheminée.
2. Un surchauffeur (S) qui peut être éventuellement contournée pour alimenter la machine en vapeur saturée.

⁷² Anne VAN NECK, *Les débuts...*, *op. cit.*, p. 99.

⁷³ Nous avons construit ce tableau sur base des informations de la thèse de Anne VAN NECK, *Les débuts de la machine à vapeur dans l'industrie belge (1800-1850)* (Unpublished doctoral dissertation). Université libre de Bruxelles, Faculté de Philosophie et Lettres, Bruxelles, 1975, p. 73-99.

⁷⁴ Ce tableau montre aussi l'effet de la surchauffe dont le bénéfice a été montré à l'Exposition de 1855. Voir Bertrand GILLE (dir.), *Histoire des techniques*, *op. cit.*, p. 790.

⁷⁵ H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, p. 369-379.

3. Une canalisation (T) équipée d'un ou plusieurs séparateurs ou sécheur (s et s') équipées de purgeurs automatiques qui enlèvent le liquide (« l'eau ») de la vapeur.
4. Un modérateur (M) permet d'ajuster, jusqu'à une interruption totale, le débit massique (« poids admis par unité de temps ») de vapeur d'eau dans la machine proprement dite.
5. Un cylindre, muni d'un piston sur lequel agit la vapeur. Comme c'est le cas à la Figure 1-3, le piston peut être à double effet. Dans ce cas, la vapeur agit successivement sur les deux faces du piston. Le mouvement du piston est rectiligne et par conséquent alternatif.
6. Des organes distributeurs qui contrôlent temporellement les séquences d'*admission* et d'*émission* de la vapeur dans et hors du cylindre. Entre la fin de l'*admission* et le début de l'*émission*, un poids de vapeur est emprisonné dans le cylindre et sa pression diminue au fur et à mesure que le volume du cylindre augmente. Cette fraction de la course s'appelle la *détente* ou expansion. Entre la fin de l'*émission* et le début de l'*admission*, un poids de vapeur constant est également enfermé dans le cylindre. Sa pression augmente au fur et à mesure que le volume diminue. Cette course de retour du piston s'appelle la *compression*. Les organes de distribution peuvent permettre une avance à l'*admission* et à l'*échappement*.

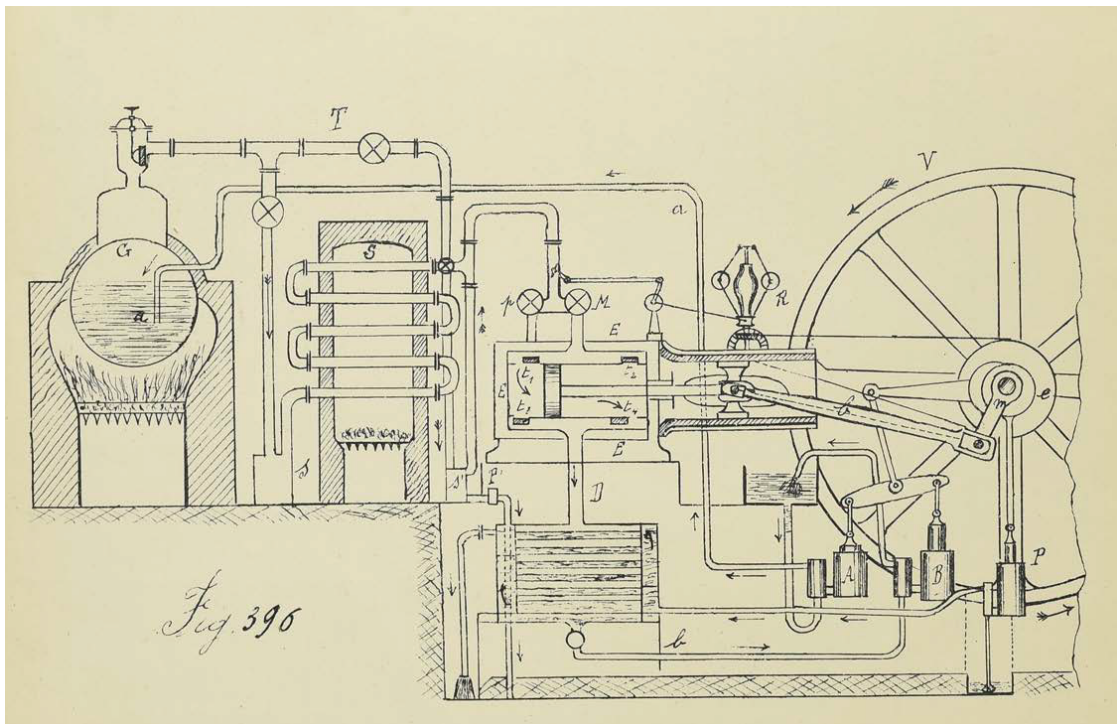


Figure 1-3 : Représentation schématique d'un moteur à vapeur à piston. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, p. 370.

Les principaux types d'organes de distribution sont les tiroirs, les robinets et les soupapes. Les *tiroirs* glissent alternativement sur la surface plane (glace ou table) aménagée sur le pourtour extérieur du cylindre. En glissant, les tiroirs découvrent des lumières. Sur la glace repose la

chapelle, une boîte qui est en communication avec la chaudière ou le condenseur. Les *robinets* s'apparentent aux tiroirs, mais au lieu d'avoir un mouvement rectiligne ils tournent autour d'un axe et glissent sur une surface circulaire. Les *soupapes* se soulèvent et retombent, découvrant et recouvrant des orifices circulaires. Ce système ne présente pas de frottement.

7. Un condenseur qui abaisse la pression de la vapeur et la ramène à l'état liquide. Il peut être à *injection* ou *par surface*. Dans le premier cas, l'eau de refroidissement est injectée sous forme de pluie dans la vapeur. Dans le second cas, l'eau de refroidissement circule dans des tuyaux autour desquels se trouve la vapeur à condenser. On peut aussi remplacer l'eau par l'air (airocondenseur de Fouché)
8. Une pompe (B) extrait l'eau liquide du condenseur et la ramène à la pression atmosphérique. Cette pompe, parfois appelée *pompe à air*, extrait aussi l'air dissous dans l'eau venant du moteur à piston et dans l'eau de condensation dans le cas des condenseurs à injection (l'air est dégazé lorsque cette dernière eau est chauffée).
9. Une pompe de circulation (P) alimente le condenseur en eau de refroidissement depuis un puits, une rivière, etc.
10. Une pompe alimentaire (C) ramène l'eau condensée dans la chaudière.

1.5.3 L'amélioration des performances des machines à vapeur à la fin du XIX^e siècle

Dans son mémoire présenté au Congrès International de Mécanique de Liège en 1904, l'Italien François Sinigaglia liste les moyens d'améliorer le rendement thermique des machines à vapeur⁷⁶ :

- 1) L'emploi d'enveloppes de vapeur
- 2) L'augmentation de la vitesse du piston en augmentant le nombre de tours de l'arbre
- 3) La détente fractionnée
- 4) La surchauffe

L'auteur fait remarquer que les moyens d'améliorer les performances se s'additionnent qu'en partie. Aussi, il y a des considérations mécaniques et économiques à prendre en compte.

⁷⁶ François SINIGAGLIA, « LA SURCHAUFFE appliquée à la machine à vapeur d'eau », dans les *Actes de la Section de mécanique appliquée du Congrès international des mines, ...*, Liège, La Meuse, 1905, t. II, p. 239-240.

1.6 La formation des ingénieurs à Liège depuis la création de l'Université jusque celle de sa Faculté technique

Il nous a semblé important de situer la création du Laboratoire de Mécanique dans l'historique général de la Faculté technique de l'Université de Liège⁷⁷. Nous commencerons cet historique avec la création de l'Université et l'arrêterons à la création de la Faculté technique en 1893.

L'Université de Liège est créée en 1817. Le règlement de 1816 dote l'Université d'un cours de métallurgie, ce qui peut être considéré comme l'origine de l'École d'ingénieurs. Un arrêté du Roi Guillaume des Pays-Bas du 13 mai 1825 prescrit l'enseignement de la chimie et de la mécanique appliquée aux arts et d'un cours d'exploitation des mines⁷⁸. L'École des mines de Liège est créée en 1825. Les premiers ingénieurs sortent de cette école en 1837, avec le grade de *conducteurs des mines*⁷⁹.

Il faut toutefois attendre la loi du 27 Septembre 1835 pour voir cette École complètement et sérieusement organisée. Cette loi stipule que l'exploitation des mines, la métallurgie et la géométrie descriptive à la construction des machines doivent être enseignées à la Faculté des Sciences. En 1836, ces enseignements (assurés par la Faculté des Sciences) sont réunis sous le titre d'Écoles des Arts et Manufactures et des Mines par un arrêté ministériel. La formation d'ingénieur dure 4 années. Dès 1838, les deux sections sont séparées. Une troisième section est créée le 23 février 1843 et rajoutée aux Écoles Spéciales : la formation d'ingénieur mécanicien. Les premiers *ingénieurs de mines* sont diplômés en 1841, ceux des *arts et manufactures* en 1842, les premiers *ingénieurs mécaniciens* en 1846 (et les *électriciens* en 1884)⁸⁰.

Un arrêté du 25 septembre 1852 régit l'organisation des Écoles Spéciales. La loi du 20 mai 1876 autorise toutes les universités du pays (universités de l'État comme celles de Liège et Gand et Universités libres comme celles de Louvain et Bruxelles) à délivrer des titres d'ingénieur (à l'exception du grade d'ingénieur des Mines qui ne pouvait être délivré uniquement par l'Université de Liège et ce jusqu'en 1890). Le diplôme d'ingénieur électricien fut instauré par la loi du 10 avril 1890.

La Faculté Technique prend son indépendance avec la loi du 30 juin 1893. Jusqu'à cette année, les Écoles Spéciales font donc partie de la Faculté des Sciences. A partir de la création de cette nouvelle

⁷⁷ Pour retracer cet historique, nous nous sommes principalement basés sur l'édition spéciale de la Revue Universelle des Mines publiée à l'occasion du centenaire de l'École : Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'École des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », *Edition de la Revue Universelle des Mines*, Liège, 1937, p.6-7 et p. 190-191.

⁷⁸ Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, *op. cit.*, p. 190.

⁷⁹ Association des Ingénieurs Sortis de l'École de Liège, *Mémorial du Cinquantenaire : 1847-1897*, Liège, Charles Desoer Imprimeur-Editeur, 1898, p. 13.

⁸⁰ *Ibid.*, p. 13.

faculté, les enseignements des Écoles spéciales seront assurés par les deux facultés⁸¹. Sa population ne fera que croître dans les années qui suivent sa création (Tableau 1-4). Les Écoles spéciales sont fréquentées par 918 élèves lors de l'année académique 1900-1901, soit 57% de la population totale de l'Université de Liège cette année-là (1602 élèves)⁸².

Tableau 1-4: Évolution de la population étudiante dans la Faculté des sciences et la Faculté technique entre 1893-1894 et 1900-1901⁸³

	Nombre d'élèves dans les Écoles spéciales			Répartition dans la Faculté technique						Admis à l'examen d'entrée
	Faculté sciences	Faculté techniques	Total	Année complémentaire en électricité	Mines	Arts	Mécanique	Électricité	Libres	
1893-94	178	184	362	62	55	35	11	21		
94-95	198	225	423	62	78	41	18	23	3	114
95-96	263	251	514	65	90	38	25	30	3	99
96-97	259	317	576	79	117	32	41	42	6	122
97-98	316	343	659	78	122	29	29	63	22	143
98-99	356	410	766	103	146	35	38	68	20	152
99-1900	412	445	857	107	178	30	33	89	8	163
00-01	407	511	918	110	206	24	31	111	29	185
01-02	425	526	964	84	232	19	41	102		177

A titre de comparaison, le Tableau 1-5 donne la population d'élèves mécaniciens dans plusieurs Écoles techniques allemandes et suisse vers 1901⁸⁴. Nous observons que les populations étudiantes y sont plus importantes qu'à l'Université de Liège et nous comprenons ainsi pourquoi elles sont souvent prises en exemple par la jeune Faculté technique de Liège.

⁸¹ La Faculté de sciences semble prendre en charge les cours plus fondamentaux préparant aux études techniques comme les cours de mathématiques (algèbre supérieure, calcul infinitésimal géométrie analytique), la cinématique et la statique, la mécanique élémentaire, la physique mathématique, la physique expérimentale, la chimie générale, et chimie analytique. Rapport de la Faculté technique de 1901, « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

⁸² *Ibid.*

⁸³ « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

⁸⁴ Rapport de la Faculté technique de 1901, « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

Tableau 1-5 : Population d'élèves mécaniciens dans 4 Écoles d'ingénieur d'Allemagne et de Suisse vers 1901

	Nombre d'élèves mécaniciens	Nombre d'assistants
Charlottenburg (Berlin)	1150	16
Munich	557	7
Stuttgart	313	5
Zurich	322	6

(Source : « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège)

1.7 Conclusions

Ce chapitre a tenté de présenter dans quel contexte se situe la création du Laboratoire de mécanique de l'Université de Liège et le développement de l'activité expérimentale autour de la machine à vapeur.

Tout d'abord, la région de Liège (« le Pays de Liège ») possède une activité industrielle très développée, notamment des industries charbonnières, sidérurgiques et de constructions mécaniques.

Aussi, le moteur à vapeur est largement présent dans cet environnement industriel. Il y a été introduit très tôt (il est utilisé dès le tout début du XIX^e siècle ; mais y aurait été construit déjà au XVIII^e siècle), la région possède de nombreux constructeurs de machines à vapeur et l'utilisation de cette technologie est en forte croissance dans la seconde moitié du XIX^e siècle (malgré le développement de technologies de la seconde révolution industrielle comme les moteurs à combustion interne et les moteurs électriques). Le besoin d'améliorer la performance des machines à vapeur (« l'économie ») pour diminuer le coût de revient de certaines productions industrielles, face à une concurrence de plus en plus internationale justifie les travaux de recherche sur ce type de machines.

Enfin, Liège forme des ingénieurs depuis les années 1830 et la population dans les Écoles d'ingénieurs (« Écoles spéciales ») est en forte croissance. Le succès de l'enseignement technique a probablement contribué à la création de la Faculté technique en 1893.

CHAPITRE 2 Les différentes étapes de la création du Laboratoire de mécanique

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la chronologie de la création du Laboratoire de Mécanique qui s'étend depuis les premières démarches effectuées par Dwelshauvers-Dery auprès des Autorités (vers 1870) jusqu'à la mise en service de l'installation expérimentale (en 1887). Nous mentionnerons également les déménagements que subira le Laboratoire en 1892 et en 1937. Avant toute chose, nous présenterons le parcours de Victor Dwelshauvers-Dery antérieur à la création du laboratoire, nous aborderons le rôle des *ateliers* à Liège (précurseurs du laboratoire). Nous donnerons aussi un aperçu des laboratoires similaires en fonctionnement dans le dernier quart du XIX^e siècle et nous discuterons de l'intérêt qu'il y avait à l'époque de disposer de tels laboratoires.

2.2 Le parcours de Victor Dwelshauvers-Dery avant la création du Laboratoire de Mécanique

Auguste Ernest Victor Dwelshauvers est né le 25 avril 1836 à Dinant (en Belgique). Il est le fils de Pierre Joseph Henry Dwelshauvers, instituteur en chef et de Marie Joseph Colette Sophie Gislaine Simon, également institutrice⁸⁵. Il épouse Françoise Félicie Dery, née en région bruxelloise en 1842 et décédée à Liège en 1897. Ils ont un fils, Victor Félix Dwelshauvers, né à Liège en 1869 et qui sera Docteur en Philosophie. Il épouse Anne Freda Kruger en Allemagne⁸⁶. Nous verrons plus tard qu'il participera aux travaux expérimentaux de son père. Victor Dwelshauvers signera ses travaux sous le nom de Dwelshauvers-Dery.

Victor Dwelshauvers-Dery est formé à l'Université de Liège. Il sera diplômé ingénieur mécanicien en 1861, dans une promotion comptant 11 étudiants dont de nombreux étrangers (de Norvège, d'Espagne et de Pologne).

⁸⁵ Acte de naissance du 26 avril 1836, Commune de Dinant.

⁸⁶ Les informations sur l'épouse et le fils de Dwelshauvers ont été trouvées sur le site de généalogie www.geneanet.org; Nous avons jugé intéressant de mentionner que la belle-fille de Dwelshauvers est allemande.



Figure 2-1 : Photos de Victor Dwelshauvers-Dery. A gauche : avant 1898. Association des Ingénieurs Sortis de l'École de Liège, Mémorial du Cinquantenaire : 1847-1897, Liège, Charles Desoer Imprimeur-Editeur, 1898. A droite : Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

Il se voit attribuer le cours de mécanique appliquée en 1868, alors enseignée par le mathématicien Brasseur. Pendant sa carrière⁸⁷ à l'Université, Dwelshauvers-Dery sera Professeur de mécanique appliquée et de physique industrielle (dès 1872⁸⁸).

En tant que chargé de mission officielle au nom du Ministre (probablement de l'éducation), il part chez Adolphe Hirn à Logelbach (Alsace) observer le fonctionnement d'un laboratoire de mécanique dans les années 1870. Il participe à quelques expériences sur la machine à vapeur (en 1873 et 1875) décrites par Hallauer et présentées à la Société industrielle de Mulhouse par Hirn le 11 mai 1876⁸⁹.

⁸⁷ Dwelshauvers-Dery devient professeur émérite en 1904. Son successeur est Herman Hubert. Celui-ci développera une activité de recherche expérimentale sur les moteurs à gaz utilisant les gaz des hauts fourneaux (notamment avec la société John Cockerill). Il équipera le Laboratoire de Mécanique d'un moteur à gaz. A son départ à la retraite, c'est A. du Chesne (un collaborateur proche de Dwelshauvers-Dery) qui reprend l'enseignement de la mécanique appliquée. A. du Chesne devient le directeur du nouveau laboratoire de thermodynamique appliquée créé vers 1937 au Val-Benoît. Ce Laboratoire déménagera dans les années 1990 sur le Campus du Sart Tilman où il s'y trouve encore actuellement.

⁸⁸ Hubert, Herman, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.I - Physique industrielle*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, p. 6.

⁸⁹ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum des Ingénieurs Enquête sur l'Enseignement de la Mécanique*, Liège, Marcel Nierstrasz, 1893, p. 37.

2.3 Les laboratoires de mécanique appliquée en activité dans la seconde moitié du XIX^e siècle

Avant 1870, il n’existait dans le monde aucun Laboratoire de Mécanique régulièrement organisé dans les Écoles⁹⁰. Certaines Écoles proposaient à leurs étudiants de s’exercer dans des ateliers annexés ou affiliés (tout au plus, « *quelques Écoles possédaient certains éléments d’un Laboratoire* »).

Les Laboratoires de Mécanique, sous leur forme moderne, ne se développent qu’après 1870⁹¹. Ces Laboratoires peuvent combiner des laboratoires de résistance des matériaux et des laboratoires d’essai de machines à vapeur (ou, mais moins couramment à cette époque, d’autres machines thermiques, comme des moteurs à gaz). Les laboratoires et les ateliers peuvent continuer à coexister. C’est le cas au New Central Institution in South Kensington de Londres (Professeur William Cawthorne Unwin) où les ateliers sont réservés aux élèves en première et deuxième années et les laboratoires aux élèves de deuxième et troisième année⁹².

L’article de Dwelshauvers-Dery sur Les Laboratoires de Mécanique⁹³ recense les Laboratoires de Mécanique dans les Écoles Techniques étrangères à la fin du XIX^e siècle. Étant donné que ce recensement avait pour objectif de justifier la création de son propre laboratoire, nous pouvons penser que l’auteur l’a voulu complet et que les principaux laboratoires sont cités. Ce recensement et les informations majeures qui l’accompagnent sont synthétisés au Tableau 2-1.

Tableau 2-1: Description des principaux Laboratoires de Mécanique (probablement les principaux en termes d’activité) à la fin du XIX^e siècle.

Lieu (Ville, Pays)	Date de création	Professeurs Industriels contemporains de Dwelshauvers-Dery	Remarques
Conservatoire des Arts et Métiers de Paris	1794 (Conservatoire) 1852-1854 (Laboratoire de Mécanique)	Tresca	Essais sur des instruments, appareils et machines soumis par des inventeurs
École polytechnique de Dresde	Aucun laboratoire mécanique n’existait en 1891	G. Zeuner	Les étudiants se rendent dans des ateliers pour étudier des machines en fonctionnement (notamment à vapeur)

⁹⁰ *Ibid.*, p. 39.

⁹¹ *Ibid.*, p. 40.

⁹² Robert FOX et Anna GUAGNINI, “Laboratories, Workshops, and Sites. Concepts and Practices of Research in Industrial Europe, 1800-1914.” *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 29, n° 1, University of California Press, 1998, p.103.

⁹³ Article publié dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, op. cit., p. 39.

École polytechnique de Munich créée en 1868 et renommée Haute École technique de Munich en 1877 ⁹⁴	Créé par Linde en 1876 ⁹⁵	Schroeter	Laboratoire d'essais des machines à chaleur. Une chaudière avec surchauffeur (20 K de surchauffe) Deux machines à 1 cylindre. Moteur à gaz de 8 CV.
Mason Science College de Birmingham	Créé en 1882	R.H. Smith	Laboratoire d'essais de machines à vapeur
Massachusetts Institute of Technology, Boston	Laboratoire d'essais de machines à vapeur créé en 1873-1874 sous la direction du Prof. Whitaker, agrandi en 1883 par le Prof. Lanza. En 1881, un Laboratoire d'essais de matériaux est ouvert	Peabody (Auteur d'un ouvrage sur la « Thermodynamique de la machine à vapeur ») Prof. Channing Whitaker	La place de la formation expérimentale au MIT est soulignée. Des essais sur la condensation dans les cylindres d'une machine à vapeur réalisés en 1873-74. Le laboratoire possède une machine et des chaudières. Machines Harris-Corliss de 16 CV (étude de régulateurs), une Porter-Allen de 80 CV (alimentée par chaudières Babcock et Wilcox), une machine de 8 CV pour l'étude de la distribution. Une machine de 150 CV (3 cylindres) installée vers 1891. Une machine de Brown de 40 CV vers 1891. Un des rares laboratoires à posséder un surchauffeur ⁹⁶ . Surface du laboratoire : 4300 m ² vers 1891
Constructeur Willans, Angleterre		Collabora avec les Prof. Unwin et Kennedy	Ses ateliers permettent de construire et tester ses machines.
Université de Leeds		Collabore avec le constructeur anglais H. Davey (machines pour l'élévation des eaux) Prof. Baar	Machines d'essais des matériaux, machines-outils, machine à vapeur compound, 2 condenseurs (surface/injection) et une chaudière.
Laboratoire de mécanique au Collège de	1878	Kennedy et Unwin	Le laboratoire d'Unwin possédait en 1888 un laboratoire de résistance de matériaux et d'essais sur une machine à vapeur à 2

⁹⁴ Robert FOX et Anna GUAGNINI, "Laboratories, Workshops...1800-1914, *op. cit.*, p. 100.

⁹⁵ Davantage d'informations sont données sur ce laboratoire dans le livre de Robert FOX et Anna GUAGNINI, "Laboratories, Workshops, and Sites. Concepts and Practices of Research in Industrial Europe, 1800-1914." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 29, n° 1, University of California Press, 1998, p.100. Le laboratoire de von Linde créé en 1875 avec un financement du gouvernement bavarois a permis de créer le premier laboratoire d'enseignement mécanique d'Allemagne. Linde y utilisait 2 moteurs à vapeur pour ses cours. Il quittera cette école quelques années plus tard pour créer son entreprise de réfrigération.

⁹⁶ Pour mieux comprendre le rôle d'un surchauffeur, voir la description de la Figure 1-3.

l'Université à Londres			cylindres (80 CV). Sa surface est de 1400 m ² .
Sibley College (Cornell university), à Ithaca, dans l'Etat de New-York. Il s'agit d'une École de Mécaniciens.	Entre 1875 et 1892 Se développe largement à partir de 1885. Hiram Sibley a donné environ ½ million de francs pour la création du collège entre 1883 et 1887	Prof. Thurston	Une vaste collection de modèles (dont ceux de Reuleaux); un budget de bibliothèque annuel (pour l'université) compris entre 75,000 et 90,000 francs ⁹⁷ Machine à vapeur expérimentale, chaudières pour alimenter des machines jusque 600 CV. Turbine hydraulique, une machine à gaz, 6 machines pour les expériences ;
Laboratoire de l'École polytechnique de Zurich	En 1870	G. Zeuner Veith (directeur des collections de mécanique)	L'installation comprend une chaudière et une machine à vapeur avec de nombreux degrés de liberté. Les étudiants n'ont pas le temps de faire des essais calorimétriques complets (face à la charge de cours théorique). L'installation ne se prête pas non plus à des essais scientifiques.
Section électrotechnique de Milan		G. Colombo	Vers 1891 : Machine à vapeur destinée à entraîner une dynamo est étudiée par la mécanique appliquée
École de Rome			1881 : tests sur moteurs à gaz
Liverpool		Hele Shaw	Machine à 3 cylindres de 150 CV, 2 types de chaudières et un banc d'épreuve de matériaux. Sa surface est de 900 m ² .

L'ouvrage de Fox et Guagnini nous éclaire également sur la dynamique de création des Laboratoires de Mécanique dans le dernier quart du XIX^e siècle⁹⁸. L'Allemagne est prise comme point de départ. Carl von Linde y crée en 1875 le premier laboratoire d'enseignement mécanique d'Allemagne à la *Technische Hochschule* de Munich. En 1888, on assiste à la *Technische Hochschule* de Berlin à des campagnes au profit de la recherche et de l'enseignement en laboratoire et contre la présence excessive des mathématiques dans la formation des ingénieurs mécaniciens. L'activité des laboratoires allemands change lentement⁹⁹. Ils continuent longtemps à travailler pour l'industrie locale, pour de la formation d'industriels et pour la recherche personnelle des professeurs. C'est dans les années 1880 et bien plus encore dans les années 1890 que la formation pratique des ingénieurs dans le domaine des techniques expérimentales est reconnue. C'est à partir de ce moment, que l'on reconnaît les laboratoires bien équipés pour l'enseignement comme des atouts majeurs des hautes écoles allemandes. Ces laboratoires renforceront l'image de la mécanique (et plus spécifiquement celle de l'étude des machines) comme discipline ayant pris son indépendance par rapport aux pratiques rudimentaires des ateliers et aux mathématiques utilisées dans l'étude théorique et abstraite de la mécanique.

⁹⁷ En. 1897, celui de l'Université de Liège était de 23245 francs. « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

⁹⁸ Robert FOX et Anna GUAGNINI, "Laboratories, Workshops... 1800-1914, *op. cit.*, p. 100-110.

⁹⁹ *Ibid.*, p. 101.

La pédagogie basée sur la pratique de laboratoire a donc été d'abord introduite avec succès en Allemagne. L'exemple sera ensuite suivi par d'autres pays, notamment l'Angleterre¹⁰⁰ avec Alexander Kennedy qui sera nommé professeur à l'*University College* de Londres en 1875 et inaugurera son laboratoire 3 ans plus tard. De nombreux autres laboratoires sont ensuite créés dans les années 1880 dans les Écoles anglaises, avec l'aide notamment de financements privés.

Les autres pays industrialisés partagent la même vision de l'importance des laboratoires dans l'enseignement, même si la création de laboratoires s'est faite à des rythmes inégaux et souvent plus lentement¹⁰¹. Les Laboratoires de Mécanique appliquée ont commencé à proliférer dans le dernier quart du XIX^e siècle, conférant du prestige académique aux départements qui en possédaient. Cela malgré quelques fois des marques d'opposition de professeurs de la « vieille école ».

La présence des laboratoires va aider les Écoles à attirer des étudiants¹⁰². Les écoles peuvent dès à présent offrir une formation pratique (notamment aux exercices de laboratoire, à l'apprentissage des instruments de mesures et à la normalisation) que l'apprentissage « sur le tas » dans l'industrie ne peut offrir. On observe alors que les écoles font la promotion de leurs laboratoires, au travers des calendriers académiques ou prospectus mettant en évidence des photographies des laboratoires (voir plus tard les Figure 2-12 et Figure 2-14).

Ainsi vers 1900, concluent Fox et Guagnini l'ingénierie mécanique est devenue une discipline respectée dans de nombreux pays possédant une éducation technique, avec un cursus qui comprend un enseignement théorique et pratique.

Kenneth Bertrams positionne¹⁰³ aussi la création des Laboratoires de Mécanique dans un processus de reconnaissance académique de la scientificité de l'ingénierie mécanique. Ainsi, il observe que la pratique a toujours existé dans la formation des ingénieurs mécaniciens, en atteste la présence des ateliers où les élèves de l'École des Arts et Manufactures apprenaient à utiliser des instruments. Par contre, la mécanique a « souffert d'un déficit de scientificité, associé à des insuffisances théoriques »¹⁰⁴, ce qui a donné lieu à une augmentation des cours théoriques dans la formation en diminuant délibérément la formation pratique. En ce qui concerne la recherche, les professeurs palliaient l'absence de laboratoire par des activités de consultations dans des entreprises industrielles ou finançaient

¹⁰⁰ *Ibid.*, p. 101-103.

¹⁰¹ *Ibid.*, p. 103.

¹⁰² *Ibid.*, p. 109.

¹⁰³ Kenneth BERTRAMS, *Universités & entreprises : milieux académiques et industriels en Belgique 1890-1970*, Bruxelles, Le Cri édition, 2006, p. 50-64.

¹⁰⁴ *Ibid.*, p. 58.

personnellement des travaux¹⁰⁵. Bertrams note que dans les années 1880, emboitant le pas à la chimie et puis à la physique, la mécanique acquiert sa reconnaissance académique comme discipline scientifique en investissant dans des « *laboratoires spécifiques* ». Ce mouvement de l'expérimentation scientifique comme pilier de la légitimité académique se propage aux Écoles spéciales belges et le Prof. Jules Boulvin de Gand est chargé par l'État de dresser un état des lieux de la question en 1888. Il visitera de nombreux laboratoires à l'étranger¹⁰⁶. Bertrams relève également que c'est Dwelshauvers-Dery le pionnier des revendications pour la création de Laboratoires de Mécanique, mais ce mouvement s'étend à d'autres universités belges, notamment celles de Bruxelles où un Institut de Mécanique est créé en 1899-1900 dans lequel l'enseignement se base en partie sur la pratique : visites d'usines, leçons dans les salles de machines d'industriels (machines à vapeur et moteurs à gaz)¹⁰⁷.

La conclusion de Bertrams va dans le même sens que celle de Fox et Guagnini¹⁰⁸. Ainsi, déclare-t-il, la scientificité et l'expérimentation « *qui se tenaient jusqu'alors en défiance mutuelle* » ont fortement institutionnalisé leur relation au début du XX^e siècle. Les sciences de l'ingénieur trouvent une place légitime au sein de l'université et le laboratoire renforce l'image des Facultés techniques auprès des industriels.

Les liens entre la mécanique appliquée et l'électricité à l'aube du XXI^e siècle sont également abordés par les auteurs, quoique leurs observations sont différentes. Ainsi Bertrams constate¹⁰⁹ que la mécanique a bénéficié de la diffusion de l'électricité qui a été un « *véritable moteur de la nouvelle vague industrielle basée sur l'innovation* ». A Liège, l'annexion de l'institut électrotechnique Montefiore à l'École des Mines a renforcé la « *rencontre de la scientificité et de la pratique expérimentale* ». Par contre, Fox et Guagnini déclarent¹¹⁰ que l'ingénierie électrique qui arrivera dans les années 1890 a bénéficié de la reconnaissance académique qui a pris tant de temps à l'ingénierie mécanique à obtenir. Elle s'appropriera à son avantage de nombreuses pratiques de l'ingénierie mécanique, notamment la pratique expérimentale dans l'enseignement. Nous verrons à la section 5.4 que l'étude de la thermodynamique bénéficiera des développements récents en électricité, notamment le développement de la mesure de températures par thermocouple.

Le cas du Laboratoire de mécanique du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris est également intéressant quoique fort différent, car il fut créé bien avant 1870. Il a certainement largement

¹⁰⁵ *Ibid.*, p. 60.

¹⁰⁶ *Ibid.*, p. 60.

¹⁰⁷ *Ibid.*, p. 61-63.

¹⁰⁸ *Ibid.*, p. 63-64.

¹⁰⁹ *Ibid.*, p. 64.

¹¹⁰ Robert FOX et Anna GUAGNINI, "Laboratories, Workshops...1800-1914, *op. cit.*, p. 110.

inspiré Dwelshauvers-Dery dans son projet de Laboratoire¹¹¹. Le Conservatoire National des Arts et Métiers est sollicité dès 1794 pour des expertises réalisées pour le compte de services publics et dans la première moitié du XIX^e siècle pour des travaux expérimentaux réalisés pour le compte de Ministères¹¹². C'est toutefois avec le Général Morin (nommé Administrateur en 1849) que la pratique des expertises technico-scientifiques se popularise et s'officialise. Il inaugure un laboratoire expérimental de mécanique en 1856. Les industriels et les inventeurs pouvaient ainsi faire valider leurs idées par une institution scientifique. Les expertises dans le domaine de la résistance des matériaux et des machines à vapeur sont réalisées par le Prof. Tresca et celles sur les moteurs hydrauliques par Morin. Les demandes d'expertises proviennent principalement des directions techniques des Ministères, des autorités locales et des grandes compagnies de chemin de fer. Il y a davantage de demandes d'expertises dans le domaine de la résistance des matériaux et de l'agroalimentaire que dans celui de la mécanique industrielle. Dès 1856, le Laboratoire de Mécanique est ouvert au public le dimanche et certains soirs. Dans le but de diffuser les connaissances acquises, des *Annales* sont publiées régulièrement de 1861 à 1880, et contiennent en grande majorité les procès-verbaux des expertises. On y retrouve beaucoup de travaux sur la résistance des matériaux (lié à l'essor des constructions métalliques) et sur le chauffage et la ventilation des bâtiments publics (dont Morin devient expert). Dès la fin des années 1860, les demandes d'expertises mécaniques diminuent, les grandes entreprises et compagnies de chemins de fer s'équipent de moyens d'essais, et d'autres Écoles concurrentes pratiquent des essais de résistance des matériaux. A cela s'ajoute la dégradation du bâtiment qui abrite le laboratoire (imposant une diminution de son activité) et la mort de Morin en 1880 ce qui amène à la suspension des activités du laboratoire le 24 décembre 1884. Dwelshauvers-Dery s'en indigne publiquement en 1891. En 1893, le ministre du commerce de l'époque justifie le peu d'intérêt à remettre en activité le Laboratoire de Mécanique, alors que l'Allemagne compte 17 laboratoires d'essais mécaniques et l'Angleterre 7 et que ceux-ci ont été fondés avec des moyens financiers non comparables à ceux reçus par le Laboratoire de Mécanique en 1850.

¹¹¹ Dans son article sur les Laboratoires de mécanique publié dans son *Referendum*, le Conservatoire National des Arts et Métiers est bien la première Ecole qu'il prend le soin de décrire. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER *Referendum des Ingénieurs Enquête sur l'Enseignement de la Mécanique*, Liège, Marcel Nierstrasz, 1893, p. 4.

¹¹² L'historique du Laboratoire de Mécanique du Conservatoire National... est un résumé de l'article de Claudine FONTANON, « Le laboratoire expérimental de mécanique », dans : Michel Le Noel et Raymond Saint-Paul (dir.), *Le Conservatoire National des Arts et Métiers au cœur de Paris : 1794-1994*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Délégation à l'Action Artistique de la Ville de Paris, 1994, p. 171-176.

2.4 L'enseignement pratique de la Mécanique à l'Université de Liège avant 1870

Comme beaucoup d'autres Écoles techniques, l'École des Arts et Manufactures de l'Université de Liège externalisait les activités pratiques dans un atelier. « *A Liège, depuis 1836, l'Université possédait une machine verticale de dix tonnes pour l'essai des matériaux, des indicateurs de Mac Nought, des freins de Prony, et dans le contrat avec le directeur de l'atelier, il était stipulé que la machine motrice à vapeur, type Watt à balancier, devait être essayée au frein* »¹¹³.

Nous retranscrivons ici la description, d'après Lebroussart, des bâtiments de l'Université réservés à l'École des Arts et Manufactures et des Mines en 1840¹¹⁴ :

« Le rez-de-chaussée renferme un atelier de construction de machines en pleine activité où les élèves sous la direction du Professeur de Mécanique appliquée, et sous la conduite du mécanicien, sont initiés aux procédés des arts et se familiarisent avec les applications en grand des théories qui leur sont enseignées.

Le premier étage, dans toute son étendue, est destiné au musée des machines et aux collections de modèles. Les machines ingénieuses qu'il renferme, au lieu d'être posées immobiles et inactives, comme des énigmes indéchiffrables pour le visiteur, sont mues par les forces transmises de l'atelier, ce qui permet aux élèves d'en étudier le jeu et d'en calculer les effets. Cette idée neuve et féconde, qui ne pouvait se réaliser qu'à raison du voisinage de l'atelier, distingue le musée de mécanique de Liège des autres collections du même genre.

Au second étage, se trouvent des salles d'études pour les élèves de chaque catégorie, qui y travaillent sur des pupitres dont ils conservent la clef. Ces salles sont éclairées au gaz et chauffée par la vapeur de la machine qui fonctionne dans l'atelier. Plus loin. Se trouve une vaste salle pour les travaux graphiques, laquelle est parfaitement éclairée. Elle a été conçue dans des vues hygiéniques, pour délasser les élèves, qui, longtemps assis dans les salles d'études, viennent y travailler debout.

Tout, dans cet étage est si bien combiné, qu'un surveillant du bout du corridor où se trouve son cabinet vitré, peut maintenir la discipline et inspecter tout ce qui se passe dans l'école, soumise à un régime intérieur analogue à celui de l'Ecole Polytechnique, avec cette différence qu'ici les élèves sont externes »

¹¹³ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum... Mécanique, op. cit.*, p. 37.

¹¹⁴ Cette description a elle-même été retranscrite dans Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'Ecole des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », *Edition de la Revue Universelle des Mines*, Liège, 1937, p. 190.

Cet atelier (de construction de machines et d'instruments de précision) aurait été établi par un arrêté de 1840¹¹⁵. On en apprend davantage sur l'organisation de cet atelier dans un arrêté ministériel de 1854¹¹⁶. L'atelier est présenté comme un « *atelier de construction des machines et instruments de précision établi auprès de l'université* » ou comme « *un atelier de construction à l'école des arts et manufactures* ». L'atelier est dirigé par deux directeurs, l'un étant constructeur-mécanicien et l'autre ingénieur civil mécanicien¹¹⁷. Ils reçoivent un traitement annuel de 4000 francs. La convention stipule que « *tout ce qui sera fait à l'atelier par les élèves mécaniciens, sera pour le compte du musée ou de ceux des élèves qui en feraient la demande* ». Les modèles produits dans l'atelier doivent être peints en noir et vernis et enrichissent une collection, collection pour laquelle les directeurs prendront une assurance. Nous reviendrons un peu plus tard dans ce chapitre sur l'importance accordée aux collections de modèles.

Les élèves disposent d'étaux et d'un tour. Des ouvriers habiles sont à leur disposition, notamment pour la fabrication de machines ou pièces de machines à l'occasion des examens. Les directeurs doivent veiller à l'entretien des machines et des modèles de l'atelier et du musée. L'atelier comprend une chaudière et une machine à vapeur. Il est également équipé d'un atelier de menuiserie. La cour comporte une bêche d'eau pour les expériences hydraulique. L'atelier comprend une salle de dessins pour les élèves mécaniciens.

La machine à vapeur serait de type Watt à balancier¹¹⁸. Dans le contrat avec le directeur de l'atelier, elle doit être essayée au frein. L'atelier dispose de freins de Prony et d'indicateurs de Mac Nought.

Notons également qu'à cette époque, l'Université possède une machine de 10 tonnes pour l'essai des matériaux¹¹⁹.

On retrouve également une description de l'atelier dans un Journal de voyage rédigé par deux élèves de l'École des Mines de Paris en 1857, à l'occasion d'un voyage réalisé en Belgique et en

¹¹⁵ Hubert dresse un cours historique de ces cours. Voir Herman HUBERT, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.I - Physique industrielle*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, p. 6.

¹¹⁶ « Arrêté ministériel approuvant une convention nouvelle conclue avec les sieurs Pirotte et Van Hoorick pour l'entreprise de l'atelier de construction des machines et instruments de précision, établi auprès de l'école des arts et manufactures, à Liège (17 août 1854) », Situation de l'Enseignement supérieur donné aux frais de l'Etat: Rapport triennal présenté aux chambres législatives par M. Le Ministre de l'Intérieur (années 1853, 1854 et 1855), Annexes, 1854.

¹¹⁷ Il s'agit d'Eugène Vanhoorick, Ingénieur mécanicien diplômé en 1849 et originaire de Luxembourg. Association des Ingénieurs Sortis de l'École de Liège, *Mémorial du Cinquantenaire : 1847-1897*, Liège, Charles Desoer Imprimeur-Editeur, 1898.

¹¹⁸ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, Julien, *Referendum des Ingénieurs Enquête sur l'Enseignement de la Mécanique*, Liège, Marcel Nierstrasz, 1893, p. 39. Voir aussi la Lettre du 17 novembre 1890 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹¹⁹ *Ibid.* et *Ibid.*

Angleterre dans le cadre de leur formation. On y apprend que la machine entraîne différents tours de l'atelier. Elle est équipée d'un tiroir à mouvement circulaire (« papillon ») qui permet d'ajuster la quantité de vapeur qui rentre dans le cylindre (Figure 2-2). Elle possède aussi un régulateur que l'élève « regarde comme mauvais ». Il consiste en une roue à ailettes immergée dans un réservoir d'eau. La roue « éprouvera une résistance plus forte de la part de l'eau, quand la machine marche plus vite », ce qui entrainera une fermeture partielle de l'introduction de vapeur.

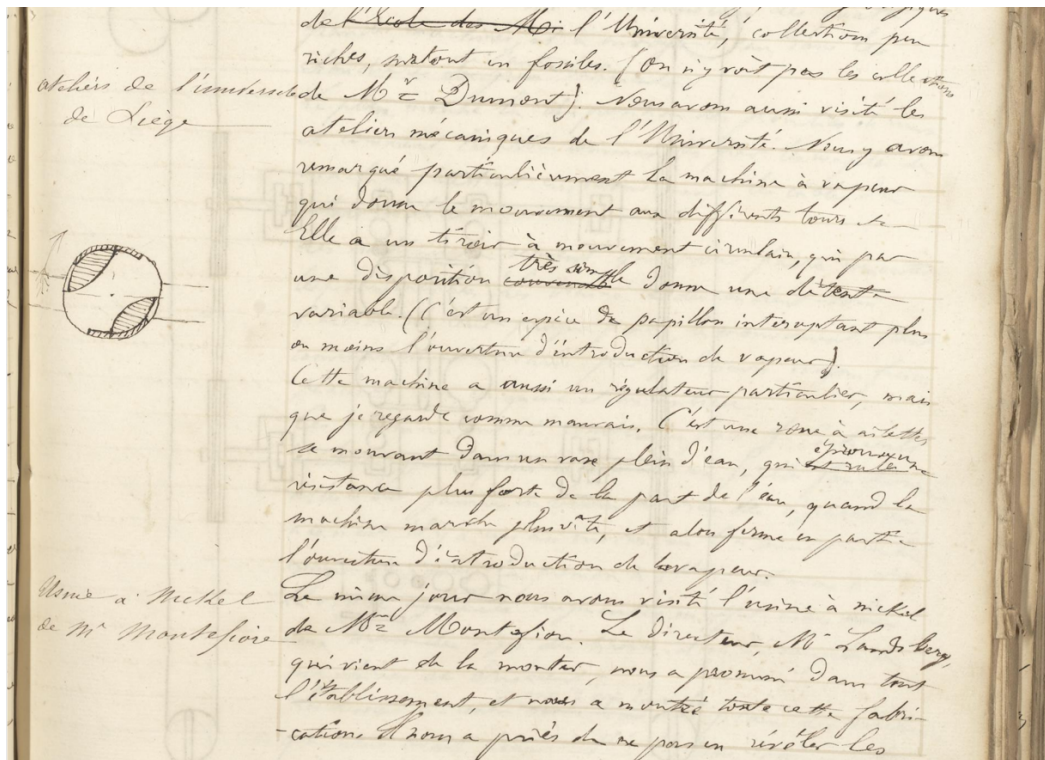


Figure 2-2 : Emile Louis GATELLIER, (*Journal de*) voyage en Belgique et en Angleterre par MM. Peslin, élève ing. et Gatellier, élève externe, J 1857 (182), Fonds manuscrit de la Bibliothèque de l'École des Mines, Paris.

2.5 De l'intérêt des laboratoires pour l'enseignement et la recherche dans le domaine de la mécanique appliquée

Victor Dwelshauvers-Dery et Julien Weiler (Ingénieur du Matériel des Charbonnages de Mariemont et de Bascoup) organisent en 1892 un Referendum largement annoncé par la Presse. Ce Referendum posait la question de l'utilité des Laboratoires de Mécanique dans la formation des ingénieurs. Les avis recueillis seront réunis dans une brochure comprenant également un article sur les Laboratoires de Mécanique par V. Dwelshauvers-Dery et une lettre de J. Weiler dans laquelle il décrit le manque de formation pratique des ingénieurs. Les avis sont regroupés en plusieurs groupes :

- « I. Professeurs de l'enseignement technique, Ingénieurs et Industriels

- II. *Ceux issus de l'enseignement autre que technique: Professeurs à tous les degrés; Professions libérales et diverses*
- III. *Articles de journaux* »

Au moment d'écrire ce manuscrit, seul l'article sur les Laboratoires a été analysé, mais il comprend déjà de nombreuses informations sur les laboratoires étrangers (que nous avons présentées à la section 2.3. Cet article reprend également les témoignages de plusieurs savants et industriels de l'époque que nous analysons plus en détail dans cette section.

2.5.1 Des Laboratoires pour l'enseignement

Globalement, les témoignages soulignent que les Laboratoires de Mécanique permettent de former les étudiants à la pratique qu'ils emploieront dans leur carrière d'ingénieur (pouvoir calculer des rendements de chaudière ou de machines, savoir régler la distribution d'une machine à vapeur, etc.). Ainsi, Haton de la Goupillère, Directeur de l'École supérieure des mines de Paris déclare¹²⁰ :

« pour que les élèves des Écoles techniques pussent acquérir une notion concrète et réelle de ce que doit être, dans la pratique courante, un essai de machine à vapeur ou de résistance de matériaux. »

Linde¹²¹ insiste également sur l'intérêt de la pratique expérimentale par les étudiants, afin de leur permettre en comparant des mesures à des données théoriques de faire une « *juste application de la théorie* ». La difficulté étant que le nombre de conditions d'utilisation étant tellement important, « *les résultats de la théorie ne se prêtent pas à une application immédiate* ». Il déclare aussi que les travaux expérimentaux des étudiants développeraient leur indépendance d'esprit et leur connaissance des instruments et appareils. Linde évoque l'intérêt pour les étudiants de réaliser des essais sur des machines à vapeur (essais à l'indicateur, essais au frein, essais sur la combustion et la vaporisation, essais d'injecteurs et éjecteurs), des essais sur des modèles de moteurs hydrauliques, des essais sur des moteurs à gaz ou à air chaud (testés pour le compte de constructeurs), des essais sur des machines et appareils quelconques.

¹²⁰ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum... Mécanique, op. cit.*, p. 10.

¹²¹ *Ibid.*, p. 35.

2.5.2 Des Laboratoires pour la recherche dans le domaine de la mécanique appliquée

Outre la formation des ingénieurs, ils permettent également de « *faire progresser la science expérimentale de la machine à vapeur* », notamment en donnant l'occasion aux élèves de faire des recherches originales¹²². Ainsi Haton de la Goupillière, déclare¹²³ :

« pour qu'un certain nombre d'hommes se vouant à la science trouvassent à leur disposition les moyens nécessaires pour approfondir et éclaircir peu à peu les questions encore si obscures relatives à bien des points de la mécanique appliquée et particulièrement à la théorie pratique des machines à vapeur. Ces dernières ne semblent pas devoir faire à l'avenir des progrès bien décisifs par les recherches abstraites de calculateurs isolés. Il faudra réunir pour cela l'outillage et l'esprit expérimental »

Linde déclare également qu'à l'époque de la création de son laboratoire (1876), l'étude théorique des machines du point de vue de la physique mathématique et de la mécanique pure était très avancée, ce qui n'était pas le cas de l'étude expérimentale du mouvement des machines et de leur mode réel de fonctionnement¹²⁴.

Le double intérêt d'un Laboratoire pour l'enseignement et pour la recherche est également souligné par G. Zeuner directeur de l'École polytechnique de Dresde¹²⁵ :

« ... Il ne peut y avoir de doute sur l'utilité, pour les Ecoles techniques supérieures, d'avoir un laboratoire pour fournir aux étudiants l'occasion de se livrer à des essais de machines à vapeur et pour provoquer des recherches spéciales à ce sujet »

Alors que l'intérêt d'un Laboratoire de Mécanique appliquée pour la formation des étudiants et la recherche est largement souligné, le Prof. Peabody du MIT relève également l'intérêt pour le professeur lui-même¹²⁶.

« Pour le professeur, le Laboratoire présente le grand avantage de le faire Ingénieur et de le conserver tel, de l'empêcher de se rouiller, comme nous disons, c'est-à-dire de s'embourber dans les vieilles ornières, tout autant que de s'égarer dans des délires d'imagination. C'est là qu'il peut le mieux apprendre à expérimenter, pour appliquer ensuite ses méthodes dans la pratique ; et là aussi qu'il peut avoir la mesure du succès

¹²² Propos de Lanza dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, op. cit., p. 47.

¹²³ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum... Mécanique*, op. cit., p. 10.

¹²⁴ *Ibid.*, p. 35.

¹²⁵ *Ibid.*, p. 10.

¹²⁶ *Ibid.*, p. 12-13.

de ses leçons orales. J'ose dire que l'occasion de mettre à l'épreuve les méthodes qu'il peut imaginer, l'empêche de devenir timide et le rend en même temps conservateur... »

2.5.3 Des Laboratoires pour se rendre indépendant d'un site industriel ou d'un atelier de fabrication de machines

Nous pourrions nous poser la question de la pertinence de réaliser des essais de machines à vapeur dans un laboratoire (d'université) plutôt que dans un environnement réel d'utilisation ou dans un atelier de fabrication. Hirn¹²⁷ donne des éléments de réponse en évoquant la difficulté de faire des essais sur des machines en fonctionnement (en raison du coût et du temps nécessaires à de tels essais, l'industriel ne voit pas l'intérêt pratique immédiat). On observe et on attend les phénomènes, alors qu'on préférerait les provoquer et les répéter. Sur un moteur de laboratoire, on peut « *répéter à volonté les essais les plus divers, les plus opposés, les plus contradictoires...* ». Le laboratoire permet de « *donner une base scientifique à une partie de la pratique que l'on acquiert que fort difficilement, et souvent sans méthode, dans les ateliers* »¹²⁸. M. Lanza rajoute¹²⁹ :

« ... une autre fonction de ces Laboratoires... c'est celle d'entreprendre et de mener à bonne fin des recherches systématiques pour la solution des problèmes relatifs à l'art de l'Ingénieur ; et cela peut se faire dans un laboratoire, tandis que ce n'est qu'avec de grandes difficultés que cela se ferait dans un atelier de constructions de machines, ou dans une manufacture quelconque. La publication de ces résultats ajoute à la richesse du domaine public des Ingénieurs. »

Aussi, déclare Gustave Schmidt de Prague, « *le but pratique des moteurs industriels dictant leur construction, ne permet que dans fort peu de cas d'introduire cette variabilité dans les organes qui est nécessaire pour décider exactement dans nombre de questions...* »¹³⁰. Le moteur expérimental, sorte de prototype, palie ce problème.

Hirn souligne encore l'intérêt de tester une machine en laboratoire, c'est-à-dire en dehors d'une installation réelle¹³¹ :

¹²⁷ *Ibid.*, p. 21.

¹²⁸ *Ibid.*, p. 26.

¹²⁹ *Ibid.*, p. 47.

¹³⁰ *Ibid.*, p. 21-22.

¹³¹ *Ibid.*, p. 21.

« Je sais par expérience combien il est rare de trouver dans les établissements industriels des chefs qui veuillent prêter leurs moteurs à des essais dont ils n'entrevoient pas l'utilité pratique immédiate, dont ils ne voient que le côté gênant et dispendieux.

...

Il me fallait accepter les machines telles qu'elles étaient, m'accommoder des dispositions locales, souvent les plus incommodes, au point de vue de mes recherches : il fallait me borner au rôle d'*observateur* et *attendre* les phénomènes au lieu de remplir celui d'*expérimentateur* et de les *provoquer*, de les *répéter* à volonté. Toutes les difficultés que j'indique ici disparaîtront chez vous, puisqu'on aura un moteur disposé *ad hoc*, sur lequel pourront se répéter à volonté les essais les plus divers, les plus opposés, les plus contradictoires... »

La dépendance à un site d'utilisation industrielle de la machine à vapeur n'est pas uniquement défavorable à la recherche. Par exemple, les cas de Doerfel (Prague), Schroeter (Munich) et Witz (Lille) sont rapportés : ils ont pu bénéficier de l'aide d'industriels qui ont mis à leur disposition des machines, mais il y a un danger que l'enseignement devienne dépendant de la bonne volonté de ces mêmes industriels.

Alexander Kennedy qui créera un laboratoire à l'University College de Londres (le premier laboratoire anglais pour l'enseignement expérimental) est convaincu que la préparation d'un ingénieur doit comporter une formation pratique de haut niveau, qu'il ne peut acquérir que dans un laboratoire d'une haute école et pas chez un constructeur de machines dont les intérêts viendraient vite s'immiscer à la formation¹³². Dans ces laboratoires, les étudiants seront formés aux techniques expérimentales et à l'application de méthodes rigoureuses à l'analyse de problèmes techniques.

Les avis peuvent être plus nuancés. C'est le cas notamment du constructeur anglais Willans qui souligne l'intérêt de suivre les performances d'un grand nombre de machines différentes, notamment des machines en opération, ce qui n'est pas possible dans un Laboratoire¹³³. Ici, c'est bien la complémentarité de la recherche expérimentale en laboratoire et de la recherche expérimentale in-situ (ce que l'on appellerait aujourd'hui le « monitoring d'installations ») qui est énoncée.

« Je crois aussi que ces Laboratoires peuvent être d'un grand secours pour notre profession ; mais je crois aussi que cette utilité est restreinte à la mise en lumière des lois générales qui affectent l'économie des machines. Sous plusieurs rapports, les constructeurs de machines qui veulent s'en donner la peine disposent de moyens plus

¹³² Robert FOX et Anna GUAGNINI, "Laboratories, Workshops...1800-1914, *op. cit.*, p.102.

¹³³ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, *op. cit.*, p. 13.

complets que ceux qui travaillent uniquement dans les Laboratoires, parce que machines après machines passent par leurs mains ; de la sorte, s'ils en ont le goût et la capacité, ils peuvent suivre de près l'effet de tout changement ou de tout perfectionnement ; tandis que dans les Laboratoires, on ne dispose généralement que d'un ou deux types de machines. ... les progrès seraient plus rapides si tous les conducteurs de machines tenaient soigneusement note des résultats obtenus avec des types divers, que s'ils doivent résulter uniquement des travaux faits dans les laboratoires... »

Fliegner de l'École polytechnique de Zurich émet des doutes sur l'intérêt des Laboratoires pour le progrès de la science¹³⁴.

« Les essais scientifiques exigent un régime thermique aussi parfait que possible et qu'il est difficile d'obtenir dans la marche fréquemment interrompue d'une machine de Laboratoire. Pour faire des essais comparatifs à des conditions variées il faut beaucoup de temps, et il faudrait des collaborateurs habiles, expérimentés et dignes de confiance »

Ce témoignage de Fliegner est intéressant, car il souligne également le rôle important joué par les « *collaborateurs* » dans le laboratoire. Il pourrait s'agir des machinistes, assistants, préparateurs, étudiants. Nous chercherons plus tard à identifier qui sont ces collaborateurs dans le cas du Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège.

2.5.4 Synthèse

Ces quelques témoignages de contemporains de Dwelshauvers-Dery, professeurs d'université et industriels confirment l'intérêt à la fois pour la recherche et pour l'enseignement de disposer d'un laboratoire d'essais de machines thermiques. Des essais dans un environnement contrôlé sur des machines éventuellement conçues à cet effet (qu'on appellerait aujourd'hui des « prototypes ») pallieraient de nombreuses limitations des essais réalisés sur des installations en service ou dans des ateliers. Toutefois, les essais en laboratoire peuvent aussi compléter l'information obtenues sur base des essais sur des machines en fonctionnement réel. C'est bien la complémentarité entre essais *en laboratoire* et essais *in situ* qui est évoquée ici et qui reste bien présente aujourd'hui dans l'étude de la thermodynamique appliquée. Enfin, on notera également le rôle important qui est reconnu aux différents collaborateurs d'un laboratoire.

¹³⁴ *Ibid.*, p. 34.

2.6 Premières sollicitations et démarches pour la création d'un laboratoire de mécanique pour l'enseignement (1870-1879)

Dans son article sur les Laboratoires de Mécanique de 1891 (repris dans le Referendum de 1893)¹³⁵, Dwelshauvers-Dery déclare solliciter les autorités depuis 1870 pour la « *fondation d'un Laboratoire de mécanique comprenant résistance de matériaux et usage des instruments relatifs aux essais de machines, tels que indicateurs, freins, etc.* ». C'est après s'être lié d'amitié à Hirn en 1873, qui l'a initié à la science expérimentale des machines, qu'il développe sa vision de ce que doit être un laboratoire d'essais de machines à vapeur. Dwelshauvers-Dery prétend qu'à sa connaissance aucun laboratoire similaire n'existait à cette époque (voir Tableau 2-1).

Une note de Dwelshauvers-Dery retrace l'historique de ses démarches pour la création de son laboratoire¹³⁶. Nous reprenons ici la chronologie et les éléments principaux de cette note.

La première demande date du 19 mars 1875 dans une lettre adressée par Dwelshauvers-Dery à l'Administrateur. L'auteur de la lettre répond à la demande de l'Administrateur de donner son avis sur le meilleur parti à tirer, pour son enseignement, d'un atelier qui redevenait libre suite à l'échéance d'une convention. Il pourrait s'agir de la Convention établie en 1854 et mentionnée plus haut.

Les premières déclarations officielles sur la nécessité de créer un Laboratoire de Mécanique à l'Université de Liège remontent à 1875. Dwelshauvers-Dery est chargé par l'Administrateur d'étudier la question de la formation pratique des ingénieurs mécaniciens au sein même de l'Université. Il émet en juillet 1875, devant le Conseil de l'École, l'avis de créer un Laboratoire.

« L'affaire tomba à l'eau », mais la question resurgit en 1877, lorsque Dwelshauvers se voit exiger la rédaction d'une note présentant les besoins de son enseignement en termes de matériel et locaux. Il réclame un laboratoire de matériaux et un « *aménagement de laboratoire général sans machine à vapeur spéciale* ».

En 1879, son collègue Holzer et lui-même reçoivent chacun 10000 frs pour créer des collections et des laboratoires. Nous verrons plus loin que cette somme correspond à peu près à 6 à 10 années de salaires d'un technicien de laboratoire. M. Holzer utilise cette somme pour démarrer sa « collection de cinématique ». Etant donné l'année et les termes de « *collection de cinématique* » employés, nous pensons qu'il pourrait s'agir d'une collection de modèles cinématiques de Reuleaux dont l'Université de Liège possède encore actuellement une collection. Six parmi les modèles de cette collection sont

¹³⁵ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, op. cit., p. 37.

¹³⁶ « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

conservés au Laboratoire de Thermodynamique actuel. La Figure 2-3 représente des vues de ces modèles, sur lesquels nous reviendrons plus tard (section 4.6.4)



Figure 2-3 : Deux modèles de la collection de modèles cinématiques de Franz Reuleaux construits dans le dernier quart du XIX^e siècle (modèles 13 et 17 selon la taxonomie aphanumérique employée dans le catalogue du constructeur Voigt). Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège. Photo par l'auteur (Novembre 2021).

Nous retrouvons une photographie des collections de modèles prise à une date inconnue, mais probablement dans les locaux qu'occupaient la Faculté technique avant son transfert en 1937 sur le site du Val-Benoît. On y distingue le mécanisme de Roots, très probablement celui encore présent actuellement au Laboratoire de thermodynamique (Figure 2-3). Cette photographie atteste également de l'importance qui est donnée aux collections dans la Faculté technique (leur mise en valeur, mais aussi le fait d'être photographiée).



Figure 2-4 : Collection de modèles. L. MORIN, Université de Liège - Faculté technique, Photographie, 35 x 45 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43234, s.d. © Musée Wittert ULiège.

2.7 La première machine du Laboratoire et l'exposition Nationale de Bruxelles en 1880

Dwelshauvers-Dery estime que les 10000 francs octroyés par la Faculté ne lui permettront pas de mettre en place un laboratoire de résistance de matériaux. Il suit alors le conseil de son ami Adolphe Hirn de se tourner vers l'étude de la machine à vapeur. Dwelshauvers-Dery acquiert (gratuitement ou contre rétribution, nous ne le savons pas) une machine à vapeur qui avait été exposée à l'Exposition nationale de Bruxelles en 1880 (Figure 2-5).



Figure 2-5 : « Galerie des Machines » à l'Exposition Nationale de 1880. On peut observer au centre de l'image le volant d'inertie d'une machine à vapeur (grande roue à 6 rayons)¹³⁷.

Dwelshauvers-Dery précise que la machine en question a attiré l'attention des journaux scientifiques anglais. Le journal *Engineering* présente effectivement en 1880 un descriptif d'un moteur expérimental conçu et construit par la Maison Beer de Jemeppe pour l'Université de Liège et exposé (en fonctionnement) à l'exposition de Bruxelles¹³⁸. La Figure 2-6 montre des gravures, en élévation et en plan, de la machine (d'autres schémas sont donnés en Annexe). Nous reviendrons plus tard sur le

¹³⁷ <https://belgique-insolite-et-occulte.blogspot.com/2016/10/bruxelles-exposition-nationale-1880.html>, consulté le 31 août 2022.

¹³⁸ « Experimental Engine for the Liege School of Mines. Constructed by M. Charles BEER, Engineer, Jemeppe », *Engineering*, Décembre 1880, p. 516-517. On retrouve une représentation similaire, ainsi que d'autres représentations et une description des composants dans A. RAVEN, *Exposition Nationale 1880. Exposition de la Maison Beer A Jemeppe, Près Liège. (Belgique)*, Liège, Imp. et Lith. de J. Daxhelet, 1880.

descriptif technique de cette machine. Notons simplement qu'il ne s'agit pas d'une machine destinée à une utilisation commerciale, mais bien d'une machine de laboratoire offrant de multiples degrés de liberté. Il est possible de régler les degrés de détente et de compression ainsi que les avances à l'admission et à l'émission¹³⁹. Nous ne savons pas si l'utilisation de telles machines était courante, mais nous relevons que le professeur Unwin à Londres utilisait avec ses étudiants de troisième et dernière année une machine à vapeur spécialement conçue pour la recherche en thermodynamique¹⁴⁰.

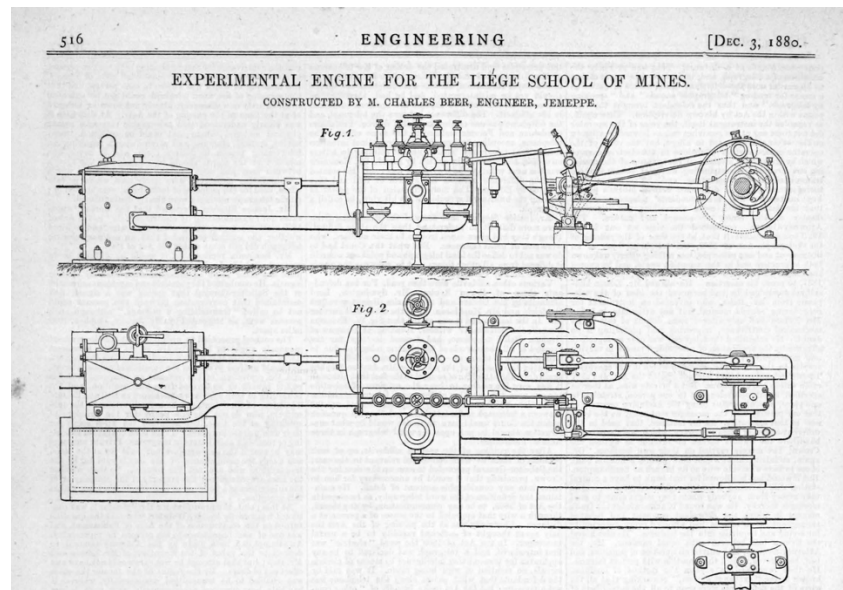


Figure 2-6 : Gravures en élévation et en plan du moteur à vapeur expérimental construit par la Maison Beer pour l'Université de Liège en 1880 et exposé la même année à l'Exposition Nationale de Bruxelles. Dans *Engineering*, Décembre 1880.

Il est possible que la machine ait été conçue par Dwelshauvers-Dery, même si ce dernier ne l'a jamais affirmé. L'historique de son activité dressé en 1837 précise que « *Ch. Beer, le grand industriel, avait monté dans ses ateliers à Jemeppe près de Liège, la machine construite d'après les données du professeur* »¹⁴¹.

¹³⁹ Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'Ecole des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », *Edition de la Revue Universelle des Mines*, Liège, 1937, p. 166.

¹⁴⁰ Robert FOX et Anna GUAGNINI, "Laboratories, Workshops...1800-1914, *op. cit.*, p.103.

¹⁴¹ Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'Ecole des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », *Edition de la Revue Universelle des Mines*, Liège, 1937, p.196.

2.8 A la recherche d'un local pour y installer la machine à vapeur (1879-1885)

Dwelshauvers-Dery sollicite les autorités de l'Université dès mai 1879 pour obtenir un local pour installer sa machine à vapeur. Le local devrait être situé au rez-de-chaussée, afficher une hauteur sous plafond de 4 à 5 mètres et être pavé. Dans un premier temps, la chaudière utilisée pour le chauffage du bâtiment pourrait être utilisée pour alimenter la machine. Les échanges entre Dwelshauvers-Dery et les autorités se prolongent plusieurs années. Prévoyant l'avenir et connaissant la situation d'autres laboratoires (dont celui de Munich), le Professeur demande une surface de 500 m² pour son laboratoire de machine à vapeur (et 400 m² pour le laboratoire de résistance des matériaux). En 1881, on lui réserve un emplacement trop exigu et il s'en plaint auprès de l'Administrateur. En 1882, il écrit au Ministre et lui fait part des efforts qu'il met en œuvre pour avoir un laboratoire de mécanique digne de ce qu'il a pu voir en Angleterre et en Allemagne. Ce qu'il lui faut c'est uniquement quatre murs et un toit. Le bâtiment et les frais de montage ne représenteraient que 10000 francs. La machine est toujours chez le constructeur Beer. A cette époque, Dwelshauvers-Dery revoit probablement ses ambitions à la baisse et demande un bâtiment assez simple : il devrait faire un rectangle de 18 par 12 m. Ses fondations doivent pouvoir accueillir une machine à vapeur et une chaudière et être connecté aux égouts de la Ville.

Dans les lettres qu'il adresse aux autorités, M. Dwelshauvers-Dery insiste aussi sur l'apport que le laboratoire peut apporter à la science. C'est ainsi qu'il écrit en 1882 « ... j'aurai le temps de former des élèves, peut-être même de résoudre à l'honneur de notre École des questions dont on n'a pas en ce moment la solution désirée, en tout cas de gagner cette expérience que nul ne possède aujourd'hui et qui ne sera certes pas inutile le jour où il s'agira d'installations définitives ».

Nous ne listerons pas ici tous les éléments de la chronologie qui soulignent les oppositions affichées ou latentes des autorités à la création de ce Laboratoire, mais aussi le soutien de savant tels que Hirn et Messens.

2.9 Installation du Laboratoire dans la maison Beer à Jemeppe (1887)

Nous reprenons le récit au mois d'octobre 1884, lorsque le Recteur Trasenster lui annonce qu'il sera « le dernier servi ». Ce même recteur lui impose comme condition « d'exposer [sa] propre fortune et [sa] responsabilité ».

C'est cette même année que la maison Beer propose d'utiliser un « local provisoire, gratis » à 10 km de l'Université (Figure 2-7). Dwelshauvers-Dery accepte et y fait monter la chaudière (obtenue à crédit) et la machine à vapeur. En décembre 1884, il demande l'autorisation à l'Administrateur d'établir son laboratoire chez M. Beer. Un contrat devra être mis en place. Tout porte à croire que les autorités aient tardé délibérément. Ce contrat doit couvrir la période allant du 1^{er} janvier 1886 au 1^{er} janvier

1891¹⁴². Le 29 septembre 1885¹⁴³, il reçoit l'autorisation ministérielle d'installer la machine à vapeur chez Beer.

En contrepartie de la mise à disposition d'un local gratuit, la Maison Beer demande que des essais soient réalisés sur sa machine de 30 CV. De même, Dwelshauvers-Dery établit un accord similaire avec le fabricant de chaudière (De Naeyer) qui lui aurait réclamé que la moitié du prix.

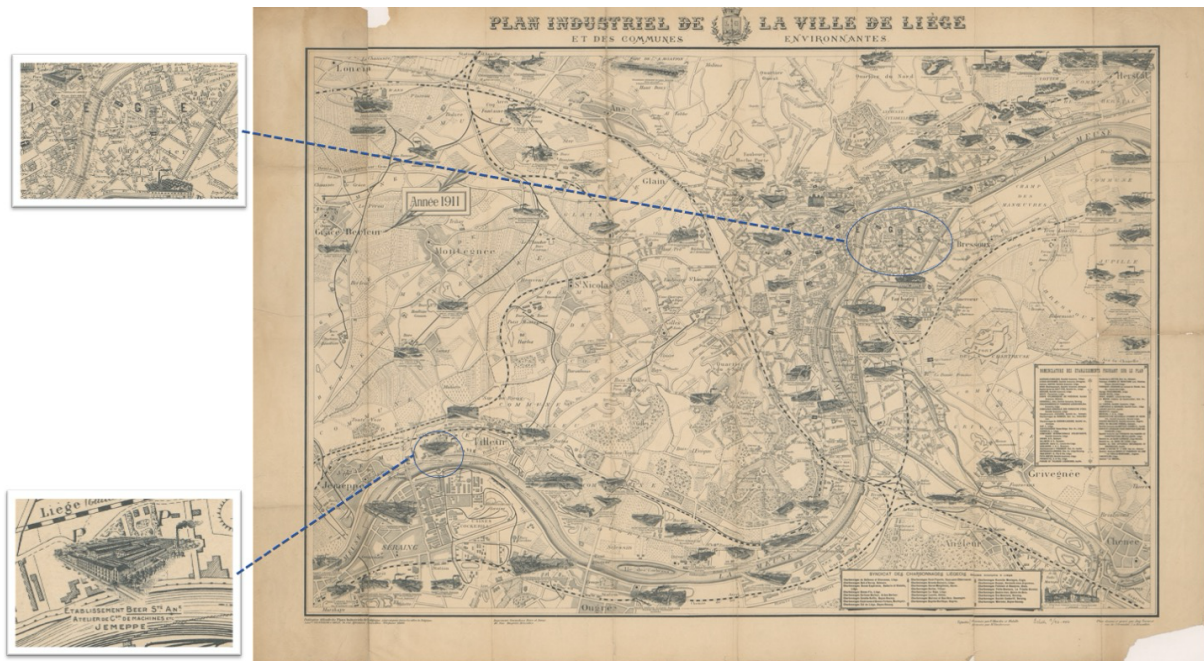


Figure 2-7 : « Plan Industriel de la Ville de Liège ». Coll. Institut d'histoire ouvrière, économique et sociale (Seraing).

Dwelshauvers explique aussi dans une lettre adressée en 1890 au Recteur qu'un autre ami, le directeur de la houillère du Gosson lui donne des eaux lorsqu'il en a de trop¹⁴⁴.

2.10 Le Laboratoire de Jemeppe (1887-1890)

L'installation de Jemeppe comprend une chaudière à vapeur (alimentée en charbon), la machine à vapeur du constructeur Beer, un frein de Prony (pour mesurer le travail utile fourni par la machine), un condenseur à injection et une pompe à air (qui expulse le mélange d'eau et de vapeur condensée).

¹⁴² Note manuscrite de Dwelshauvers-Dery, « Réponse à la question... », « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège, p. 14.

¹⁴³ D'après Dwelshauvers, la nomination d'un nouvel Administrateur, Bormans, en juin 1885 aurait fait avancer le dossier.

¹⁴⁴ Lettre du 17 novembre 1890 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

La vapeur en sortie de chaudière n'entraîne généralement pas d'eau¹⁴⁵. De l'eau peut apparaître par condensation dans le tuyau qui l'amène au cylindre. Ce tuyau débouche dans la chapelle de distribution. De là, elle rentre dans le cylindre au travers d'un organe d'admission. L'admission commence quand le piston est au point mort gauche et se prolonge pendant une partie de la course du piston de gauche à droite. La phase de détente commence quand *Ag* se ferme. Le volume augmente et la pression diminue car la masse dans le cylindre est constante. La détente se produit jusqu'à ce que le piston atteigne le point mort droit. A ce moment *Ad* s'ouvre et de la vapeur rentre dans le cylindre pendant une fraction de la course du piston de droite à gauche. Pendant une fraction de cette course, la soupape *Eg* est ouverte (*Ag* est fermée). La vapeur quitte le cylindre. C'est la phase d'émission ou de décharge. Remarquons que si *Eg* s'ouvre avant d'atteindre le point mort droit, il y avance à l'émission. *Eg* se ferme avant que le piston atteigne le point mort gauche. Comme la masse dans le cylindre reste constante, la pression augmente au fur et à mesure que le piston poursuit sa course de droite à gauche vers le point mort gauche. C'est la phase de compression. Il peut aussi y avoir une avance à l'admission si *Ag* s'ouvre avant que le piston est atteint le point mort gauche. Cela permet « d'amortir la force vive des pièces à mouvements alternatifs mieux que par la phase de compression ». Notons que le retard à l'admission existe aussi. La machine à vapeur de Jemeppe est donc à double effet.

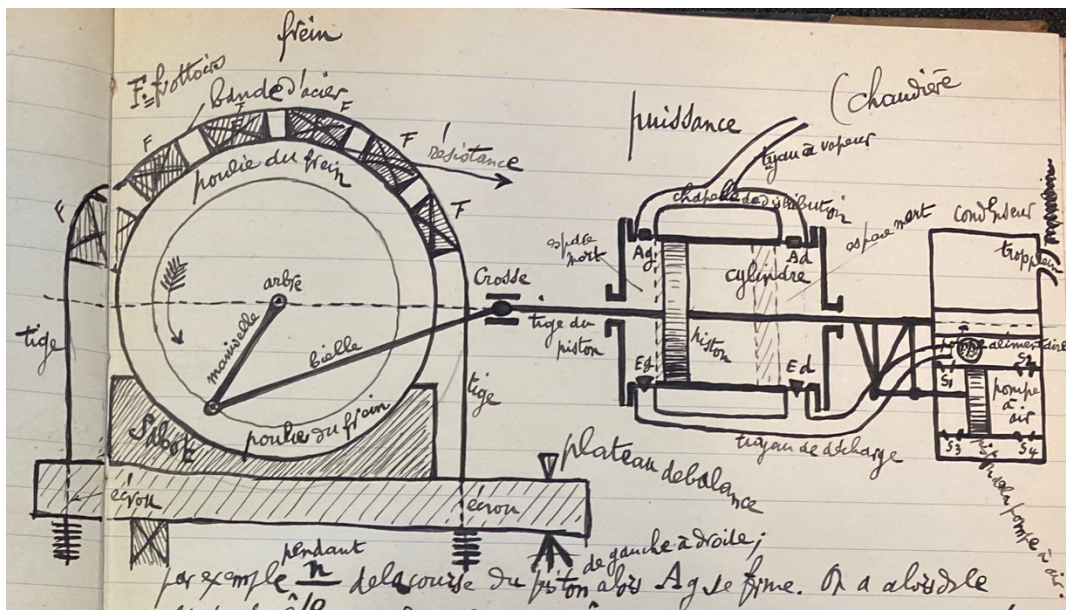


Figure 2-8 : Schéma partiel de l'installation de Jemeppe. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

Le condenseur à injection est une caisse reliée au cylindre par le tuyau de décharge. Dans le condenseur à injection, l'eau froide de refroidissement est mélangée à la vapeur au moyen d'une pomme

¹⁴⁵ Par « eau », nous entendons ici la phase liquide de l'eau. Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

d'arrosoir. A la température de la vapeur qui condense, la dépression ($1/20^{\circ}$ de la pression atmosphérique) est suffisante pour aspirer l'eau de refroidissement (d'une hauteur de 5 mètres environ). Le mélange d'eau et de vapeur condensée est ensuite refoulé par la pompe à air. L'eau de rivière ou l'eau de puits contient à la pression atmosphérique de $1/15$ à $1/20^{\circ}$ en volume d'air. Dans le condenseur, cet air est libéré de l'eau, ce qui donne lieu à des bouillonnements.

La mesure de l'espace mort a été réalisée en introduisant de l'eau au moyen d'une burette graduée lorsque le piston est en bout de course. Les ouvertures pratiquées permettront de placer les indicateurs.

En termes d'instrumentation¹⁴⁶, le condenseur est équipé d'un déversoir avec flotteur afin de mesurer le débit d'eau qui s'écoule au travers de l'échangeur. Des thermomètres tarés sont utilisés pour mesurer les températures de la vapeur en différents points, ainsi que la température de l'eau dans le bac du condenseur. Un manomètre métallique et un manomètre à mercure à l'air libre permettent de mesurer la pression de la vapeur dans la chaudière. La pression atmosphérique est connue grâce à un baromètre. Le niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation de la chaudière est également mesuré. La machine à vapeur est équipée d'un compte-tours. Le temps est également mesuré¹⁴⁷. Les deux dernières mesures permettent de déduire le nombre de tours effectués par la machine par unité de temps. Les diagrammes d'indicateurs, diagrammes représentant la relation pression-volume à l'intérieur de la machine, sont relevés au moyen de deux indicateurs (de types Richards). Ils peuvent ensuite être surfacés au moyen d'un planimètre.

Les premiers essais sur la chaudière à vapeur, avec du charbon donné par Donkin de Londres, ont lieu les 21, 22 et 23 février 1887¹⁴⁸. Un essai réalisé en septembre 1887 par Omer De Bast est décrit avec beaucoup de détails¹⁴⁹ (Figure 2-9).

¹⁴⁶ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

¹⁴⁷ Le temps écoulé est une grandeur très importante dans le calcul de l'énergie et donc de la performance. Citons Mumford qui a émis l'idée que « *La machine-clé de l'âge industriel moderne* » est l'horloge et non pas la machine à vapeur. Voir Lewis MUMFORD, *Technics and Civilization* (1^e éd. 1934), (trad. fr. Technique et civilisation, Marseille, Parenthèses, 2016), p. 38.

¹⁴⁸ « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁴⁹ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, *op. cit.*

Omer DeBast.

Université de Liège.

Laboratoire de Jemeppe

Étude d'un essai de chaudière exécuté le 21 Septembre 1887 sous la direction de M. le professeur Dwelshauvers-Dery.

Les opérations ont été de VIII^h du matin à IV^h du soir. Le temps a été beau avec quelques rafales de vent. La température extérieure a varié de 11° entre VIII heures et IX heures du matin pour s'élever de X heures à 14° et plus tard à 15° C.

La vapeur était employée à faire fonctionner la machine du laboratoire. Après s'être assuré que le régime était obtenu et que la chaudière était en pleine pression, ordre a été donné d'arrêter la machine et de retirer les foyers du foyer pour les peser.

À VIII^h on a jeté sur la grille préalablement bien nettoyée 24^{kg} de combustible incandescent. En même temps, on relevait les indications des différents appareils de mesure. À IV^h du soir on a retiré du foyer 35^{kg} de charbon incandescent et relevé les mêmes indications. Les observations ont donné les résultats suivants.

	VIII ^h	IV ^h
Niveau de l'eau dans le tube indicateur	-53 mm	-31 mm
Pression indiquée par le manomètre métallique	5 atm 5	5 atm 6
Hauteur du mercure dans le tube du manomètre	4 ^m 214	4 ^m 195
Température du mercure au thermomètre de la boîte	13° 5	18°
Pression barométrique en millim de mercure à 0°	761.5	760
Température de l'eau à l'entrée dans le récipient	16°	17°
id id id id id	90°	95°
Nombre du compte tours de la machine	95577	136277

Figure 2-9 : Compte rendu d'un essai de chaudière réalisé dans le Laboratoire de Jemeppe. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4513, ca. 1888 (feuillelet volant).

Les essais sur la machine à vapeur ont lieu plus tard. Une première campagne d'essais connue a lieu les 24 octobre, 31 octobre, 9 novembre, 15 novembre 1888. La Figure 2-10 montre un extrait du carnet d'observations du Laboratoire de Jemeppe (relatif à l'essai du 24 octobre 1888) qui traite des moyens de mesure de la pression de vapeur à la chaudière. Les essais sont réalisés par un groupe constitué de différents observateurs¹⁵⁰.

¹⁵⁰ G. Beer, D. Brasseur, Omer De Bast. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

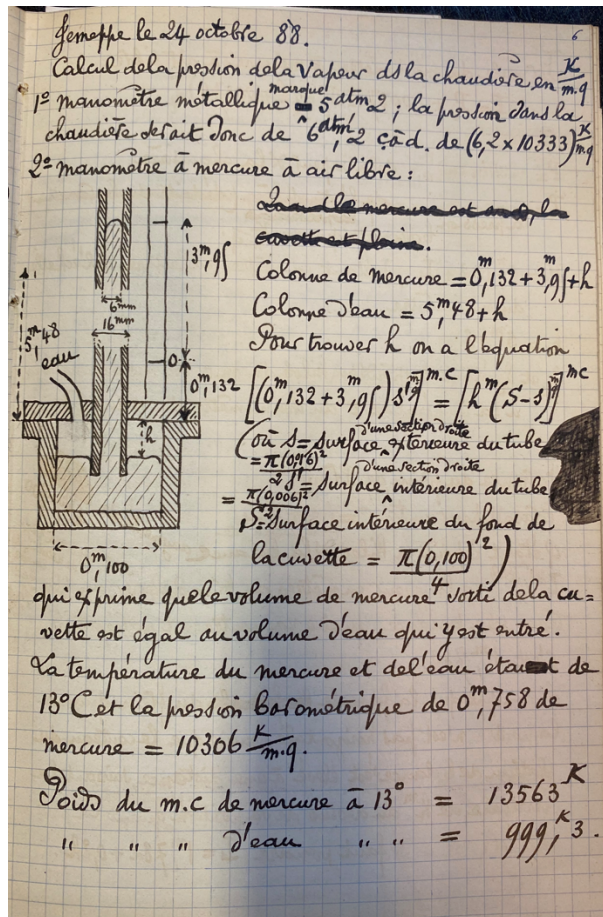


Figure 2-10 : Extrait du carnet d'observations du Laboratoire de Jemeppe. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

Les conditions de travail dans le laboratoire restent difficiles, celui-ci étant exposé aux intempéries¹⁵¹. Dans une lettre de 1890 adressée au Recteur, Dwelshauvers-Dery précise que la chaudière est sous un simple toit sans parement. Les élèves y risquent des « rhumes et des fluxions de poitrine ». Il y a un risque pour le professeur et ses assistants à passer de la salle surchauffée de la machine à la chaudière, zone sujette à la pluie et aux courants d'air. Les trajets entre Liège et le Laboratoire sont également longs. Le laboratoire étant à 10 kilomètres de l'université, l'aller-retour prend deux heures. En quittant Liège à 13h30 et en revenant à 19h00, il ne reste que peu de temps pour les essais et la « trituration des résultats ». Le vent empêche l'utilisation de lampes (sauf quelques lampes à pétrole) aux abords de la chaudière. De fin novembre à avril, le Laboratoire est fermé à cause du gel qui pourrait casser un tuyau ou un robinet. Si le temps est rigoureux dès la mi-octobre, l'enseignement en est donc perturbé. En 1891, Dwelshauvers-Dery signale au Recteur que « la situation

¹⁵¹ Lettre du 17 novembre 1890 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

de [son] Laboratoire à Jemeppe chez Mr. Beer devient de plus en plus précaire »¹⁵². Il rappelle aussi que l'engagement amical de Mr Beer vis-à-vis de lui arrive à son terme.

Remarquons que Dwelshauvers-Dery avait également fait l'acquisition d'une machine d'essais de matériaux (petit banc Kennedy de 3 tonnes) pour montrer quelques résultats aux étudiants¹⁵³. On retrouve effectivement une trace de cette machine dans les notes manuscrites du cours de mécanique appliquée vers 1890¹⁵⁴. Les étudiants l'utilisent pour mesurer notamment des limites d'élasticité d'éprouvettes.

2.11 Transfert du laboratoire de Jemeppe dans les murs de l'Université de Liège en 1892

Le Laboratoire de Mécanique appliquée est déplacé vers le centre de Liège en 1892. Il est situé Quai des Etats-Unis. Il sera visité par de nombreux visiteurs étrangers¹⁵⁵. Il est peut-être déplacé une seconde fois Boulevard de la Constitution, à l'occasion de la construction de l'Institut de Mécanique en 1901.

La Figure 2-11 et la Figure 2-12 montrent deux vues de la machine à vapeur. La plaque signalétique sur le moteur visible à la Figure 2-12 atteste bien qu'il s'agit d'une machine du constructeur Beer. Le frein de Prony, qui permet de mesurer la puissance mécanique utile à l'arbre de la machine, est visible sur chacune des photographies. Son fonctionnement sera décrit au Chapitre 4.

A l'avant de la Figure 2-12, on peut distinguer le condenseur et sa pompe à air. Ils sont également visibles sur la Figure 2-19 qui sera décrite plus loin. A la différence de l'installation du Laboratoire de Jemeppe, le condenseur n'est plus à *injection* mais à *surface*¹⁵⁶. Nous expliquerons la différence au Chapitre 3.

¹⁵² Lettre du 4 mars 1891 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁵³ Lettre du 17 novembre 1891 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁵⁴ On retrouve les notions d'énergie et d'équivalent mécanique de la calorie dans le premier manuscrit : Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4495, ca. 1890, ff. 12 et 13.

¹⁵⁵ « Rapport de M. le Recteur de l'Université de Liège sur le mémoire de la Faculté technique en date du 3 octobre 1900, concernant ses locaux », « Locaux de la Faculté technique », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁵⁶ Dans son analyse, Dwelshauvers-Dery mentionne bien le transfert de la chaleur depuis la vapeur vers l'eau froide qui circule dans les tubes. Voir Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894, p.15.

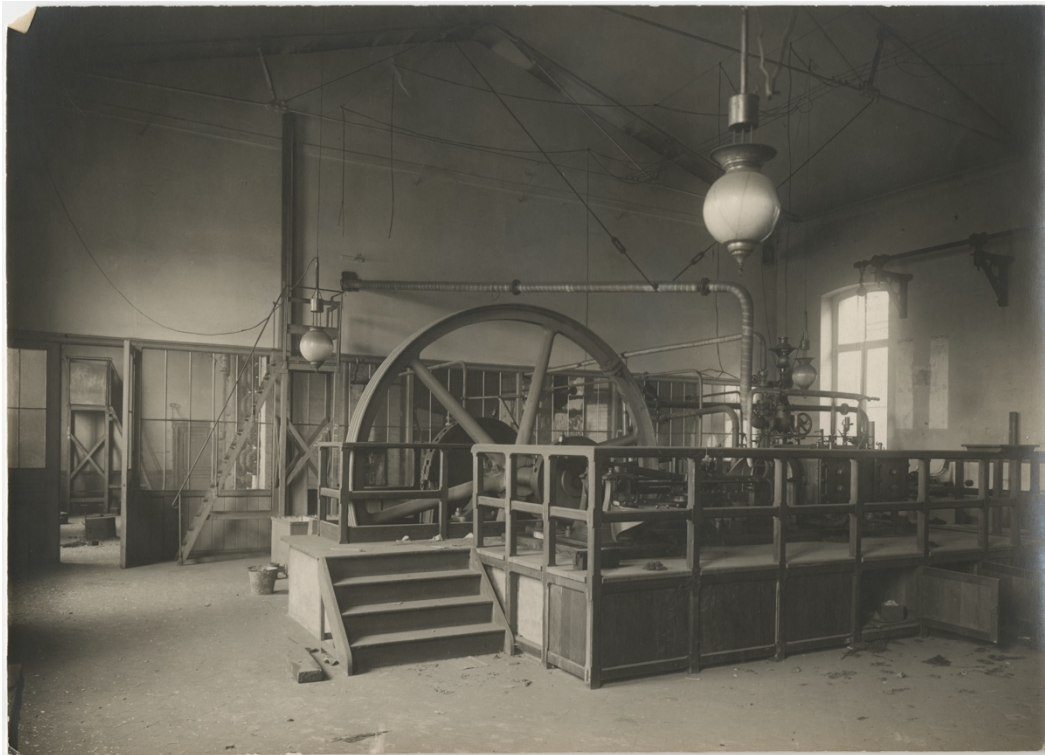


Figure 2-11 : Vue du moteur à vapeur Beer en 1918. *Université de Liège - Dommages de guerre - Laboratoire de mécanique - Salle des machines*, Fonds photographique des dommages de la guerre 1914-1918 faits aux bâtiments de l'Université de Liège (positifs), Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43205, 1918. © Musée Wittert ULiège

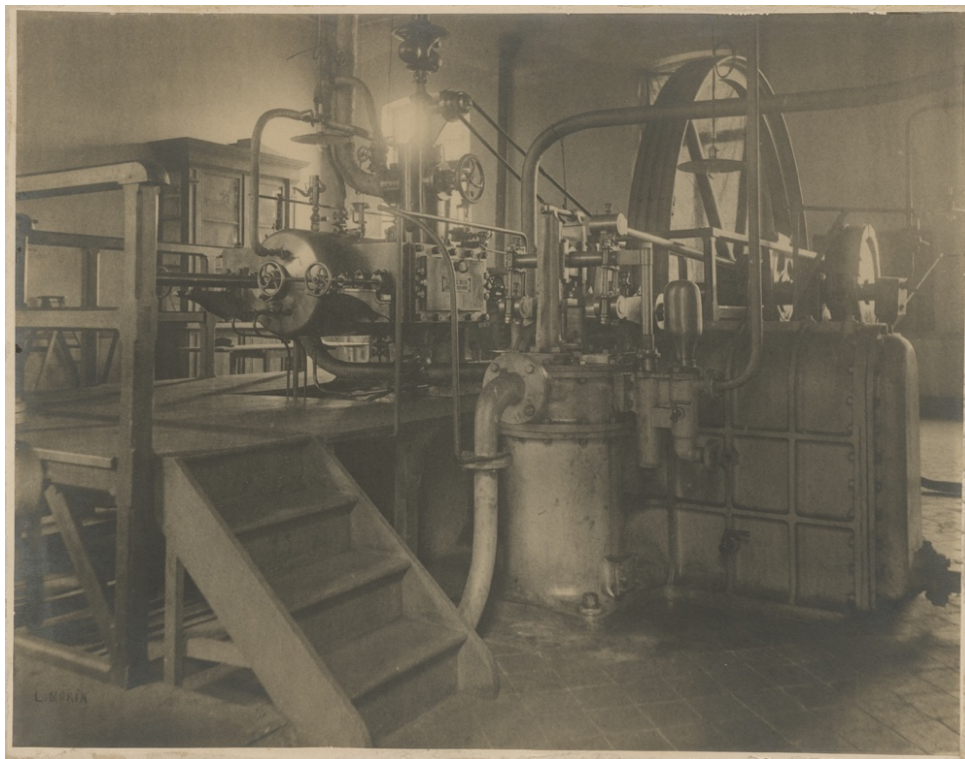


Figure 2-12 : Autre vue du moteur à vapeur Beer. L. MORIN, *Université de Liège - Faculté technique - Laboratoire de mécanique appliquée*, Photographie, 35 x 45 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43230, s.d. © Musée Wittert ULiège

On retrouve une représentation schématique du condenseur et de la pompe à air dans le livre de *Données relatives à la machine à vapeur* publié en 1897 et 1898¹⁵⁷ (Figure 2-13). La caisse A contient les 146 tubes parcourus par l'eau froide. Elle communique avec la pompe à air C par le conduit B. La caisse contient à la fois de la vapeur et de « l'eau » (du liquide). Pour que la pompe à air puisse fonctionner, la hauteur d'eau au fond du condenseur doit être au moins de 7 cm.

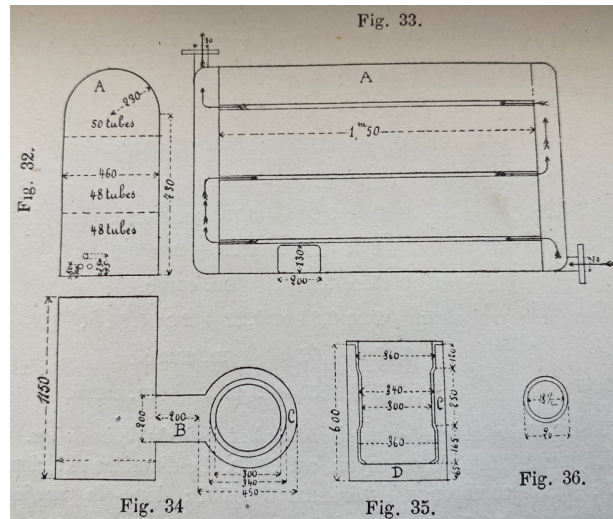


Figure 2-13 : Projection orthogonale du condenseur et de sa pompe à air. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 62.

La Figure 2-14 montre une vue de la chaudière à vapeur (on pourrait distinguer « de Naeyer et Cie. » sur la plaque signalétique).

Nous n'avons pas trouvé beaucoup d'informations sur cette chaudière. Hubert et André fournissent une description de chaudières de type De Nayer (sic) dans leur cours de physique industrielle. Il s'agit d'une chaudière aquatubulaire à foyer extérieur, construite pendant longtemps aux ateliers Willebroeck près de Malines. Les 8 tubes que l'on peut distinguer sur la gauche sont peut-être des tubes réchauffeurs (ou économiseurs) qui chauffent l'eau d'alimentation liquide avec les gaz (plus froids) provenant du corps de chauffe et allant vers la cheminée. Cette circulation *méthodique* (ou *rationnelle*)¹⁵⁸ augmente le rendement de la chaudière.

¹⁵⁷ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 62-65.

¹⁵⁸ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 241 et 254.



Figure 2-14 : Vue de la chaudière de la machine à vapeur. L. MORIN, *Université de Liège - Faculté technique - Laboratoire de mécanique appliquée*, Photographie, 35 x 45 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43233, s.d. © Musée Wittert ULiège

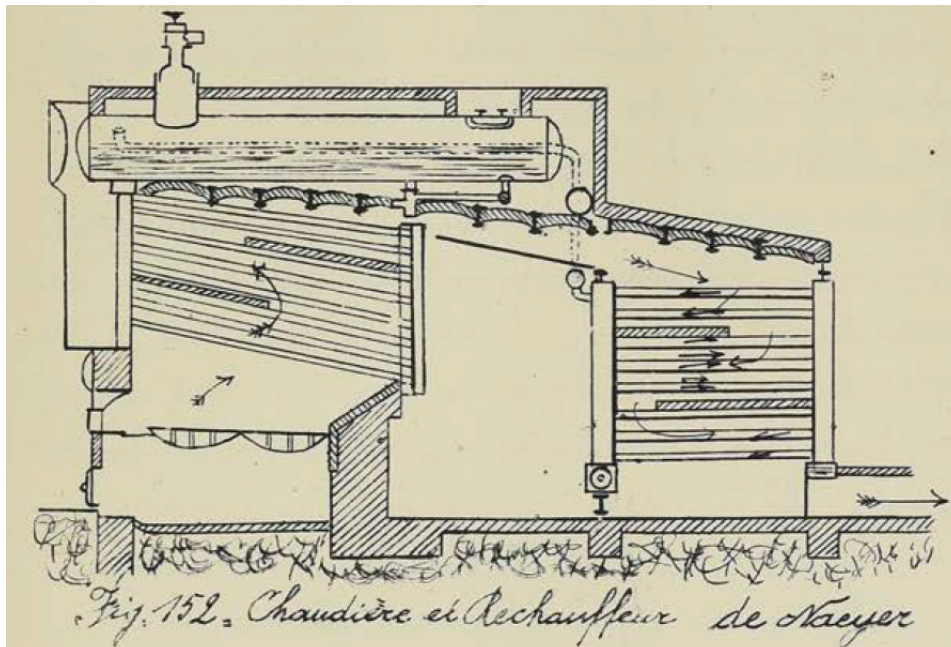


Figure 2-15 : « Chaudière à Réchauffeur de Naeyer ». Le réchauffeur est constitué de l'ensemble des tubes horizontaux sur la droite. Les tubes inclinés sont les tubes bouilleurs. Dans H. Hubert et C. André, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 24.

2.12 Herman Hubert et la diversification des activités du Laboratoire de Mécanique au début du XX^e siècle

2.12.1 Le parcours d'Herman Hubert

Herman Hubert joue un rôle important dans le développement et la diversification des activités du Laboratoire au tout début du XX^e siècle. Même si son parcours initial et certainement sa personnalité sont différents de ceux de Victor Dwelshauvers-Dery, ses activités s'inscrivent dans la lignée de celles de son prédécesseur et il continue à développer le Laboratoire de mécanique et son activité expérimentale.

Herman Hubert est né à Liège le 19 mai 1849. Après des études secondaires brillantes, il est reçu premier à l'examen d'admission aux Ecoles spéciales annexées à l'Université de Liège en 1867. Il est diplômé ingénieur des mines en 1872, premier de sa promotion.



Figure 2-16 : Photos de Herman Hubert. A gauche : avant 1898. Association des Ingénieurs Sortis de l'École de Liège, Mémorial du Cinquantenaire : 1847-1897, Liège, Charles Desoer Imprimeur-Editeur, 1898. A droite : Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'École des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », Edition de la Revue Universelle des Mines, Liège, 1937, p. 196.

Herman Hubert rentre ensuite au corps des Mines en 1873. Il y franchira les échelons pour terminer Inspecteur Général honoraire de Mines. Il co-écrit d'ailleurs un Code de l'industrie et des mines¹⁵⁹. En parallèle, il enseigne la mécanique et la physique dans différentes Ecoles industrielles. En 1874, il obtient un diplôme de candidat en sciences physiques et mathématiques de l'Université de Liège. Il entre dans le corps enseignant de l'Université de Liège en 1881 comme répétiteur. Il est nommé, à titre définitif, répétiteur des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle aux Écoles

¹⁵⁹ Camille WILLIQUET et Herman HUBERT, *Code de l'industrie & des mines*, Mons, Hector Manceaux, 1889.

spéciales le 17 septembre 1885. Il est chargé de cours le 31 décembre 1882¹⁶⁰. Il prend la succession de Victor Dwelshauvers-Dery le 28 octobre 1903, comme professeur ordinaire, et enseignera la mécanique appliquée à l'étude des machines, la physique industrielle et la résistance des matériaux. Ces principaux travaux initiaux traiteront¹⁶¹ :

- 1) « *De la machine Willians à grande vitesse, à simple effet*¹⁶² (1889)
- 2) *Des moteurs thermiques autres que la machine à vapeur*¹⁶³ (1891)
- 3) *Des méthodes de la fabrication du gaz pauvre et du gaz détonnant, formé par l'air enrichi des vapeurs de gazoline ;*
- 4) *Des différents modes d'utilisation du gaz pauvre au moyen du moteur à explosion avec compression préalable. »*

2.12.2 L'étude des moteurs à gaz

Il poursuit la tradition de son prédécesseur en accordant une importance particulière à l'étude expérimentale des machines thermiques. Il diversifie toutefois les machines étudiées, en initiant l'étude des moteurs à gaz. Il fait partie de ceux qui développent l'idée de valoriser les gaz des hauts fourneaux et publie de nombreux mémoires sur le sujet¹⁶⁴. En 1895, il essaye un moteur à gaz de hauts fourneaux d'une puissance de 8 chevaux à la Société John Cockerill à Seraing. Il publie un premier mémoire sur l'utilisation des gaz de hauts fourneaux en 1897, qui sera traduit pour être diffusé à l'étranger. Vers 1900, il étudie avec la société Cockerill des moteurs de plusieurs centaines de chevaux, voire plus (Figure 2-17), notamment au travers d'essais très complets.

¹⁶⁰ Lettre du Recteur au Ministre du 30 mai 1917, Dossier 159 (« Hubert Herman, Répétiteur »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁶¹ C. HANOCQ, "Hubert (Herman), ingénieur, professeur à l'Université de Liège (1849-1922)." Dans *Biographie nationale / Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique*, 305-310. Bruxelles, Belgique, Emile Bruylant, 1964, p. 306-307. Nous avons largement consulté cette Biographie d'Herman Hubert pour lister les dates et faits importants de sa carrière.

¹⁶² Hubert traduit des ouvrages sur le sujet. Voir Pierre Willam WILLANS, « Essais sur les Conditions économiques d'une machine à vapeur sans condensation fonctionnant comme machine simple, compound ou à triple expansion », *Bulletins de l'Institut des Ingénieurs civils de Londres*, Mémoire inséré dans les vol. XCIII (1887-1888) et XCVI (1888-1889) (Hubert, Herman, trad.) (Extrait de la *Revue Universelles des Mines, etc.*, 3^e série, t. V., p. 1, et t. VII, p. 159, 33^e année, 1889), Liège et Paris, Desoer, 1889, 116 p., 7 planches ; Pierre Willam WILLANS, « Essais sur une machine à vapeur à condensation, fonctionnant comme machine simple, compound ou à triple expansion », *Proceedings of the Institution of civil Engineers (Londres)*, (Hubert, Herman, trad.) (Extrait de la *Revue Universelles des Mines, etc.*, t. XXVI., 3^e série, p. 57, 38^e année, 1894), Liège et Paris, Desoer, 1894, 116 p., 6 planches.

¹⁶³ Herman HUBERT, « Les moteurs thermiques autres que la machine à vapeur. Etude théorique et pratique sur les moteurs à gaz, à essence, à pétrole et à air chaud », *Revue Universelle des Mines*, Liège, 1892, 141 p., 8 planches.

¹⁶⁴ Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'Ecole des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », Liège, Edition de la *Revue Universelle des Mines*, 1937, p. 196.

Tableau 2-2: Caractéristiques de moteurs au gaz testés par Hubert en 1900 et 1901

Type de moteur	Date	Diam. [cm]	Course [m]	Puissance indiquée [HP ou CV]	Puissance effective	Combustible	Température de refroidissement	Température gaz d'échappement	Rendement
Simplex Cockerill	21/3/1900	130	1,4	786,16	575	Gaz de hauts-fourneaux	33,17°C	508°C	0,183
Simplex Cockerill	11/1901	85	1	246,89	215,31	Gaz de hauts-fourneaux	-	598°C	0,2

(Source : Université de Liège, Actes du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées, Liège, du 25 juin au 1er juillet 1905 : section de mécanique appliquée, t.I., 1905, p. 65.)

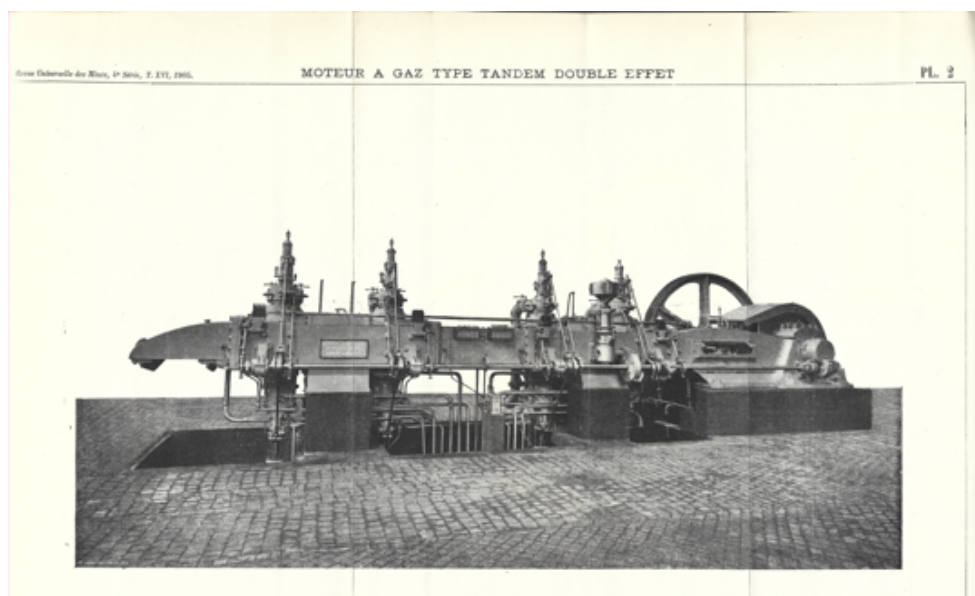


Figure 2-17 : Vue du moteur à gaz testé à Liège. Dans Herman HUBERT et Aimé WITZ, *Essai d'un moteur à gaz de haut-fourneau à quatre temps et à double effet d'une puissance de 1500 chevaux*, 1906.

Notons qu'Hubert travaille encore sur les machines à vapeur. Ainsi, en 1905, il teste une machine compound avec un condenseur à surface à l'Usine Valentin-Coq de la Vieille-Montagne à Hollogne-aux-Pierres¹⁶⁵. Les deux pistons sont dédoublés. Chaque piston est équipé d'une enveloppe avec circulation de vapeur. Le rendement est de 19% (« résultats comparables aux meilleures machines à vapeur surchauffée »).

¹⁶⁵ François SINIGAGLIA, « LA SURCHAUFFE appliquée à la machine à vapeur d'eau », dans les *Actes de la Section de mécanique appliquée du Congrès international des mines, ...*, Liège, La Meuse, 1905, t. II, p. 247.

Il continue à gérer le laboratoire développé par Dwelshauvers-Dery. En 1907, il équipe ce laboratoire d'un moteur à gaz pauvre avec un gazogène, installation sur laquelle il réalisera des bilans thermiques¹⁶⁶. Il équipe également le laboratoire de machines pour l'étude des matériaux de construction mécanique.

Herman Hubert n'a certainement pas été aussi prolifique que son prédécesseur en termes de publications scientifiques. En 1903, Joseph Henrotte, un candidat malheureux à la succession de Dwelshauvers-Dery ne manquera pas d'écrire à l'Administrateur Bormans : « *M. le Chargé de Cours Hubert a publié des descriptions d'ordre technique, ou plutôt commercial concernant les moteurs à gaz de hauts fourneaux de la Sté Cockerill. Il n'a produit aucun ouvrage scientifique ou d'enseignement, ni aucun article de l'espèce dans les journaux périodiques* »¹⁶⁷. Hubert rédigea plus tard des ouvrages d'enseignement (sur la mécanique appliquée, la résistance des matériaux et la physique industrielle) particulièrement remarquables du fait de leur exhaustivité, ouvrages que nous étudierons à la section 4.3.

En 1914, alors que l'Université ferme ses portes, il s'exile en Angleterre puis passe en France et devient en 1916 secrétaire de tous les services du Ministère des Affaires économiques au Gouvernement du Havre. Il part à la retraite un an après l'Armistice. On retiendra également qu'il était un grand orateur¹⁶⁸.

2.12.3 L'enseignement des machines frigorifiques

Herman Hubert a probablement initié au sein du Laboratoire l'intérêt pour les machines frigorifiques, bien que nous n'ayons pas à ce jour trouvé de traces de travaux d'étude. En 1908, il est Délégué du gouvernement belge au Premier Congrès International du froid à Paris. Il participera également au second à Vienne en 1910. Dès 1913, son cours de Physique industrielle comprend un chapitre sur les différentes machines frigorifiques. Il est le premier à introduire dans l'enseignement universitaire belge des leçons sur les machines frigorifiques et la production de froid¹⁶⁹. On sait aussi qu'il a été président de l'Association belge du froid¹⁷⁰.

¹⁶⁶ C. HANOCQ, "Hubert (Herman), ingénieur, professeur... », *op. cit.*, p. 308.

¹⁶⁷ « Note pour Monsieur l'Administrateur Bormans relativement à la succession professorale de Monsieur le Recteur Dwelshauvers », Dossier 159 (« Hubert Herman, Répétiteur »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège, s.d.

¹⁶⁸ Avant de s'intéresser aux mathématiques, il avait entrepris des études de philosophie et lettres. Il parlait et défendait également le wallon de Liège. Voir C. HANOCQ, "Hubert (Herman), ingénieur, professeur à l'Université de Liège (1849-1922)." Dans *Biographie nationale / Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique*, 305-310. Bruxelles, Belgique, Emile Bruylant, 1964.

¹⁶⁹ Voir sa nécrologie dans Association française du Froid et Association belge du Froid, *La Revue générale du froid et des industries frigorifiques*, t. III, n° 10, Octobre 1922, p. 375-6. Assez étonnamment, la notice biographique écrite par Hanocq ne mentionne pas les activités de Herman Hubert dans le domaine du froid. Voir C. HANOCQ, "Hubert (Herman), ingénieur, professeur ... », *op. cit.*

¹⁷⁰ *Ibid.*



GRUPE DE CONGRESSISTES DEVANT L'ÉGLISE DE LA SORBONNE.

H. Demoulin, Sc.

Figure 2-18 : « Groupe de congressistes devant l'église de la Sorbonne ». H. Hubert pourrait être la deuxième personne en partant de la droite. Photo prise à l'occasion du 1^{er} Congrès International du Froid en 1908. Institut International de Réfrigération, Paris.

2.13 Le Nouveau Laboratoire de Thermodynamique (vers 1937)

En 1937, à l'occasion du centenaire de l'École des Mines, le nouveau site de la Faculté Technique est inauguré¹⁷¹ au Val Benoît, à la sortie de Liège. L'étude de la création de ce nouveau site sort du cadre de ce travail. Nous nous limiterons à mentionner que la Laboratoire de Mécanique s'appelle à présent « Nouveau Laboratoire de Thermodynamique ». Son directeur est le Professeur A. du Chesne (un ancien élève de Dwelshauvers-Dery).

Aussi, c'est en nous intéressant à ce nouveau Laboratoire que nous avons pu trouver à nouveau trace de la machine à vapeur de Beer en 1937¹⁷². Elle y a été réinstallée (Figure 2-19), subissant ainsi son deuxième ou troisième déménagement. La machine de Beer, ainsi qu'une autre machine à vapeur de type Van den Kerchove et une turbine de Laval, sont alimentées par la vapeur produite par les chaudières de la centrale thermoélectrique attenante au laboratoire. Notons que la pression de vapeur en

¹⁷¹ En grandes pompes, en présence du Roi des Belges, de Ministres et de Savants et Industriels de premier plan.

¹⁷² Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'École des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », *Edition de la Revue Universelle des Mines*, Liège, 1937, p. 164-173.

entrée de machine peut être ajustée entre 2,5 et 7 kilogrammes par centimètre carré et la température entre celle de saturation de la vapeur et 300°C. A cette époque, il semblerait que la machine soit encore utilisée pour des travaux d'étudiants visant à déterminer le bilan énergétique sur la machine et à quantifier les échanges de chaleur entre la vapeur et les parois.

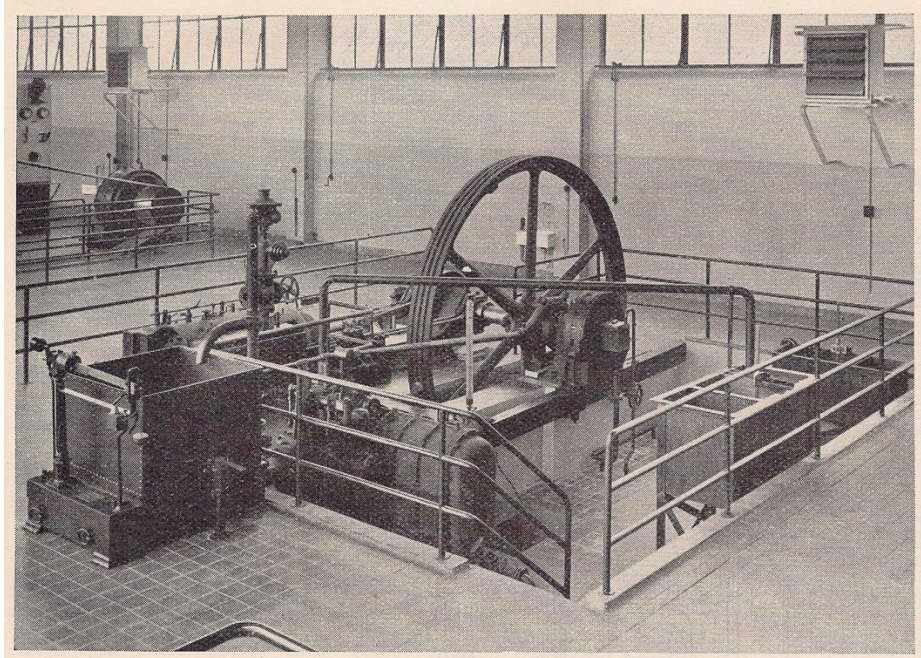


Figure 2-19 : Vue de la “Machine Beer” installée dans le Nouveau Laboratoire de Thermodynamique du Val-Benoît vers 1937. Dans Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l’Ecole des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », Edition de la Revue Universelle des Mines, Liège, 1937.

2.14 Conclusions

Ce chapitre a montré que l’enseignement et la recherche en Mécanique appliquée est un domaine en pleine expansion dans la seconde moitié du XIX^e siècle. La qualité de cet enseignement et des travaux de recherche exige la mise en place de Laboratoires de Mécanique. En fait, la création des Laboratoires de Mécanique dans le dernier quart du XIX^e siècle participe à un processus de légitimation académique de la scientificité de la Mécanique appliquée. En proposant un cursus basé sur un enseignement théorique et pratique de haut niveau, cette discipline académique à part entière se distancie de l’apprentissage pratique dans des ateliers et de la mécanique abordée uniquement sous l’angle des mathématiques abstraites.

Ces laboratoires englobent en réalité deux types de laboratoires : les laboratoires de résistances de matériaux (certainement liés au développement important de la sidérurgie et des constructions mécaniques) et les laboratoires d’essais de machines.

C'est précisément à ce deuxième type de laboratoire que nous nous intéressons en présentant l'histoire de la création du Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège. A sa création, ce laboratoire se consacre à l'étude d'une machine à vapeur construite par un industriel de la région et spécialement conçue pour une étude en laboratoire. Cette collaboration entre un industriel et un laboratoire universitaire autour de ce que nous appellerions aujourd'hui un « prototype » nous semble remarquable.

Le Laboratoire de Mécanique de Liège fait partie des laboratoires précurseurs dans le domaine des machines thermiques. Comme les quelques autres laboratoires similaires de l'époque, c'est à l'étude des machines à vapeur et des chaudières qu'il s'intéresse. D'autres laboratoires ont déjà étendu cette étude aux moteurs à combustion interne (et probablement aux machines de production de froid). Le Laboratoire de Liège emboîtera le pas aux autres laboratoires avec des essais sur des moteurs à gaz réalisés dès la toute fin du XIX^e siècle et début du XX^e siècle. Même si nous n'avons pas retrouvé de traces au laboratoire (à cette époque) d'essais sur les machines frigorifiques, le laboratoire a été pionnier en Belgique de l'enseignement de ces nouvelles techniques frigorifiques. Cette activité d'étude des machines thermiques en tout genre préfigure celle d'un laboratoire actuel de thermique, d'énergétique ou de thermodynamique appliquée. Le « nouveau laboratoire de thermodynamique » de l'Université de Liège créé en 1937 et encore en activité aujourd'hui sous le nom de « laboratoire de thermodynamique appliquée » hérite d'ailleurs de l'expérience d'enseignement et de recherche (mais aussi d'installations remarquables, comme la machine à vapeur de Beer) du Laboratoire de Mécanique appliquée.

Nous proposons aussi de considérer l'année 1887 comme année de création du Laboratoire de Mécanique. En effet, il s'agit de l'année de la publication scientifique la plus ancienne (un rapport d'essais) que nous avons pu trouver et qui est relative à une activité expérimentale réalisée dans le laboratoire. La date d'acquisition de la machine à vapeur, 1880, aurait pu être retenue, mais il nous semble qu'un laboratoire est pleinement opérationnel si son activité s'étend de l'essai expérimental à la publication de l'analyse des résultats.

CHAPITRE 3 Le fonctionnement du Laboratoire de Mécanique

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous cherchons à comprendre le fonctionnement du tout nouveau Laboratoire de Mécanique. Qui sont les personnes actives dans le laboratoire ? Quel sont leurs rôles et leurs qualifications ? Qu'a coûté la construction du laboratoire et quel est son budget annuel ? Comment se situe ce budget par rapport au budget de la Faculté et même de l'Université ? Nous traiterons la production scientifique du Laboratoire dans les deux prochains chapitres.

3.2 Rôles joués par les différents intervenants dans le laboratoire, y compris les élèves

Une question qui nous est apparue intéressante était de mieux comprendre les rôles joués par les différents intervenants du Laboratoire. Nous voudrions savoir quelles fonctions ils occupent, quels sont leurs statuts à l'Université et quelles sont leurs qualifications.

Une lettre datée du 13 janvier 1896¹⁷³ adressée par V. Dwelshauvers-Dery à l'Administrateur de l'Université de Liège nous éclaire sur ces questions. L'auteur de la lettre mentionne la présence d'un *assistant*, d'un *machiniste* et d'un *préparateur*¹⁷⁴ qui jouent tous les trois un rôle important dans la mission d'enseignement de la mécanique appliquée et de la physique industrielle. D'autres documents attestent de la présence d'un répétiteur¹⁷⁵.

3.2.1 Le répétiteur et l'assistant

Le répétiteur (et probablement l'assistant) est ingénieur de formation. Le statut du répétiteur est plus important que celui de l'assistant.¹⁷⁶ Dans la Faculté technique, les répétiteurs encadrent les séances

¹⁷³ « Personnel de la Mécanique », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁷⁴ *Ibid.* Respectivement M. W. Duchesne, M. Mathieu Gonda et M. Ch. Pairon.

¹⁷⁵ Voir notamment Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894.

¹⁷⁶ Le répétiteur apparaît après le professeur mais avant l'assistant dans l'ordre dans l'ordre des auteurs de *Etude de deux essais de machine à vapeur*, *op. cit.*

d'exercices et les interrogations. Les assistants assistent le professeur pour des travaux pratiques¹⁷⁷. Ils sont aussi autorisés à aider le répétiteur pour les interrogations et à encadrer les excursions. Dans certains cas, l'assistant s'occupe principalement des travaux de recherche du Service.

3.2.2 Le machiniste et le préparateur

Le machiniste et le préparateur jouent un rôle qui semble similaire à celui des techniciens de laboratoire de nos jours.

Le machiniste est en service dans le laboratoire depuis 1885, époque à laquelle la machine à vapeur se trouvait encore dans le Laboratoire de Jemeppe, dans les ateliers de la maison Beer. Il est monteur de formation et a longtemps travaillé dans la Maison Beer. Malgré ses années de services, il n'est pas encore « *rentré dans les cadres* »¹⁷⁸ et souhaiterait voir sa situation améliorée.

Au moment de demander à être retraité, le préparateur était attaché au cours de mécanique depuis plus de 30 ans. Des dires de Dwelshauvers-Dery, il « *était un ouvrier de premier ordre, travaillant avec une grande précision, connaissant les instruments délicats du laboratoire, sachant les entretenir et les réparer, connaissant d'électricité ce qu'il en faut pour [les] travaux* ». Le remplacer est important, mais difficile, car « *le préparateur de mécanique doit être un ouvrier de précision, un artiste pour ainsi dire... il doit être vigoureux et actif, pas trop âgé et pas trop jeune* ». Le préparateur participe donc à la préparation et à l'exécution des séances de laboratoire.

3.2.3 Les élèves

Les élèves jouent un rôle majeur dans les études expérimentales. La nature même des essais réalisés dans un laboratoire de machine à vapeur exige la présence de plusieurs observateurs et Dwelshauvers-Dery semble profiter de la présence des élèves. Ainsi, il déclare en 1891¹⁷⁹ :

«Par leur nature même, les essais de machines exigent plusieurs observateurs capables chacun de traiter toutes les parties du sujet, mais n'en pouvant faire qu'une seule à la fois. Un tel personnel doit être formé d'abord, et de là la nécessité d'organiser des expériences où les élèves jouent chacun individuellement leur rôle et s'habituent au maniement des instruments pour arriver à faire des mesures et des observations exactes.

¹⁷⁷ « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁷⁸ *Ibid.* Le sens exact de cette expression devrait être recherché, mais pourrait correspondre à ce qu'on appelle aujourd'hui une « nomination définitive ».

¹⁷⁹ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, op. cit., p. 41.

Après le travail expérimental proprement dit, commence l'étude de l'essai qui comporte un grand nombre de problèmes et exige beaucoup de temps. Pour mon Laboratoire, afin que chaque élève fasse lui-même l'étude entière de l'essai, j'ai fait préparer des carnets complets d'observation, et, à la fin de l'essai, chaque observateur dicte à tous les autres les chiffres qu'il a recueillis. Des diagrammes sont distribués et les problèmes à résoudre bien déterminés. »

En 1888, au Laboratoire de Jemeppe, les observateurs des indicateurs sont G. Beer et D. Brasseur¹⁸⁰.

La publication de deux essais de machines à vapeur réalisés en 1893¹⁸¹ nous en apprend un peu plus. Les « observateurs » sont listés. Pour le premier essai, par ordre d'apparition, il s'agit du « Professeur » (V. Dwelshauvers-Dery), du « Répétiteur »¹⁸², de « l'Assistant » et de 8 « élèves »¹⁸³. Pour le second essai, les observateurs sont Dwelshauvers-Dery, son Répétiteur et son fils renseigné comme Docteur en sciences. Les élèves observent la pression à la chaudière, l'eau de circulation du condenseur et les températures de la vapeur à différents endroits. Le Professeur Dwelshauvers-Dery suit la vitesse de rotation de la machine et la vapeur consommée. Le Répétiteur et le Préparateur relèvent les diagrammes indicateurs et le fils du Professeur surface ceux-ci au planimètre d'Amsler. Ces différentes techniques expérimentales seront détaillées au Chapitre 5 de ce manuscrit.

Le rôle joué par les élèves lors des essais et le crédit qui leur est accordé dans une publication scientifique nous semble remarquable. Cette observation souligne à nouveau l'importance qu'accorde Dwelshauvers-Dery à la pratique expérimentale dans l'enseignement et indique également que la pratique expérimentale tend à décompartmenter l'enseignement de la recherche. Les élèves plus expérimentés participent d'ailleurs indirectement à la recherche scientifique de Dwelshauvers-Dery, ce qui répond à sa propre vision d'un laboratoire. Ce dernier déclare¹⁸⁴:

¹⁸⁰ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

¹⁸¹ Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894. Pour le rôle actif du préparateur, voir p. 8. Nous proposons une analyse technique de ces essais à la section 5.3.2.

¹⁸² Lors de la succession de Dwelshauvers-Dery en 1903, un dénommé Hubert, qui pourrait avoir été le Répétiteur en 1893, s'est vu proposer par le Recteur l'attribution des cours de physique industrielle et de mécanique appliquée (en donnant provisoirement les répétitions du cours). Dans « Personnel de la Mécanique », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁸³ Les dix dernières personnes sont respectivement H. Hubert, Fr. Deruyts, et, pour les élèves, MM. Hankart, L'Heureux, Lebacqz, Libotte, Massange, Nothomb, Dechesne et Schiffers.

¹⁸⁴ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, *op. cit.*, p. 41.

« Donc les essais de machines font plus intimement partie de l'éducation des ingénieurs ; mais, faits par des commençants, quelque habile qu'en soit la direction, ils ne peuvent guère servir à enrichir la science de données sûres. Seulement l'avis des professeurs expérimentés que j'ai consultés à ce sujet est, en général, que les élèves ont l'occasion de se perfectionner et peuvent acquérir les qualités voulues pour aider le maître dans ses recherches scientifiques. »

Le Règlement des Essais de Machine reproduit à la Figure 3-1 stipule d'ailleurs (article 15) que le Prof. Dwelshauvers-Dery est libre d'exploiter les mesures des étudiants pour ses propres travaux de recherche.

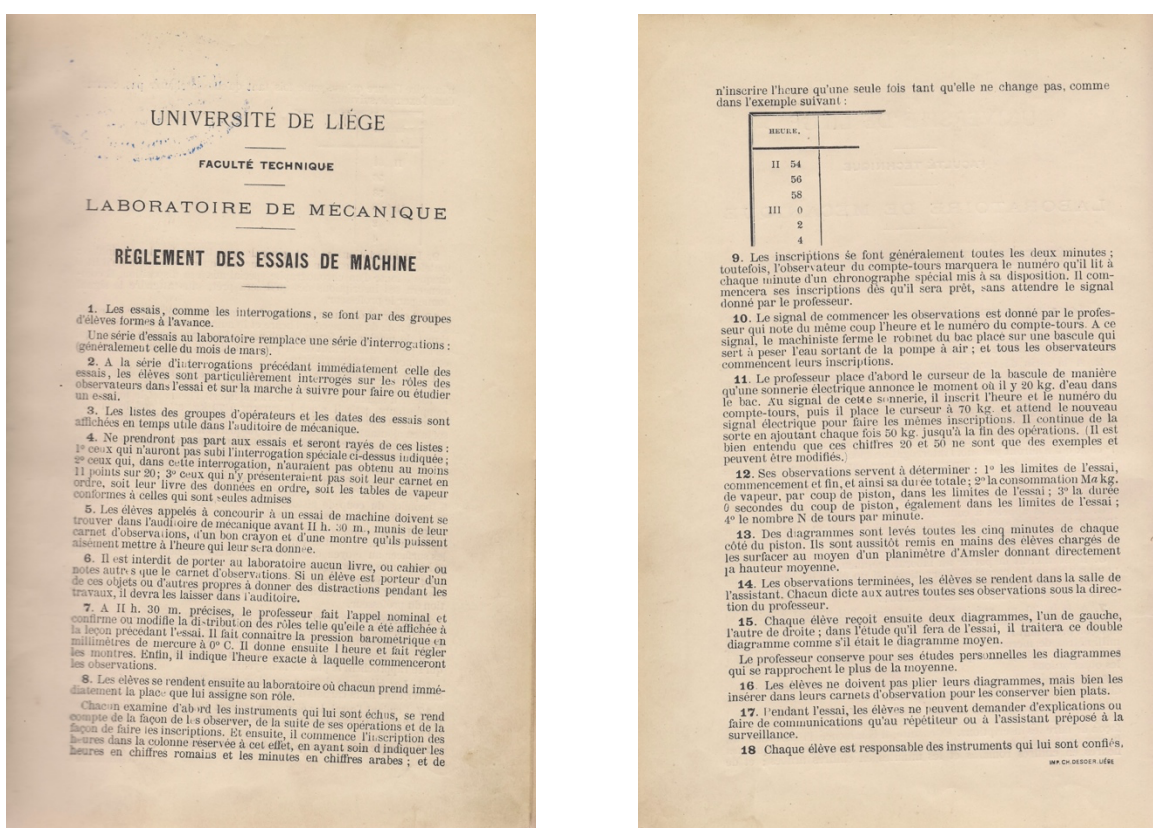


Figure 3-1 : « Règlement des Essais de Machine ». Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902.

Cette vision du rôle important des élèves dans la recherche est effectivement partagée par nombreux de ses collègues à l'étranger¹⁸⁵. Il cite le cas de l'École de mécaniciens d'Ithaca (USA) où les ingénieurs fraîchement diplômés peuvent se perfectionner et poursuivre pendant deux années le travail de recherche qui a mené à leur diplomation. Aussi, le Prof. Lanza du Laboratoire de Boston déclare

¹⁸⁵ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, op. cit., p. 41-42.

« Sans doute, en règle générale, les étudiants ne sauraient faire des recherches originales sans l'aide du professeur, mais cette aide ne leur fait pas défaut dans les Écoles pourvues de Laboratoires, qui ont pu dans ce sens accomplir des travaux importants. Le professeur varie ses essais de manière à faire de chacun un élément d'une recherche générale, et ce sont les élèves qui, sous la surveillance des assistants, recueillent les données d'expérience et font les calculs des résultats. Le professeur les fait entrer ensuite dans le système général. Les recherches originales des étudiants pour baser leurs thèses de graduat, sont aussi une occasion d'enrichir la science ».

Dwelshauvers-Dery décrit également le fonctionnement du *Sibley college* (École de Mécaniciens de l'Université de Cornell aux USA). Les étudiants reçoivent leur diplôme après avoir défendu une « *Master piece, une thèse ayant exigé des recherches, des expériences, des études personnelles, où l'on est surveillé plutôt que guidé par le professeur* »¹⁸⁶.

3.2.4 Le Professeur

Nous venons de voir que le Prof. Dwelshauvers-Dery exploite les résultats des travaux pratiques donnés à l'occasion de ses cours dans le cadre de ses propres travaux de recherche. Non seulement, il participe aux essais en tant qu'observateur, mais aussi il se porte garant de la validité des essais. Ainsi, par exemple, lorsqu'il s'agit de mesurer le niveau de l'eau dans un tube, il dira que « *le professeur soussigné qui a fait ces lectures peut affirmer que le ménisque était à peine sensible parce que le plan d'eau dans le tube allait en montant...* »¹⁸⁷. Aussi, à l'occasion du tarage d'un dispositif d'un dispositif de mesure de débit, on apprend que « *l'observateur signalait le passage du niveau de l'eau à 0^m10, 0^m20, 0^m30, etc., au professeur qui tenait en main un chronographe à rattrapante parfaitement réglé* »¹⁸⁸.

3.3 Données financières du Laboratoire

3.3.1 Évolution des salaires et du coût de la vie en Belgique dans la deuxième moitié du XIX^e siècle et premier quart du XX^e siècle

Afin de pouvoir se faire une idée de la valeur des montants relatifs aux données financières qui seront présentées dans la suite, nous avons recherché des informations quantitatives sur les coûts de la vie et les salaires pour la période étudiée. Puisque notre étude porte sur une période couvrant plusieurs

¹⁸⁶ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum...*, op. cit., p. 53.

¹⁸⁷ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902, p. 48.

¹⁸⁸ *Ibid.*, p. 67.

décennies (approximativement 1870-1910), il est pertinent de prendre en compte l'évolution du coût de la vie et des salaires.

Il existe peu d'études sur l'évolution de l'indice des prix à la consommation avant la première guerre mondiale. L'État belge fournit l'évolution de cet indice, mais seulement depuis 1920. La difficulté liée à la quantification d'un tel indice consiste à définir les produits dans le « panier de la ménagère », leur pondération et leur évolution dans le temps. Il faut également trouver des sources fournissant l'évolution des coûts de ces produits de manière cohérente et sur une période suffisamment longue. Il faut donc garder à l'esprit que les évolutions proposées sur des longues périodes sont fort imprécises. Par exemple, Michotte¹⁸⁹ a établi un indice des prix de détail et de gros, utilisant 3 sources : les comptes du Fonds d'Assistance publique de Louvain, des registres de comptes de la ville de Louvain et d'institutions de charité (notamment des hospices et hôpitaux) à Louvain et des comptes de couvents à Enghien. Il a établi un indice général des prix de détails sur base du coût de 30 denrées (alimentaires et non alimentaires) pour la période 1830-1913. Selon l'auteur, le choix de ces 30 denrées représente de manière satisfaisante l'évolution des prix. Observant l'évolution de cet indice des prix de détail, Michotte distingue une période de hausse de 1835 à 1876, une période de baisse de 1877 à 1896 et à nouveau une période de hausse de 1897 à 1913. Michotte propose différentes explications de ces évolutions que nous ne reprenons pas ici, mais qui font intervenir la pression des prix des produits outre-mer sur les coûts des produits indigènes (et des mesures douanières), l'amélioration du statut des classes ouvrières et agricoles, la limite des terrains exploitables et la hausse de la population.

Scholliers¹⁹⁰ a étudié les salaires *réels* des ouvriers du monde industriel entre les années 1840 et 1939, de manière à vérifier si la vision jusqu'alors jugée optimiste de l'augmentation des salaires de 1.2% par an entre 1846 et 1913 était fondée (augmentation supérieure à celles estimées en France et Grande-Bretagne). Ainsi, Scholliers a également défini un indice des prix, différent de celui de Michotte, basé sur 11 produits de base, ainsi que le kérozène, le charbon, le savon et le prix des loyers. Les informations proviennent de la ville de Gand. Il a suivi l'évolution de cet indice sur la période 1835-1914. Les 11 produits de base représentent approximativement 85% des dépenses d'un ménage de la classe ouvrière (contre 60% dans le cas des 30 produits de Michotte, d'après l'auteur). Le calcul de l'indice pondère les coûts des différents produits et prend en compte une évolution du « panier de la ménagère » en distinguant deux périodes : 1835-1880 et 1880-1914. Scholliers a comparé son indice à

¹⁸⁹ Fritz MICHOTTE. "L'évolution Des Prix de Détail En Belgique de 1830 à 1913." *Bulletin de l'Institut Des Sciences Économiques*, vol. 8, no. 3, 1937, p. 345–57. *JSTOR*, <http://www.jstor.org/stable/40742639>. Consulté le 8 août 2022.

¹⁹⁰ Peter SCHOLLIERS, « A century of real industrial wages in Belgium, 1840-1940 », dans P. SCHOLLIERS et V. ZAMAGNI, eds., *Labour's reward, real wages and economic change in 19th and 20th century Europe* (Aldershot, 1995), p. 107-116.

celui de Michotte (Figure 3-2). Nous ne reprenons pas ici l'analyse complète de cette comparaison, mais nous soulignerons les conclusions de Scholliers. Premièrement, la vie semblait meilleure marché avant 1880, mais avec des fluctuations de prix plus importantes. Deuxièmement, la valeur de l'indice dépend fortement du type de moyenne (arithmétique versus géométrique, pondérée ou non). Troisièmement, le panier de la ménagère doit être représentatif du profil du consommateur (le choix des denrées et la pondération de leurs coûts est importante ; certaines denrées comme le sucre stabilisent les prix). Enfin, il faut éventuellement tenir compte de différences de coûts qui existeraient entre différentes régions du pays.

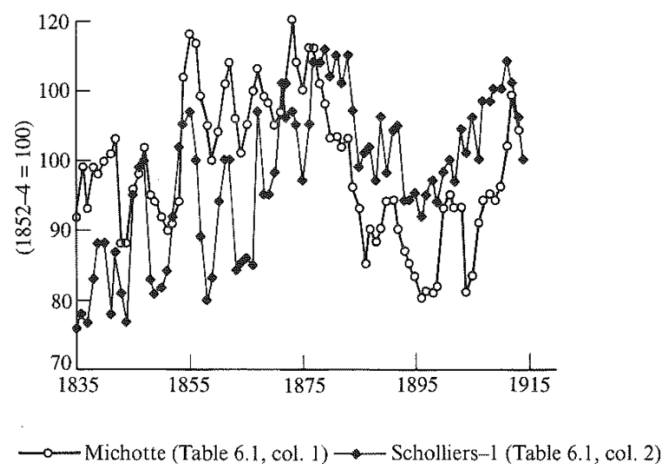


Figure 3-2 : Évolution de l'indice des prix de détail de Michotte (Louvain/Enghien) et Scholliers (Gand) sur la période 1835-1914. Dans Peter SCHOLLIERS, « A century ...1840-1940 », *op. cit.*, p. 108.

Dans un second temps, Scholliers¹⁹¹ a calculé un nouvel indice des salaires des travailleurs industriels belges, constituant une alternative à l'indice de Peeters. Cet indice se base sur les salaires annuels d'hommes et femmes de 13 secteurs de l'industrie et/ou occupations (dont des mineurs, des métallurgistes, des ingénieurs et des ouvriers du zinc). Les salaires sont pondérés par rapport au nombre de travailleurs. Il s'agit ici de salaires *nominaux* (le salaire perçu par le travailleur). La Figure 3-3 indique que l'évolution de cet indice est très proche de celle de l'indice de Peeters. L'augmentation annuelle des salaires est de 1.25%.

¹⁹¹ Peter SCHOLLIERS, « A century ...1840-1940 », *op. cit.*, p. 116-125.

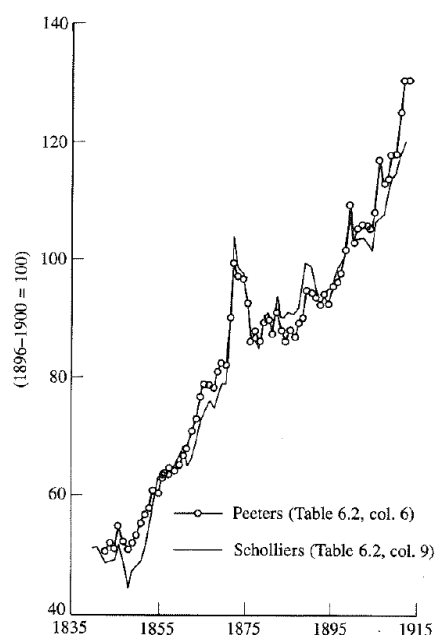


Figure 3-3 : Évolution de l'indice des salaires nominaux de Peeters et Scholliers sur la période 1840-1913. Dans Peter SCHOLLIERS, « A century of real industrial wages in Belgium, 1840-1940 », dans Peter SCHOLLIERS et V. ZAMAGNI, *Real wages and economic change in 19th- and 20th-century Europe*, Aldershot, 1995, p. 117.

Enfin, Scholliers¹⁹² développe un indice des salaires *réels* qu'il évalue sur la période 1840-1939 et le compare à celui de Neyrinck pour le XIX^e siècle. L'indice des salaires réels est égal au ratio entre l'indice des salaires nominaux et l'indice du coût de la vie. A nouveau, nous ne reprenons pas ici l'analyse détaillée de la comparaison faite par Scholliers, mais soulignons quelques-unes des observations ou conclusions les plus importantes¹⁹³. Ainsi, Scholliers observe que sur la période 1850-1913, son indice suit une augmentation annuelle de 1.04%. Sur la période 1880-1913, le nouvel indice présente peu de fluctuations et suit celui de Neyrinck. Il subit une chute importante pendant la première guerre mondiale et des fluctuations importantes jusqu'à la seconde guerre mondiale. Sur la période 1850-1875, les salaires ont augmenté de 1.8% par an et la production industrielle de 3.73 % par an¹⁹⁴. Dans les années 1860-1870, des grèves des ouvriers en Europe ont donné lieu à des augmentations des salaires en Belgique. La crise économique a ensuite diminué les salaires de 4% par an de 1873 à 1877

L'évolution de l'indice des salaires réels peut être davantage influencée par l'évolution des salaires que l'évolution du coût de la vie (par exemple, sur la période 1846-1870). Des grèves des ouvriers en Europe ont donné lieu à des augmentations des salaires en Belgique (par exemple, dans les années 1860-1870, mais surtout après 1900). Pendant la crise économique, les salaires réels ont stagné

¹⁹² Peter SCHOLLIERS, « A century ...1840-1940 », *op. cit.*, p. 125-129.

¹⁹³ Peter SCHOLLIERS, « A century ...1840-1940 », *op. cit.*, p. 127-129.

¹⁹⁴ Scholliers reprend Gadisseur, 1981, p. 55.

entre 1870 and 1880 et ont augmenté de 1% entre 1880 et 1895. L'industrie reprend sa croissance après 1895

A partir des années 1895, les développements technologiques ont permis d'engager des ouvriers peu qualifiés. Des engagements de masse ont été rendus possibles par le développement des moyens de transports qui ont augmenté le périmètre de la zone géographique de résidence des ouvriers autour des usines. A cela s'est ajoutée une augmentation plutôt faible de la productivité (mesure du rendement de production exprimé en output de production par input de ressource tel que des heures de travail). L'augmentation de la main d'œuvre disponible combinée à une faible productivité ont empêché une augmentation rapide des salaires nominaux. Les salaires nominaux et le coût de la vie sont restés plutôt stables de 1895 à 1905. Ensuite, les salaires dans l'industrie ont suivi l'augmentation du coût de la vie avec un retard. Globalement, les salaires réels ont légèrement diminué entre 1895 et 1910. Les salaires réels augmentent significativement en 1913. Ainsi, de 1895 à 1913, les salaires réels augmentent de 0.7% par an.

Scholliers¹⁹⁵ note également que de 1895 à 1905, les salaires nominaux et le coût de la vie influencent de la même manière le salaire réel (pouvoir d'achat). Par contre, à partir de 1905, c'est davantage le salaire nominal que le coût de la vie qui influence le salaire réel.

L'ouvrage de Scholliers et Zamagni fournit également l'évolution annuelle des salaires nominaux pour différentes activités spécifiques et l'évolution annuelle du coût de la vie en Belgique sur la période 1835-1939¹⁹⁶. Nous comparons ces évolutions aux Figure 3-5 et Figure 3-6.

¹⁹⁵ Peter SCHOLLIERS, « A century ...1840-1940 », *op. cit.*, p. 128.

¹⁹⁶ Peter SCHOLLIERS, « A century ...1840-1940 », *op. cit.*, p. 203-206.

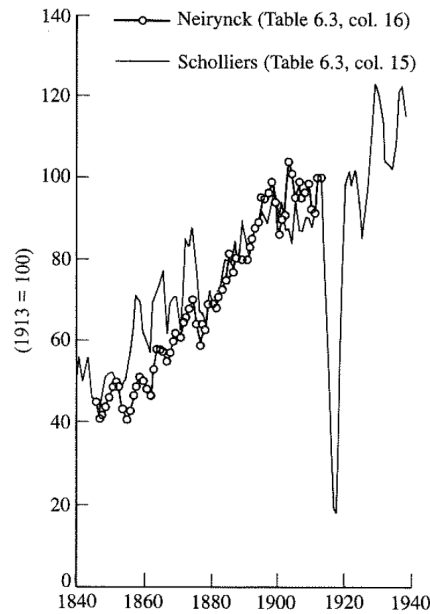


Figure 3-4 : Évolution de l'indice des salaires réels de Neiryck et Scholliers sur la période 1840-1939. Dans Peter SCHOLLIERS, « A century of real industrial wages in Belgium, 1840-1940 », dans Peter SCHOLLIERS et V. ZAMAGNI, *Real wages and economic change in 19th- and 20th-century Europe*, Aldershot, 1995, p. 126.

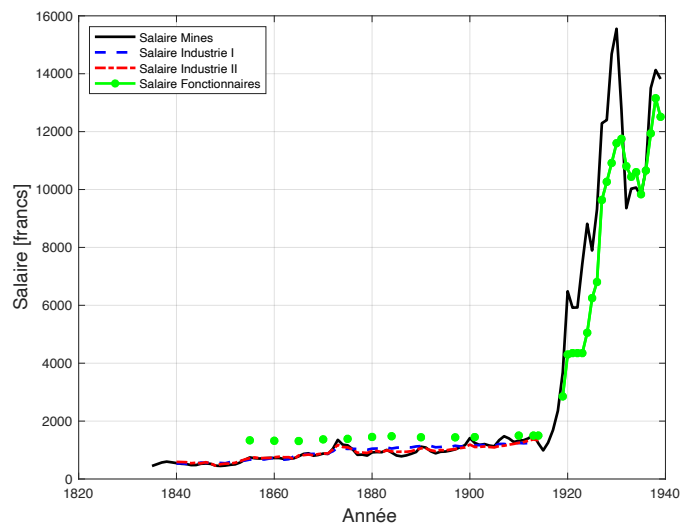


Figure 3-5 : Évolution des salaires nominaux pour différents types d'activités pour la période 1835-1939. Reproduit à partir de Peter SCHOLLIERS et V. ZAMAGNI, *Real wages and economic change in 19th- and 20th-century Europe*, Aldershot, 1995, p. 203-206.

En ce qui concerne l'indice du coût de la vie, son estimation se base sur une moyenne pondérée de 15 denrées et services sur la période 1835-1913, 25 sur la période 1914-1918 et 118 sur la période 1919-1939. Ces denrées et services comprennent de la nourriture, des habits, des loyers, du savon et du charbon.

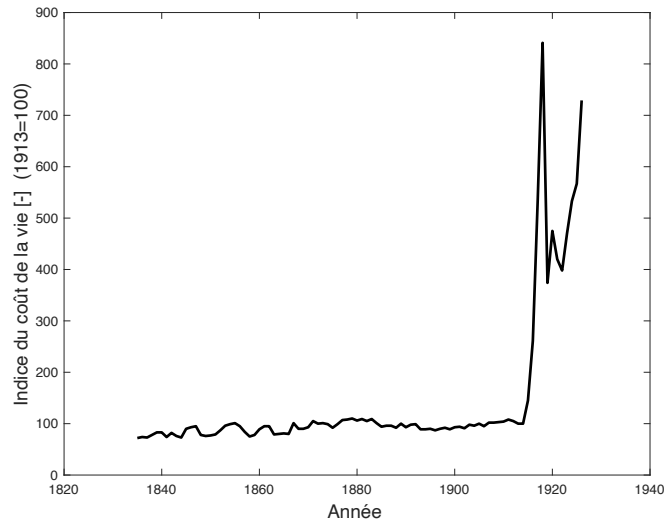


Figure 3-6 : Évolution de l'indice du coût de la vie sur la période 1835-1939 (1913=100). Reproduit à partir de Peter SCHOLLIERS et V. ZAMAGNI, *Real wages and economic change in 19th- and 20th-century Europe*, Aldershot, 1995, p. 203-206.

L'analyse des Figure 3-5 et Figure 3-6 fait clairement apparaître la forte inflation pendant et après la Première Guerre mondiale. Avant cette période, les salaires et le coût de la vie augmentent globalement entre 1835 et 1914, avec des fluctuations visibles sur des plus courtes périodes et dont certaines causes ont été évoquées plus haut.

Nous pouvons conclure que sur la période qui nous intéresse (approximativement 1870-1910), et pour laquelle nous sommes susceptibles de récolter des données financières, les salaires nominaux et le coût de la vie restent du même ordre de grandeur ; ce qui n'est pas le cas après 1914. D'après la Figure 3-3 (et considérons 1913=100), les valeurs minimale et maximale de l'indice des salaires nominaux sont de 66 (en 1870) et 90 (en 1900). D'après la Figure 3-6 (et considérant 1913=100), les valeurs minimale et maximale de l'indice du coût de la vie (« indice des prix ») sont de 87 (en 1896) et 110 (en 1897). Dans la suite de ce travail, afin d'améliorer la comparaison des données financières, relatives à des années différentes, nous renseignerons les indices des salaires et du coût de la vie.

3.3.2 Salaires des membres du Laboratoire

Dans une lettre de 1896 adressée par Victor Dwelshauvers-Dery¹⁹⁷ à l'Administrateur de l'Université de Liège, nous apprenons quels sont les salaires de certains membres du « *service de la mécanique* » (Tableau 3-1) et pour certains leurs qualifications. Aussi, les salaires et les statuts de ces employés semblent précaires et V. Dwelshauvers-Dery en sollicite, auprès de l'Administrateur, une

¹⁹⁷ « Personnel de la Mécanique », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

amélioration. Enfin, le service de la mécanique semble disposer d'une enveloppe fermée et V. Dwelshauvers-Dery suggère d'utiliser le solde laissé par le remplacement de son préparateur (par quelqu'un d'un peu plus jeune au salaire moins élevé) pour augmenter les salaires de son assistant et de son machiniste. Les différents salaires de 1896 sont peut-être couverts par le *crédit ordinaire de la mécanique*¹⁹⁸. Un rapport sur la situation du personnel des Écoles spéciales de 1902¹⁹⁹ donne également des informations sur le salaire d'un assistant et d'un préparateur.

Tableau 3-1 : Salaires de certains membres du Service de la Mécanique Appliquée.

Fonction	Salaire	Année	Indice des salaires nominaux (113=100)	Indice du coût de la vie (113=100)	Indice des salaires réels (113=100)
Assistant	1000-1500 frs par an	1896	80	87	92
	1500 frs par an	1902	86	91	94
Machiniste	1500 frs par an	1896	80	87	92
Préparateur	1000 frs par an (soit 3,25 frs par jour) ²⁰⁰ en début de carrière, 1300 frs par an après 4 ans de fonction et 3500 frs par an en fin de carrière	1896	80	87	92
Répétiteur	2500 frs par an	1902	86	91	94

(Source pour l'année 1896 ; « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège ; Source pour l'année 1902 : « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège)

¹⁹⁸ « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

¹⁹⁹ Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

²⁰⁰ *Op. cit.* « Personnel de la Mécanique », Dwelshauvers-Dery précise qu'un salaire journalier de 3,25 frs est inférieur au salaire moyen d'un ajusteur. Il sollicite d'ailleurs, auprès de l'Administrateur, une augmentation de salaire initial pour atteindre un niveau de 1300 frs par an, ce qui doit permettre de trouver des « candidats capables pour le poste de préparateur ».

Nous n'avons pas retrouvé d'information sur le salaire de Dwelshauvers-Dery, mais le moniteur belge indique que le traitement d'un professeur émérite d'âge avancé de l'Université de Liège est de 8000 francs en 1879²⁰¹.

A titre indicatif, le budget annuel de l'Université pour la période 1897-1899 est donnée au Tableau 3-2. Le budget personnel était également de 687341 francs en 1893²⁰². Il a augmenté continuellement pour atteindre 810450 francs en 1901.

Tableau 3-2: Budget annuel de l'Université de Liège entre 1897 et 1901²⁰³.

Année	Personnel		Matériel	
1897	A	390500	Bibliothèque	23245
	B	160740	Fac. Sciences	42349
	C	158300	Fac. Technique	18491
	D	20670	Fac. Médecine	53919
			Ad ^{on}	80886
	<u>Total</u>	<u>730210</u>	<u>Total</u>	<u>218890</u>
1898	A	397500	Bibliothèque	23245
	B	166240	Fac. Sciences	42869
	C	157725	Fac. Technique	18491
	D	21445	Fac. Médecine	55019
			Ad ^{on}	80886
	<u>Total</u>	<u>742910</u>	<u>Total</u>	<u>220510</u>
1899	A	402500	Bibliothèque	23245
	B	167640	Fac. Sciences	42609
	C	163440	Fac. Technique	18491
	D	19420	Fac. Médecine	57669
			Droit	250
			Ad ^{on}	80886
	<u>Total</u>	<u>753000</u>	<u>Total</u>	<u>223150</u>
1900	A	421500	Bibliothèque	23245
	B	174640	Fac. Sciences	44509
	C	166650	Fac. Technique	20841
	D	16625	Fac. Médecine	58569
			Droit	250
			Ad ^{on}	99086
	<u>Total</u>	<u>779415</u>	<u>Total</u>	<u>246500</u>
1901	A	425500	Bibliothèque	23245
	B	183390	Fac. Sciences	44504
	C	184935	Fac. Technique	20841
	D	16625	Fac. Médecine	60069
			Droit	250

²⁰¹ « Développement du Budget du Ministère de l'Instruction Publique pour l'Exercice 1879 », Dans : *Recueil des pièces imprimées par ordre de la Chambre des Représentants*. Pièce n°34 (séance du 17 décembre 1878), p. 32-33. A titre indicatif, l'indice des salaires nominaux et l'indice des prix (tels que proposés par Scholliers) étaient de 71 et 110 en 1879.

²⁰² Rapport de 1901 adressé au Ministre pour solliciter une augmentation du budget du personnel « auxiliaire » (assistants et répétiteurs) des Écoles spéciales de 14400 frs (8500 frs pour la Faculté Technique et 5500 frs pour la Faculté des Sciences), « Personnel Écoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

²⁰³ Nous n'avons pas trouvé la signification des lettres A, B, C et D. "A" pourrait signifier le corps académique. « Ad^{on} » pourrait signifier Administration.

			Ad ^{on}	108086
	<u>Total</u>	<u>810450</u>	<u>Total</u>	<u>257000</u>

(Source : « Personnel Ecoles spéciales », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège)

Nous avons tenté de comparer ce budget à celui du Conservatoire National des Arts et Métiers, connu pour l'année 1887 et bien plus détaillé (Tableau 3-3). La comparaison reste difficile, mais elle permet d'obtenir une meilleure idée des proportions entre certains postes. Le poste « bibliothèque » représente 1,8% du poste « Personnel ». A Liège, en 1897, il en représente 3,2%. Le poste « personnel » représente 61% du budget total au Conservatoire des Arts et Métiers, alors qu'en 1897, il en représente 77% à Liège. Dans un cas comme dans l'autre, le coût du personnel présente une fraction significative du budget annuel. Au Conservatoire des Arts et Métiers, on notera aussi le budget important alloué aux collections et aux modèles.

Tableau 3-3: Projet de Budget des dépenses ordinaires du Conservatoire des Arts et Métiers pour l'exercice 1887.

Division du Budget par chapitre et par article		Crédit demandé par article (en francs)	Crédit demandé par chapitre (en francs)
Chapitre 1 : Personnel	Traitement des professeurs	150000	271350
	Traitement des préparateurs	25800	
	Traitement des fonctionnaires et employés	40100	
	Traitement des gardiens et garçons de laboratoires	50950	
	Fonds de réserve	4500	
Chapitre 2 : collections et expériences	Achats et réparations de modèles	70000	84500
	Tableaux pour les galeries	2000	
	Entretien des collections et galeries	7500	
	Service des machines en mouvement	4500	
	Menus frais d'expériences	500	
Chapitre 3 : Bibliothèque	Achat de livres	2500	5000
	Abonnements	1200	
	Reliure	800	
	Indemnité des gardiens de la Bibliothèque	500	
Chapitre 4 : Portefeuille industriel	Dessins	2500	4000
	Brevets d'inventions et marques de fabrique	1500	

Chapitre 5 : Haut Enseignement	Géométrie appliquée aux arts	500	22500
	Géométrie descriptive	500	
	Mécanique appliquée aux arts	2500	
	Constructions civiles	500	
	Physiques appliquée aux arts	3000	
	Chimie générale dans ses rapports avec l'industrie	3000	
	Chimie industrielle	3000	
	Chimie appliquée aux industries de la teinture, de la céramique et de la verrerie	3000	
	Chimie agricole et analyse chimique	3000	
	Agriculture	500	
	Travaux agricoles et génie rural	500	
	Filature et tissage	500	
	Économie politique et législation industrielle	200	
	Économie industrielle et statistique	150	
	Droit commercial	150	
Police de cours et dépenses diverses	1500		
Chapitre 6 : Bâtiments	Bâtiments et entretien	4000	
Chapitre 7 : Chauffage et éclairage	Indemnité de chauffage et d'éclairage du Directeur	2000	36000
	Combustibles et service de calorifie	13000	
	Fumisterie	2000	
	Appareil d'éclairage et entretien	3000	
	Gaz et huile	16000	
Chapitre 8 : Mobilier et fournitures de bureaux	Achat et réparation d'objets mobiliers	10000	12500
	Fournitures de bureaux et impressions diverses	1500	
	Ports de lettres et abonnement de téléphone	1000	
	Habillement des gens de service	3700	9000
	Blanchissage et frottage	1200	
	Frais de transport et déplacement	900	
	Balayage et égouts	1200	
	Objets destinés au nettoyage	2000	

(Source : « Correspondance du 12 décembre 1884 au 13 avril 1886 », Registres des minutes de la correspondance de la Direction Archives du Conservatoire des Arts et Métiers de Paris)

3.3.3 Matériel du Laboratoire de mécanique

La correspondance entre Dwelshauvers-Dery et les autorités de l'Université renseigne certains coûts d'investissement et d'opération de son laboratoire. Les salaires associés à certaines fonctions ont déjà été donnés au Tableau 3-1. Le coût lié à la création du Laboratoire de mécanique (coût immobilier et le coût du matériel) est certainement une information intéressante. Nous avons rassemblé les informations obtenues au Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Données budgétaires liées à la création du Laboratoire de Mécanique.

Poste	Coût	Année	Indice des salaires nominaux (113=100)	Indice du coût de la vie (113=100)	Indice des salaires réels (113=100)
Collection de modèles cinématique Collection en lien avec la mécanique	10000 frs ²⁰⁴ 17000 frs ²⁰⁵	1879	71	110	65
Appareils et Instruments lié à la machine à vapeur	17000 frs ²⁰⁶	1880	76	106	72
Machine à vapeur	Non renseigné. Peut être offert par la Maison Beer. Peut-être acquise avec les 10000 frs	1880	76	106	72
Chaudière	7000 frs ²⁰⁷	1883	78	109	72
Hangar	9625 frs ²⁰⁸	1884	76	101	75

²⁰⁴ Note manuscrite de Dwelshauvers-Dery, « Réponse à la question... », « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège, p. 2. Les Professeurs Dwelshauvers et Holzer se partagent un budget de 20000 francs. Holzer utilise ses 10000 francs pour démarrer sa collection de modèles cinématiques. On retrouve effectivement la trace de ce budget de 20000 francs dans le « Développement du Budget du Ministère de l'Instruction Publique pour l'Exercice 1879 », dans *Recueil des pièces imprimées par ordre de la Chambre des Représentants*. Pièce n°34 (séance du 17 décembre 1878), p. 34.

²⁰⁵ Note manuscrite de Dwelshauvers-Dery, « Réponse à la question... », « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège, p. 7. Il n'est pas clair si ce montant comprend la machine à vapeur et la chaudière.

²⁰⁶ Note manuscrite de Dwelshauvers-Dery, « Réponse à la question... », *op. cit.*, p. 3. Dans son article sur les Laboratoires de mécanique publié dans le Referendum, Dwelshauvers-Dery mentionne qu'il a ramené de Londres en 1862 un indicateur Richards. Malheureusement, on n'en connaît pas le coût. Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum ... Mécanique, op. cit.*, p. 39.

²⁰⁷ La chaudière a été fournie à crédit au laboratoire par le fabricant De Naeyer. En 1885, Dwelshauvers déclare aussi avoir payé la moitié à M. De Naeyer avec qui il a un accord. Dwelshauvers demande un subside spécial de 7000 pour payer M. De Naeyer. Voir la note manuscrite de Dwelshauvers-Dery, « Réponse à la question... », *op. cit.*, p. 9, 12 et 15. Ce subside lui aurait finalement été octroyé par l'administrateur Bormans. Voir la lettre du 17 novembre 1890 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

²⁰⁸ Il s'agissait du coût d'un hangar à Liège, qui ne sera probablement pas acheté. Voir la note manuscrite de Dwelshauvers-Dery, « Réponse à la question... », « Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège, p. 9.

	22250 frs ²⁰⁹				
Crédit matériel	2900 frs ²¹⁰	1888	77	92	84
Remplacement cylindre machine à vapeur	6000 frs ²¹¹	1899	84	89	94

Le crédit de 2900 francs reçu annuellement vers 1888 par le Service de Mécanique appliquée est à comparer au crédit matériel reçu par chacune des Facultés. Nous avons tenté de rassembler cette information sur la période 1890-1912 (Tableau 3-5), mais l'information reste incomplète. Notons que la Faculté technique n'existe qu'après 1893. Vers 1888-1890, le crédit matériel (de la Mécanique) représente 4,8% du crédit octroyé à la Faculté des Sciences. Ce crédit augment de 1200 francs en 1893, peut-être en raison de l'activité naissante du Laboratoire de Mécanique associé au Service. Nous noterons aussi le crédit important qui a été octroyé en 1899 (près de 10% du crédit matériel total octroyé aux Facultés des Sciences et Technique) pour le remplacement du cylindre de la machine à vapeur.

Tableau 3-5 : Crédit matériel annuel octroyé par le Ministère de l'Intérieur et de l'instruction publique aux différentes Facultés de l'Université de Liège.

	Faculté des Sciences y compris les Écoles Spéciales	Faculté Technique	Faculté de Médecine	Droit	Philosophie	Total
1890	60000 frs (Comprend les Écoles Spéciales)	/	42969 frs			
1893	60000 frs + une augmentation de 1200 frs pour le service de Mécanique Appliquée	/	49219 frs			
1897			53919			
1898	42569 frs	18491 frs	55319 frs			
1901	44509 frs	20851 frs	60069 frs			

²⁰⁹ Un architecte donne un devis de 22250 frs pour un local de 300 m². Voir la lettre du 17 novembre 1890 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

²¹⁰ « Crédit matériel 1888 », Dossier 415 (« Crédit matériel »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège. Le crédit est octroyé (probablement annuellement) par le Ministère de l'intérieur et de l'Instruction publique.

²¹¹ « Crédit matériel 1899 », Dossier 415 (« Crédit matériel »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

1909	49619 frs	22277 frs	67389 frs	7600 frs	11300 frs	158185 frs
1911	49619 frs	22277 frs	68389 frs	7750 frs	11 400 frs	159435 frs
1912	49619 frs	22527 frs	68389 frs	7950 frs	11 400 frs	159885 frs
1913	54619 frs	22527 frs	69889 frs	7950 frs	11 400 frs	166385 frs

(Source : Dossier 415 (« Crédit matériel »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège)

3.3.4 Missions à l'étranger

Nous n'avons pas trouvé de demande de crédits pour des missions à l'étranger réalisées par Dwelshauvers-Dery. Nous avons toutefois jugé utile de rapporter l'octroi (par le Ministère des Sciences et des Arts) d'un subside de 1000 francs au Prof. Herman Hubert, successeur de Dwelshauvers-Dery en 1912 pour un voyage d'études en Amérique²¹². Il doit y visiter les installations techniques de plusieurs laboratoires « *réputés pour la perfection de leur organisation* ». On apprend également qu'Hubert avait visité à ses propres frais les laboratoires de machines de Berlin et Copenhague.

Antérieurement à Herman Hubert, Dwelshauvers-Dery semble également voyager. Il visite notamment les expositions internationales. Il participe aux Expositions de Londres, de Vienne, de Milan, d'Amsterdam et de Paris de 1878 à 1889 et en rédige des rapports pour le compte du Gouvernement belge²¹³. Ses voyages lui ont certainement permis de tisser des liens avec des industriels et savants de son époque, mais aussi de se tenir informé des dernières innovations. Le contenu de ses enseignements a aussi certainement été mis à jour. Par exemple, dans son programme de Mécanique appliquée et Physique industrielle de 1878, il mentionne des mécanismes de machines à vapeur exposés à l'Exposition de Vienne de 1873²¹⁴. On sait qu'il a été élu par ses collègues Vice-Président du Jury de la Mécanique Générale à l'Exposition de 1889.

3.4 Conclusions

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons listé les différents intervenants du laboratoire et décrit le rôle qu'ils y jouent. La réalisation d'un essai de machine à vapeur demande un grand nombre d'intervenants (on parlerait aujourd'hui d'une « grande équipe ») : professeur, répétiteur, assistant, machiniste, préparateur, et élèves. Le professeur participe aux essais, probablement motivé par sa recherche personnelle. Nous soulignerons le rôle important joué par les élèves qui, tout en se formant à des techniques de mesures de pointe, participent indirectement à la recherche du professeur. Le rôle du

²¹² « 1912, Mr. H. Hubert, Voyage en Amérique ». Dossier 300 « Subsidés extraordinaires », Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

²¹³ H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. Mai 1900, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

²¹⁴ V. DWELSHAUVERS-DERY, *Programme des cours ...*, op. cit., p. 93.

personnel technique est également majeur, justifiant la nécessité de trouver des ouvriers au profil très spécifique

Dans seconde partie, nous avons voulu rassembler des données financières liées au coût de la mise en place du laboratoire et à son coût de fonctionnement (salaires, crédits matériel annuels). Anticipant le fait que les données financières recueillies concerneraient des années fort éloignées (la carrière de Dwelshauvers-Dery s'étalant de 1868 à 1904 et celle de son successeur se prolongeant jusqu'à la Première Guerre mondiale), nous avons tout d'abord vérifié s'il fallait prendre en compte les variations du coût de la vie. La période avant la Première Guerre mondiale a été relativement stable avant d'afficher une forte inflation. Par soucis de rigueur, nous avons renseigné les indices des salaires nominal et réel ainsi que l'indice du coût de la vie pour chaque année considérée. Nous avons également souligné la difficulté à estimer une évolution d'un indice du coût de la vie sur une longue période (notamment en raison de l'évolution des habitudes de consommation).

En ce qui concerne l'achat de matériel, en plus des crédits reçus du Ministère de tutelle, tout porte à croire que Dwelshauvers-Dery ait investi une partie de sa fortune personnelle. En ce qui concerne le budget de fonctionnement, les salaires constituent un poste important. Le service de Mécanique dispose certainement d'une enveloppe fermée et doit en tenir compte pour l'engagement du personnel.

CHAPITRE 4 Étude et enseignement des machines thermiques au Laboratoire de Mécanique

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'émergence de la thermodynamique appliquée (ou thermodynamique technique) et son application aux machines thermiques comme nouvelle discipline de l'ingénierie enseignée et étudiée au Laboratoire de Mécanique.

La thermodynamique est la branche de la physique qui s'intéresse aux conversions entre chaleur et travail. Comme son nom l'indique, elle traite « *de la corrélation régissant les deux ordres de phénomènes : thermiques et dynamiques* »²¹⁵. C'est principalement l'étude des machines à vapeur qui a permis son développement. La publication de Sadi Carnot, qui pose les bases du Second principe de la thermodynamique, en est un exemple canonique sur lequel nous reviendrons plus tard. Une nouvelle science fondamentale est née d'une application technologique. La thermodynamique constitue ainsi un parfait contre-exemple du modèle linéaire de l'innovation, puisqu'une technologie bien connue au XIX^e siècle, la machine à vapeur, a servi de catalyseur au développement de nouvelles théories de la physique, dont la portée dépassera bien vite l'étude des machines à vapeur. Elle s'avère en effet vite féconde dans les domaines les plus divers de la physique et de la chimie²¹⁶. Aujourd'hui encore, le champ d'applications de la thermodynamique et ses principes est encore très vaste : les moteurs, les pompes à chaleur, la climatologie, la biologie, etc.

Les principes de la thermodynamique s'établissent progressivement tout au long du XIX^e siècle : le théorème de Carnot (1824), la conservation de l'énergie (Mayer et Joule en 1842 et 1843), l'entropie (Clausius en 1865). Clausius introduira les notions de *Premier* et *Second Principes de la Thermodynamique*, proposant ainsi un canevas qui est encore celui employé aujourd'hui dans l'étude et l'enseignement de *thermodynamique classique*. Dans le dernier quart du XIX^e siècle, la thermodynamique classique est encore une branche relativement jeune de la science, mais suffisamment développée pour permettre son application au perfectionnement des moteurs à vapeur (qui seront encore

²¹⁵ André HOUBERECHTS, *Traité de thermodynamique technique*, Librairie Universitaire, Louvain et Dunot, Paris, 3^e édition, 1962, p. 3.

²¹⁶ *Ibid.*, p.3.

largement employés au XX^e siècle) et au développement de nouveaux moteurs thermiques et ensuite à celui des machines frigorifiques.

Nous désignerons par *machine thermique* les moteurs thermiques (qu'ils soient à vapeur, au gaz, à air, etc.) et les machines frigorifiques. C'est précisément à cette application de la thermodynamique classique que nous nous intéressons dans ce chapitre. L'application de la thermodynamique à l'étude des machines thermiques s'appelle aujourd'hui la *Thermodynamique Appliquée*, ou *Thermodynamique Technique*, ou *Thermodynamique Appliquée aux Machines (et Systèmes) Thermiques*.

Nous noterons que d'autres branches de la thermodynamique se sont développées au XX^e siècle, notamment la *Thermodynamique statistique* (qui cherchera à comprendre les phénomènes macroscopiques en les reliant à l'échelle microscopique) et la *Thermodynamique des phénomènes irréversibles*.

Nous remarquerons que le terme *Thermodynamique* n'est apparu que tardivement, en 1849 (c'est Thomson qui le propose), et son utilisation s'est ensuite progressivement diffusée. Ainsi, par exemple, en 1872, dans sa *Note sur le second principe de la thermodynamique*, Belpaire évoque encore la *Théorie mécanique de la chaleur* de Zeuner et le « *premier principe de la théorie mécanique de la chaleur* »²¹⁷.

Dans ce chapitre, nous commencerons par définir ce qu'est une machine et plus précisément une machine thermique. Cet objet étant central dans le présent travail. Nous analyserons ensuite les précis des cours de *Mécanique appliquée* et de *Physique industrielle* à l'Université de Liège de 1868 à 1913. Ces cours, qui préfigurent un cours de thermodynamique appliquée moderne, constituent un corpus de sources très riche pour évaluer la diffusion de la théorie encore jeune de la thermodynamique dans la formation des ingénieurs.

4.2 Les machines thermiques à la fin du XIX^e siècle

4.2.1 Définitions et aspects essentiels des machines

A ce stade, il apparaît pertinent de définir ce qu'est une machine, ou du moins qu'elles en sont les définitions données à la fin du XIX^e au début du XX^e siècle par les ingénieurs mécaniciens.

²¹⁷ Théo BELPAIRE, « Note sur le second principe de la thermodynamique, » *Bulletins de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres, et des Beaux-Arts de Belgique*, 34, 1872, p. 509-10.

Reuleaux²¹⁸, présenté par l'historien américain Lewis Mumford (1895-1990)²¹⁹ comme le « premier grand morphologiste des machines » en donne la définition suivante : « Une machine est une combinaison de corps résistants, assemblés de telle façon que par leur moyen et par certaines motions déterminantes, les forces mécaniques de la nature soient obligées de faire le travail »²²⁰. Mumford en proposera plus tard (en 1934) une définition différente mais complémentaire, déclarant que « les machines ont été développées à partir d'un complexe d'éléments non organiques pour convertir l'énergie, accomplir un travail, accroître les capacités mécaniques ou sensorielles du corps humain, ou réduire à un ordre et une régularité mesurables les phénomènes de la vie ». Mumford²²¹ rappelle que « la machine ne peut pas être séparée de son cadre social, car c'est ce cadre qui lui confère un sens et un but ».

En 1868, Jean-Baptiste Brasseur, Professeur à l'Université de Liège, propose déjà de distinguer deux espèces de machines : « les métiers où la géométrie plus que la mécanique intervient par les nombreuses et ingénieuses transformations de mouvement qu'elle apprend à réaliser ; et les machines motrices dont l'économie de force motrice est le but principal et où les lois de la mécanique rationnelle sont indispensables. »²²²

Vers 1890, Victor Dwelshauvers-Dery « appelle machine un ensemble de pièces capables de résistances et disposées de telle façon que sous l'influence des efforts appelés à les solliciter elles ne puissent prendre que des mouvements prescrits par avance, déterminés aussi bien sous le rapport de la direction et du sens [?] que sous celui de la vitesse »²²³. « Il faut distinguer la machine des systèmes libres ». Dans ces derniers, sous l'action d'un effort, la matière accélère dans la direction de l'effort. Dans son cours de mécanique, dont l'objet central est la machine, Dwelshauvers-Dery s'intéresse à plusieurs catégories de machines : les moteurs thermiques (principalement les machines à vapeur et accessoirement les machines à gaz, et les moteurs à air), les moteurs hydrauliques et les pompes à air et à eau. Dans ce cours, Dwelshauvers-Dery aborde très vite les résistances passives auxquelles sont sujettes les machines et qui influencent fortement leur performance.

²¹⁸ Franz REULEAUX, *Cinématiques. Principes Fondamentaux d'une Théorie Générales des Machines*. (Debize, A. Trad.), Liège, Librairie Marcel Nierstrasz, 1877, p. 37.

²¹⁹ Lewis MUMFORD, *Technics and Civilization* (1^e éd. 1934), (trad. fr. *Technique et civilisation*, Marseille, Parenthèses, 2016), p. 33.

²²⁰ *Op.cit.* Lewis MUMFORD, p. 33. Remarquons que la définition exacte donnée par Reuleaux dans la traduction par Debize de son ouvrage *Cinématiques. Principes Fondamentaux d'une Théorie Générales des Machines* désigne la machine comme « un assemblage de corps résistants, disposés de manière à obliger les forces mécaniques naturelles à agir, en donnant lieu à des mouvements déterminés ».

²²¹ *Op.cit.* Lewis MUMFORD, p. 128.

²²² Jean-Baptiste BRASSEUR et François FOLIE, *Précis du cours de mécanique appliquée (ouvrage posthume terminé d'après les manuscrits de l'auteur par F. Folie)*, Carmanne, Liège, 1868, p. 1.

²²³ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890, ff. 1.

Dans la continuité de son prédécesseur Dwelshauvers-Dery, Herman Hubert écrira (en 1905) que les machines « *sont des ensembles de corps qui sont maintenus en mouvement par une source d'énergie naturelle, et qui transforment cette énergie en travail utilisable. Ces corps ne sont pas libres : ils ont des liaisons telles, que les trajectoires de leurs différents points sont prescrites. [...] Les forces appelées à agir dans la machine doivent donc être connues, la machine n'est construite que pour leur obéir ou leur résister dans des conditions prévues. L'expérience prouve, du reste, que l'on atteint convenablement le but visé par la machine, que dans certaines conditions de vitesse et surtout de régularité. Elle montre aussi que l'application de l'énergie naturelle à la machine, sa transmission par les organes de celle-ci et sa transformation en travail disponible utilement, sont toujours accompagnées de certaines pertes. [...] Les machines ne rendent par conséquent qu'une partie de l'énergie naturelle qu'on leur fournit* »²²⁴.

Les définitions, de la fin du XIX^e siècle, qui précèdent introduisent les idées de conversion d'énergie (« force motrice », « forces mécaniques de la nature », « énergie naturelle »), de mouvement ou de trajectoire contraints, et de pertes. Intéressons-nous à présent à quelques définitions données par des penseurs de la première moitié du XX^e siècle, certainement influencés par l'amélioration des machines à vapeur et par le développement des autres moteurs auxquels ils ont assisté.

La pensée de l'ingénieur français Jacques Lafitte, père de la *mécanologie*, mérite particulièrement d'être étudiée. Tout d'abord, dans *Réflexions sur la science des machines* publié en 1932, Lafitte remarque que la définition de la machine a évolué d'un transformateur de mouvement à un transformateur de forces et finalement d'énergie²²⁵. Il reproche aux définitions du XIX^e siècle de ne reposer que sur certains phénomènes dont la machine est le siège et de ne pas se fonder sur l'observation des caractères différentiels bien déterminés des machines. Ainsi, on ne doit pas uniquement caractériser la machine par sa capacité à transformer l'énergie. Qui de la machine à écrire dont le but n'est pas de convertir l'énergie ? et du bœuf qui convertit l'énergie comme un moteur ? Lafitte distingue bien les corps bruts de la nature (par exemple le nid d'un oiseau) des corps organisés construits par l'homme²²⁶. Les premiers sont invariables (basés sur le hasard ou l'instinct animal) et les seconds sont susceptibles d'évolutions. On pourrait qualifier de machine l'ensemble des corps organisés construits par l'homme. Cela engloberait alors les « *engins, instruments, appareils, outils, jouets, constructions architecturales, etc.* ». Il s'agirait de tous les corps ou assemblages de corps résistants « *qui reçoivent de l'homme une forme plastique organisée* ». Il insiste sur le fait que « *toute définition [de la machine] qui s'en pourra*

²²⁴ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 2.

²²⁵ Jacques LAFITTE, *Réflexions sur la science des machines*, Cahiers de la nouvelle journée, 21, Paris, Librairie Bloud & Gay, 1932, p. 30.

²²⁶ *Ibid.*, p. 25 et 28.

proposer ne sera qu'une approximation sans grand intérêt, révisable à chaque nouveau progrès de la science et dangereuse parce qu'elle tend à cristalliser dans une forme immuable l'expression de phénomènes essentiellement mouvants »²²⁷. Lafitte conclut que « *pour définir la machine, il faut d'abord assurer les progrès de la science des machines [la mécanologie] par des observations directes et nombreuses* »²²⁸.

Dans *Technique et civilisation* publié en 1934, Lewis Mumford (1895-1990)²²⁹, distingue les outils et les machines en considérant le degré d'indépendance acquis au cours de l'opération (on manipule un outil, alors que la machine a une action automatique), la complexité (attention toutefois qu'un outil peut permettre d'accomplir des tâches de précision alors qu'une machine peut réaliser des tâches élémentaires), l'automatisation (la machine permet d'atteindre un degré d'automatisation plus élevé), la précision et la spécialisation des fonctions (un outil est plus souple ; par exemple, un couteau permet de réaliser différentes actions).

Dans son célèbre ouvrage *Du mode d'existence des objets techniques* publié en 1958, Gilbert Simondon (1924-1989) distingue 3 niveaux d'objets techniques : l'élément, l'individu et l'ensemble. L'élément correspondrait en quelque sorte à l'outil et l'individu à la machine. Les individus techniques sont composés d'éléments techniques et d'un milieu associé. L'ensemble technique comprend des dispositifs qui font qu'il ne tend pas à créer un unique milieu associé²³⁰. Les éléments de l'ensemble technique interagissent entre eux, mais ils ne tendent pas à se concrétiser²³¹, c'est-à-dire à s'unifier. Simondon donne l'exemple suivant²³² : la chaudière tubulaire et la coulisse de Stephenson sont des éléments thermodynamiques. Ils sont utilisés dans des moteurs thermodynamiques, comme des locomotives, qui sont des individus. Grâce à ses dernières, le transport de « *gros tonnages* » ne dépend plus des voies navigables. Ainsi, les grands ensembles industriels du XIX^e siècle se reconcentrent autour des mines de charbon, dont la combustion produit la chaleur nécessaire aux moteurs thermodynamique, et des usines métallurgiques. Ces ensembles industriels sont des ensembles thermodynamiques.

²²⁷ Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, *op. cit.*, p. 29.

²²⁸ *Ibid.*, p. 30. Lafitte propose alors la science des machines ou mécanologie (s'intéressant aux machines existantes), une science normative qui se base sur l'observation et étudie les différences de formes, de structures, de fonctionnements et d'organisations générales et la genèse de chaque type.

Cette discipline rejoint deux autres disciplines : l'art de construire des machines (de les concevoir, de les réaliser matériellement et d'en assurer le fonctionnement) et la mécanographie (science descriptive générale des machines). La mécanographie reprend entre autres l'étude des techniques de représentations des machines (représentation écrites, graphiques des formes et fonctionnements ou symboliques), l'étude des classifications. Voir Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, *op. cit.*, p. 32-4.

²²⁹ Lewis MUMFORD, *Technics and Civilization* (1^e éd. 1934), (trad. fr. *Technique et civilisation*, Marseille, Parenthèses, 2016).

²³⁰ Gilbert SIMONDON. *Du mode d'existence des objets techniques*. Editions Aubier, 2012 [Edition revue et corrigée de l'ouvrage original de 1958], p. 79.

²³¹ *Ibid.*, p. 79. Nous aborderons la notion de concrétisation à la section 4.7.

²³² *Ibid.*, p. 83-87.

Dans les années 1950-60, pour Arnold Gehlen (1904-1976), anthropologue, sociologue et philosophe allemand, « on appelle machine un mécanisme destiné à transférer des énergies qui effectuent un travail utile »²³³. Pour comprendre la définition de Gehlen des outils et des machines, il faut comprendre sa vision de l'homme comme être incomplet, déficient (*Mängelwesen*). L'origine de la nécessité de la technique trouverait son origine dans la « déficience organique » de l'homme²³⁴. Ce dernier ne peut pas vivre dans son environnement sans une adaptation de celui-ci, adaptation qui passe notamment par le développement de la technique. Il distingue les techniques de substitution (qui permettent des actions que le corps humain n'est pas capable de réaliser), les techniques de renforcement (qui renforcent un organe, comme l'utilisation de la pierre qui renforce le poing seul) et les techniques de décharge (qui permettent de soulager les organes pour économiser le travail fait par l'homme). Au sens de Gehlen, la machine frigorifique nous semble être à la fois une technique de substitution (le corps humain n'est pas capable de produire du froid), une technique de renforcement (la capacité à produire du froid d'une machine frigorifique est plus importante que celle d'une source de froid naturelle, comme le froid stocké par une glacière ou le froid produit par évaporation de l'eau) et une technique de décharge (en permettant de stocker des denrées périssables, l'homme économise certainement le travail nécessaire à son alimentation).

4.2.2 L'état des connaissances sur les machines thermiques au Congrès international de mécanique de Liège en 1905

A la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, l'étude et les applications industrielles des machines thermiques concernaient très majoritairement les moteurs thermiques (*machines motrices*). Les machines pour la production de froid sont encore très peu répandues et la chaleur est toujours produite majoritairement par combustion. A côté des moteurs thermiques, les moteurs hydrauliques font encore l'objet d'un enseignement en mécanique appliquée (voir Figure 4-1).

L'analyse des actes du Congrès international de mécanique appliquée qui s'est tenu à Liège en 1905 permet de dresser un état de l'art des connaissances dans le domaine des machines thermiques, mais également d'en apprendre davantage sur le déroulement d'une conférence au début du XX^e siècle.

²³³ Arnold GEHLEN, *Anthropologische und sozialpsychologische Untersuchungen. Mit e. Nachwort v. Herbert Schnädelbach*, Reinbek, Rowohlt, 1986, (trad. fr. *Anthropologie et psychologie sociale. Avec une postface d'Herbert Schnädelbach*, Paris, PUF, 1990), p. 179. Ce livre rassemble des écrits d'Arnold Gehlen publiés en 1986, après sa mort. Le livre a été traduit en français en 1990 sous le titre *Anthropologie et psychologie sociale*. Les écrits de Gehlen datent des années 1950 - début des années 1960. En plus de d'une postface, l'ouvrage est constitué de deux grandes parties intitulées respectivement *Anthropologische und sozialpsychologische Untersuchungen* et *Sozialpsychologie. Sozialpsychologische Probleme in der industriellen Gesellschaft*. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux chapitres intitulés « LA TECHNIQUE dans l'optique anthropologique » et « L'HOMME ET LA TECHNIQUE ».

²³⁴ *Ibid.*, p.175.

4.2.2.1 *L'organisation du Congrès*

Un congrès international des Mines, de la Métallurgie et un congrès de Mécanique appliquée avaient été tenus à Paris en 1900 et à cette occasion il fut décidé qu'un Congrès International des Mines, de la Métallurgie, de la Mécanique et de la Géologie appliquées serait organisé à Liège pendant l'Exposition Universelle de 1905²³⁵. Ce congrès a lieu du 26 juin au 1^{er} juillet et est placé sous le haut patronage du Gouvernement. Il est organisé par les soins de l'Union des Charbonnages, Mines et Usines métallurgiques de la province de Liège et de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège. Le congrès est organisé en Sections : la Section des Mines, la Section de Métallurgie, la Section de Mécanique Appliquée et la Section de la Géologie Appliquée. C'est à la Section de Mécanique Appliquée que nous nous intéresserons. Elle est présidée par Herman Hubert. Le Congrès comporte des séances générales, des conférences, des séances dédiées à l'étude de questions spéciales sur les 4 thématiques du congrès, des visites de l'exposition, d'établissements scientifiques et industriels et des excursions de géologie appliquée.

Le Comité d'organisation choisit les questions et nome des rapporteurs. Les rapports doivent être envoyés au moins deux mois avant la date du congrès. Les rapports peuvent être envoyés en langue étrangère, avec idéalement une traduction ou un résumé en français. Sinon, le comité rédigera autant que possible le résumé en français. Dans la mesure du possible, les rapports doivent être distribués aux adhérents avant le Congrès.

Pour qu'un travail puisse être présenté en séance, son résumé et sa conclusion doivent avoir été communiqués au Comité d'organisation au moins 1 mois avant l'ouverture de la session et il doit être inscrit à l'ordre du jour. Si l'ordre du jour d'une Section venait à être épuisé, le bureau de la section pourrait alors autoriser des présentations non annoncées.

Le règlement fixe l'organisation des séances. Ainsi, le rapporteur doit exposer la question en séance générale ou en séance de section en moins de quinze minutes. Lors des discussions qui suivent l'exposé, sauf décision de l'Assemblée, personne ne peut garder la parole plus de dix minutes, ni prendre la parole plus de deux fois dans la même séance et sur le même sujet. Les orateurs ayant posé des questions remettront au Secrétaire de séance un résumé de leurs observations dans le vingt-quatre heures, résumé (éventuellement condensé) qui sera consigné dans le procès-verbal. En l'absence de résumé, le Bureau rédigera un texte. On notera que le Comité peut autoriser la reproduction des rapports et communications dans des revues et journaux techniques.

²³⁵ On retrouve les informations liées à la genèse de ce congrès et à son organisation dans son Règlement publié par l'Association amicale des anciens élèves de l'École nationale supérieure des mines de Paris. Bulletin, n°1, Lille, Imprimerie Lefebvre-Ducrocq, 1904, p. 17-31.

4.2.2.2 Les moteurs thermiques

L'analyse des questions abordées par le comité d'organisation de la Section de Mécanique du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées qui s'est tenu à Liège en 1905 nous en apprend beaucoup sur les préoccupations techniques des ingénieurs mécaniciens au début du XX^e siècle²³⁶.

Parmi les moteurs thermiques, le moteur à vapeur est encore étudié au début du XX^e siècle (et il sera encore largement utilisé pendant la première moitié du XX^e siècle), mais beaucoup d'efforts se déplacent vers l'étude des moteurs à combustion interne, des turbo-machines et les moteurs électriques.

Ainsi, la théorie générique des *moteurs à combustion interne* est en cours d'élaboration. Elle doit notamment permettre de déterminer les dimensions de ces moteurs. On s'intéresse aux campagnes d'essais et observations à faire sur ces moteurs : comment définir ces essais, quels instruments doit-on utiliser, comment les étalonner et les tarer ? Tout comme pour les moteurs à vapeur, la question du réglage de la vitesse des moteurs à combustion interne reste importante. Les compétences acquises dans le domaine des régulateurs et des volants, dont nous parlerons plus tard, seront valorisées. Parallèlement, à côté des moteurs à piston, qui décrivent des cycles à 4 temps ou à 2 temps, qu'ils soient à simple ou à double effet, la turbine à gaz se développe²³⁷.

Les applications mécaniques des *moteurs électriques* constituent également un sujet central. On retrouve en effet de tels moteurs dans de nombreux secteurs industriels (laminoirs, machines d'extraction, appareils de levage).

Les *turbo-machines* font également l'objet d'un groupe de travail. On les utilise pour détendre la vapeur (turbines à vapeur) ou de l'eau (turbines hydrauliques) ou pour comprimer des fluides (pompes centrifuge et ventilateurs). Leur application à l'aviation est évoquée.

Les *machines et chaudières à vapeur* ne semblent plus être le thème central du congrès, bien qu'on s'intéresse à synthétiser les connaissances permettant d'en améliorer les performances, qu'on rappelle la théorie expérimentale et qu'on évoque aussi l'utilisation d'autres fluides que la vapeur d'eau.

²³⁶ Université de Liège, *Actes du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées*, Liège, du 25 juin au 1er juillet 1905 : section de mécanique appliquée, t.I, 1905, p.1-2.

²³⁷ L'Ingénieur anglais Kennedy déclare « Il est hors de doute que la turbine à gaz marchera et fera, bien établie, son apparition sur le marché ; seulement, la question se pose de savoir qui pourra se résoudre à supporter les frais pour les essais considérables nécessités pour la réalisation pratique de cette question ». Dans *The Engineering Review*, n°1904, p. 313 et suivante, repris par Rudolph BARCOW, "Mémoire sur les turbines à gaz", dans les *Actes de la Section de mécanique appliquée du Congrès international des mines, ...*, Liège, La Meuse, 1905, t. II, p. 185.

Les thématiques du Congrès se reflètent également dans le contenu des cours de Mécanique appliquée (1905-1906) et de Physique industrielle (1906-1907) d’Herman Hubert, qui proposent la classification des moteurs donnée à la Figure 4-1.

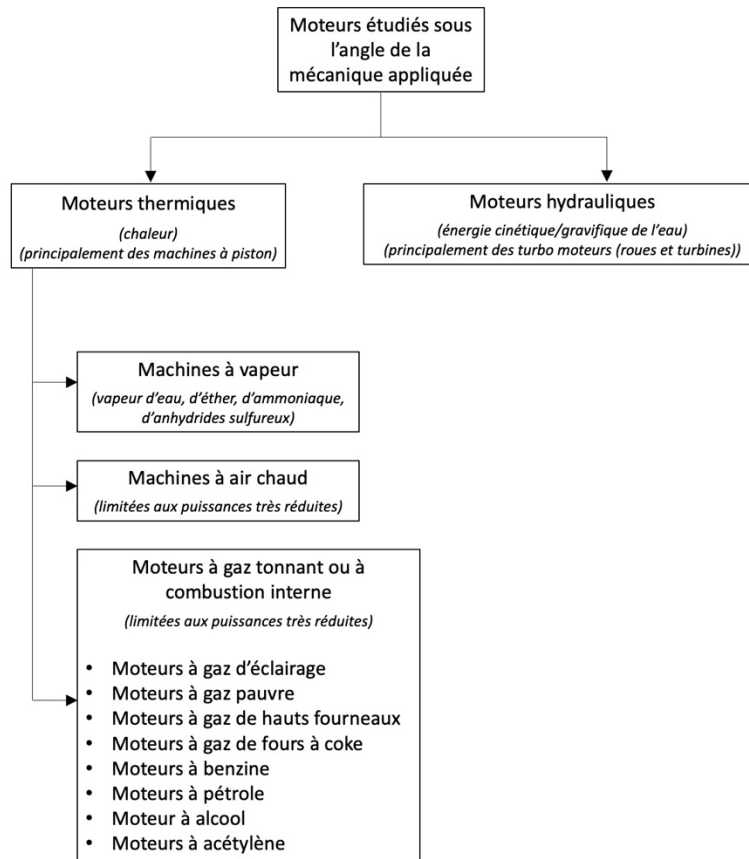


Figure 4-1 : Moteurs étudiés dans le cours de Mécanique Appliquée à l’Université de Liège en 1906.

4.2.2.3 Les machines frigorifiques

Les techniques de production de froid comment à se développer à la fin u XX^e siècle, mais il s’agit encore d’un sujet d’étude et de développement limité, en comparaison avec les moteurs. Ainsi, sur l’ensemble des mémoires présentés au Congrès, un seul traite de la question mais fournit un état de l’art très détaillé des techniques de production de froid. Les cours de Mécanique appliquée (1905-1906) et de Physique industrielle (1906-1907) d’Herman Hubert n’abordent pas encore le sujet.

4.3 L’émergence de l’enseignement de la thermodynamique appliquée aux machines thermiques (1868 à 1913)

Dans cette section, nous tentons de comprendre comment l’enseignement de la thermodynamique appliquée, ou thermodynamique technique, a progressivement pris forme dans la formation des

ingénieurs liégeois dans la seconde moitié du long XIX^e siècle. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés aux enseignements de trois professeurs qui se sont succédés à la tête de la même chaire : Jean-Baptiste Brasseur, Victor Dwelshauvers-Dery et Herman Hubert.

4.3.1 L'objet des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle

Victor Dwelshauvers-Dery et Herman Hubert se présentent comme professeurs de mécanique appliquée et de physique industrielle. Commençons par définir l'objet de ces cours.

L'objet du cours de *Mécanique appliquée* est d'appliquer les principes de la mécanique à la construction de systèmes utiles, à la fois des constructions fixes et des machines²³⁸. L'étude de la mécanique appliquée exige une connaissance des principes de la mécanique rationnelle (notamment, la composition et la décomposition des mouvements et des forces, le théorème des travaux virtuels, de la quantité de mouvement, des forces vives)²³⁹.

Le cours de *Physique Industrielle* concerne quasiment uniquement l'étude de la production et des applications de la chaleur dans l'industrie et les applications domestiques²⁴⁰. Ce cours est intimement lié à la mécanique appliquée.

Comme le déclare Dwelshauvers-Dery en 1878²⁴¹, « en résumé donc, dans le cours de mécanique appliquée, nous étudierons la machine proprement dite ; dans celui de physique industrielle, les parties de machine dont l'homme fait son laboratoire de préparation des forces naturelles qu'il veut appliquer à la machine. (Le cours de physique industrielle ne se bornera du reste pas à cela) ».

4.3.2 Les notes de cours de mécanique appliquée et de physique industrielle : un indicateur des connaissances en thermodynamique appliquée aux machines thermiques

Afin de connaître l'état des connaissances dans le domaine de la thermodynamique appliquée et des machines thermiques à la fin du XIX^e siècle, nous avons analysé les notes de ces cours (ou « *Résumé des cours* » ou « *Précis de cours* ») donnés à l'Université de Liège sur une période allant d'approximativement 1868 à 1913.

Le corpus comprend tout d'abord des notes *manuscrites* du cours de mécanique appliquée du Prof. Victor Dwelshauvers-Dery de 1868-1869²⁴² (947 pages). Nous avons également analysé le

²³⁸ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 1.

²³⁹ *Ibid.*, p. 2.

²⁴⁰ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 1. Et H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 5.

²⁴¹ V. DWELSHAUVERS-DERY, *Programme des cours ...*, *op. cit.*, p. 5-6.

²⁴² Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869.

Programme des cours de Mécanique appliquée et de Physique Industrielle professés à l'Ecole des Mines de Liège publié en 1876²⁴³ (188 pages et 39 planches). Ce corpus est complété d'une source majeure pour notre étude et datant de ca. 1890 : les cours de mécanique appliquée²⁴⁴ et de physique industrielle²⁴⁵ du Prof. Victor Dwelshauvers-Dery. Le cours de mécanique appliquée est composé de 11 cahiers de 68 feuillets non numérotés. Le cours de physique industrielle contient 6 cahiers de 68 feuillets, certains partiellement numérotés. A ces notes de cours, nous rajoutons un cahier d'observation de laboratoire (de Jemeppe)²⁴⁶. Toutes ces notes ont été copiées vers 1890 par Omer De Bast.

Nous avons enrichi ce corpus des notes de cours du Prof. Herman Hubert, successeur de Victor Dwelshauvers-Dery. Il s'agit tout d'abord de deux cours manuscrits copiés par C. André : le cours de mécanique appliquée²⁴⁷ (2 volumes) de l'année académique 1905-1906 et le cours de physique industrielle de l'année académique 1906-1907²⁴⁸. Herman Hubert a publié plus tard un « *Résumé des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège* » sous forme imprimée, en trois tomes, une première fois en 1910²⁴⁹. Une deuxième édition revue et augmentée (de 695 pages à 1740 pages) sera publiée en 1913, en 3 tomes²⁵⁰, intitulée « *Précis des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège* ».

²⁴³ V. DWELSHAUVERS-DERY, *Programme des cours de Mécanique appliquée et de Physique Industrielle professés à l'Ecole des Mines de Liège*, Hector Manceaux Imprimeur-Editeur, Mons, Henri Manceaux, Libraire, Bruxelles, 1876.

²⁴⁴ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488 à MS4498, ca. 1890.

²⁴⁵ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4510 à MS4515, ca. 1888.

²⁴⁶ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

²⁴⁷ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, 1905-1906 ; H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 2*, ULiège Library, MS4336, 1905-1906

²⁴⁸ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, 308 p.

²⁴⁹ Herman HUBERT, *Résumé des Cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle de l'Université de Liège. t.I (Physique industrielle)*, Liège, Imprimerie H. Vaillant-Carmanne (S.A.), 1910, 411 p. ; Herman HUBERT, *Résumé des Cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle de l'Université de Liège. t.II (Résistance des matériaux)*, Liège, Imprimerie H. Vaillant-Carmanne (S.A.), 1910, 284 p. Nous pensons qu'il existe un troisième tome (non trouvé), tout comme dans l'édition de 1913.

²⁵⁰ Herman HUBERT, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.I - Physique industrielle*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, 601 p. ; Herman HUBERT, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.II - Résistance des matériaux*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, 352 p. ; Herman HUBERT, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.III - Lois générales du mouvement des machines. Etude des moteurs thermiques et des moteurs à pesanteur*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, 787 p.

Nous avons voulu remonter avant 1890 et nous intéresser aux contenus des cours de mécanique et physique appliquée antérieurs au professorat de Dwelshauvers-Dery²⁵¹. Il nous a en effet semblé important d'apprécier dans quelle mesure ce dernier a été influencé par ses prédécesseurs. Des cours de mécanique et de physique appliquées étaient déjà organisés dès 1825 dans la formation des ingénieurs des mines à l'Université de Liège. A la création de l'École des Arts et Manufactures et des Mines (annexée à l'Université de Liège) en 1836, le programme de la 3^e année comportait un cours de mécanique appliquée aux arts et un cours de physique appliquée aux arts. Le cours de mécanique appliquée a été confié à Brasseur de 1835 à 1868 (année de sa mort). Les titulaires du cours de physique industrielle se succédèrent de 1835 à 1872 : Gloesener, Bède et Perard. Dwelshauvers-Dery reprendra le cours de mécanique appliquée en 1868 et celui de physique industrielle en 1872. La seule source liée au prédécesseur de Victor Dwelshauvers-Dery que nous avons pu analyser est le *Précis de mécanique appliquée* de Jean-Baptiste Brasseur publié de manière posthume en 1868 par Folie d'après les manuscrits de Brasseur²⁵². Il s'agit d'un texte imprimé de 234 pages sans schémas.

En résumé, le corpus principal est constitué des cours de Dwelshauvers-Dery, mais nous l'avons enrichi d'un cours de son prédécesseur (Brasseur) et des cours de son successeur (Hubert). L'analyse du cours de Brasseur doit nous permettre d'apprécier son influence sur Dwelshauvers-Dery et d'identifier l'apport de ce dernier. L'analyse des cours d'Hubert, et surtout ceux écrits les toutes premières années de son professorat, fournit certainement un excellent état de l'art des connaissances acquises par Dwelshauvers-Dery à la fin de sa carrière. En suivant une approche antichronologique (nous avons d'abord étudié les cours d'Hubert puis ceux de Dwelshauvers-Dery), nous avons pu plus facilement en comprendre les contenus. Le contenu des cours d'Hubert est en effet plus proche d'un cours de thermodynamique technique actuel.

Dans les sections suivantes, nous décrivons le contenu de ces cours, mais nous en laissons l'analyse à une section ultérieure (section 4.4).

4.3.3 L'enseignement de la mécanique appliquée avant 1868 (Jean-Baptiste Brasseur)

Ce cours s'intéresse principalement aux machines qui transmettent une puissance à des charges résistives au travers de pièces ou organes aux propriétés géométriques et mécaniques appropriées. Le cours aborde ainsi la transformation de mouvement (engrenages), la résistance des matériaux, les frottements, le travail des forces, le principe des forces vives (appliqué au mouvement des machines),

²⁵¹ Hubert dresse un court historique de ces cours. Voir Herman HUBERT, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.I - Physique industrielle*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, p. 5-7.

²⁵² Jean-Baptiste BRASSEUR et François FOLIE, *Précis du cours ...*, op. cit..

les volants et régulateurs. Le cours présente ensuite différents types de machines, principalement celles utiles pour l'exploitation des mines et des arts métallurgiques.

Les thématiques abordées par le cours de Brasseur sont bien celles reprises et certainement enrichies plus tard par son successeur Dwelshauvers-Dery. Par contre, même si le cours mentionne comment l'expérience peut aider à identifier des lois²⁵³, il ne décrit aucune expérience réalisée à Liège.

Nous notons que le cours aborde différentes machines. Ainsi, il comprend une théorie des machines à vapeur²⁵⁴. On y présente le calcul des propriétés de la vapeur et du liquide. Une classification des machines à vapeur est proposée. Le calcul du travail moteur et du travail utile est présenté. On y traite notamment le cas de la machine de Woolf à deux cylindres. L'effet bénéfique de la haute pression sur la performance de la machine est aussi discuté, bien qu'il ne soit pas encore fait référence au rendement de Carnot. L'espace que la vapeur doit occuper dans la chaudière est étudié. Le rôle du condenseur est finalement discuté.

Brasseur aborde ensuite le calcul des dimensions principales d'une machine à vapeur et de l'ensemble de ses composants (y compris la pompe à eau froide, la pompe alimentaire et la pompe à air)²⁵⁵.

Brasseur traite enfin de différentes machines : des machines d'extraction, des machines d'épuisement, mais également des machines soufflantes²⁵⁶. Le reste du précis du cours présente une théorie des roues hydrauliques²⁵⁷.

4.3.4 L'enseignement de la mécanique appliquée et de la physique industrielle de 1868 à 1904 (Victor Dwelshauvers-Dery)

4.3.4.1 Le cours de Mécanique appliquée fait à l'école des mines de Liège (1868-1869)

Ce cours est un manuscrit de 947 pages datant de l'année académique 1868-1869²⁵⁸. Il faudrait encore vérifier si une ou plusieurs mains ont écrit ce texte, mais il pourrait s'agir entre autres de W. Spring, dont le nom apparaît sur la première page.

Il s'agit probablement de la source la plus ancienne concernant l'enseignement de Victor Dwelshauvers-Dery. Le cours couvre à la fois la cinématique des pièces de machines, la résistance des

²⁵³ Par exemple, les lois du frottement. Brasseur cite les expériences de Morin (voir *ibid.*, p. 5-31) ; les expériences de Regnault pour la détermination des propriétés de l'air (voir *ibid.*, p. 132) ; l'utilisation d'un frein pour la mesure du travail utile (voir *ibid.*, p. 137) ; les expériences menées par Morin et d'autres dans le domaine des roues hydrauliques (voir *ibid.*, p. 214-229).

²⁵⁴ *Ibid.*, p. 129-157.

²⁵⁵ *Ibid.*, p. 176-199

²⁵⁶ *Ibid.*, p. 176-199.

²⁵⁷ *Ibid.*, p. 200-234.

²⁵⁸ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869.

matériaux et la théorie des machines. Nous avons reproduit une table des matières, encore incomplète en Annexe.

Même si le cours illustre la théorie par de nombreux problèmes et des exemples numériques²⁵⁹, il ne semble pas mentionner d'essais réalisés à Liège, mais parle tout de même d'indicateurs et de freins dynamométriques pour les essais de machines à vapeur. La machine à vapeur reste la *machine* centrale du cours. Les moteurs à air chaud sont également couverts, mais de façon plus limitée.

La 3^e partie a retenu notre attention et particulièrement le chapitre 5. Ce chapitre constitue probablement le premier enseignement de la thermodynamique à l'Université de Liège. A ce titre, on peut reconnaître que c'est Dwelshauvers-Dery qui a introduit l'enseignement de la thermodynamique classique et appliquée aux machines dans la formation des ingénieurs liégeois. Ce chapitre rappelle des lois importantes des gaz parfaits (loi de Mariotte, de Gay-Lussac). Il définit les notions de chaleur spécifiques à pression et à volume constants. La première loi de la thermodynamique est formulée (l'équivalent mécanique de la chaleur), mais il n'est pas fait mention de Joule ou Mayer. La deuxième loi est introduite via le théorème de Rankine. Nous analyserons plus en détails cette partie du cours à la section 4.4.5.4. Dwelshauvers ne parle pas de Carnot, de Clausius, mais seulement de Rankine. La notion de travail maximal d'un moteur (réversible) et de dépense minimale de travail à fournir pour transférer de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud sont introduites. Enfin, ce chapitre emprunte une approche globale de l'évaluation de la performance d'un moteur thermique incluant le générateur de chaleur²⁶⁰. Le rendement total est ainsi défini sur base du pouvoir calorifique du combustible. Une comparaison est donnée avec les roues hydrauliques.

Dans cette 3^e partie, le chapitre VII lié à la théorie des machines à vapeur fournit également une idée de l'état des connaissances de l'époque sur l'analyse thermodynamique de tels moteurs. On y rappelle les propriétés de la vapeur d'eau saturée ou surchauffée. Il y est fait allusion aux mesures de Regnault, de Rankine et de Zeuner. Le chapitre aborde ensuite le cycle des machines à vapeur parfaites pour lequel on peut écrire « *en vertu du deuxième théorème de Rankine* »²⁶¹: $\mathcal{T} = Q (\tau_2 - \tau_1) / \tau_2 = 424 M_2 x_2 r_2 (\tau_2 - \tau_1) / \tau_2$. Le cycle de la machine à vapeur réelle est par la suite étudié en listant les différentes pertes. Le cours présente enfin des formules à appliquer pour la construction des machines.

4.3.4.2 Le programme du cours de mécanique appliquée et de physique industrielle (1876)

Le programme du cours de mécanique appliquée et de physique industrielle (publié en 1876) n'est pas, comme le fait remarquer Dwelshauvers-Dery dans son avant-propos, un traité de mécanique

²⁵⁹ Par exemple, à l'occasion du calcul du travail utile d'un moteur à vapeur dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 730-731.

²⁶⁰ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 663-672

²⁶¹ *Ibid.*, p. 721

appliquée aux machines. Il s'agit d'un document destiné à ses étudiants de l'École des mines et des arts et manufactures de Liège. En plus du contenu technique et scientifique, le texte présente également le déroulé du cours (exemples à traiter, modèles à présenter). Il reconnaît que le cours peut manquer de pondération, détaillant de trop certaines parties et trop peu d'autres. Dwelshauvers-Dery se profile aussi comme défenseur de la mécanique appliquée comme discipline scientifique²⁶². En tant que discipline scientifique, la mécanique appliquée aux machines produit des méthodes et des procédés scientifiques que l'on peut généraliser. C'est grâce à ces méthodes et procédés scientifiques que l'ingénieur pourra créer et innover plutôt que copier les machines existantes. Selon lui, le fait que la mécanique appliquée soit enseignée par la Faculté des sciences (la Faculté technique n'est pas encore créée, voir section 1.6) permet à la machine d'être étudiée scientifiquement.

Dans ce document, Dwelshauvers-Dery propose tout d'abord d'étudier les machines (l'objet central du cours) sous l'angle de la cinématique. Différents mécanismes simples et plus complexes (comme la bielle) sont abordés. Cette étude est étendue aux « *mécanismes dont une pièce est fluide* ». Ainsi, Dwelshauvers-Dery présente la vapeur comme une pièce mobile de la machine. L'auteur couvre notamment la distribution dans les machines à vapeur (tiroirs, robinets, soupapes), le diagramme indicateur et les machines de Woolf. Dwelshauvers-Dery propose une description et classification des machines à vapeur²⁶³.

Ce matériel de cours de 1878 n'atteste pas (encore) d'une quelconque approche expérimentale dans l'enseignement. Par contre, de nombreuses mentions sont faites à du matériel didactique employé lors des leçons. Par exemple, lorsqu'il décrit les pièces fixes et mobiles d'une machine, Dwelshauvers-Dery mentionne comme exemple (et problème associé) « *la machine à vapeur à balancier dans l'auditoire* ». S'agit-il d'un modèle réduit ? Il mentionne également un modèle de manivelle à coulisse, de bielle, de parallélogramme double de Watt, de clapets, soupapes, glissières, robinets, d'indicateur de Watt et de coulisse de Marcel Deprez²⁶⁴. Nous pouvons penser qu'il s'agit de pièces physiques exposées dans l'auditoire.

4.3.4.3 Les manuscrits du cours de mécanique appliquée (vers 1890)

Nous fournissons ici une analyse générale du contenu de ces manuscrits. Des analyses plus détaillées de certaines parties sont données dans d'autres sections de ce travail (description du laboratoire de Jemeppe, description des indicateurs). Nous n'avons pas dressé de tables des matières associées à ces manuscrits, par manque d'organisation dans les textes. Il semblerait en effet que ces

²⁶² V. DWELSHAUVERS-DERY, *Programme des cours ...*, *op. cit.*, avant-propos.

²⁶³ *Ibid.*, p. 85-89.

²⁶⁴ *Ibid.*, p. 42, 48, 66, 83, 98, 140.

notes manuscrites ont été rédigées à la volée et corrigées et complétées (voir par exemple, la Figure 4-2). Elles devaient certainement servir de support au professeur et à son assistant. Comme nous le verrons dans des sections ultérieures, elles présentent deux intérêts majeurs : la qualité des schémas (principalement en termes d'informations, voir par exemple la Figure 5-2) et le fait qu'elles relatent des expériences faites par l'auteur.

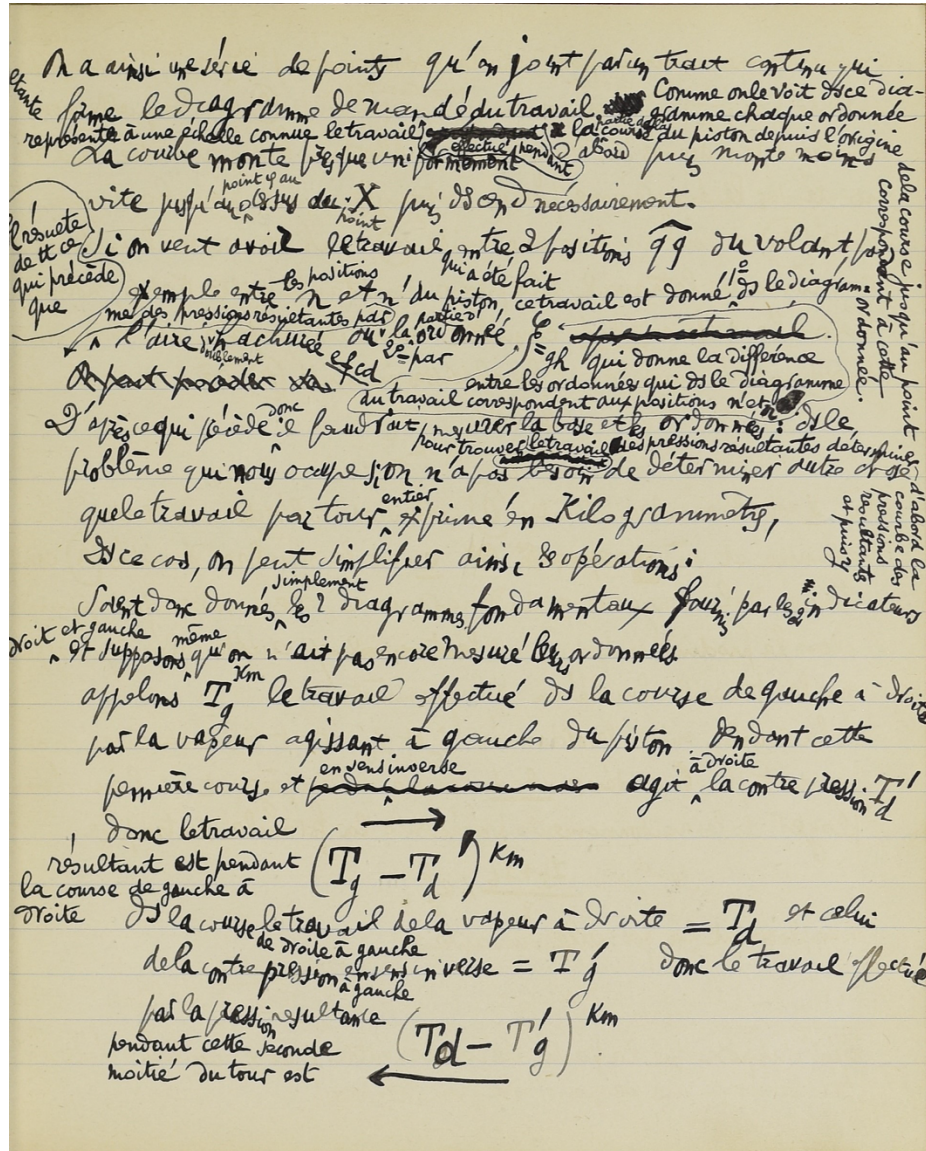


Figure 4-2 : Exemple de notes du cours de Mécanique appliquée. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

?

 force en plus par la détermination de celle qui agit en plus sur la

 partie d.....

 On le somme algébrique des travaux de toutes les forces pendant tout espace de

 la nouvelle = 0. on d'autre termes le travail de la résultante E par

 tout = 0. Cette résultante appelle la E ^{Kilos} et suppose la appli-

 que au point A de B mêmes conditions que autres forces y appliquées.

 Elle se compose de

$$E = p - (1+d)Q - F$$

 On trouve par tout et

$$E \text{ par tout} = 0$$

 On a vu que par E_m le travail moteur de p par tout $\times Km$

 par E_u le travail utile par tout aussi $\times Km$ par E_f

 par tout $\times Km$ le travail de frottement et intérêts à l'usage

 machin à vide de la machine que indique que le régime est constant

 égalisation de la puissance

$$E_m = (1+d)E_u + E_f$$

 le travail moteur par tout = le travail utile par tout multi-

 plier par $(1+d)$ + le travail de frottement et intérêts par machine

 machin à vide par tout aussi.

 C'est celle qui donne les valeurs pour déterminer l'effort de la

 machine. D'après les diagrammes de la machine de la machine 88

 trouve

$$E_m = 952 \frac{Km}{100} = 2 \text{ le travail indiqué}$$

$$E_u = 746,82 \text{ par coup de piston}$$

Figure 4-3 : Exemple de corrections apportées aux notes du cours de Mécanique appliquée (il est question ici du travail moteur et du travail utile d'une machine à vapeur). Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

Dwelshauvers-Dery commence par rappeler que le cours de mécanique appliquée étudiera uniquement des machines utilisant la gravité et la chaleur comme forces naturelle ; l'électricité fait l'objet d'un cours spécial. Les machines étudiées sont les moteurs thermiques : principalement les machines à vapeur et accessoirement les moteurs à gaz et à air chaud. Le cours aborde ensuite les moteurs hydrauliques et les pompes à air et à eau. L'objet du cours est bien la machine, dont Dwelshauvers-Dery donne également une définition (tout comme en 1878).

Le cours reprend certains des exemples du programme de 1878 (par exemple ; l'échauffement d'un tourillon tournant dans son coussinet et sa « *température de régime* »). Il insiste sur les résistances passives (les frottements). L'auteur rappelle la différence entre cinématique et dynamique. Le concept de *pièces solides* et de *pièces fluides* est encore présent.

Le concept d'énergie²⁶⁵ apparaît enfin. Dwelshauvers-Dery évoque l'expérience de Joule et l'équivalent mécanique de la calorie : « *c'est le phénomène de frottement lui-même qui a permis à Mr. Joule de déterminer l'équivalent mécanique de la calorie* » (425 kilogrammètres par calorie).

Le cours présente très vite la machine à vapeur de Jemeppe. Dwelshauvers-Dery explique le fonctionnement de tous les composants (chaudière, cylindre et piston, condenseur) d'une machine à vapeur et donne chaque fois comme exemple le composant utilisé à Jemeppe. Les mesures à réaliser, sur chacun des composants, dans un essai de machine à vapeur sont décrites. Dwelshauvers-Dery détaille les calculs des grandeurs d'intérêt (chaleur, travail) sur base de ces mesures. Des grandeurs (que l'on appellerait aujourd'hui *variables thermodynamiques*) sont introduites, comme le titre du mélange eau-vapeur. Le lien avec la pratique est encore renforcé en donnant toutes les dimensions des composants de la machine de Jemeppe.

Le cours traite ensuite longuement des indicateurs et notamment de la manière de les tarer, ce qui est illustré via des essais réalisés au Laboratoire de Jemeppe en 1888. L'analyse des diagrammes et le calcul des travaux est détaillé.

Le manuscrit MS4489 poursuit l'étude des diagrammes indicateurs. Le manuscrit traite ensuite de la force motrice effective, de la résistance totale et de la résultante E , de travail moteur et de travail utile (Figure 4-3). Nous détaillerons ces notions à la section 4.4.2²⁶⁶.

Dans le manuscrit MS4490, il est entre autres question des moments d'inertie, des forces vives, des vitesses de la manivelle et du coefficient de régularité du volant. La plupart des équations seront reprises plus tard dans les notes du cours de mécanique d'Hubert²⁶⁷. On retrouve des questions d'interrogations. La machine de Jemeppe sert d'exemple pour fournir des valeurs numériques.

Les manuscrits MS4491 et MS449 couvrent la résistance des matériaux (notamment le moment de flexion, les déformations (allongement, cisaillement, flexion, torsion) et les différents types d'acier).

²⁶⁵ On retrouve les notions d'énergie et d'équivalent mécanique de la calorie dans le premier manuscrit : Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

²⁶⁶ Dans le manuscrit de Victor Dwelshauvers-Dery et Omer De Bast, la résultante est notée E et non pas R .

²⁶⁷ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335.

Le manuscrit MS4494 traite des déformations composées et le manuscrit MS4495 du calcul des courroies. Le manuscrit MS4496 donne une description de bancs de tests de déformation. On y présente différents systèmes de distribution, le diagramme en coordonnées polaires, le réglage d'une distribution par tiroir simple et les différents types de coulisses (Stephenson, Waelschaert). Dans le manuscrit MS4497, il est question des Coulisses de Belpaire, de Stevart, des tiroirs doubles, des régulateurs. Le manuscrit 4498 poursuit l'étude des régulateurs (notamment le régulateur de Farcot) et traite des « tachomètres ». Enfin, on y aborde l'hydraulique : théorème de Bernoulli, ligne de charge effective, équation de Torricelli, injecteurs, moteurs à eau, roues à pesanteur, roues à augets, et turbines. On retrouve aussi dans ce manuscrit les résultats d'une analyse des charbons utilisés à Jemeppe.

4.3.4.4 Les manuscrits du cours de physique industrielle (vers 1890)

Le manuscrit MS4510 définit les propriétés principales de la vapeur d'eau et en donne une description. On y aborde aussi le maniement des tables, ce qui est illustré par l'analyse des essais réalisés au Laboratoire de Jemeppe en octobre 1888 (on y exprime les bilans sur les composants de la machine à vapeur). Ainsi, l'état du fluide dans la machine au cours des différentes phases (admission, détente, émission, compression) est décrit et en particulier l'état de la vapeur au moment de la recompression (l'hypothèse de Hirn est rappelée). Toujours au moyen d'essais réalisés à Jemeppe, le cours illustre l'utilisation des diagrammes de la chaleur échangée entre la vapeur et le métal (Figure 4-4). Nous reviendrons plus tard sur l'utilisation de ces diagrammes.

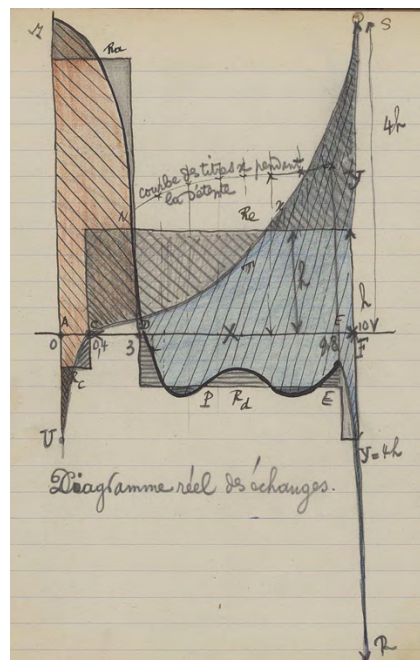


Figure 4-4 : Diagramme des échanges de chaleur dans une machine à vapeur. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4510, ca. 1888, ff. 61.

Des questions (« problèmes ») d'interrogations sont listées²⁶⁸. Les manuscrits mentionnent également quelles parties du cours sont couvertes par les différentes interrogations²⁶⁹

Dans le manuscrit MS4511, il est question ici de la performance des machines à vapeur en lien avec les niveaux de températures. Les notes décrivent également les moyens d'augmenter le rendement des machines à vapeur (protéger la machine contre tout refroidissement, toute fuite, employer une couche de porcelaine dans les cylindres, changer le matériau des composants, utiliser des enveloppes à vapeur (il est fait mention à des essais de Donkin), surchauffer la vapeur (il est fait mention à des essais par Hirn à Logenbach en 1872 et 1875), varier la vitesse de la machine (essais de Williams en 1886 entre 400 et 100 tours par minutes)²⁷⁰. Dwelshauvers rapporte les résultats des essais de ses pairs dans des tables, ce qui montre une fois de plus l'importance qu'il accorde à la pratique expérimentale dans l'enseignement. La suite de ce deuxième manuscrit traite de la thermodynamique²⁷¹ qui « *se résume en 2 principes ou propositions* » que l'auteur développe. Il traite notamment de l'équivalent mécanique de la chaleur.

Le manuscrit MS4512 poursuit l'enseignement de la thermodynamique. Il y est question d'évolutions isothermales, adiabatiques, mais aussi de cycles réversibles et de bilan sur un cycle et de cycle à vapeur idéal. Le théorème de Rankine est formulé. Le cours aborde ensuite les grandeurs thermométriques (notamment la température). On revient sur le cycle de Carnot et sur la notion de poids thermique. Dwelshauvers introduit, probablement pour la première fois, la définition d'entropie de Clausius et la notion d'isentropique²⁷². Les définitions d'un moteur thermique et d'une pompe thermique sont données, en employant une analogie aux machines hydrauliques²⁷³.

Dwelshauvers poursuit avec la 2^e loi de la thermodynamique « *qui est connue par plusieurs énoncés et en voici un : c'est le théorème de Carnot* »²⁷⁴. Un premier théorème est formulé, que l'on résumera par la formule $(Q_2 - Q_1)/Q_2 = \text{const.}$ En utilisant le théorème de Rankine, Dwelshauvers-Dery montre qu'on peut démontrer un autre théorème de Carnot que l'on résume par $Q/\tau = Q'/\tau' =$

²⁶⁸ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4510, ca. 1888, p. 11-12.

²⁶⁹ Voir par exemple, la mention à la « *fin de la 4^{ème} interrogation passée le jeudi 17.1.89* » dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4510, ca. 1888, p. 68. Ou encore la mention « *fin de la [] interrogation passée le lundi 25.3.89* » dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4512, ca. 1888, p. 43.

²⁷⁰ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, p. 23-49.

²⁷¹ *Ibid.*, p. 50-68.

²⁷² Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4512, ca. 1888, p. 20.

²⁷³ *Ibid.*, p. 22.

²⁷⁴ *Ibid.*, p. 30.

const. Le théorème de Clausius sur la chaleur latente externe *Apu* est ensuite abordé, ainsi qu'un théorème de Hirn²⁷⁵ et une théorie du condenseur.

Le manuscrit MS4513 couvre d'abord la théorie de l'injecteur Giffard. Le reste du manuscrit traite des essais de chaudières : « *le but d'un essai de chaudière est de comparer le nombre de calories réellement utilisées à la formation de la vapeur au nombre de cal que la combustion pourrait développer et de déterminer le quantum de chaque genre de pertes* ». Les mesures à réaliser sont décrites, ce qui atteste une fois de plus la volonté d'introduire une pratique expérimentale dans la formation. Il est aussi question du rôle du *chauffeur* pendant l'opération d'une chaudière. La fin du manuscrit illustre la théorie par la description d'un essai de chaudière réalisé à Jemeppe le 21 septembre 1887. Cette chaudière présente un bouilleur et un réchauffeur.

Le manuscrit MS4514 poursuit la description de l'essai de chaudière de Jemeppe. Il propose ensuite une description générale des chaudières. Des croquis de quelques types de chaudières et de foyers sont proposés. Le cours développe les équations de transfert de chaleur. Le reste du chapitre présente la théorie des gaz parfaits en introduisant notamment l'équation $p\nu/\tau = p/\tau\delta = cst$. On appréciera la description de l'expérience de Joule (réalisée en 1843²⁷⁶) qui a montré que l'énergie interne U d'un gaz parfait ne dépend que de la température.

²⁷⁵ *Ibid.*, p. 51.

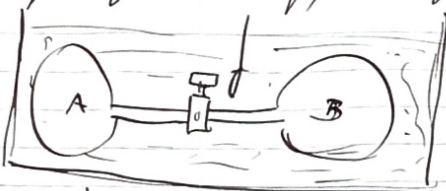
²⁷⁶ Yunus A. ÇENGEL et Michael A. BOLES, *Thermodynamics, An Engineering Approach*, 5th Edition. McGraw-Hill Higher Education, 2006.

quand chauffe kilo de gaz parfait on le chauffe en deux fois
 il y a un effet de chaleur qui est introduit de
 gaz a la seule effet d'augmenter le volume. On le
 gaz parfait

on le trouve a l'air $K = C_v$ al. prof. i. ol. stat

$$(AT)^{ka} / \text{cal} = C_v (2_1 - 2_1)$$

celle qui est de gaz parfait a de densité ρ et
 que s'il est dans un cylindre on a une valeur de force
 pour qu'il soit en équilibre avec l'atmosphère.



après l'onde de B
 B pour moi
 0 atm
 1001
 et tout est réglé

(120 V) à l'état de A
 on le chauffe et change de volume
 le produit de chaleur est γ et degré qui est divers
 = ?

$dq = dU + AdP$
 chaleur travail en cal

1. On voit le gaz de A de B dans le cylindre
 on le chauffe, on le

Figure 4-5 : Notes relatives à l'expérience de Joule (1843). Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4514, ca. 1888.

Les reste du manuscrit développe les équations bien connues associées à l'évolution adiabatique d'un gaz parfait $\tau v^{\gamma-1} = cst$ et $p v^{\gamma} = cst$.

Le dernier manuscrit (MS4515) s'intéresse notamment à l'écoulement d'un gaz parfait au travers d'un orifice, développant la formule de Weissbach.

L'analyse du contenu de tous ces manuscrits atteste très clairement que Dwelshauvers-Dery a introduit l'enseignement de la thermodynamique classique dans la formation des ingénieurs. Il illustre aussi largement son cours par des résultats expérimentaux issus du Laboratoire de Jemeppe ou d'expériences réalisées par d'autres savants de son époque. Dans sa lettre de 1890 adressée au Recteur²⁷⁷, Dwelshauvers-Dery prétend, à juste titre, avoir introduit dans l'enseignement de son École « l'étude de la résistance des matériaux, celle de la graphostatique, celle des distributions et celle de la thermodynamique. Feu [son]s vénéré maître, Brasseur, donnait quatre ou cinq leçons de résistance où la poussée des terres et la théorie des voûtes occupaient la plus large place ».

²⁷⁷ Lettre du 17 novembre 1891 adressée au Recteur, « Laboratoire de Mécanique appliquée », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège.

4.3.5 L'enseignement de la mécanique appliquée et de la physique industrielle de 1905 à 1914 (Herman Hubert)

Lorsqu'Herman Hubert prend la succession de Victor Dwelshauvers-Dery en 1904 (et la charge des cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle), l'enseignement de la thermodynamique appliquée et des machines thermiques à l'Université de Liège ne fait encore l'objet d'aucun cours spécifique. Les principes fondamentaux de la thermodynamique sont enseignés dans le cours de Physique mathématique. On en rappelle les bases dans le cours de Physique industrielle. Les lectures suivantes sont alors recommandées²⁷⁸ : Thermodynamiques à l'usage des ingénieurs de Witz et Thermodynamique de Marchis.

4.3.5.1 Les manuscrits des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de 1905-1907

Les cours de Mécanique appliquée (1905-1906) et de Physique industrielle (1906-1907) sont des manuscrits d'un intérêt tout particulier. Premièrement, ils sont faciles à lire, bien organisés et contiennent des schémas de très grande qualité. Alors que les manuscrits de 1887-1890 semblent constituer des notes prises à la volée et à l'usage des enseignants, les manuscrits d'Hubert ressemblent davantage à des notes de cours à destination des étudiants. Les manuscrits étudiés sont d'ailleurs des reproductions (lithographies). Deuxièmement, ils sont publiés dans les premières années du professorat d'Hubert et constituent ainsi une parfaite synthèse des connaissances que Dwelshauvers-Dery transmettait à ses étudiants. Troisièmement, ils font encore très souvent référence aux dispositifs expérimentaux du « Laboratoire de Liège » (laboratoire de mécanique), ce qui a permis de compléter la description de ce dernier.

Nous reprenons les tables des matières de ces cours pour les années 1905-1906 (Mécanique appliquée) et 1906-1907 (Physique industrielle) à l'annexe G. Le cours de mécanique appliquée traite de la résistance des matériaux, de l'étude générale du mouvement des machines et des différentes classes de moteurs industriels. Même si le moteur à vapeur occupe encore une place prépondérante, le cours traite également largement des moteurs à gaz, dont on sait qu'Herman Hubert en avait fait un sujet d'expertise. Le cours couvre toujours les moteurs hydrauliques et les turbomachines. Le cours de Physique industrielle comprend un chapitre intitulé *Propriétés générales des gaz et des vapeurs* qui est en réalité un cours de thermodynamique. Le cours aborde les différents aspects de la production de chaleur : la combustion, les foyers, le tirage, la transmission de la chaleur et les chaudières à vapeur.

D'un point de vue méthodologique, nous avons tout d'abord analysé les manuscrits d'Herman Hubert de 1905-1907 avant d'analyser ceux, antérieurs, de Victor Dwelshauvers-Dery (vers 1880). Cela a permis de mieux comprendre le contenu de ces derniers manuscrits, plus difficilement lisibles.

²⁷⁸ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 172.

4.3.5.2 Les cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de 1910

Dans son édition de 1910, le « *Résumé des Cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle* » est une version imprimée et complétée des manuscrits de 1905-1907. On peut voir que la thermodynamique occupe une place plus importante en faisant l'objet unique du premier chapitre (alors que les principes fondamentaux de la thermodynamique étaient abordés dans une sous-section du Chapitre III du cours de 1906-1907)²⁷⁹. En réalité, le Chapitre III du cours de 1906-1907 fait à présent l'objet de 3 chapitres regroupés dans une première section intitulée « Propriétés des gaz et des vapeurs » : Chapitre I – Principes fondamentaux de la thermodynamique, Chapitre II – Étude des gaz, Chapitre III – Étude des vapeurs et particulièrement de la vapeur d'eau. La deuxième et dernière section du cours de physique industrielle de 1910 traite de la production et de la transmission de la chaleur : Chapitre I – De la combustion, Chapitre II – Des foyers, Chapitre III – Du tirage, Chapitre IV – Transmission de la chaleur, Chapitre V – Des Chaudières à vapeur.

4.3.5.3 Les cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de 1913

La version imprimée de 1913 du « *Précis des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège* » est une version revue et augmentée du « *Résumé des cours de mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège* ». Par rapport à la version de 1910, le cours a introduit une section liée au refroidissement et une section liée au chauffage et la ventilation des édifices. La section sur le refroidissement traite des machines frigorifiques à compression, à absorption, des machines à détente d'air, mais aussi des procédé Linde et Claude.

4.3.6 Vers un enseignement de la thermodynamique appliquée aux machines et systèmes thermiques

Comme nous l'avons mentionné dans le début de ce chapitre, la thermodynamique s'est développée à l'occasion de l'étude des machines à vapeur. Cette nouvelle discipline est « née ainsi de la préoccupation des mécaniciens d'adjoindre à l'étude des phénomènes mécaniques celle des phénomènes calorifiques concomitants, adjonction qui se trouvait faciliter et même rendre seule pratiquement possible la solution de maints problèmes »²⁸⁰. La thermodynamique, comme discipline physique, s'est progressivement déclinée en une série de sous-disciplines, notamment la thermodynamique statistique, la thermodynamique cinétique ou encore la thermodynamique appliquée ou technique. Comme nous venons de le voir, la thermodynamique appliquée ne fait pas encore l'objet d'un cours spécifique à la fin du XX^e siècle. Un cours de Thermodynamique appliquée et de machines et systèmes thermiques moderne se situerait à l'intersection des cours de Mécanique appliquée et de

²⁷⁹ Herman HUBERT, *Résumé des Cours de Mécanique appliquée et ...*, t.I, op. cit., p. 409-411.

²⁸⁰ André HOUBERECHTS, *Traité de thermodynamique technique*, op. cit., p. 3-4.

Physique industrielle du XX^e siècle, confiant à d'autres cours l'enseignement de la résistance des matériaux mais renforçant l'étude thermodynamique des différentes machines qui se développèrent à la suite des machines à vapeur. Il en va de même des laboratoires de machines thermiques qui prirent leur indépendance par rapport aux laboratoires de mécanique (qui se préoccupaient des essais de résistance des matériaux).

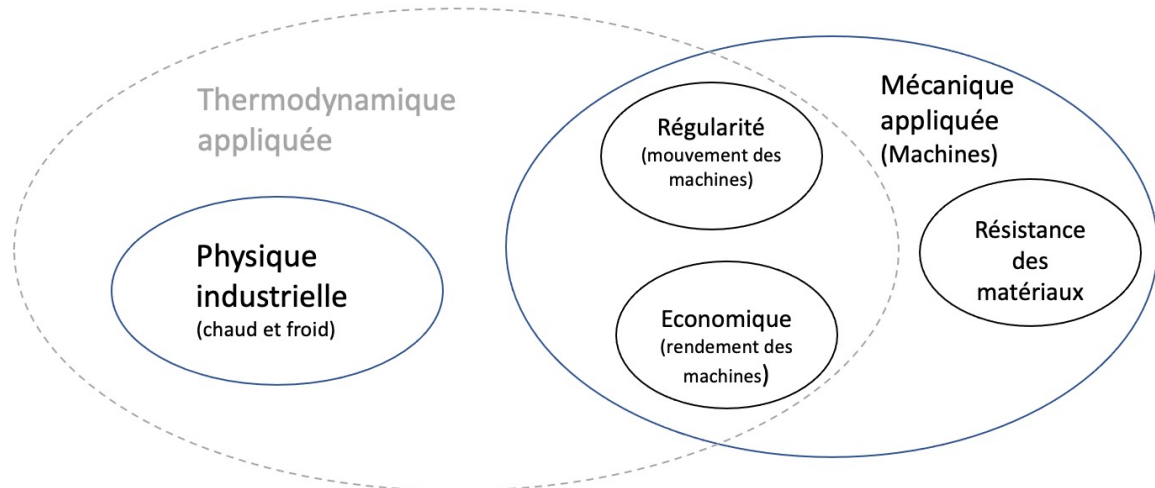


Figure 4-6 : Essor de l'enseignement de la Thermodynamique appliquée par rapport à ceux de la Physique industrielle et de la mécanique appliquée.

Ainsi, nous pouvons conclure que la thermodynamique a progressivement pris son essor en se distinguant de la mécanique, à laquelle elle reste évidemment liée. Rappelons que les premières théories de la thermodynamique dans la seconde moitié du XIX^e siècle faisaient explicitement référence à la mécanique (par exemple, la *théorie mécanique de la chaleur*). Aussi, comme nous venons de la voir, l'étude et l'enseignement des machines thermiques était encore l'apanage de la mécanique appliquée au début du XX^e siècle.

Nous n'avons pas poursuivi l'analyse des précis des cours dispensés aux ingénieurs mécaniciens après la première guerre mondiale. Cela constitue une perspective au présent travail. Nous pouvons toutefois relever plusieurs faits. En 1937, un « Nouveau Laboratoire de Thermodynamique » est inauguré à Liège. Il s'intéresse à l'étude des machines thermiques. En 1962, André Houberechts, Professeur à l'Université de Louvain, publie un *Traité de Thermodynamique Technique*.

4.4 État des connaissances en thermodynamique appliquée à la fin du XIX^e siècle

Dans cette section, nous proposons une synthèse de l'état des connaissances en thermodynamique appliquée à la fin du XIX^e siècle à l'Université de Liège. Cette synthèse se base principalement sur

l'analyse des résumés et précis des cours de Mécanique appliquée et Physique industrielle présentés à la section précédente. Nous pensons que cette synthèse est indispensable à la compréhension des techniques expérimentales présentées au Chapitre 5.

4.4.1 Le théorème des forces vives, une forme encore incomplète du principe de conservation de l'énergie

Le théorème des forces vives est encore central dans l'étude des machines à vapeur au début du XX^e siècle. Nous reprenons ici les définitions principales nécessaires à la formulation de son énoncé que nous expliciterons également²⁸¹.

La force vive d'une masse élémentaire m est égale au produit de la masse du point par le carré de sa vitesse ($m v^2$). La force vive d'une masse quelconque M est la somme des forces vives de ses composants $\sum m v^2$. Si la masse décrit un mouvement translation, la force vive est $\sum m v^2 = Mv^2$. Si la masse décrit un mouvement de rotation à la vitesse angulaire ω , alors $\sum m v^2 = \sum m (\omega r)^2 = \omega^2 I$ avec I le moment d'inertie de la masse entière par rapport à l'axe de rotation et r la distance de la masse m à l'axe de rotation. Pour un mouvement quelconque qui combine translation et rotation, la force vive $Mv^2 + \omega^2 I$.

Le théorème des forces vives peut être énoncé de la façon suivante : « *Dans tout système matériel de masse invariable en mouvement, pour lequel les forces tant extérieures qu'intérieures sont des fonctions des coordonnées de leurs points d'application, la somme des travaux de toutes les forces pendant un temps quelconque, est toujours égale à la moitié de la variation des forces vives de toutes les masses pendant le même temps, c'est à dire à la moitié de la différence entre la somme des forces vives, à la fin et au commencement de ce temps* ». Sous forme d'équation, si F désigne une des forces, $\mathcal{T} F$ son travail, m une des masses dont la vitesse de translation est v et la vitesse de rotation est ω et le moment d'inertie autour de son axe de rotation I , et si 0 et 1 désignent l'instant initial et l'instant final du temps considéré, on a

$$\sum_0^1 \mathcal{T} F = \frac{1}{2} \sum m(v_1^2 - v_0^2) + \frac{1}{2} \sum I(\omega_1^2 - \omega_0^2)$$

Hubert rappelle que ce théorème ne s'applique pas aux forces telles que la chaleur ou l'électricité. Le théorème s'applique à des systèmes qui conservent la même masse, la même température, le même volume et les mêmes propriétés physiques et chimiques.

Ce théorème constitue une des formes encore incomplètes du principe de conservation de l'énergie. Hubert note que pour l'étendre, on a été amené à « *assimiler au travail mécanique des*

²⁸¹ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée I, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 235-236.

quantités de nature différente et, pour cela, à créer une nouvelle notion plus compréhensive que le travail. C'est l'Energie qui comprend toutes les capacités de production de travail, que présentent les agents naturels »²⁸².

4.4.2 L'application du théorème des forces vives à l'étude des machines à vapeur

Désignons par \mathcal{T}_m le travail fourni par l'énergie motrice de la machine pendant un intervalle de temps dont l'instant initial est noté par 0 et l'instant final par 1. Désignons par \mathcal{T}_r le travail de toutes les résistances pendant l'intervalle de temps. Le travail \mathcal{T}_r peut être décomposé en un travail utile \mathcal{T}_u (la résistance que la machine a pour fonction de vaincre) et un travail des résistances passives \mathcal{T}_f . Dans ce cas, l'équation des forces vives peut s'écrire²⁸³

$$\mathcal{T}_m - \mathcal{T}_u - \mathcal{T}_f = \frac{1}{2} \sum m(v_1^2 - v_0^2) + \frac{1}{2} \sum I(\omega_1^2 - \omega_0^2)$$

Le temps qui s'écoule entre deux passages successifs par une même position s'appelle la *période*. Le mouvement est appelé périodique ou en *régime*. Ainsi, « le régime se compose donc d'une succession de périodes identiques »²⁸⁴. Une période coïncide souvent avec un tour de l'arbre principal. Entre le début et la fin d'une période, les masses repassent par la même vitesse. La différence des forces vives entre ces deux instants est donc nulle. Par conséquent, il faut que « la somme algébrique des travaux moteurs et résistants pendant chaque période ou tour soit exactement nulle »²⁸⁵. Autrement dit, sur une période, $\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u - \mathcal{T}_f$.

Une méthode pour étudier le mouvement des machines et permettant de déterminer les variations de vitesse est proposée²⁸⁶. On rapporte toutes les forces agissant dans la machine à un point déterminé. Cela n'altère pas l'équation des forces vives. On ramène ainsi toutes les forces agissant sur la machine à deux forces de même direction et de sens opposé : la force motrice effective E (qui remplace les forces motrices) et la résistance totale Q . Leur différence est la résultante R . Elles sont tangentes à la trajectoire au point choisi. Ainsi, nous avons

$$\mathcal{T}(R) = \mathcal{T}(E) - \mathcal{T}(Q) = \mathcal{T}_m - (\mathcal{T}_u + \mathcal{T}_f)$$

²⁸² H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 237.

²⁸³ *Ibid.*, p. 241.

²⁸⁴ *Ibid.*, p. 243.

²⁸⁵ *Ibid.*, p. 244.

²⁸⁶ *Ibid.*, p. 246-250.

La force vive augmente tant que le travail de la résultante est positif. « La force vive totale de la machine passe par un maximum ou un minimum lorsque les forces appliquées à la machine se font équilibre »²⁸⁷. La force vive augmente lorsque $T(E - Q) > 0$ et diminue lorsque $T(E - Q) < 0$.

La machine à vapeur monocylindre du laboratoire de l'Université de Liège est proposée à titre d'exemple dans le cours de Mécanique appliquée. Sa manivelle tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre.

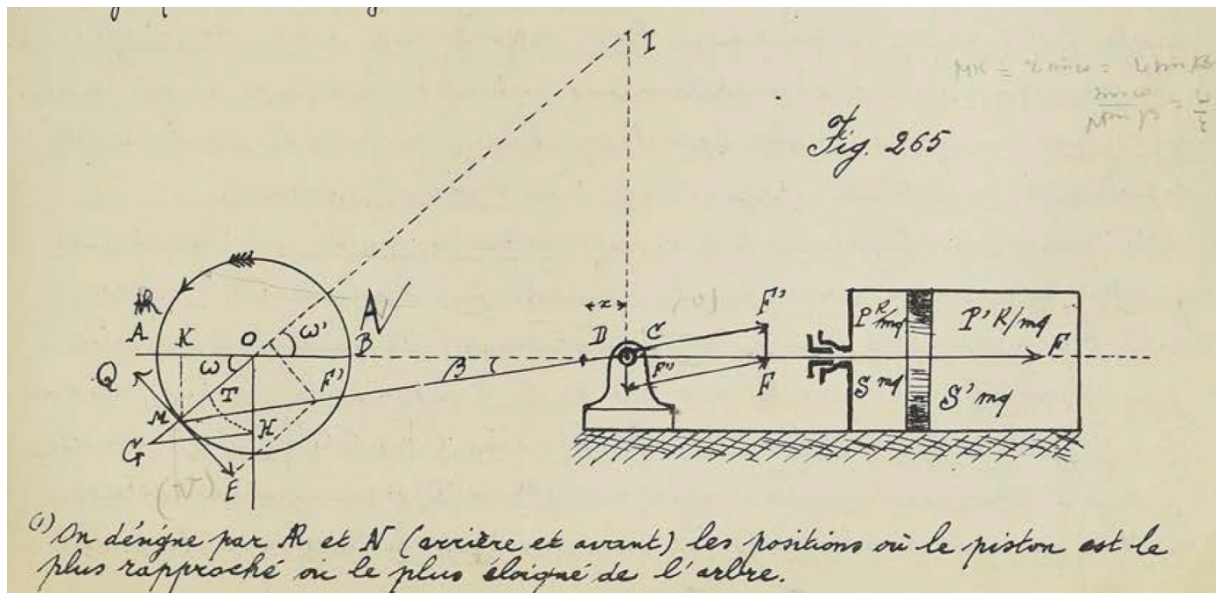


Figure 4-7 : Application de l'équation des forces vives à la machine à vapeur du Laboratoire de mécanique. H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée I*, ULiège Library, MS4335, p. 247.

A la Figure 4-7, ω est l'angle que la manivelle OM fait à partir de la position du point mort. La bielle décrit un angle β . P et P' sont les pressions exercées sur les deux faces du piston. S et S' sont les aires des surfaces (notons qu'elles peuvent différer à cause de la tige). La force résultante dans la direction de l'axe est $F = PS - P'S'$. M désigne le centre du boulon de la manivelle. On en fait le point d'application des forces fictives.

La force motrice effective E est dirigée dans le sens de déplacement du point M . La résistance totale Q est dirigée en sens contraire. OG est la force F tracée à une échelle donnée sur la manivelle. On peut montrer²⁸⁸ que $E = OH = OG f(\omega) = F f(\omega)$. On peut alors tracer le diagramme polaire de E et déterminer ainsi la valeur de E par construction graphique.

²⁸⁷ H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée I*, Cours de l'année académique 1905-1906, ULiège Library, MS4335, p. 247.

²⁸⁸ *Ibid.*, p. 247-248.

En ce qui concerne la résistance totale Q , on ne connaît généralement pas la loi de ses variations. Pour une machine motrice en régime, Hubert propose de supposer que Q est constante pendant tout le tour. En régime, le travail de cette résistance sur un tour est donné par $Q \times 2\pi r = (\mathcal{J}(E))_0^{2\pi}$. Le diagramme polaire de Q est donc une circonférence ou une horizontale dans le diagramme rectangulaire (l'aire du rectangle est égale à la surface du diagramme de E)²⁸⁹.

Un exemple de diagramme polaire est donné à la Figure 4-8. La course du piston est divisée en 10 graduations. Pour un tour tout entier de la manivelle, nous avons donc 20 graduations.

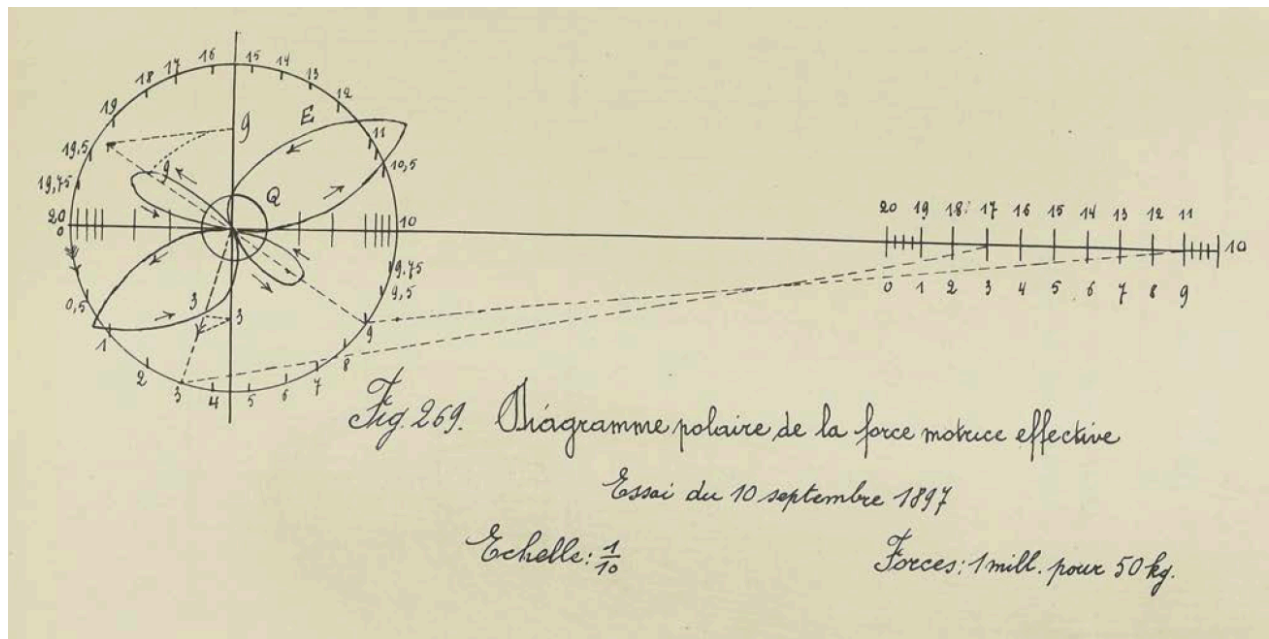


Figure 4-8 : « Diagramme polaire de la force motrice effective ». H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, p. 256.

Nous pouvons utiliser la méthode pour calculer les variations de vitesse²⁹⁰. Hubert propose de classer les masses en celles animées d'un mouvement de rotation (on se limitera à celles tournant autour de l'axe de l'arbre, négligeant notamment le régulateur), celles animées d'un mouvement de translation et celles animées d'un mouvement combiné. La masse M désigne la masse fictive concentrée au boulon de la manivelle et représentant l'ensemble des masses en rotation ($M = \sum I/r^2$). On lui associe la vitesse linéaire V du boulon de la manivelle (ωr). Notons que r désigne la distance à l'axe du point où se concentrent les masses (par exemple, le centre du boulon de la manivelle). La masse du volant joue un rôle prépondérant dans la masse fictive M . La masse m désigne la masse fictive représentant les

²⁸⁹ *Ibid.*, p. 250.

²⁹⁰ *Ibid.*, p. 260-4.

masses en translation ; à cette masse fictive, on associe la vitesse du piston. Avec ses notations, en considérant comme position de départ un des points morts (où la vitesse linéaire est nulle), on a

$$\mathcal{T}(E - Q)_0^n = \frac{M}{2}(V_n^2 - V_0^2) + \frac{m}{2}v_n^2$$

Cette dernière équation permet de calculer la vitesse du boulon de la manivelle V_n pour une position quelconque définie par l'indice n . Le terme $\mathcal{T}(E - Q)_0^n$ peut être déterminé si on connaît le ou les diagrammes de variations de la force motrice et des résistances.

Puisque l'ingénieur s'intéresse principalement à la vitesse de rotation de l'arbre de la machine, on peut la mettre en évidence en reportant dans le membre de gauche, la force vive de translation²⁹¹. Ainsi,

$$\mathcal{T}(E - Q)_0^n - \frac{m}{2}v_n^2 = \frac{M}{2}(V_n^2 - V_0^2)$$

Si $\varphi = dv/dt$ est l'accélération instantanée de la masse m , alors $m\varphi$ est la force liée à l'inertie de la masse m . Son travail de 0 à n est $\mathcal{T}_0^n(m\varphi) = m v_n^2/2$. Cette force est dirigée selon l'axe de la machine, c'est-à-dire selon la résultante des forces sur le piston. Ainsi l'effort net suivant la tangente à la circonférence du bouton de la manivelle est $(F - m\varphi)f(\omega) = E - m\varphi f(\omega)$. La loi de variation de φ avec la position de la manivelle doit être déterminée. L'équation des forces vives devient

$$\mathcal{T}(E - m\varphi f(\omega) - Q)_0^n = \frac{M}{2}(V_n^2 - V_0^2)$$

Nous verrons au Chapitre 5 comment les travaux \mathcal{T}_m , \mathcal{T}_u et \mathcal{T}_f peuvent être mesurés expérimentalement.

4.4.3 Régulateurs accumulateurs et volants d'inertie

La variation du mouvement des machines entraîne des pertes d'énergie, voire compromet la sécurité de la machine (liée par exemple aux efforts centrifuges), et même affecter la rentabilité économique. Hubert explique ainsi que l'on doit donc maintenir la vitesse la plus constante possible (économiquement)²⁹².

²⁹¹ Pour les développements qui suivent, voir H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 364-367

²⁹² Nous reprenons la théorie des régulateurs des notes de cours d'Herman Hubert. *Ibid.*, p. 330-340.

On cherche dans les machines « à réaliser le régime ou mouvement périodique, dans lequel la durée de la période est constante ». Pour cela il faut que « le travail moteur pendant cette durée soit égal à la somme des travaux résistants utile (sic) et passifs ».

Si cette égalité est détruite, sous l'action d'une cause quelconque, la vitesse d'une pièce quelconque va varier (par exemple la vitesse de l'arbre de rotation). Il faut alors modifier le travail moteur ou les travaux résistants pour rétablir l'égalité. C'est précisément le rôle du régulateur.

On peut aussi utiliser des accumulateurs qui « mettent en réserve le travail en excès pour l'utiliser plus tard comme travail moteur ».

On cherche généralement à rendre aussi uniforme que possible la vitesse de rotation. Le volant d'inertie permet de maintenir aussi constante que possible la vitesse à l'arbre au sein d'une période. En analysant l'équation des forces vives que nous venons de développer (voir section 4.4.2) et notant que M représente l'ensemble des masses en rotation, on peut avoir la vitesse maximum V' qui se rapproche de la vitesse minimum V'' en augmentant $M = \sum I/r^2$. Il faut donc augmenter le moment d'inertie $\sum I$, ce qui explique la dimension importante du volant²⁹³.

$$\mathcal{T}_m - \mathcal{T}_u - \mathcal{T}_f = \frac{M}{2}(V''^2 - V'^2) + \frac{m}{2}(v''^2 - v'^2)$$

La régularité des machines est une caractéristique importante. Si V est la vitesse linéaire du bouton de la manivelle, le coefficient de régularité est défini par $V_m/(V' - V'')$ avec V_m la vitesse moyenne, V' la vitesse maximale et V'' la vitesse minimale. Sa valeur, qui est spécifiée par le constructeur, est comprise entre 20 et 200, voire plus²⁹⁴.

Hubert explique que le volant fournit d'autres fonctions²⁹⁵ :

- Le volant fournit le travail nécessaire, par son inertie, pour empêcher que le piston ne s'arrête aux points morts ;
- Il peut mettre en réserve le travail moteur sous la forme de force vive pour l'utiliser plus tard (utile pour les machines qui fonctionnent par intermittence, comme une poinçonneuse) ;
- Si la courroie de la machine à vapeur se rompt, le volant peut permettre d'éviter d'atteindre des vitesses de rotation élevées

²⁹³ Pour un disque creux, le moment d'inertie est égal à $I = M(R^2 - r^2)/2$ avec R le diamètre extérieur et r le diamètre intérieur. Puisqu'on cherche à limiter la masse du volant, on augmente donc son diamètre extérieur.

²⁹⁴ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 264.

²⁹⁵ *Ibid.*, p. 332.

Hubert revient sur le rôle du régulateur²⁹⁶. Il agit sur le travail moteur ou sur le travail résistant de manière à les équilibrer pendant chaque période, alors que l'un ou l'autre varie, de manière à rétablir le régime. Le régulateur doit être insensible aux variations imposées par le volant. Les régulateurs les plus classiques utilisent les variations de la force centrifuge. On oppose à ces forces des forces antagonistes, telles que des poids (Figure 4-9) ou la tension d'un ressort. Il en résulte une position d'équilibre du régulateur.

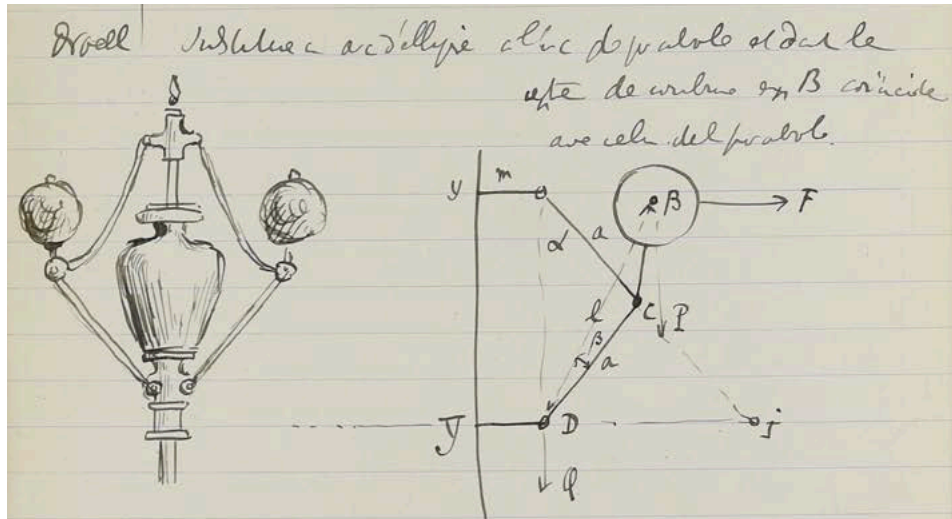


Figure 4-9 : Représentation d'un régulateur à poids de type Proell. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4498, ca. 1890, ff. 6.

Le régulateur tourne autour d'un axe à une vitesse proportionnelle à celle de la machine. Il peut maintenir le volume de l'admission et faire varier la pression ou l'inverse. Il existe un 3^e type de régulateur, utilisé dans les moteurs à gaz, qui coupe l'admission pendant un certain nombre de périodes.

Pour modifier la pression, le régulateur utilise généralement une vanne papillon de forme elliptique qui oscille autour de son petit diamètre qui est aussi celui de la canalisation. Dans le deuxième cas, le régulateur joue sur la durée pendant laquelle le fluide est admis en pilotant les organes de distribution

²⁹⁶ Nous reprenons la théorie des régulateurs présentée par H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 331-340.

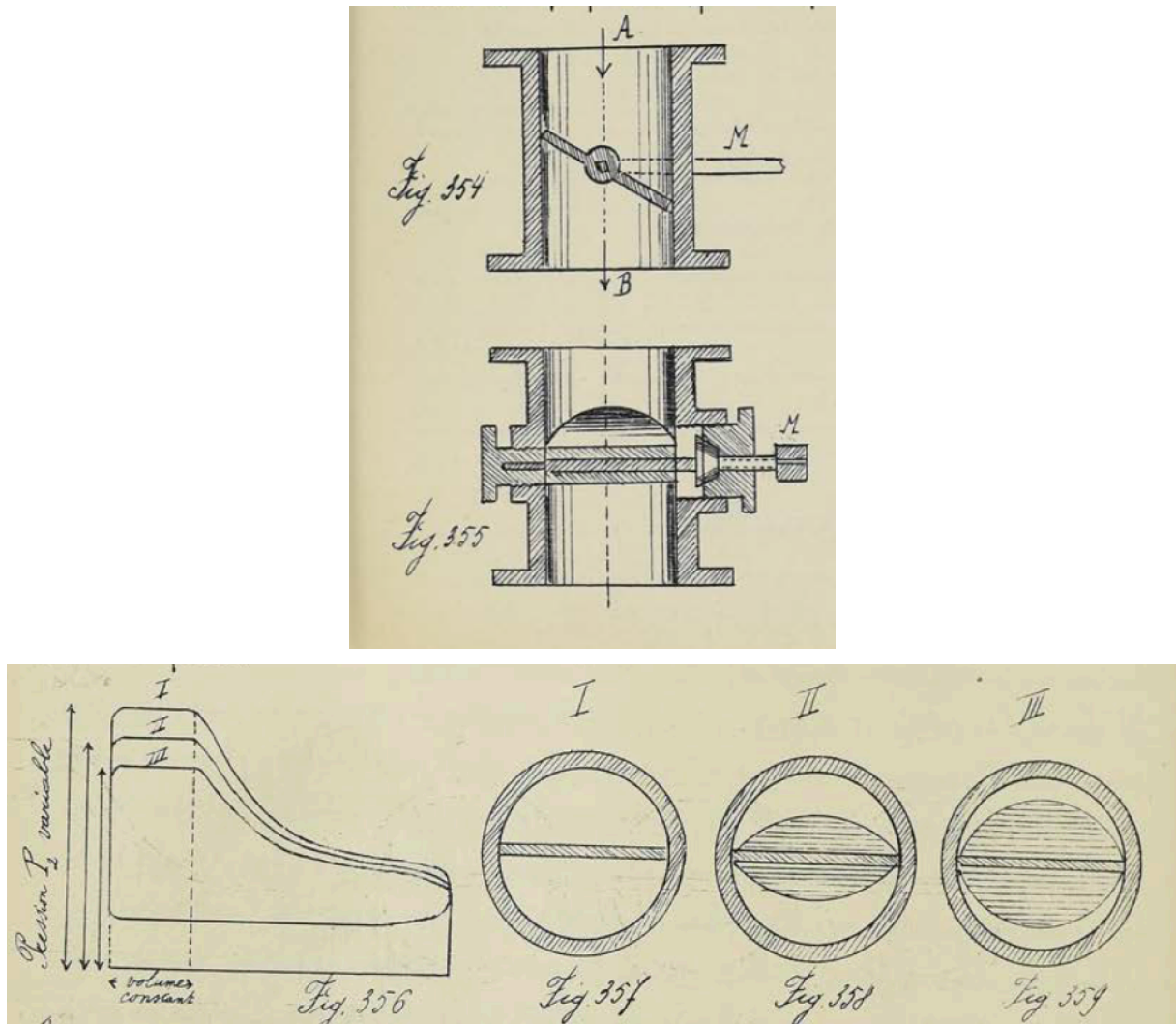


Figure 4-10 : Régulation de la pression haute au moyen d'un régulateur actionnant une vanne papillon. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, Année académique 1905-1906, p. 333.

Le régulateur emploie des masses dont la force centrifuge détermine le mouvement des pièces mobiles. Les masses sont reliées à des bras *B* de longueur invariable articulés sur un axe normal à l'axe *A* du régulateur (régulateurs de type Watt, Porter, Kley, Farcot, Andrade, Rankine, Beer, Raffart, Hartung). Les masses peuvent également être raccordées au manchon lui-même et ne pas tourner autour d'un point fixe (régulateurs de type Buss, Pröl ou Proell, Steinlen, Beyer, Sauter et Harlé). La figure ci-dessous montre des régulateurs à poids et à ressorts. Les articulations sont représentées par des cercles noirs.

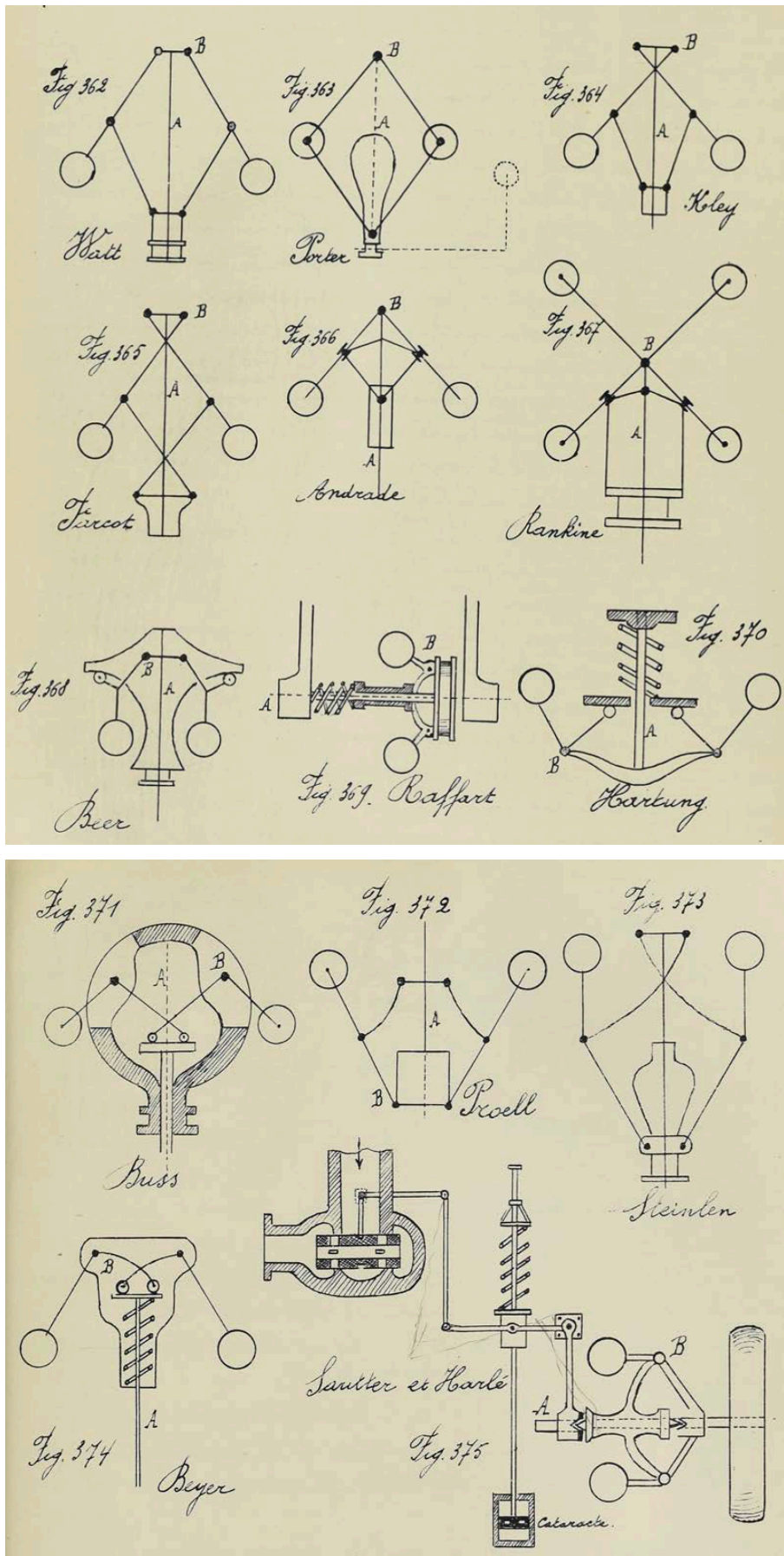


Figure 4-11 : Différents types de régulateurs de pression. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, Année académique 1905-1906, p. 336-337.

L'équilibre du régulateur dépend de la forces centrifuge, du poids des masses (boules, tiges, manchon) et des résistances passives. La position du régulateur impose le degré d'ouverture de la vanne papillon. Dans certains cas, un moteur spécial entrainé par la vapeur est utilisé pour déplacer l'organe modificateur du travail. C'est le rôle du servo-moteur²⁹⁷. On parle alors de régulateurs à action indirecte.

Le régulateur de Beer a particulièrement retenu notre attention. On peut le distinguer à la Figure 2-12. Nous en donnons les dimensions à la Figure 4-12, ainsi que 2 vues d'un modèle probablement utilisé pour l'enseignement.

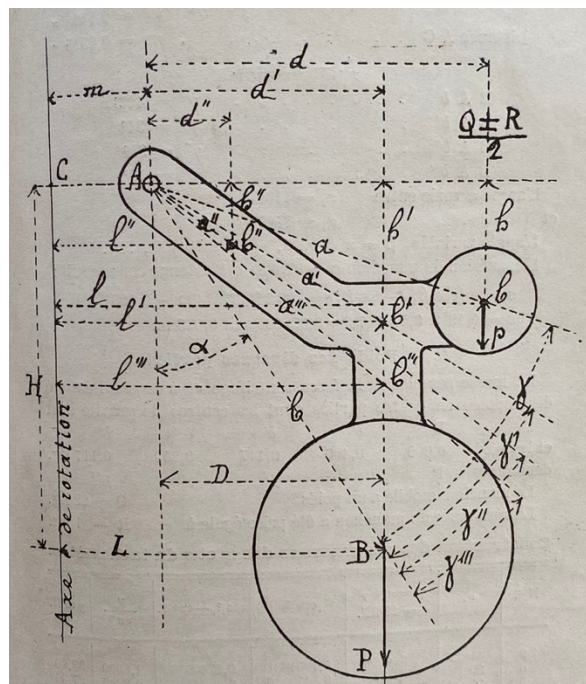


Figure 4-12 : Dimensions et « auscultation » du « système Beer, force n°2 ». Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 71.

²⁹⁷ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 360.



Figure 4-13 : Vues d'un modèle de régulateur de Beer. Maison de la Métallurgie et de l'Industrie de Liège. Numéro d'inventaire : 0000.002.043.

4.4.4 De l'équivalent mécanique de la chaleur à la conservation de l'énergie

Une des avancées significatives dans l'histoire de l'énergie est la démonstration de l'équivalence mécanique de la chaleur²⁹⁸. L'équivalent mécanique de la chaleur E a été mesuré par de nombreux scientifiques et est compris entre 425 et 427 Kilogrammètres par Calorie. Il est égal à 426 à 1/400 près²⁹⁹. Mayer (1814-1878) a été le premier à noter l'existence d'un ratio constant entre travail et chaleur en 1842 et à produire un premier essai pour le déterminer, alors que Joule l'a déterminé plus précisément plus tard³⁰⁰, à partir de 1843. Mayer n'était pas un expérimentateur, mais un théoricien : il a utilisé les tables des chaleurs spécifiques c_v et c_p publiées à l'époque³⁰¹. Ainsi, il comprend que $c_p > c_v$, car il faut fournir de la chaleur additionnelle pour permettre au gaz de se détendre. Lorsque T augmente de 1K, Mayer calcule que le volume augmente de 1/274 pour un gaz idéal. Cela revient à pousser un poids lié à l'atmosphère. Il arrive à calculer que 1 BTU correspond à 665 foot-pounds de travail (85% de la valeur communément acceptée). Ses travaux n'ont pas été reconnus par l'ensemble

²⁹⁸ Robert T. HANLON, *Block by block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*, Oxford University Press, 2020, p. 229.

²⁹⁹ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 3.

³⁰⁰ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 172. Au sujet des expériences de Joule, voir Robert T. HANLON, *Block by block: op. cit.*, p. 252-260. L'expérience de la roue à aubes de Joule décrite dans la publication de 1850 a été reproduite par Otto Sibus. Voir Heinz Otto SIBUM, « Reworking the Mechanical Value of Heat: Instruments of Precision and Gestures of Accuracy in Early Victorian England », *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, Volume 26, Issue 1, 1995.

³⁰¹ Robert T. HANLON, *Block by block: op. cit.*, p. 243-245.

de la communauté, et il faudra attendre 1860 pour qu'il soit mis sur le devant de scène (notamment grâce à Clausius, von Helmholtz et Tyndall)³⁰².

Ainsi, l'équivalent mécanique de la chaleur est connu dès 1842, mais le concept d'énergie arrivera plus tard. Le mot « énergie » a été popularisé par Thomson qui le reprend de Thomas Young dans une publication majeure de 1847 dans laquelle il écrit « *Nothing can be lost in the operation of nature – no energy can be destroyed* »³⁰³.

A quelle époque, le concept d'énergie a-t-il été introduit dans les cours de l'Université de Liège ? Ce concept n'est pas encore présent dans la publication posthume (1868) de Brasseur. Celui-ci mentionne que « *les forces motrices primitives que l'on rencontre dans la nature sont : la gravité, la chaleur, l'électricité, la force des hommes et des animaux. Le poids de l'eau, le vent, la vapeur sont des forces motrices secondaires, qu'on peut sans inconvénient, nommer simplement forces motrices.* »³⁰⁴ Nous relevons, avec beaucoup d'intérêt, la remarque de Folie dans l'avant-propos qui atteste du caractère encore très récent de la théorie mécanique de la chaleur : « *Nous avons d'abord à choisir entre les deux théories de la machine à vapeur d'après Pambour. La théorie mécanique de la chaleur avait fortement ébranlé la confiance de Brasseur dans l'exactitude des hypothèses de Pambour, et nous croyons que c'est pour cette raison, qu'après avoir rédigé d'abord la théorie complète de ce savant, il s'était résolu ensuite à ne l'exposer qu'en abrégé ; nous avons donc cru devoir choisir la théorie succincte de préférence à la théorie détaillée.* »³⁰⁵

Le concept d'énergie n'est pas encore présent en 1876. Dwelshauvers-Dery parle de « *force calorique* » qui, lorsqu'elle produit un travail, diminue la température des corps³⁰⁶. La chaleur est vue comme une « *force naturelle* » qui s'emploie dans les machines par l'intermédiaire de la vapeur d'eau. Ainsi, la chaudière est vue comme un vase renfermant la pièce fluide mobile qui reçoit l'action de la force naturelle appelée chaleur³⁰⁷.

Il cite un exemple intéressant qui semble préfigurer la notion d'opération réversible : « *Retirez le corps pressant en supprimant la pression petit à petit, de manière que la force calorique vous rende le travail de cette pression par la résistance qu'elle éprouve à reproduire les surfaces primitives et l'échauffement disparaîtra ; l'expérience le prouve encore. Enlevez au contraire subitement le corps*

³⁰² *Ibid.*, p. 247.

³⁰³ *Ibid.*, p. 390.

³⁰⁴ Jean-Baptiste BRASSEUR et François FOLIE, *Précis du cours de mécanique appliquée (ouvrage posthume terminé d'après les manuscrits de l'auteur par F. Folie)*, Liège, Carmanne, 1868, p. 81.

³⁰⁵ *Ibid.*, p. 5.

³⁰⁶ V. DWELSHAUVERS-DERY, *Programme des cours ...*, op. cit., p. 4-5.

³⁰⁷ *Ibid.*, p. 85.

pesant, la force calorifique n'opérant plus aucun travail, restera augmentée ; les corps resteront échauffés. Encore une fois, c'est l'expérience qui le prouve »³⁰⁸. Le concept de régime de température est décrit.

Lors de la description du fonctionnement d'une machine à vapeur, le paragraphe ci-dessous énonce à peu près le second principe de la thermodynamique³⁰⁹ :

« Une source de chaleur (force naturelle) donne une tension P m.q. à un mélange d'eau et de vapeur contenu dans une capacité appelée chaudière. Ce mélange, ainsi chauffé à une température t° , s'en va par parties déterminées vers un second milieu (corps froid), atmosphère libre ou condenseur, où il revient à l'état d'eau froide à une température $t'o$, à laquelle il est restitué à la chaudière. Dans ce circuit fermé, le mélange eau et vapeur a passé, en vertu de l'impulsion donnée par la chaleur, dans ce que l'on appelle la machine à vapeur, où une partie de la chaleur a disparu pour produire le travail mécanique recueilli par la machine et utilisé par l'homme. La quantité de chaleur qui tombe de la température t° à la température $t'o$ étant connue, des phénomènes physiques imprescriptibles déterminent le maximum de celle qui peut disparaître pour être transformée en travail mécanique pendant le transport de la vapeur du corps chaud au corps froid ».

Dwelshauvers-Dery quant à lui emploie largement l'équivalent mécanique de la chaleur, sur lequel se basent les analyses expérimentales qu'il a réalisées avec ses étudiants. Il relate la paternité partagée de ce concept par Mayer et Joule. Ainsi, vers 1888, dans son cours de Physique industrielle, Dwelshauvers mentionne³¹⁰ l'expérience de Joule (« professeur à Manchester ») pour calculer E . Il redémontre aussi le calcul de E par les équations des gaz parfaits, comme l'avait fait Mayer³¹¹.

Le concept d'énergie apparaît enfin vers 1890³¹², avec un exemple très pratique : « Quand on tend brusquement une [sic] élastique en la tenant contre la langue, on dépense une certaine énergie (musculaire) pour faire ce travail et cette énergie se transforme alors en chaleur : l'élastique s'est échauffée ». Aussi « pour produire du travail, il faut dépenser une certaine forme d'énergie et le travail effectué, cette énergie n'est pas perdue mais se retrouve sous une autre forme d'énergie ». La

³⁰⁸ *Ibid.*, p. 4-5.

³⁰⁹ *Ibid.*, p. 84-85.

³¹⁰ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 51.

³¹¹ *Ibid.*, 58-64.

³¹² On retrouve les notions d'énergie et d'équivalent mécanique de la calorie dans le premier manuscrit. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée Volume I*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

reproduction de deux pages du manuscrit de 1890 à la Figure 4-14 laisse penser que le mot « énergie » a été rajouté plus tard en lieu et place des mots « travail » et « chaleur ».

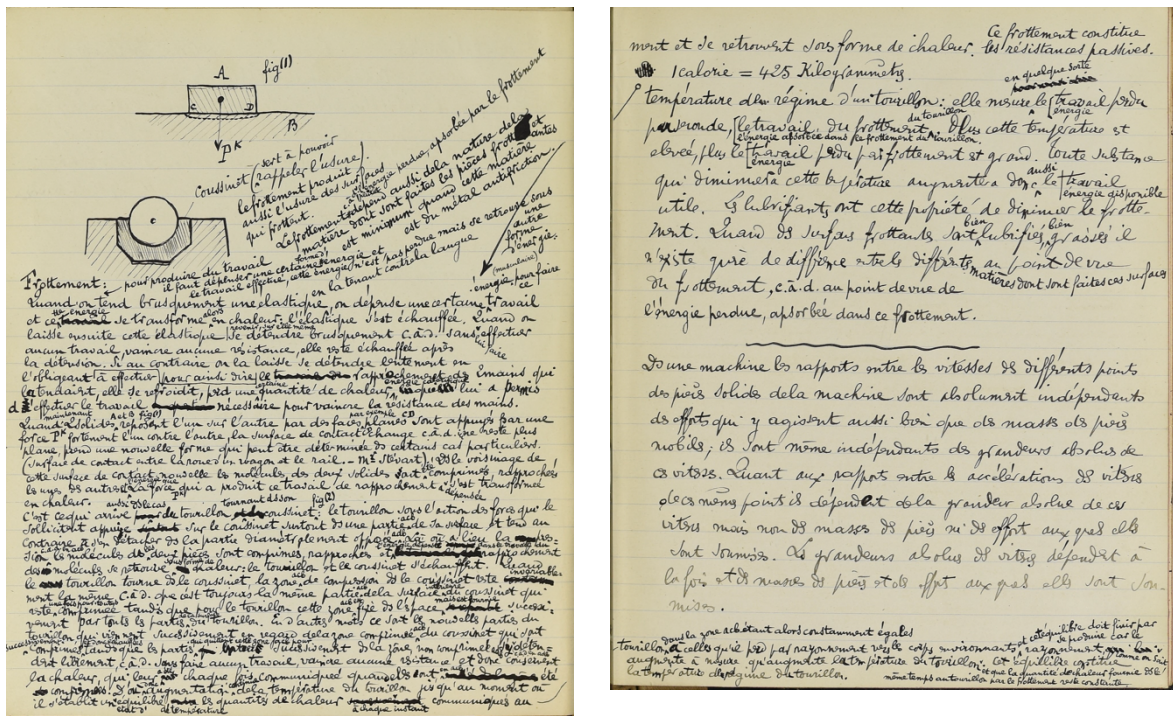


Figure 4-14 : Introduction du concept d'énergie dans le cours de *Mécanique appliquée* de Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

Hubert, dans son cours de *Mécanique appliquée* de 1905-1906, cite les différentes formes d'énergie, c'est-à-dire les différentes formes sous lesquelles « la nature met à notre disposition [...] la capacité à produire du travail : énergie cinétique (eau ou air en mouvement), énergie gravifique (chutes d'eau), énergie thermique (machines à vapeur) ; énergie chimique (armes à feu, moteurs à explosion), énergie électrique ou magnétique (machines-dynamo ou magnéto-électriques). Nous sommes impuissants à augmenter ou à diminuer la quantité totale d'énergie existant dans le monde. Mais nous pouvons transformer l'énergie et la transporter, de façon à l'utiliser pour nos besoins »³¹³. Toutes les énergies doivent en effet être préparées avant d'être utilisées dans les machines³¹⁴. L'énergie des êtres vivants est également citée³¹⁵. Dans son cours de *Physique industrielle* de 1906-1907, il souligne que l'énergie la plus utilisée est la chaleur. Les différentes sources de chaleur sont connues : la chaleur solaire, la chaleur animale, la chaleur issue de la terre, la chaleur issue de réactions chimiques (notamment la combustion), la chaleur produite par des procédés physiques. Hubert rappelle³¹⁶ que c'est

³¹³ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, p. 366.

³¹⁴ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 5.

³¹⁵ *Ibid.*, p. 5.

³¹⁶ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 3-4.

la chaleur et la lumière solaire qui sont à l'origine indirecte de ces sources de chaleur (croissance des végétaux, action du vent et des rivières, constitution des réserves de combustibles fossiles). Même si la chaleur dégagée par le soleil est colossale, Hubert note qu'il n'y a peu d'applications industrielles directes. La chaleur la plus utilisée est celle issue de la combustion d'un combustible.

Dans les notes de cours de Physique industrielle de l'année 1906-1907, le « *principe de conservation*³¹⁷ de l'énergie » est exprimé par³¹⁸

$$U_2 - U_1 = Q - \frac{\mathcal{T}_e + W_2 - W_1}{E}$$

Avec

W la demi somme des forces vives des masses à un instant quelconque, en Kilogrammètres. On l'appelle aussi l'énergie cinétique.

U l'énergie interne. Le terme est proposé par Clausius, mais on l'appelle aussi chaleur interne.

\mathcal{T}_e le travail des forces externes sur le système de points matériels.

Hubert déclare³¹⁹ que l'œuvre majeure de la physique du XIX^e siècle a été la mise en évidence du « *principe d'indestructibilité de l'énergie* » et de la masse, ainsi que la détermination de l'équivalence mécanique de différentes formes de l'énergie. Cette œuvre n'est pas achevée, mais suffisamment complète pour deux formes d'énergie qui intéressent l'ingénieur : la chaleur et l'électricité.

4.4.5 De la performance maximale des moteurs à l'entropie

Dans ses notes de cours de 1906-1907, Hubert nomme de la façon suivante les Principes fondamentaux de la thermodynamique : le *Principe de Mayer-Joule* et le *Principe de Carnot et Clausius*. A la suite du second principe, il aborde l'entropie et puis les cycles non-réversibles. A cette époque, la thermodynamique et ses deux principes, est donc présentée sous sa forme moderne, c'est-à-dire de façon très similaire à un enseignement actuel. Revenons en arrière afin de comprendre l'origine du second principe.

4.4.5.1 L'œuvre de Carnot

Nous ne pouvons pas nous intéresser à l'histoire de la thermodynamique à Liège sans mentionner l'œuvre de Carnot et la manière dont elle a été diffusée au début de la carrière de

³¹⁷ Le mot "conservation" est rentré dans le lexique thermodynamique avec la publication en 1847 de von Helmholtz "On the Conservation of Force". Voir Robert T. HANLON, *Block by block: ..., op. cit.*, p. 369.

³¹⁸ L'expression « principe de conservation de l'énergie » est utilisée par H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 173-174.

³¹⁹ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, p. 238.

Dwelshauvers-Dery. Nous synthétisons dans la suite de cette section le chapitre de livre que Robert Hanlon consacre à Carnot³²⁰.

Carnot est un ingénieur français formé à l'Ecole Polytechnique et ayant réalisé une courte carrière militaire. Il reçoit de son père, Lazare Carnot, une forte éducation technique. Il se montre impressionné par la technologie anglaise et souhaite améliorer l'état des connaissances techniques des moteurs pour le bénéfice de la France. La question de Carnot n'était pas de savoir comment la machine à vapeur fonctionne, on le sait, mais bien de savoir quel est encore le potentiel d'amélioration de ses performances. Cela doit ainsi orienter les développements techniques. En réalité, les fabricants de machines à vapeur n'attendaient pas de théorie pour améliorer leurs machines et les vendre. Leurs connaissances empiriques leur avaient appris à réduire les frottements, à réduire les fuites et à utiliser les gaz chaud de la chaudière pour préchauffer l'eau. Pourtant, il y avait une perte qui n'avait pas été tout à fait identifiée : la chute de température depuis la chaudière (à 1000°C) et la vapeur (à 150°C).

En 1824, à 28 ans, Carnot écrit un livre intitulé *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Dans son livre, Carnot se base sur la théorie du calorique, une substance sans masse qui s'écoule du corps chaud vers le corps froid. Le calorique se conserve : il ne peut être ni créé ni détruit. Aussi, il comprend deux formes : sensible et latente. Notons que Carnot utilise *calorique* et *chaleur* indifféremment. La théorie du calorique avait été développée par Lavoisier et a rencontré un succès dans les années 1770. Elle expliquait bien les observations et restait donc bien établie : par exemple, lors de l'expansion d'un gaz, il y avait un transfert du calorique sensible au latent, ce qui expliquait la chute de température. La théorie du calorique a commencé à s'estomper dans les années 1820, mais Carnot, éloigné des cercles académiques n'en était pas entièrement conscient et a continué à l'utiliser plus tard que les autres. Plus tard, Clausius modifiera et corrigera *Réflexions* en remplaçant calorique par énergie, contribuant à la création de la thermodynamique classique.

4.4.5.1.1 Les contributions de « *Réflexions...* »

Il y a au moins quatre contributions importantes dans *Réflexions* que nous détaillons ici :

1. Carnot a eu l'intuition que la puissance maximale est dépendante de la différence de températures et non pas de pressions.

Carnot fait l'analogie avec un moteur hydraulique. La puissance d'une chute d'eau dépend de la quantité d'eau et de la hauteur entre les deux réservoirs. La puissance motrice de la chaleur, quant à elle, dépend de la quantité de calorique et de la différence de températures entre les deux corps qui

³²⁰ Voir le chapitre 30 – Sadi Carnot dans Robert T. HANLON, *Block by block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*, Oxford University Press, 2020, p. 329-366.

échantant du calorique. La question que se pose Carnot est de savoir si la puissance est proportionnelle à cette différence. Carnot déclare que le rendement maximum est dépendant de la différence entre la température du foyer de la chaudière et celle du condenseur. Ainsi, son point de départ, le calorique, est faux mais la conclusion est correcte. A son époque, la majorité de la communauté s'intéressait à la pression. La température était simplement une propriété de la matière. La majorité des ingénieurs et praticiens regardaient la chute de calorique de la haute à la basse pression et voyaient l'élévation de pression comme un moyen d'augmenter la performance en plus d'augmenter la compacité des machines. En réalité, comme le souligne Hanlon, la pression augmentait bien le rendement mais la relation cause à effet était mal identifiée.

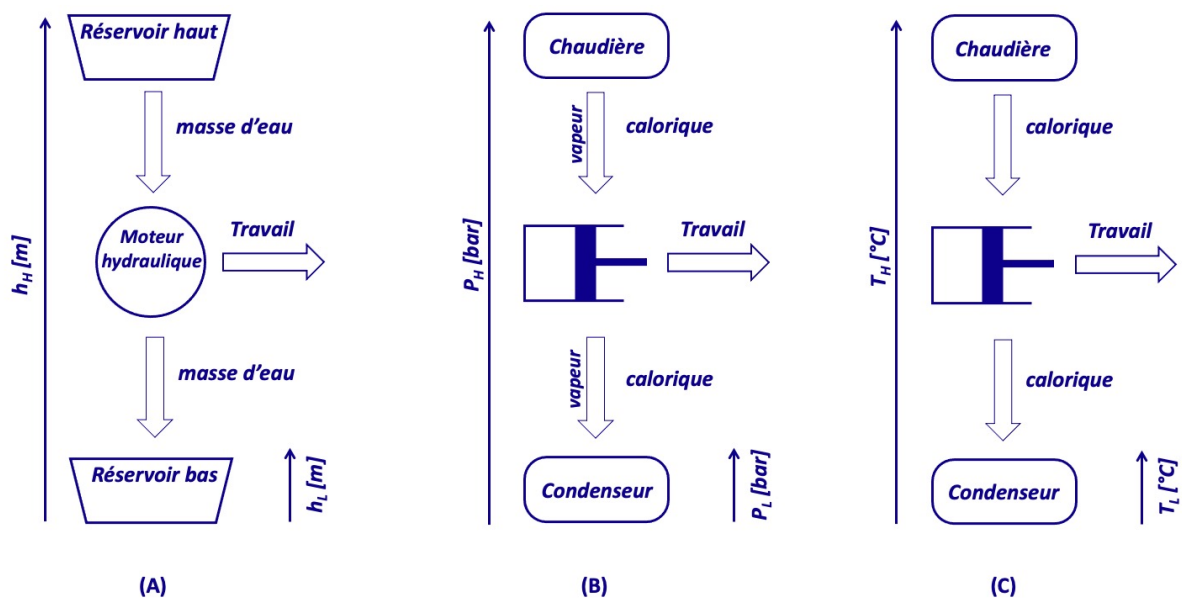


Figure 4-15 : L'analogie entre le moteur hydraulique et l'expansur à piston et le passage de la pression à la température comme variable critique dans *Réflexions...* de Carnot (1824).

2. Le cycle doit être fermé pour l'analyser

La seconde contribution de Carnot est de ne pas considérer seulement l'expansur à piston (« la machine à vapeur proprement dite »³²¹), mais aussi la chaudière, le condenseur et la pompe et ainsi de fermer le cycle.

Carnot ne fait aucune référence à une machine particulière, mais était inspiré par la machine de Woolf, une machine à vapeur récente à son époque qui fonctionnait à haute pression. Carnot a développé sa théorie sur base d'un cycle à gaz, alors que les machines de l'époque fonctionnaient avec de la vapeur saturée (comme le rappelle Hanlon, la vapeur surchauffée ne sera commercialisée que vers 1900).

³²¹ On retrouve cette expression dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée Volume I*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890. Voir approximativement le 5^e feuillet (non numéroté) dans la description générale de la machine à vapeur de Jemeppe.

Pour simplifier l'étude de ce cycle fermé, Carnot imagine un cycle à gaz idéalisé dans lequel le calorique « chute » de la source de chaleur à la source froide en limitant les différences de températures. Ainsi, Carnot a transformé le moteur à vapeur compliqué en un moteur à gaz idéal simplifié. Peu importe que ce moteur idéal n'existât pas et qu'il aurait été difficile de le construire ou de l'opérer (notamment en raison de la difficulté d'obtenir des transferts de chaleur raisonnables durant la compression et l'expansion dans les cylindre).

3. La performance maximale ne dépend pas de la nature du fluide

A l'époque de Carnot, certains pensaient que l'air était un meilleur fluide que la vapeur d'eau et d'autres pensaient le contraire. Carnot a montré que la performance de son cycle idéal n'était pas liée au fluide. L'important est de réduire les différences de températures. Ce qui limite le choix des fluides est évidemment des aspects techniques (comme les soudures). Cette approche très théorique et éloignée des aspects pratiques peut avoir limité la diffusion du livre.

4. Le cycle de Carnot est réversible

Carnot a certainement lu Déprécieux et sa roue hydraulique réversible, dans laquelle chaque changement se fait sous un gradient infinitésimal. Il a également été influencé par son père qui avait introduit le concept de réversibilité en physique.

Pour comprendre la notion de réversibilité, revenons sur le concept du calorique. Dans la chaudière, il y a rupture de l'équilibre du calorique, c'est-à-dire un déplacement du latent vers le sensible. La nature rétablit ensuite l'équilibre du calorique par deux chemins :

- Conduction de chaleur, c'est-à-dire une chute du calorique non productive liée à la mise en contact de deux corps à des températures différentes
- Augmentation du volume (conservation du calorique avec un déplacement sensible-latent)

Pour Carnot, pour maximiser le travail il faut éviter toute chute de calorique non productive dans le procédé : a) éviter toute différence de températures entre la machine, la source et le puits ; b) bien isoler la machine pour ne pas perdre de calorique vers l'environnement ; c) éviter tout contact direct entre source et puits. Une chute de température doit seulement être due à un changement de volume : lors de l'expansion d'un gaz, le calorique se conserve, mais il y a un déplacement du calorique sensible au latent. En d'autres termes, il doit y avoir chute du calorique par augmentation du volume et non pas par différence de températures. Minimiser la différence de températures en tout point, se base sur deux principes : a) éliminer les pertes de chaleur (éliminer les frottements, améliorer l'isolation) ; b) maximiser la différence de températures entre la haute température et le fluide et entre le fluide et la basse température. En limitant toutes les différences de températures au travers du cycle, Carnot peut

inverser le cycle. Ainsi, le moteur devient réversible. Carnot introduit d'ailleurs le cycle de la pompe à chaleur.

4.4.5.1.2 *L'hypothèse incorrecte*

Malgré le fait que la théorie était basée sur une hypothèse incorrecte (la conservation du calorique transgresse la conservation de l'énergie), Carnot arrive à énoncer ce qui sera plus tard le second principe. Comme nous l'avons vu, on devra attendre 1842 pour comprendre et quantifier l'équivalence entre chaleur et travail et ainsi établir le principe de conservation de l'énergie.

Dans des notes publiées à la même époque et rendues publiques en 1878 par son frère Hyppolite Carnot, on apprend qu'avant sa mort il avait rejeté la théorie du calorique. Cette théorie n'expliquait effectivement pas certains résultats expérimentaux³²².

4.4.5.1.3 *La réception de « Réflexions » et son succès posthume*

Le livre de Carnot n'a quasiment pas été vendu. Ses idées n'ont pas intéressé ceux qui recherchaient des conseils d'ingénierie pratiques. Carnot meurt du choléra en 1832 à 36 ans. On brûlera la majorité des livres et papiers de peur de propager l'infection³²³. Carnot ne connaîtra pas le succès de son livre de son vivant.

Clapeyron découvre le travail de Carnot et l'incorpore dans sa publication de 1834 (*« Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur »*). Il clarifie son travail en utilisant les mathématiques et le diagramme P-V. Son ouvrage est traduit en anglais en 1837 et en allemand en 1843.

Le travail de Clapeyron arrive jusque William Thomson qui reconnaît le génie du livre : *« one of the greatest scientific works ever written »*. En réalité, Thomson qui réalisait un séjour de recherche à Paris (chez Regnault) est tombé par hasard sur le livre de Clapeyron, et a recherché ardemment le livre de Carnot (cité dans les références) parmi les libraires de Paris, mais le livre était rare. Il le trouve en 1848 et écrit en 1849 *« An account of Carnot's Theory of the Motive Power of Heat »*, livre dans lequel il propose le mot et le concept de *thermo-dynamique* et adopte le mot *énergie* de Thomas Young³²⁴. En 1850, Clausius, inspiré par la publication de Thomson publia *« On the Motive Power of Heat »*³²⁵.

³²² Gay-Lussac a montré expérimentalement que lors de la détente libre d'un gaz contre le vide, la température ne changeait pas. Or, la théorie du calorique prévoit que lors d'une détente adiabatique, il y a chute de température à cause du changement entre calorique sensible et latent. Voir Robert T. HANLON, *Block by block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*, Oxford University Press, 2020, p. 364.

³²³ André HOUBERECHTS, *Traité de thermodynamique technique*, op. cit., p. 2.

³²⁴ Robert T. HANLON, *Block by block: ...*, op. cit., p. 390.

³²⁵ Clausius déclare dans cette publication n'avoir jamais eu une copie de la publication originale de Carnot. Il en connaît le contenu au travers des travaux de Thomson, Clapeyron et Holtzmann. Voir Robert T. HANLON, *Block by block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*, Oxford University Press, 2020, p. 370.

4.4.5.2 Le cycle de Carnot dans la formation des ingénieurs liégeois

Quand l'œuvre de Carnot a-t-elle diffusé à l'Université de Liège³²⁶ ? Nous n'avons relevé aucune mention à Carnot dans l'œuvre de Brasseur (mis à part certains travaux de son père Lazare Carnot). Il semble qu'il faudra attendre Dwelshauvers-Dery, qui fait état d'une très bonne connaissance de l'œuvre de Carnot, mais aussi de celle de Thomson, Clausius et Rankine. Ainsi vers 1888, dans un chapitre de cours lié à la thermodynamique, Dwelshauvers-Dery déclare³²⁷ :

« Sadi Carnot est le premier à publier le 2nd principe dans un mémoire : « *Réflexions sur la puissance motrice du feu.* » Ce mémoire paru en 1824 fait connaître ce qu'a été appelé après 2^{de} proposition de thermodynamique. Clausius et Rankine ont énoncé la même proposition ultérieurement sans connaître le mémoire de Carnot. James Thomson a fait connaître ce mémoire en le proclamant une des grandes choses qui avaient été faites au monde. »

Nous verrons plus tard que Dwelshauvers-Dery a gardé l'idée d'analogie entre la chute d'eau et la chute de température, en introduisant la notion de *poids thermique*.

En 1906, la notion du cycle théorique de Carnot est donc bien connue³²⁸. Hubert rappelle que si Q_1 désigne la chaleur absorbée d'une source de chaleur à température constante T_1 et Q_2 la chaleur cédée à un corps froid à une température T_2 , alors d'après le théorème de Carnot³²⁹, on a $\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$. On en déduit que $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$. Or, le travail \mathcal{T} est égal à $E(Q_1 - Q_2)$. Le rendement thermique (ou économique) du cycle de Carnot ne dépend donc que des températures entre lesquelles le cycle évolue et non pas de la composition du système. Il augmente si T_1 augmente et si T_2 diminue.

³²⁶ “*Réflexions...*” de Carnot a été acheté le 9 décembre 1935 par l'Université de Liège pour la somme de 240 frs (libraire Fernand Gothier) comme l'atteste le Registre des Entrées dans l'Inventaire de l'Université de Liège (numéro du catalogue 369, années 1935-36).

³²⁷ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 50.

³²⁸ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 177-8

³²⁹ Cette équation a en réalité été établie par Thomson en 1854. Voir Robert T. HANLON, *Block by block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*, Oxford University Press, 2020, p. 429.

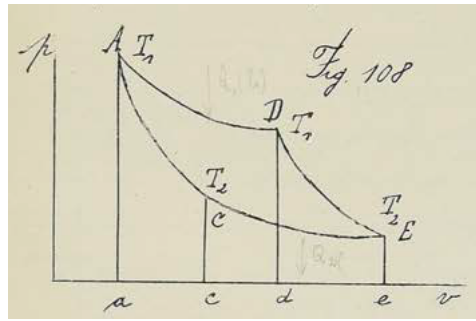


Figure 4-16 : Représentation du cycle de Carnot. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 177.

Hubert emploie ce cycle pour calculer un rendement maximal théorique entre une température d'évaporation de 200°C et une température de condensation de 10°C, soit approximativement 40%. Il note que la température de 200°C est une limite supérieure imposée par la résistance des chaudières (épaisseur des tôles)³³⁰.

4.4.5.3 Du cycle réversible de Carnot au cycle de la machine réelle en passant par le cycle de Rankine

4.4.5.3.1 Le cycle de Carnot

Il est connu à l'époque d'Hubert que le cycle de Carnot était inconcevable en pratique³³¹. Le dispositif cylindre-piston n'est pas imperméable et on ne peut pas effectuer les opérations du cycle de Carnot à l'intérieur du cylindre. Aussi, on ne peut pas vaporiser l'eau à l'intérieur du cylindre. Ainsi, on doit laisser la vapeur et l'eau sortir du cylindre et rejoindre le condenseur. Aussi, seule une petite quantité de vapeur est recomprimée dans le cylindre et pas l'entièreté du fluide évoluant. L'évolution de l'eau du condenseur qui alimente la chaudière et dans laquelle elle est réchauffée ne ressemble pas à la compression adiabatique du cycle de Carnot. Enfin, lors de la détente adiabatique, il n'est pas possible techniquement de rejoindre la température dans le condenseur. Le taux de détente volumétrique serait très important. Les dimensions seraient très importantes. Finalement, le travail des frottements (« résistances passives ») deviendrait du même ordre de grandeur que le travail moteur.

Au vu de ces considérations, Hubert explique qu'il peut « paraître inexact de comparer la machine à vapeur réelle à celle qui fonctionnerait suivant un cycle de Carnot, puisqu'il est impossible et qu'il serait même nuisible sous certains rapports de le réaliser. C'est pourquoi on a substitué à la machine idéale fonctionnant suivant le cycle de Carnot d'autres machines encore idéales, mais se rapprochant davantage de la réalité et qui peuvent servir rationnellement de terme de comparaison

³³⁰ H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, p. 380.

³³¹ *Ibid.*, p. 381-382.

pour juger les machines réelles et apprécier de combien elles s'écartent encore de cette perfection relative »³³².

4.4.5.3.2 Le cycle de Rankine

Hubert rappelle que le cycle proposé par Rankine est un des cycles les plus employés. Dans ce cycle, décrit en 5 étapes³³³, la chaudière vaporise un kilogramme³³⁴ d'eau saturée à température T_1 à pression constante. La vapeur est envoyée dans un cylindre où elle y est détendue adiabatiquement jusqu'à la pression p_2 . Le mélange d'eau et de vapeur est expulsé vers le condenseur dans lequel règne la pression p_2 . La pompe à air élève la pression du kilogrammes d'eau extrait du condenseur de p_2 à la pression atmosphérique p_a , ce qui exige une dépense de travail. Ce kilogramme d'eau est ensuite réintroduit dans la chaudière à la pression p_1 et à la température T_1 , ce qui exige une dépense de travail et de chaleur. Dwelshauvers-Dery rappelle que « la vapeur condensée étant de l'eau distillée pure est avantageusement utilisée à l'alimentation de la chaudière »³³⁵. Aussi, les pertes d'eau et de vapeur doivent en pratique être compensées en reprenant dans la nature la quantité d'eau perdue³³⁶.

On appelle rendement générique³³⁷ le rapport entre le rendement du cycle de Rankine et le rendement théorique maximum du cycle de Carnot.

4.4.5.3.3 Le cycle de la machine réelle

Le cycle de la machine réelle s'écarte du cycle de Rankine en raison de 3 pertes principales : la consommation additionnelle liée à l'espace mort, la détente partielle jusqu'à la pression de condensation et l'effet des parois métalliques. En pratique, le rendement du cycle réel vaut 70% du rendement du cycle de Rankine. Si le rendement générique de celui-ci est de 77% et le rendement économique du cycle de Carnot 40%, le rendement thermique total de la machine à vapeur fonctionnant avec de la vapeur saturée serait de 21,6%³³⁸. Il faut ensuite tenir compte d'un rendement organique qui dépasse rarement 90%. Le rendement définitif serait donc de 19,4%. Hubert note que ce résultat serait sensiblement meilleur si la vapeur était *surchauffée*.

³³² H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, p. 382-283.

³³³ *Ibid.*, p. 383.

³³⁴ On remarquera que le cycle est décrit en grandeurs spécifiques.

³³⁵ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

³³⁶ V. DWELSHAUVERS-DERY, *Programme des cours ...*, *op. cit.*, p. 86.

³³⁷ *Ibid.*, p. 384.

³³⁸ *Ibid.*, p. 387.

4.4.5.4 Du Théorème de Rankine à la performance maximale des moteurs

En repartant du cours d'Hubert, nous sommes remontés jusqu'au cours de Dwelshauvers-Dery de 1868-1869³³⁹ pour découvrir si et comment le second principe y était enseigné.

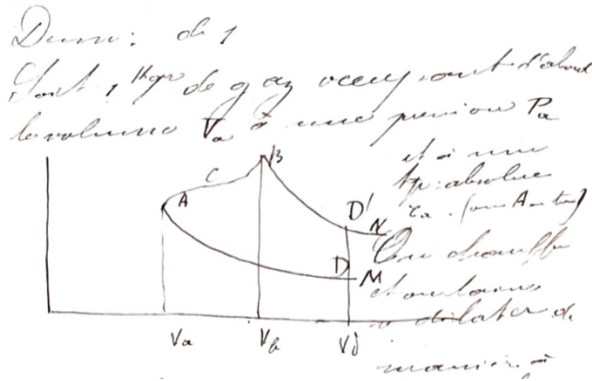


Figure 4-17 : Représentation graphique du calcul de la chaleur nécessaire pour passer d'un état A à un état B selon le Théorème de Rankine. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 639.

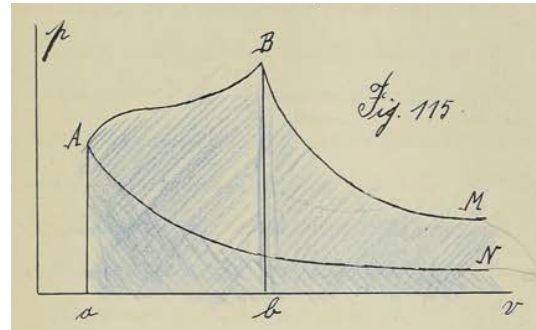


Figure 4-18 : Représentation graphique du calcul de la chaleur nécessaire pour passer d'un état A à un état B selon le Théorème de Rankine. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 181.

En 1868, Dwelshauvers-Dery propose les développements suivants. En partant d'1 kilogramme de gaz à la pression P_a et volume V_a et à la température τ_a , on chauffe et on laisse se dilater le gaz pour arriver en P_b , V_b et τ_b (Figure 4-17). AM et BN sont les courbes adiabatiques indéfiniment prolongées sur l'axe des x. Selon Dwelshauvers³⁴⁰, la conséquence de la première loi de la thermodynamique est que l'équivalent mécanique de la chaleur absorbée pour passer de A en B est égale à l'air comprise entre ACB et BN et AM. Hubert mentionne que ce théorème est le théorème de Rankine et en fait la démonstration (Figure 4-18)³⁴¹. La comparaison de la Figure 4-17 et de la Figure 4-18, bien qu'espacées de près de 40 ans, montrent clairement la « filiation » entre l'enseignement de Dwelshauvers et celui de Hubert.

Imaginons qu'on prolonge l'adiabatique de B à D', qu'on refroidisse ensuite de D' en D et qu'on revienne l'adiabatique de D à A. Ainsi, le gaz aura subi un « cycle fermé d'opérations ». Si le cycle est réversible³⁴², alors le travail « effectué contre la résistance du piston » est égal à l'air ACBD'DA. Cette aire, divisée par 424, est égale à la différence entre la chaleur fournie de A à B et celle cédée de D' à D.

³³⁹ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869

³⁴⁰ Pour tous les développements qui suivent, voir Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 639 et suivantes.

³⁴¹ H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 181.

³⁴² Dwelshauvers emploie bien le mot réversible. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 641.

Dwelshauvers-Dery introduit ensuite le théorème de Rankine. Soit A_1A_2M et B_1B_2N des courbes adiabatiques et $Q_1\tau_1$ et $Q_2\tau_2$ des courbes isothermes. Les courbes adiabatiques se prolongent indéfiniment jusqu'à croiser l'axe des x . Supposons que la différence de températures $\tau_1 - \tau_2$ soit une fraction n de τ_1 . L'aire du quadrilatère courbe $A_1A_2B_2B_1$ est une $n^{\text{ème}}$ partie de l'aire MA_1B_1N . En effet, la chaleur Q_1 absorbée pour passer de A_1 à B_1 est égale à l'aire MA_1B_1N . La chaleur Q_2 dégagée pour passer de B_2 à A_2 est égale à l'aire MA_2B_2N . La différence entre ces deux aires est le travail réalisé par la différence de températures $\tau_1 - \tau_2$. Comme les n parties de du quadrilatère courbe sont égales, on a que $Q_1 - Q_2 = Q_1/n$. On en déduit donc que $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1}$ que l'on peut écrire $\frac{Q_1}{\tau_1} = \frac{Q_2}{\tau_2}$ ou $\frac{Q_1}{\tau_1} - \frac{Q_2}{\tau_2} = 0$. Notons que dans ce développement, Dwelshauvers-Dery ne mentionne que Rankine, mais non pas Carnot et Thomson.

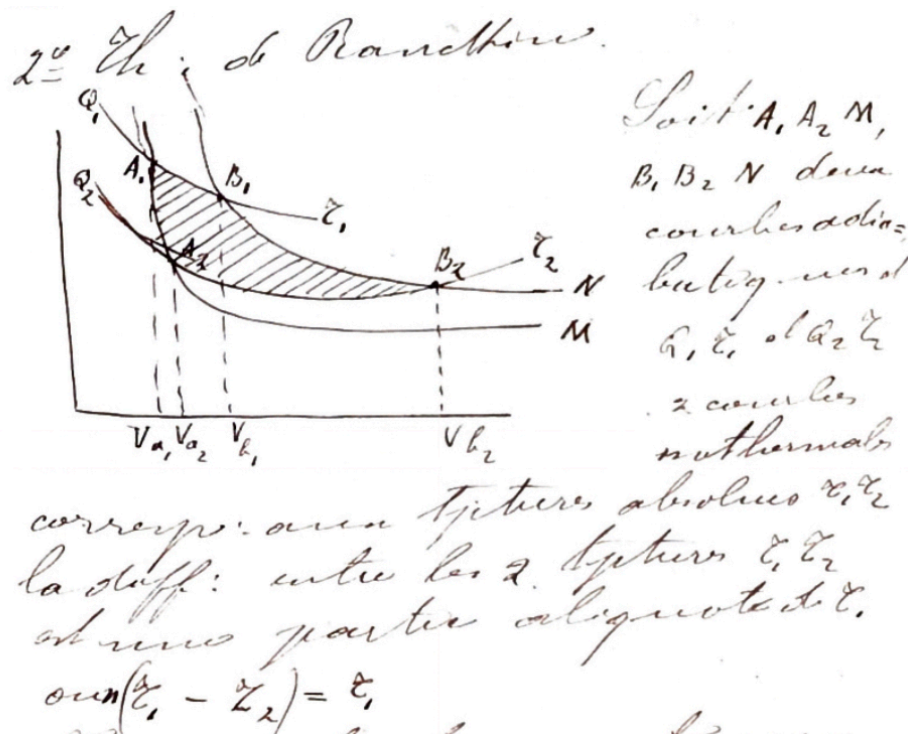


Figure 4-19 : Représentation graphique du théorème de Rankine. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 645

Dwelshauvers-Dery va plus loin et extrapole ces résultats au cas d'un cycle quelconque dans lequel on pourrait introduire des cycles composés d'adiabatiques et d'isothermes³⁴³. En inscrivant dans ce cycle un grand ensemble de cycles composés d'isothermes et d'adiabatiques, on obtient $\int dQ/\tau = 0$

³⁴³ Il n'appelle pas « cycle de Carnot », ce cycle composé d'adiabatiques et d'isothermes. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 648. Remarquons aussi que le cycle doit être réversible.

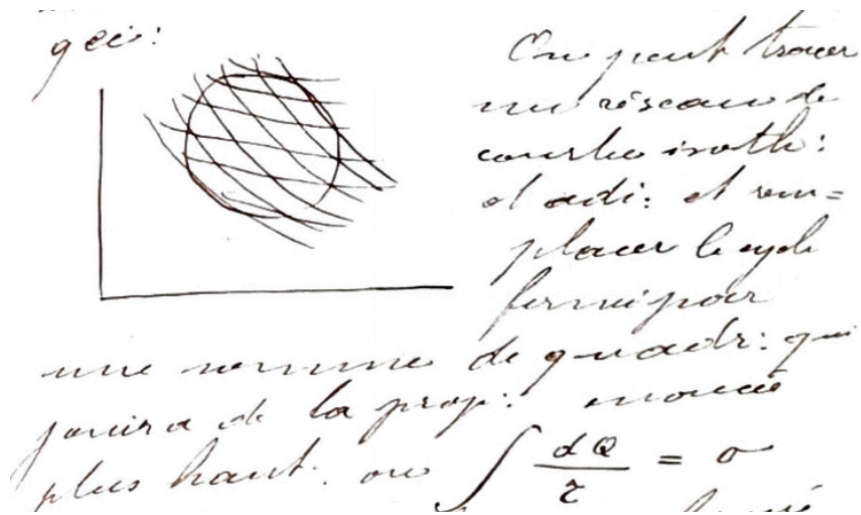


Figure 4-20 : Extrapolation à un cycle quelconque. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 648.

4.4.5.5 L'analogie (encore) entre le moteur thermique et le moteur hydraulique

Nous remarquons aussi que Dwelshauvers-Dery donne (déjà en 1868) le nom de *poids thermique*³⁴⁴ au ratio Q/τ , en raison de l'analogie avec le poids en dynamique, et le note G . Si le poids G « tombe » de τ_1 à τ_2 , alors il produira un travail égal à $Q_1 - Q_2 = G(\tau_1 - \tau_2)$ avec $G = Q_1/\tau_1 = Q_2/\tau_2$. Une définition similaire est donnée vers 1888-1889 : « on appelle poids thermique, le travail thermique même [la lecture des deux derniers mots est incertaine] dont un corps se dépouille pour une chute de température de 1° »³⁴⁵. On peut aussi dire qu'« un corps qui renferme C calories à τ degrés absolus a un poids thermique de $C/\tau = \text{constante}$ et le travail max qu'il peut faire en tombant de τ à τ' degrés est $(C/\tau)(\tau - \tau')$ calories »³⁴⁶.

Dwelshauvers-Dery écrivait déjà en 1868 que l'on peut notamment déduire³⁴⁷ :

- « Dans un cycle simple où le poids $G = Q_1/\tau_1$ est transmis de K' à la température τ_1 à un autre K à la température τ_2 , on gagne un travail $\mathcal{T} = Q_1/\tau_1 (\tau_1 - \tau_2)$ et que ce travail est un maximum.

³⁴⁴ Dwelshauvers note l'analogie avec le poids en dynamique. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 650. Il souligne à nouveau l'analogie remarquable avec l'expression du travail de la pesanteur dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, « Les machines à vapeur et leurs progrès », dans Louis Olivier, Dir., *Revue générale des sciences pures et appliquées*, t. Ier, n°5, Paris, Octave Doin, Editeur, 15 mars 1890, p. 133.

³⁴⁵ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4512, ca. 1888, ff. 26.

³⁴⁶ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 10.

³⁴⁷ Il s'agit en fait des expressions du rendement d'un moteur de Carnot et du COP d'une pompe à chaleur de Carnot. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 653.

- *Le poids thermique G ne peut jamais se transmettre de lui-même du corps K au corps K' qui est plus chaud, une pareille transmission nécessite une dépense de travail dont le minimum est $Q_1/\tau_1 (\tau_1 - \tau_2)$. »*

Notons que $1/\tau$ [cal] ou $425/\tau$ [km] est le travail que l'on peut retirer par degré de chute de température d'une calorie qui se trouve dans un corps à la température absolue τ . Pour une chute de température de $\tau - \tau'$, le travail est donc de $1/\tau (\tau - \tau')$ [cal]³⁴⁸.

Dwelshauvers pousse la comparaison avec la gravité en faisant le parallèle entre les équations liées au travail associé à une chute de hauteur et celui lié à une chute de température. Ainsi, « *un corps pesant ne peut faire du travail en vertu de la pesanteur qu'à la condition de tomber. Quand un corps pesant se trouve à une hauteur déterminée, il possède une énergie gravifique déterminée, c'est-à-dire une capacité déterminée pour faire du travail en vertu de la pesanteur. Si cette hauteur [de] h mètres à partir du centre de la terre devient $h' < h$, le corps placé à la hauteur h' possède une énergie gravifique moindre qu'à la hauteur h . Que si T^{Km} représente l'énergie gravifique de ce corps à la hauteur h mètres, du centre de la terre, j'appelle T'^{Km} son énergie gravifique à la hauteur $h' < h$, T' est donc $< T$ »³⁴⁹. L'homme peut exploiter cette dépense d'énergie gravifique $T - T'$ pour produire du travail utile au moyen d'une machine, par exemple un moteur hydraulique. Le rendement de cette machine est *rendement = travail utile / (T - T')*. Ainsi, « *le max de travail d'un corps qui tombe en vertu de la pesanteur est représenté par la différence d'énergie gravifique que le corps possède au niveau initial et au niveau final respectivement* »³⁵⁰. Pour un moteur thermique³⁵¹, le rendement est donné par *Travail absolu / 425 Q* « où $425 Q$ représente l'énergie thermique du corps, de la vapeur au moment de son admission dans le cylindre quand elle [serait] à son niveau thermique le plus élevé, quand elle serait à la température absolue τ de la chaudière (τ est compté à partir du 0 absolu) »³⁵². Cette température pourrait tomber à celle τ' de l'eau froide introduite dans le condenseur. La vapeur redevenue eau au condenseur ne renferme plus que Q' calories. La vapeur qui tombe de τ à τ' a donc mis $Q - Q'$ calories à la disposition de l'utilisateur. Seule une fraction de ces calories est transformée en travail utile mesuré à l'indicateur. Dwelshauvers-Dery remarque qu'on devrait définir le rendement de manière rationnelle par *rendement = Travail absolu / (Q - Q')* alors qu'on le définit de manière irrationnelle par *rendement = Travail absolu / Q*. Avec cette définition, le rendement des moteurs à vapeur n'est*

³⁴⁸ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 11.

³⁴⁹ *Ibid.*, ff. 12.

³⁵⁰ *Ibid.*, ff. 14.

³⁵¹ Pour les développements qui suivent, voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 15-19.

³⁵² Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 15.

que de 3, 4, 5 et peut être jusque 10% alors qu'on aurait des rendements entre 50 et 90% avec des roues hydrauliques³⁵³.

Dans le cas du moteur hydraulique, la perte d'énergie gravifique d'un poids P tombant d'une altitude H à H' est $P(H - H')$ [km]. Le poids du corps peut donc être défini comme l'énergie (en [km]) perdue par mètre de hauteur de chute. Si H est mesurée à partir du centre de la terre, alors on a $P = T/H$ avec T l'énergie gravifique. L'analogie entre le moteur thermique et le moteur hydraulique apparaît davantage si l'on introduit la notion de poids thermique. Ainsi, si $P(H - H')$ est le travail maximum que peut fournir un moteur hydraulique, $425 Q/\tau \times (\tau - \tau')$ est le travail maximum que peut fournir le moteur thermique. Les deux expressions du travail « que l'on met à la disposition de celui qui opère » la machine font intervenir un potentiel (une différence de hauteur ou de température) et une quantité (le poids). Cette analyse montre que l'analogie avec le moteur hydraulique déjà présente dans l'œuvre de Carnot en 1824 est encore exploitée à la fin du XIX^e siècle dans l'enseignement liégeois.

Nous tentons de synthétiser l'évolution entre la vision de Carnot et de Dwelshauvers-Dery à la Figure 4-21. Le fait que l'enseignement des moteurs thermiques et hydrauliques fait partie des mêmes cours de mécanique et de physique industrielle explique peut-être en partie l'utilisation de cette analogie.

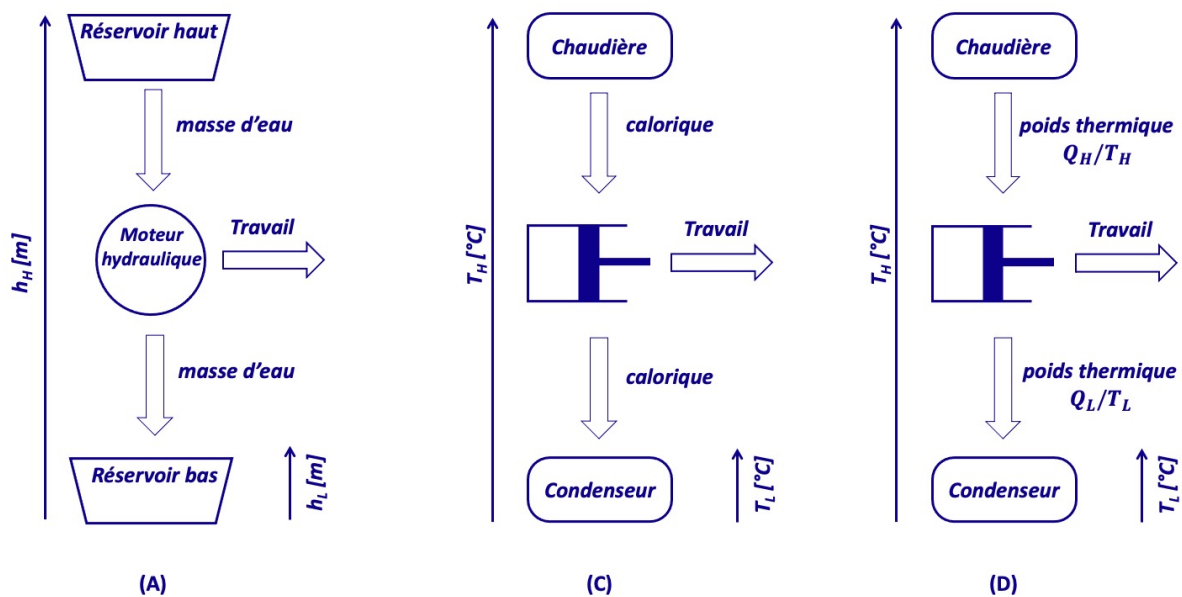


Figure 4-21 : L'analogie entre le moteur hydraulique et l'expandeur à piston et le concept de poids thermique utilisée par Dwelshauvers (les schémas (A) and (C) ont été décrits à la section 4.4.5.1).

Dwelshauvers-Dery solutionne le problème de la définition irrationnelle du rendement en introduisant un rendement du moteur thermique qui est le rapport entre le travail réel et le travail

³⁵³ Dwelshauvers fait remarquer que si on définissait le rendement du moteur hydraulique comme le *travail utile* / T , considérant que le rayon de la terre est 6370000 mètres, ce rendement serait extrêmement faible.

maximum³⁵⁴. Dwelshauvers-Dery propose d'analyser un essai du 12 octobre (1888 ?). La consommation de vapeur était de 24,7 calories et la machine a fourni un travail de 1,3915 calorie, soit 591,4 kilogrammètres. Le rendement est donc de 5,6%. Si $\tau = 427,4 K$ et $\tau' = 286,4 K$, alors le travail maximum est de 3463 kilogrammètres. Le rendement *corrigé*³⁵⁵ serait donc de 17,1%. Si on considère un moteur consommant près de 1 kilo de houille par cheval vapeur et par heure et si on considère que la chaudière a un rendement proche de 70%, on aurait un rendement corrigé de plus 20%.

Sans le nommer, Dwelshauvers introduit ainsi le concept de rendement exergetique, qui arrivera bien plus tard. Le concept de « availability » (« disponibilité ») sera popularisé par le MIT dans les années 1940 et remplacée par la notion d'exergie développée en Europe dans les années 1950³⁵⁶. En effet, le rendement du moteur hydraulique est en réalité un rendement exergetique, puisque l'exergie de l'énergie gravifique est l'énergie elle-même. Le rendement exergetique du moteur thermique est défini par le ratio entre le travail qu'il fournit et l'exergie de la chaleur Q qu'il reçoit (τ' étant la température de référence et H' étant la hauteur de référence pour le calcul de l'exergie). Comme le montre les deux équations ci-dessous, en comparant deux rendements exergetiques plutôt qu'un exergetique et un énergétique, l'analogie serait parfaite.

$$\eta_{ex,hyd} = \frac{\text{travail utile}}{P(H - H')} \quad \text{et} \quad \eta_{ex,ther} = \frac{\text{travail utile}}{\frac{Q}{\tau}(\tau - \tau')}$$

4.4.5.6 Entropie, diagramme entropique et les bases de la future approche exergetique

Le principe de Carnot énoncé par Clausius, et repris par Hubert, stipule que pour un cycle fermé composé d'opérations réversibles³⁵⁷ on a :

$$\sum \frac{Q}{T} = 0$$

De ce principe, on retrouve le rendement thermique (ou économique) du cycle de Carnot, qui ne dépend que des températures et non pas de la composition du système³⁵⁸

$$\text{rendement de carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

³⁵⁴ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 20-23

³⁵⁵ Le mot « corrigé » a été introduit par nous-mêmes.

³⁵⁶ Yunus A. ÇENGEL et Michael A. BOLES, *Thermodynamics, An Engineering Approach*, 5th Edition. McGraw-Hill Higher Education, 2006, p. 425.

³⁵⁷ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 177

³⁵⁸ *Ibid.*, p. 178

De son principe stipulant que $\sum Q/T = 0$ pour un cycle fermé réversible (qui peut aussi s'écrire $\int dQ/T = 0$ pour une succession de modifications infinitésimales), Clausius a introduit l'Entropie. Aux évolutions isothermes et adiabatiques, viennent alors s'ajouter les évolutions isentropiques (adiabatiques et réversibles).

Dans ses notes de cours de 1888-1889, Dwelshauvers-Dery mentionne Clausius (à notre connaissance pour la première fois dans des notes de cours) et l'entropie μ . Il la relie au poids thermique Q/τ : « *Donc le poids thermique, c'est la différence d'entropie entre deux courbes adiabatiques ou isentropiques déterminées* »³⁵⁹. Ainsi $a = Q/\tau = \mu_a - \mu_b$ avec μ_a la valeur de μ pour l'adiabatique passant par a (et réciproquement pour b) ;

C'est l'ingénieur belge Théodore Belpaire qui en 1872 propose de représenter l'état d'un système par sa température et son entropie plutôt que par la pression p et le volume spécifique v ³⁶⁰. Il est connu qu'il existe une relation qui relie p , v et t : $f(p, v, t) = 0$, relation qui dépend de l'espèce de corps considéré. On a alors coutume de représenter l'état d'un corps par p et v . Dans le diagramme entropique, la surface sous la courbe de la transformation représente l'énergie dégagée ou absorbée. Pour une évolution cyclique et pour un cycle réversible on peut aussi utiliser le diagramme pour calculer le rendement. C'est dans le diagramme entropique que le cycle de Carnot prend sa forme rectangulaire bien connue. Gibbs emploiera le diagramme entropique peu de temps après Belpaire et Boulvin rendra son utilisation systématique pour l'étude des machines³⁶¹.

Hubert rappelle que d'autres cycles réversibles produisent un rendement égal au rendement de Carnot³⁶². De tels cycles exigent un régénérateur interne et présentent des courbes appelées *isodiabatiques* par Rankine (ou courbes conjuguées ou d'égle transmission). L'utilisation du diagramme entropique facilite la visualisation de ces cycles. On a essayé d'exploiter ces cycles dans des moteurs à air chaud avec des évolutions à pression ou volume constant avec des régénérateurs de chaleur. Le pincement de température dans le régénérateur empêche d'atteindre le rendement de Carnot.

Pour les cycles non-réversibles, Hubert rappelle que Clausius a établi $\sum Q/T < 0$. Le rendement d'un cycle non-réversible est toujours inférieur à celui d'un cycle réversible fonctionnant entre les

³⁵⁹ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4512, ca. 1888, p. 27.

³⁶⁰ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 179 ; Herman HUBERT, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.I - Physique industrielle*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, p. 38.

³⁶¹ E. JOUGUET, *Théorie des moteurs thermiques*, Paris, Octave Doin et fils, 1909, p. 20.

³⁶² H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 180.

mêmes températures. Parmi les cycles réversibles, Hubert rappelle que celui de Carnot constituera le cycle idéal des machines thermiques³⁶³.

On désigne par Σ_0^1 la somme des valeurs de Q/T pendant une évolution non réversible. On peut alors écrire, $S_1 - S_0 = \Sigma_0^1 + P$. Hubert rappelle que Clausius a appelé $S_1 - S_0$ la transformation compensée. P est la transformation non compensée. Elle dépend des états 0 et 1 et des « états intermédiaires ». Son signe est toujours positif. On peut dès lors écrire $dQ/T = dS - dP$. Hubert développe ensuite la notion de travail maximum rappelant le théorème de Gouy³⁶⁴. Ainsi, « *si l'on considère [...] une machine comme un système variable soumis à la pression atmosphérique, recevant de la chaleur, produisant du travail, subissant des variations de volume, de force vive et d'énergie interne, et échangeant de la chaleur avec l'atmosphère à température constante T_0* », en intégrant d'un état 1 à un état 2, on obtient

$$\mathcal{T}_e = (U - T_0 S + p_a V)_1 - (U - T_0 S + p_a V)_2 - T_0 \int_1^2 dP + W_1 - W_2$$

En supposant que l'énergie vive ne change pas entre les états 1 et 2, on peut écrire que le travail produit est

$$\mathcal{T}_e = G_1 - G_2 - T_0 \int_1^2 dP$$

La fonction G est définie par $U - T_0 S - p_a V$. Elle « *représente l'énergie utilisable de la machine au contact de la source T_0* ». Elle se rapproche de la définition moderne de l'exergie d'un système fermé $X = U - U_0 - T_0 (S - S_0) + p_0 (V - V_0)$ si l'indice 0 désigne l'état mort caractérisé la température T_0 et la pression p_0 (prises conventionnellement à la température ambiante et à la pression ambiante). Le travail que la machine peut produire au maximum est donné par $G_1 - G_2$. « *On ne l'obtient que par des opérations réversibles* ». Hubert se base ensuite sur la communication de Jouguet au Congrès international de Mécanique de Liège en 1905³⁶⁵ pour expliquer plus en détail le théorème de Gouy. La machine se compose d'un corps actif ou agent, dont l'état (physique ou chimique) varie de 1 à 2, et d'intermédiaires dont les états 1 et 2 sont les mêmes (évolution cyclique). Dans le cas d'une machine à vapeur, le corps actif est le mélange de combustible et d'air (en 1) transformé en gaz brûlés (en 2). Les intermédiaires sont les pièces de la chaudière, du moteur et du condenseur, mais aussi l'eau qui circule de manière cyclique. Dans une turbine hydraulique, le corps actif est l'eau et la terre : en 2, l'eau s'est rapprochée du centre de la terre par rapport à l'état 1. Les intermédiaires sont la turbine. Le travail maximum $G_1 - G_2$

³⁶³ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 182.

³⁶⁴ GOUY, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 1889 cité par H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 183.

³⁶⁵ JOUGUET, "Sur la théorie des moteurs thermiques. Comparaison des machines à feu interne et des machines à feu externe". Mémoires du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées, Liège, du 25 juin au 1er juillet 1905 : section de mécanique appliquée, t.II., 1905, p. 67-133.

ne dépend donc que du corps actif dont l'état 1 diffère de l'état 2. Le travail maximum dépend par exemple la nature du combustible. Hubert reprend Jouguet et note que le théorème de Gouy s'écarte de l'approche du moteur de Carnot dont le rendement est indépendant de la nature du corps évoluant³⁶⁶.

4.4.6 Les propriétés des fluides au tout début du XX^e siècle

La connaissance et la représentation des propriétés des fluides est particulièrement importante. On distingue les gaz des vapeurs. On distingue à la fin du long XIX^e siècle les gaz et les vapeurs.

4.4.6.1 Le comportement des gaz

Pour les gaz, deux comportements limites existent et sont représentés par les lois de Mariotte (évolution à T constante) et de Gay Lussac (évolution à P constante).

La loi des gaz parfaits permet de décrire le comportement du gaz lorsque p , V et T varient simultanément. Dans ce cas, Hubert rappelle que $pV/T = R$, avec la constante R à déterminer expérimentalement pour chaque gaz (on mesure la masse volumique (« poids du mètre cube ») à 0° centigrades et à la pression atmosphérique normale)³⁶⁷. La masse volumique est proportionnelle au poids moléculaire, ce qui permet d'extrapoler la constante à d'autres gaz. Hubert rappelle l'expérience de Joule.

Une propriété importante des gaz parfaits est la chaleur spécifique ou calorique spécifique.

$$c_p = c_v + A R = c_v + \frac{R}{E}$$

Le rapport c_p/c_v est constant pour tous les gaz. Hubert mentionne que les valeurs pour différents gaz ont été déterminées récemment. Elle est par exemple de 1,406 pour l'air. D'autres fluides sont considérés : l'air, l'hydrogène, l'azote, le CO, l'oxygène, le CO². Les relations adiabatiques (en réalité isentropique) des gaz parfaits et relations polytropiques sont bien connues. L'équation de Laplace/Poisson pour l'isentropique d'un gaz parfait, $p v^\gamma = constante$, est développée

Les équations des écoulements des gaz, adiabatiques ou non, sont développées. Nous notons que ces équations ne font pas encore apparaître la grandeur enthalpie. Ainsi, si 1 et 2 désignent l'entrée et la sortie de l'écoulement, on a³⁶⁸

$$U_2 + \frac{A w_2^2}{2g} - U_1 - \frac{A w_1^2}{2g} = A(p_1 v_1 - p_2 v_2) + A(z_1 - z_2) + Q$$

³⁶⁶ *Ibid.*, p. 70.

³⁶⁷ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 184.

³⁶⁸ *Ibid.*, p. 188.

Le membre de gauche représente la variation de l'énergie totale. Le premier terme dans le membre de droite est le travail des pressions, le second le travail de la pesanteur et le troisième la chaleur reçue de l'extérieur. Hubert rappelle comment cette équation peut donner la formule de Bernoulli sous certaines hypothèses.

Hubert cite les équations de Weisbach ou Saint-Venant, les travaux de Zeuner sur les frottements de l'écoulement sur les parois (Technische Thermodynamik) et de Rateau sur le régime choqué (Annales des Mines de France, 1902).

4.4.6.2 Le comportement des vapeurs

En ce qui concerne les vapeurs, on s'intéresse évidemment principalement à la vapeur d'eau. Au début du XX^e siècle, d'autres vapeurs présentent aussi un intérêt³⁶⁹ : les vapeurs de l'éther, de l'alcool, du chloroforme, du mercure, du CS², du CCl⁴, du NH³ et du SO². On emploie déjà les termes suivants pour caractériser l'état du fluide : liquide, liquide saturé, vapeur saturée, vapeur surchauffée et titre. La chaleur nécessaire au chauffage du liquide nécessite de connaître le « calorique spécifique du liquide à pression constante » ou chaleur du liquide. Hubert cite les travaux de Zeuner (basés sur les expériences de Regnault et de Unwin au sujet des propriétés du liquide saturé. Nous noterons que la distinction est faite entre chaleur latente interne ρ (liée aux « réactions réciproques des molécules d'eau ») et externe (liée au travail d'expansion du passage du liquide saturé à la vapeur saturée), dont la somme est la chaleur latente totale r ou chaleur de vaporisation $r = \rho + Ap(v - \sigma) = \rho + Apv$ avec v le volume de la vapeur saturée et σ le volume du liquide saturé. La chaleur totale de la vapeur saturée est calculée à partir de l'état liquide à 0°C et s'exprime par³⁷⁰ $\lambda = q + \rho + Ap(v - \sigma) = q + r$.

Hubert rappelle les formules de Zeuner, de Regnault et de Clausius pour le calcul de la chaleur latente interne (Zeuner) ou de la chaleur totale de la vapeur saturée (Regnault et Clausius).

Vers 1890, dans son cours de Physique industrielle³⁷¹, Dwelshauvers présente déjà l'étude du diagramme pression-volume d'une vapeur et explique les comportements associés au passage du liquide (L) à la vapeur (V), i.e. la *vaporisation*. Les courbes *isothermales* ou *isothermiques* τ y sont représentées (Figure 4-22). Il faudra attendre le cours de Physique industrielle d'Hubert (1906-1907) pour voir l'utilisation du diagramme entropique (Figure 4-23).

³⁶⁹ *Ibid.*, p. 191-193.

³⁷⁰ La forme moderne de l'équation $\lambda = q + \rho + Ap(v - \sigma)$ serait $h = c_l(T - 0) + u_g - u_f + P_0(v_g - v_f) \Leftrightarrow c_l T + u_{fg,0} + P_0 v_{fg,0} = c_l T + h_{fg,0}$. La chaleur totale λ correspond bien à l'enthalpie h de la vapeur saturée et l'expression $q + \rho$ à l'énergie interne de la vapeur saturée $u = c_l T + u_{fg,0}$.

³⁷¹ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 66-8 et MS4512, ca. 1888, ff. 2-3.

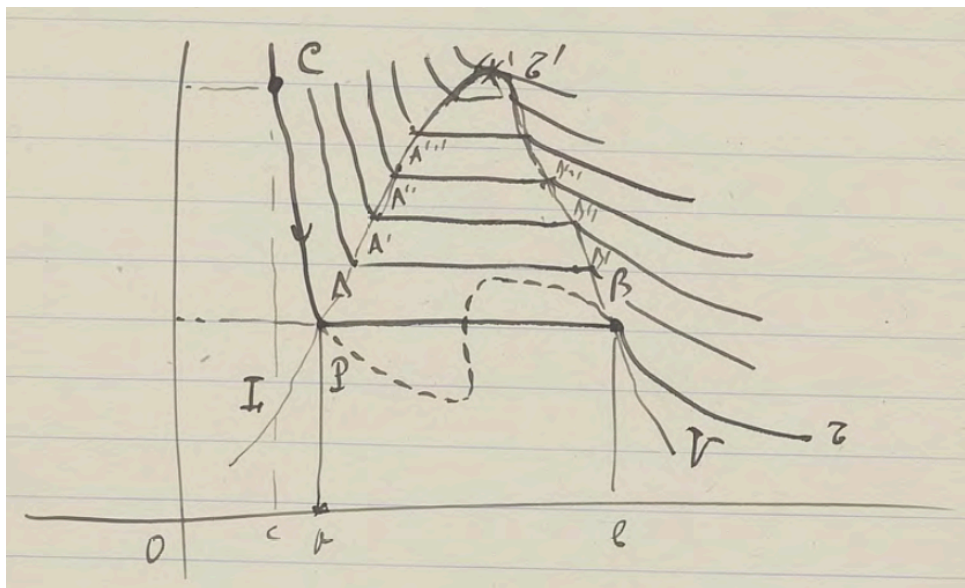


Figure 4-22 : Diagramme pression-volume permettant de représenter la transformation d'un liquide en vapeur surchauffée. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4511, ca. 1888, ff. 66.

Vers 1888, Dwelshauvers-Dery mentionne la loi d'Andrews (1813-1885), qui date des années 1860, expliquant ainsi la notion de point critique : « la liquéfaction d'une vapeur ne s'opère qu'à des températures inférieures à la température critique τ' au-delà de laquelle la liquéfaction n'est plus possible et la forme gazeuse se conserve indéfiniment quelle que soit la grandeur de la pression ou la diminution du volume »³⁷². Il donne les températures critiques du CO₂, de l'éther, de l'alcool et de la vapeur d'eau. Dwelshauvers-Dery introduit aussi la notion d'entropie³⁷³ et de courbes isentropiques.

Les propriétés de la vapeur surchauffée ont fait l'objet de travaux très récents au moment où Hubert écrit son cours de Physique industrielle³⁷⁴. Nous ne retranscrivons pas ici les formules, mais soulignons les noms des scientifiques consultés par Hubert et quand cela est connu le titre de la publication. Pour le calcul de la chaleur spécifique en fonction de la température, il cite les travaux de Le Chatelier et de Mallard (publiés en 1903 dans les *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris*), de Von Bach (publiés en 1893 dans le *Zeitschrift V.D.I.*), du Prof. Weyrauch de Stuggart (publiés en 1904 dans le *Bulletin de la Société d'Encouragement*) et de Lorenz (le *Zeitschrift V.D.I.*, T48). Zeuner propose une formule pour l'énergie interne de la vapeur d'eau surchauffée et propose également une équation d'état. Zeuner propose également des équations d'état pour l'acide sulfureux et l'ammoniaque

³⁷² Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4512, ca. 1888, ff. 2.

³⁷³ Le mot « Entropie » était initialement écrit *anthropie* et a été corrigé en *entropie*. Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4512, ca. 1888, ff. 4.

³⁷⁴ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 194-195.

(publiés dans *Technische Thermodynamik*). Pour ces deux mêmes fluides, Ledoux développe également des équations d'état (publiées en 1878 dans les *Annales des Mines*). Des tables établies par Deruyts et Madamet (et reproduites respectivement par Dwelshauvers et par Boulvin) donnent pour l'eau (et pour d'autres liquides) à l'état de vapeur saturée les propriétés suivantes³⁷⁵:

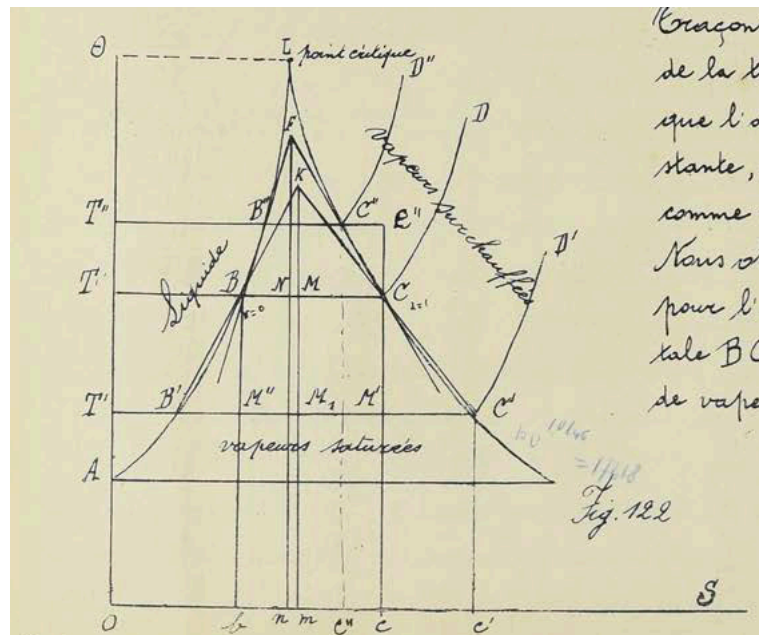
$$t, q, \rho, A\rho u, r, \lambda, \frac{r}{T}, u, v, \delta \left[\frac{\text{kgs}}{\text{m.cubes}} \right].$$


Figure 4-23 : Diagramme entropique permettant de représenter la transformation d'un liquide en vapeur surchauffée. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 196.

On retrouve aussi les tables autographiées donnant les propriétés de la vapeur d'eau saturée dans le Carnet d'observations du Laboratoire de Jemeppe vers 1888 (Figure 4-24).

³⁷⁵ *Ibid.*, p. 195.

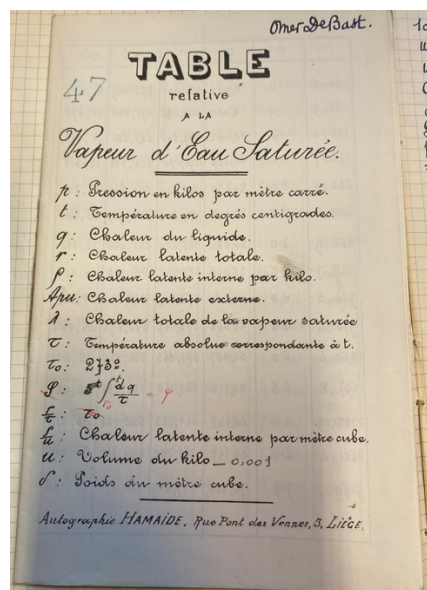


Figure 4-24 : « Table relatives à la Vapeur d'Eau Saturée ». Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

Boulvin a proposé une méthode pour passer du diagramme pression-volume au diagramme entropique³⁷⁶. Une amélioration de sa méthode est publiée en 1901 dans la *Revue de Mécanique*.

Enfin, Hubert rapporte³⁷⁷ un diagramme proposé très récemment par le Prof. Mollier de Munich, reproduit à partir de la *Revue de Mécanique* du 1^{er} semestre 1905. Ce diagramme a pour ordonnée la chaleur totale de la vapeur d'eau (qu'on appellerait enthalpie aujourd'hui) et en abscisse son entropie. Le diagramme distingue le mélange d'eau et de vapeur ($\lambda_1 = q + x r$), la vapeur saturée ($\lambda = q + r$) et la vapeur surchauffée ($\lambda' = q + r + c_p(T' - T)$). Dans ce diagramme, Hubert explique³⁷⁸ qu'une verticale représente une opération adiabatique³⁷⁹. Une horizontale représente une évolution sans échange de chaleur et production de chaleur (l'énergie cinétique est transformée en chaleur par tourbillonnement ou frottement). Hubert cite l'exemple du laminage de la vapeur d'eau. Dans ce diagramme, montré à la Figure 4-25, la représentation des points A, B, C et D préfigure la notion d'efficacité isentropique qu'Hubert ne mentionne pas encore. Il explique que la courbe AB représente une détente de la vapeur dans une conduite d'une pression p_1 à une pression p_2 . AC représente la chaleur qui aurait été utilisée dans une opération adiabatique. Dans le cas réel, la chaleur DC est perdue.

A titre de comparaison, nous donnons à la Figure 4-26 une représentation du diagramme de Mollier généré par un logiciel³⁸⁰ contemporain permettant de prédire avec une grande précision les

³⁷⁶ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 200-201.

³⁷⁷ *Ibid.*, p. 201-203.

³⁷⁸ *Ibid.*, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 203.

³⁷⁹ En réalité, adiabatique et réversible

³⁸⁰ S.A. KLEIN, Engineering Equation Solver, Version Academic Professional, V10.836-3D (2020-06-10)

propriétés de fluides. Comme à la Figure 4-25, on y a représenté des courbes d'égale pression et des courbes de titre constant. Le trait plus épais représente l'état de saturation.

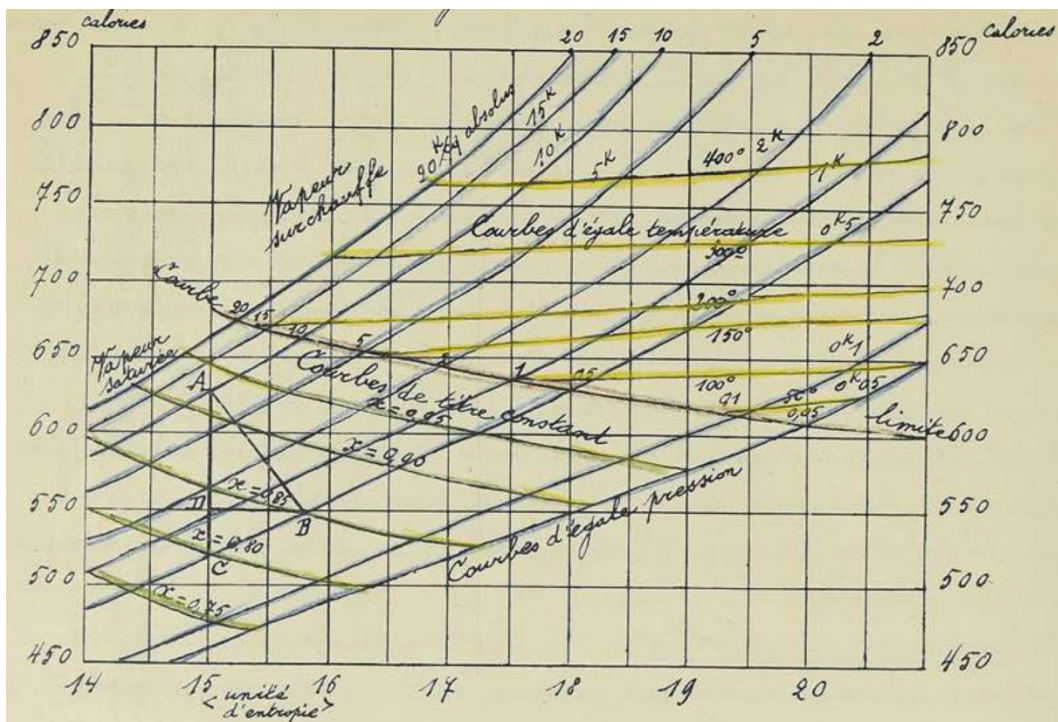


Figure 4-25 : Diagramme de Mollier. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 202.

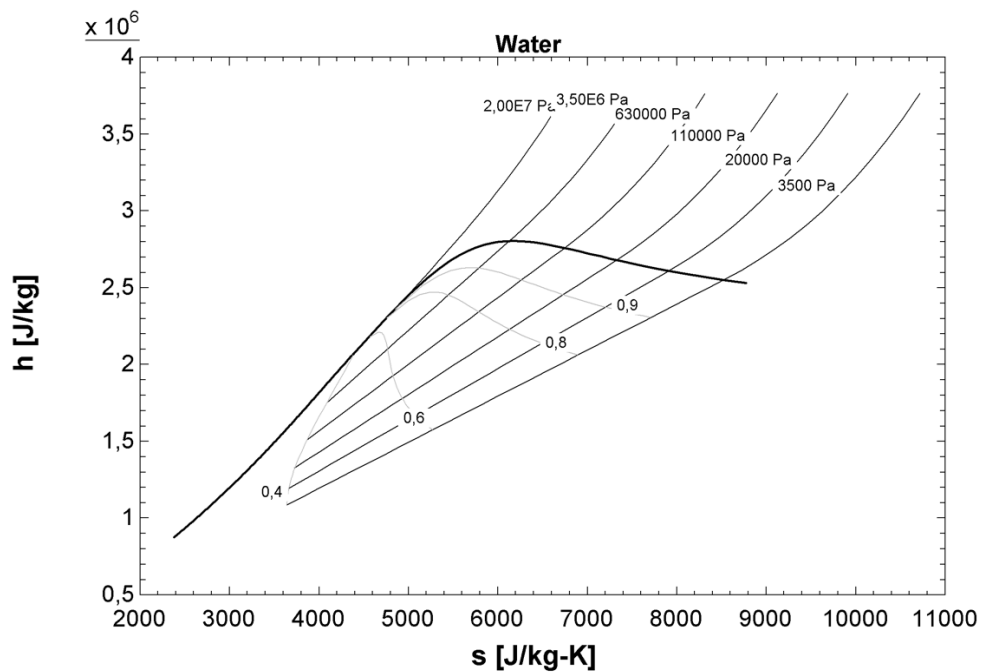


Figure 4-26 : Diagramme de Mollier de l'eau produit au moyen du logiciel contemporain EES. L'enthalpie est représentée par h et l'entropie par s .

Hubert traite enfin de la détente d'un mélange d'air et de vapeur d'eau, de l'écoulement des vapeurs, de l'écoulement des vapeurs surchauffées, et de l'écoulement de l'eau chaude.

4.4.7 Unités et nomenclature

Nous avons jugé utile de synthétiser les différents symboles et unités utilisés dans les publications consultées. Cette synthèse permettra de mieux comprendre le Chapitre 5 traitant de la pratique expérimentale.

4.4.7.1 Unités

4.4.7.1.1 Le travail

Son unité est le Kilogrammètre, défini comme « *le travail produit par une force égale au poids du décimètre cube d'eau distillée, au maximum de densité et à Paris, qui déplace son point d'application de un mètre* »³⁸¹. Hubert note qu'« *on ne peut définir le mètre que par la longueur à 0° d'une règle en platine, conservée dans les Archives de Paris* »³⁸². 1 kilogrammètre [Kmt]= g Joules

4.4.7.1.2 La puissance

La puissance est souvent donnée en chevaux vapeur, un cheval vapeur valant 75 kmts par seconde. Dans le système C.G.S., on adopte le Watt pour la puissance = 1/9,81 Kmt par seconde. Un cheval vapeur vaut 0,73545 Kwatt³⁸³

4.4.7.1.3 La chaleur

Son unité est la calorie, définie comme « *la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de un Kilogramme d'eau pure de 0° à 1° Centigrade, sous la pression atmosphérique normale* »³⁸⁴. La *petite calorie* est la « *chaleur nécessaire pour élever la température de la masse du gramme d'eau pris à Paris, de 0° à 1°* »³⁸⁵. Ainsi, une calorie équivaut à 1000 petites calories. On appelle kilocalorie l'équivalent de 1000 petites calories.

³⁸¹ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 2.

³⁸² *Ibid.*, p. 3.

³⁸³ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 234.

³⁸⁴ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 2.

³⁸⁵ Herman HUBERT, *Résumé des Cours de Mécanique appliquée et...*, t.I, *op. cit.*, p. 7.

Tableau 4-1: Synthèse des unités utilisées pour la quantification des grandeurs thermodynamiques à la fin du XIX^e siècle.

Grandeur	Unité	Abréviation	Conversion
Travail	Kilogrammètre	<i>kmt</i> ou <i>kg.m</i>	9,81 Joules
	Cheval heure	ou <i>kgm</i> ou <i>km</i>	1 cheval heure=75x60x60=270000 km
Puissance	Watt		1 Watt = 1/9,81 Kmt par seconde
	Cheval vapeur		1 cheval vapeur = 75 kmts par seconde
	Kilogrammètre par seconde		1 cheval vapeur = 0,73545 Kwatt
Chaleur	Calorie		1 calorie = entre 425 et 426 Kmts
			1 petite calorie = 4,18 joules
			1 kilocalorie (ou calorie)= 4184 Joules
Pression		<i>K/mq</i>	1 mètre de mercure = 13596 K/mq
		<i>K/m.q.</i>	1 atmosphère = 10333 K/mq
		<i>kil. par m.q.</i>	
		<i>k.p.m.q.</i>	
		<i>K/cq</i>	
		(kilogramme par mètre carré ou centimètre carré)	
Aire		<i>mq</i> ou <i>m.q</i> ou <i>mm.q</i>	
Force, effort	Kilo	<i>K</i>	
Masse	Kilogramme (kilo)	<i>K</i>	
Titre	-	<i>x</i>	$x = \frac{m}{M}$ avec <i>m</i> la masse de vapeur et <i>M</i> la masse du mélange eau-vapeur ³⁸⁶

³⁸⁶ Dwelshauvers-Dery mentionne que Zeuner représente le titre par x. Il déclare aussi que la détermination de ce titre est une des grandes difficultés des essais de machines à vapeur. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

4.4.7.2 Nomenclature

A	Équivalent calorifique du travail
E	Équivalent mécanique de la chaleur
D	Pouvoir calorifique du combustible en calories par kilogramme ³⁸⁷
δ	Poids du mètre cube (dénomination moderne : masse volumique)
H	Hauteur
λ	Chaleur totale du kilogramme de vapeur (dénomination moderne : enthalpie spécifique)
λ'	Chaleur totale du kilogramme de vapeur surchauffée
p	Pression
q	Chaleur du kilogramme d'eau (dénomination moderne : enthalpie spécifique)
Q	Chaleur (dénomination moderne : parfois, dans le sens de débit d'enthalpie)
r	Chaleur latente totale ou chaleur de vaporisation
ρ	Chaleur latente interne
σ	Volume du liquide saturé
t	Température
τ	Température
U	Energie interne (Clausius) ou chaleur interne (Zeuner) ³⁸⁸
v	Volume de la vapeur saturée
V	Volume

4.5 Une controverse scientifique de la fin du XIX^e siècle : la querelle eau contre métal

A la fin du XIX^e siècle, la machine à vapeur étant encore une machine compliquée à comprendre et à décrire du point de vue de la thermodynamique, donnant lieu à de longues discussions, polémiques et discordes entre ingénieurs³⁸⁹. Parmi les désaccords, il s'est produit une controverse particulièrement intéressante pour notre travail, car elle impliqua le Laboratoire de mécanique de l'Université de Liège et que c'est ce Laboratoire qui contribua à la clore. Cette controverse secoua la communauté internationale des experts en machines à vapeur représentée par différentes Écoles. La controverse portait sur 2 points : 1) Quel était l'état de la vapeur dans le cylindre à la fin de l'émission ? La vapeur était-elle humide, sèche ou même surchauffée ? 2) La compression était-elle économique ?³⁹⁰

³⁸⁷ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869, p. 664.

³⁸⁸ H. HUBERT et C. ANDRE, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 173.

³⁸⁹ Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », op. cit., p. 66.

³⁹⁰ *Ibid.*, p. 67.

Pour comprendre cette controverse, penchons-nous sur les notes du cours de Mécanique appliquée de l'année 1905-1906 d'Hubert Herman³⁹¹ qui en résume bien les tenants et les aboutissants. Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, on cherchait à expliquer la différence entre la consommation théorique et la consommation réelle des machines à piston. On comprend que cette différence peut s'expliquer par les échanges de chaleur entre les parois métalliques et la vapeur (éventuellement de la vapeur et de l'eau). La théorie pratique ou expérimentale des machines à vapeur, développée par Hirn, tête de file de l'École alsacienne, doit permettre d'étudier l'impact de ces transferts de chaleur. Dwelshauvers-Dery contribuera à cette théorie en en développant les équations.

Pour comprendre la complexité de ces échanges de chaleur, nous proposons de les décrire brièvement pour chacune des périodes. Cette description constitue la théorie de Hirn. Commençons la description au moment où le piston est « à fond de course ». A ce moment, l'espace mort (ou « espace nuisible ») contient un reste de vapeur à l'état du condenseur (s'il n'y a pas de recompression) ou à un état proche de la chaudière (s'il y a recompression). Au moment de l'*admission*, un phénomène de « condensation anticipée » se produit, c'est-à-dire que la vapeur qui rentre se refroidit en réchauffant le mélange emprisonné dans l'espace mort, mais aussi en réchauffant les parois (face du piston, parois cylindriques, etc.). Ce refroidissement peut entraîner la condensation. Ensuite, le piston se déplace et découvre les parois qui ont été refroidies préalablement durant l'émission. Il peut alors y avoir condensation, que l'on appelle « condensation initiale ».

Les condensations anticipée et initiale augmentent le poids de vapeur consommé, puisqu'on doit ajouter à la vapeur qui remplit le cylindre celle qui se condense sous forme de rosée (du liquide saturé). Lors de la *détente*, une partie de l'eau condensée se revaporise (car la pression chute), soutirant de la chaleur à la paroi métallique. Deux effets antagonistes prennent place. D'une part, la vapeur prend de la chaleur à la paroi pour se vaporiser. D'autre part, le piston découvre progressivement des zones où la paroi est froide et qui prennent donc de la chaleur à la vapeur. Le premier effet l'emporte.

Par contre, cette restitution pendant la détente de la chaleur perdue lors de l'admission n'est pas idéale, car la chaleur est rendue à un niveau de température moindre que celui auquel elle est prise. Dwelshauvers-Dery compare cette perte à celle qui aurait lieu dans une roue hydraulique dans laquelle « une partie de l'eau quitterait le moteur par une fissure, pour rentrer dans la roue à un niveau moins élevé »³⁹² (Figure 4-27).

³⁹¹ H. HUBERT et C. ANDRE, Mécanique Appliquée 2. ULiège Library, MS4336, p. 389-399.

³⁹² H. HUBERT et C. ANDRE, Mécanique Appliquée 2. ULiège Library, MS4336, p. 391.

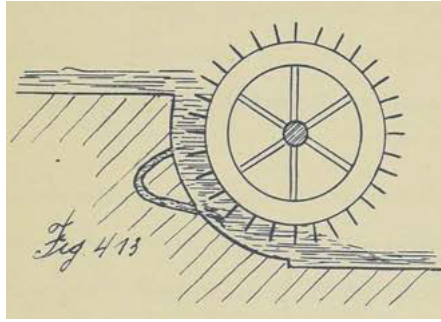


Figure 4-27 : Pertes par échange thermique entre la vapeur et les parois : analogie avec le moteur hydraulique. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, p. 391.

Pendant l'*émission*, la pression chute brusquement et l'eau répandue sur les parois s'évapore presque instantanément, ce qui donne lieu à une importante consommation de chaleur hors de la paroi qui se refroidit. Cet effet est nuisible car la quantité de vapeur à condenser augmente. Aussi, cette restitution est perdue pour le travail utile, ce qu'énonce le *principe d'économie* du Prof. Dwelshauvers-Dery : « *La marche la plus économique d'une machine à vapeur est obtenue, lorsque par un procédé quelconque, on est parvenu à faire en sorte que le métal des parois du cylindre soit absolument sec sur sa face interne dès le commencement de l'émission, en d'autres termes que la vapeur évoluant soit au commencement de l'émission exactement sèche ou légèrement surchauffée, qu'aucune partie ne soit répandue en rosée sur le métal.* »³⁹³

Au cours de la *compression*, la vapeur se surchauffe et réchauffe donc les parois. Il arrive un point où la vapeur devient plus chaude que les parois. Le refroidissement par les parois est fort intense en fin de compression, car le piston évolue moins vite et aussi car la surface d'échange diminue moins vite que le volume. La vapeur peut même revenir à saturation pour des machines avec des grandes compressions.

La question est de savoir quel est l'état de la vapeur à la fin de l'émission. « *Reste-t-il de l'eau ou bien les parois sont-elles sèches ?* »³⁹⁴ Cette question a fait l'objet d'une longue controverse entre Hirn, Zeuner et Dwelshauvers-Dery. L'École alsacienne soutenait qu'il n'y a plus d'eau à la fin de l'émission. Hirn a conclu, à la suite de nombreuses expériences, que le titre de la vapeur est égal à 1 au début de la compression (ce qui signifie, qu'il n'y a plus d'eau sur les parois, mais uniquement de la vapeur saturée dans le cylindre). Zeuner combattait cette hypothèse. Dwelshauvers-Dery était lui-même très proche de cette École alsacienne. Au début de sa carrière, il se rend à Logelbach pour travailler sous la direction de Hirn sur l'étude expérimentale de machines à vapeur. Un rapport de candidature de

³⁹³ On retrouve l'énoncé de ce principe dans Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *op. cit.*, p. 77.

³⁹⁴ *Ibid.*, p. 391.

Dwelshauvers-Dery au titre de Correspondant de la Section de Mécanique à l'Académie des Sciences de Paris, note que Dwelshauvers « *prit une part importante dans cette Ecole Alsacienne qui, malgré les critiques quelque fois fondées de Zeuner, n'a pas moins joué un rôle important dans la science* »³⁹⁵. Dwelshauvers-Dery a décrit les équations pour les quatre procédés du cycle de la machine et a pu expliquer les différences entre ce que la thermodynamique prédisait et les résultats expérimentaux³⁹⁶. La théorie de Dwelshauvers fit grand bruit, dans un contexte où beaucoup de mécaniciens de l'époque n'accordaient qu'un rôle secondaire à l'influence des parois. Ils pensaient que les différences entre les performances mesurées et théoriques étaient dues au brouillard d'eau dans la vapeur ou à l'eau condensée³⁹⁷. C'était la querelle *eau contre métal* comme on l'appelait à l'époque. Elle a opposé Dwelshauvers-Dery et Zeuner dans une « *lutte brillante* » qui a retenu l'attention de tous les ingénieurs. Zeuner finit par reconnaître la victoire de son adversaire et ses calculs ; « *dans la lutte de l'eau contre le métal, ce fut le métal qui eut raison* »³⁹⁸. Par la suite, Hirn félicite Dwelshauvers-Dery.

D'autres membres du laboratoire, proches de Dwelshauvers, contribueront aussi à donner raison aux Écoles liégeoise et alsacienne. Ainsi, sur base des courbes de la période de compression relevées par Dwelshauvers-Dery, Georges Duchesne a montré en 1899 que les parois sont entièrement sèches et que la vapeur pourrait même être légèrement surchauffée³⁹⁹. Son frère, Armand Duchesne, a utilisé un pyromètre thermoélectrique pour mesurer les températures de la vapeur et des parois. Ce type de thermomètre électrique est constitué « *de fils d'une extrême ténuité, à diamètres de l'ordre de 0,01 mm* », ce qui permet de palier la difficulté à suivre les températures des fluides que les expérimentateurs rencontraient avec les thermomètres classiques⁴⁰⁰. Nous reviendrons en détail sur ces mesures à la section 5.4. Ses essais, dont les résultats sont publiés en 1904, montrent qu'il ne reste plus d'eau à la fin de l'émission et que dans certains essais, la vapeur est même surchauffée. Il confirmera ainsi en tout point, par l'expérience, la théorie de Hirn et de Dwelshauvers-Dery⁴⁰¹.

Le révélateur (« *revealer* ») de Donkin avait déjà pu établir les mêmes faits. Dwelshauvers-Dery et Hubert en donnent des descriptions. Il s'agit d'un appareil constitué de deux cylindres concentriques. Le cylindre intérieur est en fonte polie. Le cylindre extérieur est en cristal. La zone annulaire communique avec l'espace mort. Lorsque la vapeur se condense sur le cristal, celui-ci devient opaque.

³⁹⁵ H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. Mai 1900, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

³⁹⁶ H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. 4 décembre 1893, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

³⁹⁷ *Ibid.*

³⁹⁸ *Ibid.*

³⁹⁹ Voir aussi Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *op. cit.*, p. 77.

⁴⁰⁰ Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *op. cit.*, p. 68-69.

⁴⁰¹ *Ibid.*, p. 75.

Même si les conditions de la vapeur et des parois du révélateur ne sont pas les mêmes que celles qui règnent dans le cylindre, le révélateur donne une idée de l'état de la vapeur dans le cylindre⁴⁰².

Remarquons que dans son cours de Physique industrielle de ca. 1888-1889, Victor Dwelshauvers-Dery mentionne déjà les débats autour de l'hypothèse de Hirn sur l'état de la vapeur au début de la compression⁴⁰³.

Un deuxième point de discordance concernait le théorème de Zeuner⁴⁰⁴ qui stipulait que si la détente et la compression sont complètes alors la machine se comporterait comme une machine idéale sans espace nuisible (espace mort). Pour Dwelshauvers-Dery, cet énoncé n'était pas vérifié en pratique, puisqu'il suppose que les lois d'évolution de la vapeur sont les mêmes pendant la compression et la détente, ce qui n'est pas vrai en raison justement des échanges de chaleur avec les parois.

4.6 Les représentations graphiques des machines

Ce travail a souvent abordé la représentation du fonctionnement des machines. Les sources de la fin du XIX^e siècle sont riches en dessins techniques. Mais ce n'était pas le cas aux siècles qui précèdent. Comme le souligne Deforge⁴⁰⁵, jusqu'au milieu du XVII^e siècle, on retrouve peu de dessins techniques de machines dans les archives, l'iconographie comprend davantage de figures illustratives. Il en développe la raison : les machines de l'époque, entraînées à la force du vent, de l'eau ou de l'homme, étaient simples à comprendre et se prêtaient bien à des représentations anecdotiques (personnage au travail, par exemple). Deforge remarque qu'à cette période, la machine se prête difficilement à une étude analytique (en tout cas moins qu'en horlogerie⁴⁰⁶) et que l'attitude face aux machines est plutôt contemplative et donne pour exemples les « Théâtres des machines » du XV^e au XVIII^e siècle⁴⁰⁷. Dans ceux-ci, selon lui, l'indifférence des dessinateurs pour les technologies est frappante : nous n'apprenons « rien sur les matériaux, les assemblages et les modes d'obtention des organes de la machine ». Au XVIII^e siècle, on trouve quelques auteurs qui se différencient et qui s'adressent aux praticiens, comme

⁴⁰² Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4510, ca. 1888, ff. 22.

⁴⁰³ *Ibid.*, p. 22-25.

⁴⁰⁴ Nous reprenons l'explication de H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. Mai 1900, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

⁴⁰⁵ Yves DEFORGE, *Le graphisme technique, son histoire et son enseignement*, Champ Vallon (collection milieux), 1981, p. 64.

⁴⁰⁶ Deforge remet d'ailleurs en doute l'idée de Mumford que l'horlogerie aurait joué un rôle prépondérant dans le développement de l'industrie, soulignant les différences entre l'horlogerie et la mécanique de gros volume. Voir Yves DEFORGE, *Le graphisme technique, ..., op. cit.*, p. 67-68.

⁴⁰⁷ Yves DEFORGE, *Le graphisme technique, ..., op. cit.*, p. 68.

les mécaniciens, même si la notion de dessin d'exécution en mécanique arrivera toutefois plus tard⁴⁰⁸. Il nous semble intéressant de mentionner les voyages en Angleterre à la mode au XVIII^e siècle, que décrit Deforge ; on y rapporte sur le continent des carnets de croquis très précis qui permettront de reproduire des machines.

L'utilisation du dessin techniques à la fin du (long) XIX^e siècle est bien établie. Cependant, dans ce travail, nous avons voulu étudier plus en détails leur utilisation dans le domaine de l'étude et de l'enseignement des machines thermiques. Les questions auxquelles nous avons tenté de répondre sont : a) quels types de dessins techniques (et plus généralement d'outils graphiques) sont utilisés ? b) sur la période couverte par le corpus (1868-1913), observe-t-on une évolution dans l'utilisation des représentations graphiques ?

Nous nous intéresserons à cinq types d'outils graphiques permettant de comprendre la constitution organique des machines, leurs fonctionnements et leurs performances : 1) les croquis, les dessins de machines ; 2) les représentations schématiques de machines ; 3) les diagrammes cycliques (thermodynamiques et mécaniques) représentant et quantifiant le fonctionnement des machines ; 4) les cartographies de performances de machines ; 5) les modèles de mécanismes de machines.

4.6.1 Croquis, dessins et représentations schématiques des machines

Les *croquis* et *dessins* servent principalement à comprendre la morphologie d'une machine, c'est-à-dire l'agencement de ses organes et leurs proportions (données de manière exacte ou qualitative). Ces représentations graphiques peuvent aussi servir à expliquer le fonctionnement de la machine, si on superpose, par exemple, des flèches indiquant la circulation des fluides (vapeur, gaz, etc.).

Les *schémas* sont des représentations plus abstraites qui font davantage appel à des symboles standardisés, ce qui simplifie le dessin et permet principalement de comprendre les interactions entre les organes, la circulation des fluides et in-fine le fonctionnement de la machine. Comme le remarque Lafitte⁴⁰⁹ « *les fonctions essentielles étant connues, les formes de l'organe étant, par ailleurs, bien définies, ce symbole suffit pour fixer, dans un ensemble, l'emplacement de l'organe et ses rapports avec ceux qui lui sont voisins* ».

Ferguson s'est intéressé à l'utilisation du dessin dans la pratique de l'ingénieur, et plus spécifiquement dans celle du concepteur (« designer »). Le dessin permet au concepteur de visualiser

⁴⁰⁸ *Ibid.*, p. 70.

⁴⁰⁹ Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, *op. cit.*, p. 41.

ses idées, mais aussi de pouvoir faire fabriquer les objets de sa création par l'ouvrier. Ainsi, l'utilisation du dessin distingue la pratique de l'ingénieur de celle de l'artisan⁴¹⁰. La pensée visuelle (« visual thinking ») est nécessaire à l'ingénieur⁴¹¹, même si certains milieux académiques du XIX^e siècle l'auraient mise au second plan par rapport à la pensée verbale⁴¹². Le dessin permet certainement de communiquer des idées difficiles à verbaliser, mais exige en contrepartie que le lecteur puisse les comprendre et possède la même expérience visuelle et tactile⁴¹³. Ferguson rappelle que la capacité des livres imprimés à reproduire de manière exacte des dessins et des diagrammes a eu un impact révolutionnaire dans le domaine des sciences et technologies où l'information visuelle est tout aussi importante que l'information verbale⁴¹⁴. Notons qu'à côté de la connaissance ou pensée verbale et visuelle nécessaire à la compréhension des machines, il y a une connaissance sensorielle qui est nécessaire, notamment la connaissance tactile⁴¹⁵. Les modèles contribuent à acquérir cette connaissance.

Mais à côté du *dessin comme outil d'exécution* et du *dessin comme expression de concept*, il y a bien le *dessin comme outil de compréhension et d'observation*⁴¹⁶. Cette troisième fonctionnalité du dessin nous intéresse particulièrement, car elle est également pédagogique. Les dessins techniques que nous avons reproduits et analysés dans ce travail sont la plupart du temps issus de cours de mécanique et physique appliquée ou de publications scientifiques et visent à expliquer un fonctionnement.

Parmi les dessins que nous avons observés, beaucoup sont des croquis, c'est-à-dire des dessins faits à la volée. Ferguson propose aussi de distinguer trois types de croquis⁴¹⁷ : le *prescriptive sketch* (une ébauche d'un dessin d'ingénieur plus soigné, voir par exemple la différence entre les dessins de la Figure 4-28 et de la Figure 2-15), le *thinking sketch* (un support pour se focaliser et guider la pensée non verbale) et le *talking sketch* (un croquis qui permet un échange entre techniciens).

En analysant l'évolution des notes de cours donnés à Liège dans le domaine de la mécanique appliquée et de la physique industrielle (de 1868 à 1913), on observe d'une part que les dessins se multiplient, et d'autre part qu'ils s'affinent. Ainsi, alors que le programme des cours de Mécanique

⁴¹⁰ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1992, p. 3-5.

⁴¹¹ *Ibid.*, p. 41.

⁴¹² *Ibid.*, p. 47.

⁴¹³ *Ibid.*, p. 52-53.

⁴¹⁴ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1992, p. 76.

⁴¹⁵ *Ibid.*, p. 58.

⁴¹⁶ Nous listons ici les fonctions du dessin technique proposées par Valérie Nègre à l'occasion de son séminaire *Formes et usages des dessins techniques* donné à Paris 1, le 29 septembre 2022.

⁴¹⁷ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1992, p. 96-97.

appliquée et de Physique industrielle de 1876⁴¹⁸ contient 121 figures réparties sur 39 planches, les manuscrits des cours de Dwelshauvers-Dery contiennent un nombre bien plus considérable de dessins « à main levée ». Notons, que nous n'avons pas trouvé de dessins ou schémas dans le cours de Brasseur⁴¹⁹. Les dessins dans le cours de Dwelshauvers-Dery servent clairement à expliquer le fonctionnement de machines thermiques. La Figure 4-28 donne l'exemple de la chaudière à vapeur cylindrique dans laquelle on cherche principalement à montrer l'évolution du fluide (eau, vapeur saturée, vapeur surchauffée) dans les différents composants principaux. Des représentations stylisées, plus que des conventions, permettent de comprendre où se situe le niveau d'eau liquide et la combustion du charbon (sur la grille). On distingue également ce qui est de la maçonnerie.

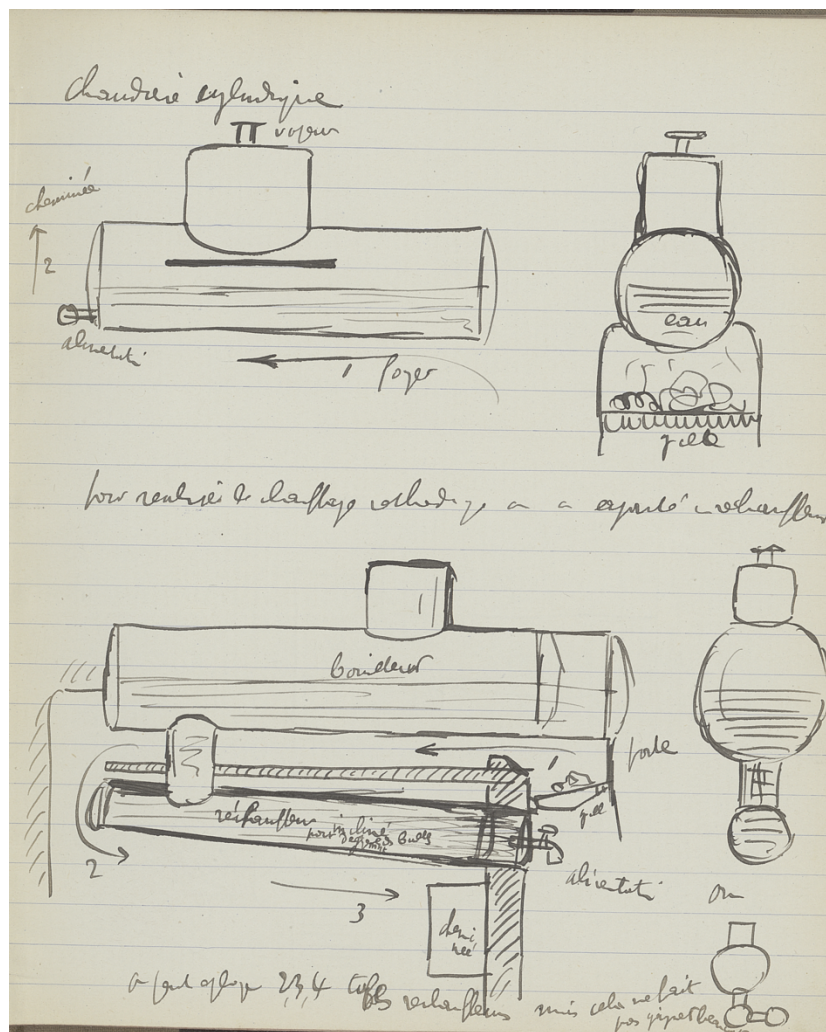


Figure 4-28 : Croquis de chaudières cylindriques. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4514, ca. 1888.

⁴¹⁸ V. DWELSHAUVERS-DERY, *Programme des cours de Mécanique appliquée et de Physique Industrielle professés à l'Ecole des Mines de Liège*, Hector Manceaux Imprimeur-Editeur, Mons, Henri Manceaux, Libraire, Bruxelles, 1876.

⁴¹⁹ Jean-Baptiste BRASSEUR et François FOLIE, *Précis du cours...*, op. cit.

Le schéma de la chaudière De Nayer du cours de Physique industrielle de 1906-1907 (voir la Figure 2-15 introduite précédemment) fait appel à davantage de conventions. On y comprend comment les gaz de combustion et l'eau circulent dans la chaudière.

Les projections orthogonales sont plus rares. Nous pouvons citer la Figure 2-13 qui vise à donner les dimensions exactes du condenseur et de sa pompe à air.

Les vues en perspective étaient déjà utilisées au XIX^e siècle (Figure 4-29), mais on ne les trouve dans les cours de l'Université de Liège que vers 1913. La Figure 4-30 montre par exemple une chaudière Kestner répandue dans le Nord de la France. Elle présente deux réservoirs horizontaux reliés par des tubes verticaux. Dans ces deux représentations, le dessinateur a fait disparaître des éléments de maçonnerie pour mieux comprendre l'anatomie interne de la chaudière. L'écoulement des gaz est toujours représenté par des flèches.

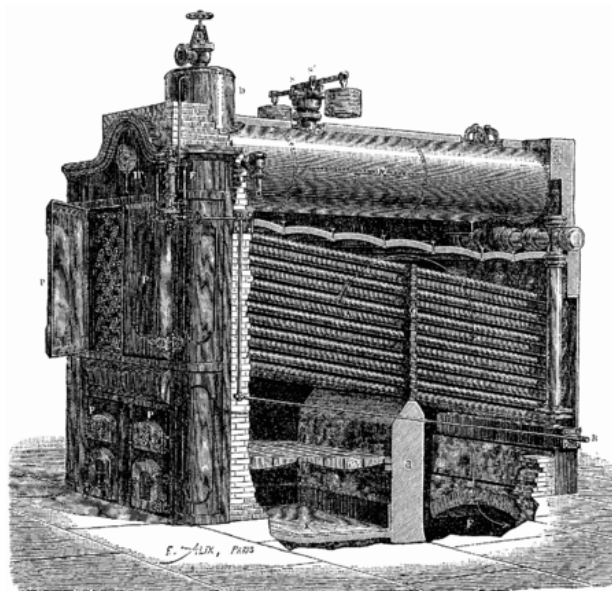


Figure 4-29 : Vue en perspective d'une chaudière De Naeyer. Dans Louis FIGUIER, *Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes*, Furne, Jouvet et Cie, 1891 (Tome 1 des Suppléments, p. 1-110).

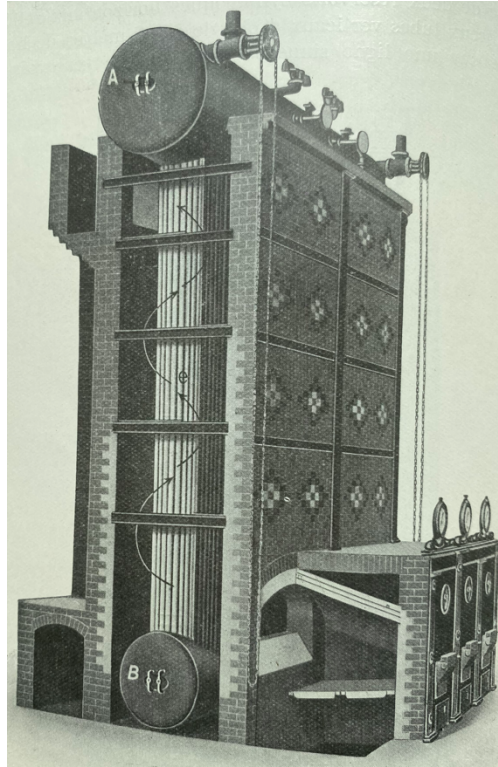


Figure 4-30 : Vue en perspective d'une chaudière Kestner. Dans Herman HUBERT, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.I - Physique industrielle*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, p. 402.

Dans les sources étudiées (notes de cours de 1868 à 1913), nous avons relevé très peu de représentations schématiques avec symboles graphiques standardisés. Ceux-ci permettent pourtant de réduire le temps de dessin, d'éviter toute ambiguïté et d'aider le lecteur peu initié à comprendre le dessin⁴²⁰. Un (rare) exemple, repris du cours de physique industrielle d'Hubert, est donné à la Figure 4-31. Il représente un régénérateur (celui-ci est introduit par Siemens), c'est-à-dire un système permettant de récupérer la chaleur des gaz brûlés pour chauffer l'air et le gaz combustible. Le système fonctionne en alternance, au moyen de vannes qui inversent la circulation des fluides, ce qui permet de stocker et déstocker de la chaleur dans des briques réfractaires. Notons tout d'abord qu'il s'agit ici d'une rare illustration d'un stockage d'énergie. Ensuite, on remarque que la figure exploite plusieurs symboles : les briques réfractaires sont représentées par des hachures verticales et les vannes par des cercles dans lesquels un segment de droite à inclinaison variable indique la position de la vanne.

⁴²⁰ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye, op. cit.*, p. 87.

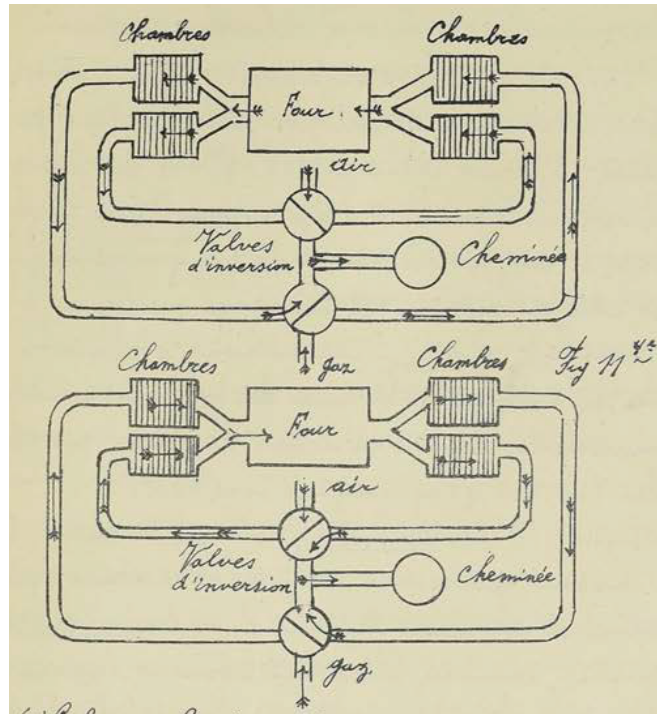


Figure 4-31 : Représentation schématique d'un régénérateur introduit par Siemens pour la récupération de la chaleur des gaz de combustion. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907, p. 57.

4.6.2 Les diagrammes pour la représentation des cycles

Les croquis et les dessins représentent principalement la morphologie de la machine, mais ne permettent pas facilement de comprendre son fonctionnement (ils représentent la machine dans un état donné au cours de son fonctionnement). Pour un corps organisé complexe, la connaissance des formes ne permet pas seule de comprendre l'enchaînement des fonctions⁴²¹. Les schémas peuvent plus facilement décrire le fonctionnement. Lafitte rappelle que Babbage (en 1826) est un des premiers à proposer une méthode pour représenter le mouvement d'une machine⁴²². Pour Babbage, une machine associe des organes reliés entre eux. Il propose un tableau listant les organes et indiquant les étapes fonctionnelles au moyen de signes qui conventionnellement représentent les liaisons. On a ainsi une description fonctionnelle qui complète la description morphologique. La représentation de Babbage a précédé la notion de cycle des machines

Le cycle thermodynamique est un concept abstrait qui permet de comprendre le fonctionnement d'une machine thermique. Ferguson identifie justement les cycles thermodynamiques comme un exemple de concept abstrait qui constitue un cadre dans lequel on peut étudier des problèmes techniques, ce qui différencie les sciences de l'ingénieur des sciences pures⁴²³. Pour lui, utilisant le cycle, on peut

⁴²¹ Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, op. cit., p. 43.

⁴²² Charles BABBAGE, « On a Method of Expressing by Signs the Action of Machinery », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 2, N°1/3, 1826, page 250-65. Dans Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, op. cit., p. 43-45.

⁴²³ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, op. cit., p. 11.

calculer par exemple le rendement thermique qui est un concept technique et non scientifique. En réalité, la *représentation* d'un cycle dans un diagramme thermodynamique (diagramme qui prend en abscisse et en ordonnée deux propriétés du fluide, comme la pression et le volume ou la température et l'entropie) est un outil particulièrement utile pour comprendre le fonctionnement (cyclique) d'une machine thermique. Le diagramme permet en effet de suivre l'évolution de l'état d'un fluide au travers des différents composants de la machine. Sa forme fermée représente l'évolution cyclique.

Le premier diagramme largement utilisé est le diagramme d'indicateur, c'est-à-dire le diagramme pression-volume. Ce diagramme, dont un exemple est donné à la Figure 4-32, décrit le fonctionnement cyclique d'un expanseur à piston. Initialement développé pour étudier les moteurs à vapeur, il sera utilisé plus tard pour décrire le fonctionnement de moteurs à combustion interne et de compresseurs d'air. C'est certainement parce qu'il peut être directement mesuré au moyen d'un instrument de mesure (l'indicateur, que nous décrirons à la section 5.2.1) que ce diagramme est le plus ancien. L'ingénieur averti pourra tirer de nombreuses informations à la vue de ce diagramme : début et fin des différentes périodes (admission, détente, émission, compression) et pertes de pression.

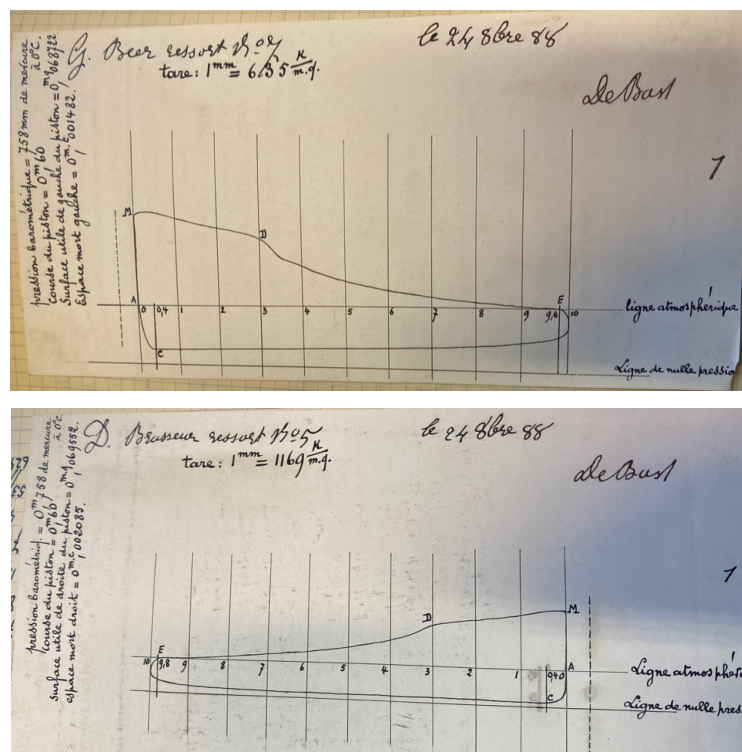


Figure 4-32 : Diagrammes d'indicateurs à gauche et à droite. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

Nous verrons plus tard qu'un autre diagramme, le diagramme température-volume, peut aussi être mesuré directement et a permis de clore une controverse sur l'état de vapeur au début de la phase de compression (la vapeur est-elle sèche ou humide ?), controverse que nous avons décrite précédemment.

Deux remarques peuvent être formulées au sujet de ces diagrammes. Premièrement, ils représentent l'évolution de grandeurs que l'on peut mesurer (température, pression, volume). Il faudra attendre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle pour voir apparaître des diagrammes qui exploitent des grandeurs thermodynamiques calculables comme l'enthalpie (« chaleur totale ») et l'entropie. Deuxièmement, ces deux diagrammes décrivent le cycle de la machine à piston et non pas le cycle de la machine à vapeur dans son ensemble. En 1824, Carnot prend bien conscience de l'intérêt de considérer le *cycle élargi* (avec l'apport de chaleur et le rejet de chaleur). Son raisonnement le conduit même à imaginer une machine à piston dont le cycle de fonctionnement se confond avec le cycle élargi. Ainsi, les phases d'apport et de rejet de chaleur sont elles-mêmes réalisées dans la machine.

Il a peut-être fallu déplacer le centre d'attention depuis la machine à pistons vers la machine à vapeur dans son ensemble (avec la chaudière, le condenseur et les pompes) pour favoriser le développement d'autres diagrammes faisant appel à des propriétés non mesurables.

Ainsi, il est un fait connu, mais très peu mentionné⁴²⁴, que l'ingénieur belge Théo Belpaire a été le premier, en 1872, à développer le diagramme température-entropie (qu'il n'appelle pas entropie et qu'il désigne par μ) pour y représenter le cycle de Carnot (abb'a'a) et tout autre cycle réversible quelconque (ABCD). La représentation de la Figure 4-33 est peut-être la plus ancienne représentation d'un cycle de Carnot dans sa forme rectangulaire bien connue que permet le diagramme T-s.

⁴²⁴ On peut notamment citer Martin Klein qui estime prudent que penser que Gibbs n'a jamais lu l'article de Belpaire. Voir Martin J. KLEIN, « The Scientific Style of Josiah Willard Gibbs », dans Duren, Peter (ed.), *A Century of Mathematics in America - part II* », American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, 1988, p. 118.

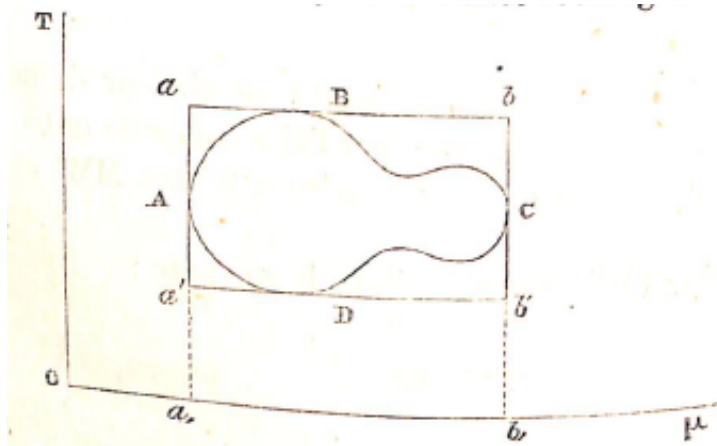


Figure 4-33 : Représentation graphique, dans un diagramme température-entropie, du rendement d'un cycle réversible quelconque et comparaison à celui du cycle de Carnot. Dans Théo BELPAIRE, « Note sur le second principe de la thermodynamique », *Bulletins de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres, et des Beaux-Arts de Belgique*, 34, 1872, p. 524.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le diagramme de Mollier, c'est-à-dire le diagramme enthalpie-entropie (Figure 4-25), a été introduit en 1905. Tout comme le diagramme température-entropie de Belpaire (voir Figure 4-23), il permet de représenter l'état du fluide : liquide sous-refroidi, mélange de liquide et de vapeur saturés (appelé aussi « vapeurs saturées ») et vapeur surchauffée. Nous noterons l'utilisation du diagramme température-entropie (T-S) pour quantifier l'intérêt de la surchauffe (Figure 4-34).

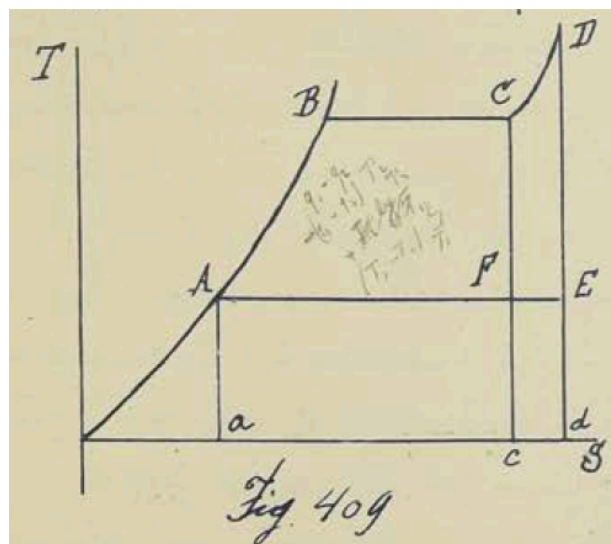


Figure 4-34 : Représentation d'un cycle à vapeur surchauffée dans le diagramme température-entropie. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, 1905-1906, p. 387.

Notons que les cycles thermodynamiques sont représentés ici en coordonnées cartésiennes. L'utilisation de coordonnées polaires a également permis de représenter des phénomènes mécaniques associés au caractère cyclique des machines (voir par exemple la Figure 4-8).

Enfin, d'autres diagrammes donnent des informations sur le cycle thermodynamique que décrit la machine. C'est le cas du diagramme d'échange de chaleur que propose Dwelshauvers-Dery pour représenter les transferts de chaleur entre le métal et la vapeur pendant les quatre phases du cycle de l'expandeur (voir la Figure 4-4 sur laquelle nous reviendrons plus tard).

4.6.3 La représentation des performances

Présenter les performances d'une machine sous forme d'abaques est certainement d'une grande utilité pour la compréhension des machines. C'est par exemple ce qui est représenté à la Figure 4-35 qui donne la consommation théorique d'un cycle de Rankine en kilogrammes de vapeur pour des valeurs de la pression dans la chaudière et dans le condenseur (pressions p_1 et p_2). Hubert note qu'on pourrait représenter la consommation non pas en kilogrammes mais en calories afin de comparer des machines à vapeur fonctionnant à des pressions et températures différentes (ou alors ramener la consommation à des kilogrammes d'une vapeur à 6 atmosphères).

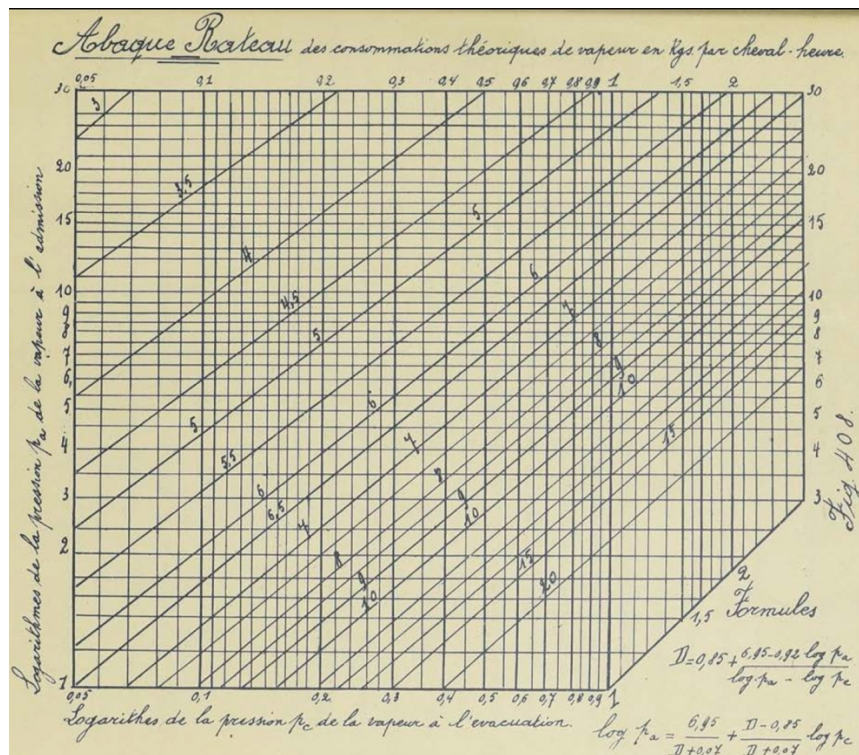


Figure 4-35 : « Abaque Rateau des consommations théoriques de vapeur en kgs par cheval-heure ». Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 2*. ULiège Library, MS4336, 1905-1906, p. 386.

4.6.4 Les modèles

Nous avons présenté précédemment deux modèles des collections actuelles du Laboratoire de Thermodynamique (Figure 2-3). Il s'agit des capsulismes à roues de types *Roots* et *Dart* décrits dans le

célèbre ouvrage de Franz Reuleaux⁴²⁵ et représentés à la Figure 4-36. Nous avons également présenté un modèle de régulateur de type Beer des collections de la Maison de la Métallurgie et de l'Industrie de Liège (Figure 4-13). Ces modèles constituent un autre type d'outil graphique qui présente deux fonctions⁴²⁶ : informer la personne qui opérera la machine de taille réelle qui utilise le mécanisme que le modèle représente et former des observateurs à des structures ou des machines peu familières. En effet, les modèles fournissent une information tactile et visuelle que le dessin ne peut pas ou peut plus difficilement transmettre. Alors que la projection orthogonale permet de décrire les détails d'une machine et que la perspective offre une vision qualitative des proportions relatives des organes, le modèle permet à l'utilisateur de regarder la pièce sous tous ses angles (et « *reconstituer le puzzle de la compréhension* ») et de recevoir une information tactile⁴²⁷.

Ces modèles pouvaient toutefois être accompagnés de dessins (et d'une description verbale), comme c'est le cas pour les modèles des mécanismes de Reuleaux (Figure 4-36) décrits dans *Cinématiques. Principes Fondamentaux d'une Théorie Générale des Machines* (1877).

⁴²⁵ Franz REULEAUX, *Cinématiques. Principes Fondamentaux d'une Théorie Générale des Machines*. (Debize, A. Trad.), Liège, Librairie Marcel Nierstrasz, 1877.

⁴²⁶ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, *op. cit.*, p. 102.

⁴²⁷ Eugene S. FERGUSON, *Engineering ...*, *op. cit.*, p. 106-107

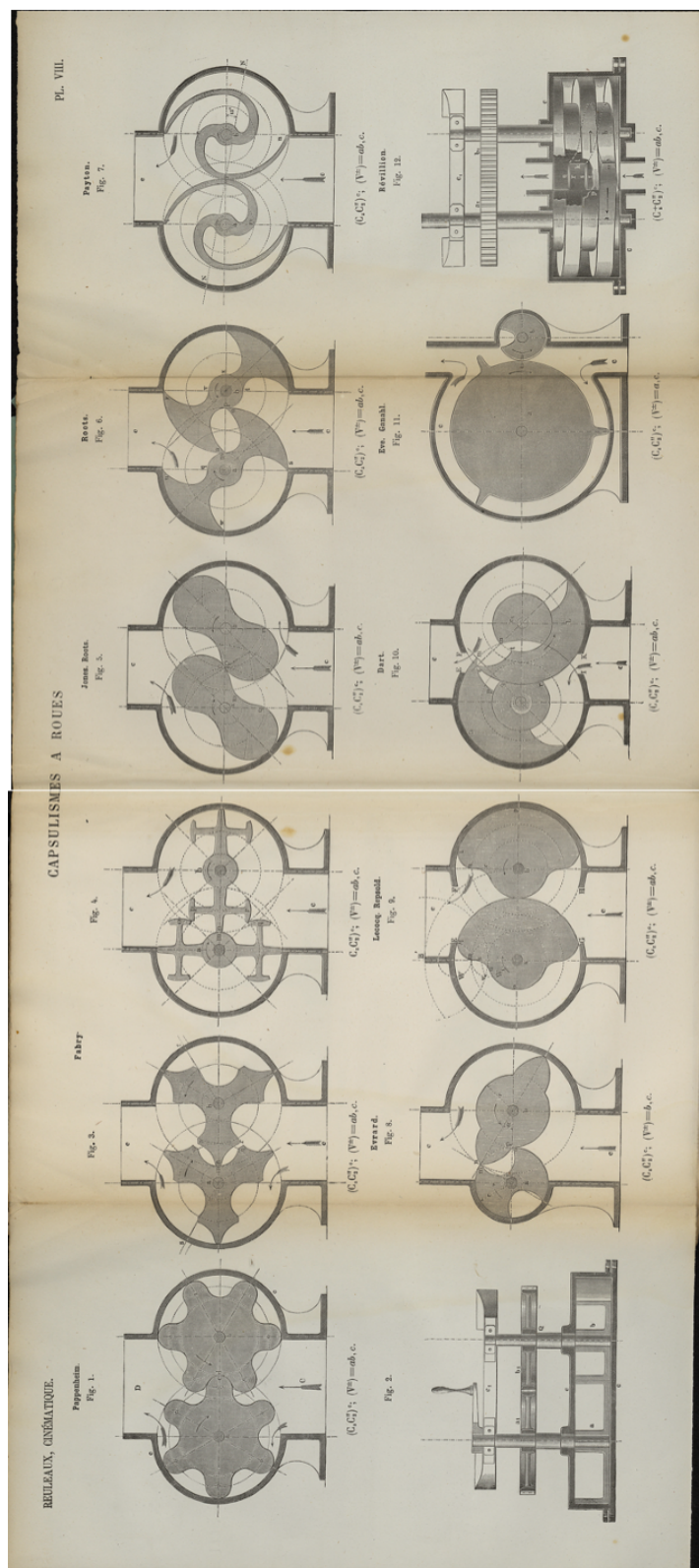


Figure 4-36 : Franz REULEAUX, « Capsulismes à roues » dans *Cinématique. Principes Fondamentaux d'une Théorie Générale des Machines* (1877). Planche 8 de l'Atlas. Le premier (« Fig. 1 ») et quatrième (« Fig. 5 ») mécanismes sont toujours utilisés de nos jours.

L'utilisation de modèles s'est développée au XVII^e siècle. Les cabinets de modèles se constituent (Académie des Sciences à Paris en 1666, Royal Chamber of Models à Stockholm en 1756,

Conservatoire des Arts et Métiers à Paris en 1799, le Bureau des brevets des Etats-Unis de 1790 à 1880)⁴²⁸. Au XVIII^e siècle, les modèles ont servi à des leçons, très fréquentées, de mécanique, d'hydraulique, etc. données à la nouvelle classe moyenne anglaise⁴²⁹. Ferguson explique que ces modèles (des pompes à deux cylindres, des dispositifs combinant poulies et poids) sont ensuite importés à Harvard. Leur utilisation dans les milieux académiques se généralise. On utilise intensivement les modèles d'éléments de machine dans les écoles d'ingénieurs américaines et européennes jusqu'à la seconde guerre mondiale. On voit à la Figure 4-37, le musée des modèles de mécanismes de Reuleaux (employés pour expliquer la cinématique des mécanismes de machines) au Sibley College de l'Université de Cornell. Cette université américaine comportait également un musée de modèles de composants de machines dans lequel on disposait des tables permettant de faire des croquis (on y retrouvait aussi des livres)⁴³⁰. Ces modèles étaient utilisés dans les auditoriums pendant les cours. Ferguson observe que les mécanismes de Reuleaux sont visibles sur la gauche et les organes de machines à vapeur (dont des régulateurs à boules) sur la droite⁴³¹.

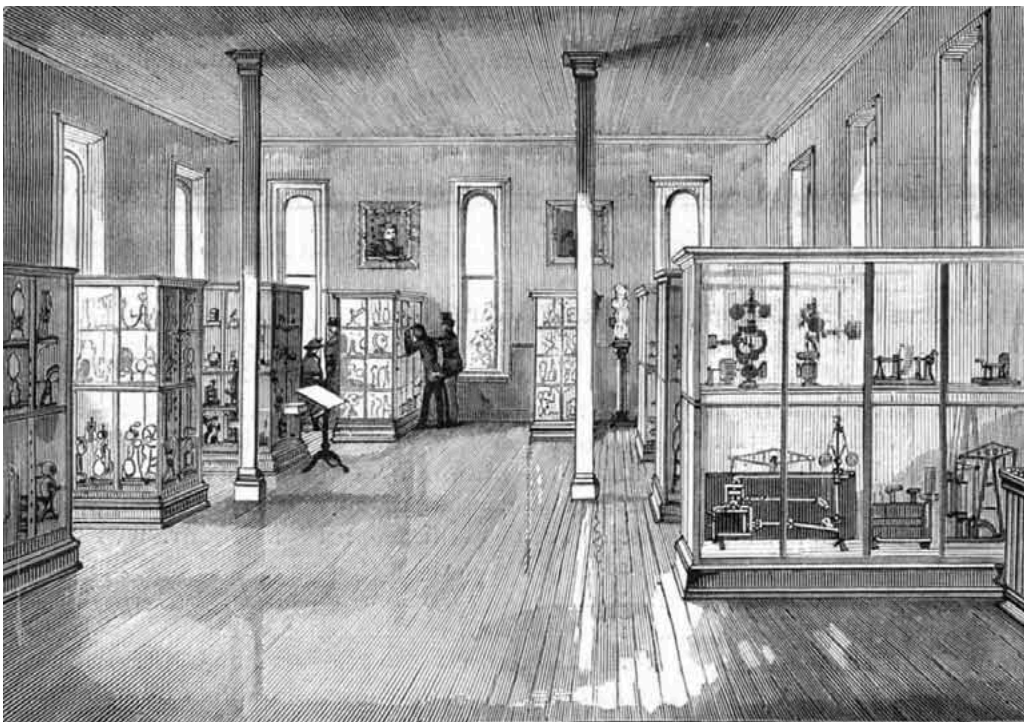


Figure 4-37 : Musée des modèles cinématique au Sibley College, Cornell University. Dans *Scientific American*, Vol. 53, No. 16, 17 octobre 1885, couverture et p. 247-248.

⁴²⁸ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, *op. cit.*, p. 135-142.

⁴²⁹ Pour l'histoire sur les modèles, voir Eugene S. FERGUSON, *Engineering...*, *op. cit.*, p. 142-146.

⁴³⁰ *Scientific American*, Vol. 53, No. 16, 17 octobre 1885, couverture et p. 247-248.

⁴³¹ Eugene S. FERGUSON, *Engineering...*, *op. cit.*, p. 146.

4.7 L'évolution des machines entre la fin du XIX^e et le début du XX^e siècle

Comme l'a montré ce chapitre, en thermodynamique (et plus généralement en mécanique) appliquée, la notion d'évolution technique est très importante. De nombreux penseurs de la première moitié du XX^e siècle ont observé l'évolution des moteurs thermiques pour comprendre et décrire ces mécanismes d'évolutions. Nous avons voulu décrire la pensée de certains d'entre eux⁴³², qui devrait être rendue plus accessible par les descriptions techniques que nous avons fournies dans les sections précédentes. Cette pensée devrait également apporter un éclairage complémentaire sur l'évolution des machines thermiques entre la fin du XIX^e et le début du XX^e siècle.

4.7.1 Machines et sciences

Commençons par Arnold Gehlen qui observe que la machine est très ancienne : le foret qui fait des mouvements tournant en aller-retour existait déjà à l'âge de pierre et la roue à aubes qui montre un mouvement circulaire continu date des Romains. Ainsi, la différence qualitative entre la *technique ancienne* et la *technique moderne* ne réside donc pas dans la différence entre l'outil et la machine. Pour comprendre cette différence, Gehlen suggère⁴³³ de considérer, à l'époque contemporaine, une « superstructure », dans laquelle les machines ne sont pas isolées des instruments ou des découvertes. Au XVII^e et XIX^e siècles, les sciences de la nature deviennent analytiques et expérimentales. Ainsi, les sciences de la nature ne sont plus faites d'observations fortuites des processus naturels et de spéculations. Au travers d'une expérience, « *on maîtrise eo ipso un processus naturel que l'on isole et que l'on observe sous des conditions que l'on fait varier, l'expérimentation est le premier pas vers l'utilisation technique de ce processus* »⁴³⁴. A présent, la technique et la science de la nature coopèrent davantage. Elles « *sont alors rentrées dans la plus étroite relation méthodologique. La technique se développe grâce au développement des nouvelles sciences de la nature* » et « *celles-ci à leur tour ont appris d'elle l'esprit pratique, constructif, non spéculatif* »⁴³⁵.

Dans un même ordre d'idées⁴³⁶, Lafitte observe qu'il y a une *recherche* sur les matières et les corps d'une grande sensibilité à certaines variations, sur des systèmes capables de transmettre sous une forme utilisable des variations que l'homme n'est pas capable d'observer, sur le développement des servo-moteurs, sur l'atténuation/suppression des oscillations (redoutables aux machines). Mais sous un

⁴³² Nous avons étudié les pensées d'Arnold Gehlen, Lewis Mumford et Gilbert Simondon dans le cadre de deux séminaires: *Sociologie et Anthropologie des Techniques* et *Les philosophes et les machines au XX^e siècle*. 2. Nous reprenons et synthétisons certains passages des travaux réalisés à ces occasions : Vincent LEMORT, *De la magie à la cybernétique en passant par l'horloge. Lecture comparée de textes de Lewis Mumford et Arnold Gehlen*; Vincent LEMORT, *Arnold Gehlen La pensée de Simondon à l'ère de la transition énergétique*.

⁴³³ Arnold GEHLEN, *Anthropologische ...*, *op. cit.*, p.179-180.

⁴³⁴ *Ibid.*, p. 180.

⁴³⁵ *Ibid.*, p. 180.

⁴³⁶ Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, *op. cit.*, p. 84.

effet de réciprocité, ces développements permettront à la physique et à la physico-chimie de se développer.

4.7.2 Les séries évolutives des machines et leur concrétisation

Depuis longtemps, l'ingénieur a tenté de classer les machines en distinguant des caractéristiques au niveau de ses composants, de sa fonction (un moteur à vapeur, à combustion, une machine frigorifique), de son degré d'automatisme, etc.

La notion de composant, ou d'organe, est ancienne. Ainsi, parmi les composants d'une machine, Dwelshauvers-Dery distingue déjà vers 1890⁴³⁷ les pièces solides et les pièces fluides. Parmi les pièces solides, il distingue les pièces fixes (le bâti) et les pièces mobiles. Les pièces mobiles se divisent en pièces primaires et pièces secondaires. Le mouvement (de rotation ou de translation) des pièces primaires est directement guidé par le bâti. Les pièces secondaires relient les pièces primaires ensemble. C'est par exemple le cas de la bielle. Distinguer et classer les composants, c'est certainement déjà classer les machines.

Toutefois, des auteurs du XX^e siècle ont montré les limites des classifications et ont également introduit l'idée d'évolution anthropomorphique des machines.

Ainsi, la pensée de Lafitte considère le développement des machines comme une série évolutive, une généalogie imposant des relations entre individus : « *Ainsi, des faits bien reconnus montrent que l'ensemble des machines se présente à nos yeux sous l'aspect d'une série évolutive et que chacun des individus, dans cette série, peut et doit, simultanément, se considérer comme une somme, comme un héritage du passé, et comme une promesse d'avenir* »⁴³⁸. Même si Lafitte estime que le langage classificateur est arbitraire, il propose tout de même de distinguer dans l'ensemble de la série mécanologique trois grandes coupures, « *isolant des masses principales, chacune d'elles comprenant des individus distingués par un système particulier d'organisation et par les propriétés qu'ils tirent de ce système* »⁴³⁹. Ainsi, il distingue trois types primaires d'organisation : machines réflexes, actives et passives⁴⁴⁰.

Les *machines réflexes* sont les plus récentes dans l'ordre d'apparition. Elles sont aussi les machines les plus composées dans la série mécanologique. Elles sont capables de modifier elles-mêmes leur fonctionnement en fonction de variations de leur milieu extérieur. Elles possèdent des organes ou

⁴³⁷ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

⁴³⁸ Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, *op. cit.*, p. 67.

⁴³⁹ *Ibid.*, p. 67-68.

⁴⁴⁰ *Ibid.*, p. 68-70.

systèmes d'organes différenciés (« un système organisé de sensibilité à certaines variations ») capables de voir des variations du milieu extérieur et de les transmettre à un système transformateur. Elles présentent des évolutions cycliques, irrégulières et modifiables par elles-mêmes et par l'homme. Elles possèdent des organes de réglage et de distribution. La machine à vapeur équipée de son régulateur est bien une machine réflexe.

Le fonctionnement des *machines actives* est déterminé par un flux d'énergie qui vient de l'extérieur. Elles transforment ou transportent ce flux. Elles ne peuvent pas modifier leur fonctionnement elles-mêmes sur base d'une perception d'une variation de leur milieu extérieur. En réalité, elles ne possèdent pas un système de sensibilité organisé. Seul l'homme peut modifier son fonctionnement cyclique. Il nous semble que l'on pourrait citer les échangeurs de chaleur comme exemple.

Les machines passives sont « *organiquement indépendantes des flux d'énergie extérieure* ». Leur statut ne peut être modifié ni par l'homme ni par elles-mêmes. Elles ne possèdent pas un système différencié de sensibilité organisée. Elles ne possèdent pas non plus un système transformateur extérieur. On peut citer comme exemples le poteau, ou la plupart des constructions architecturales.

Lafitte note que « *l'histoire de la machine à vapeur nous montre cette machine réflexe très composée provenant de formes actives comme la pompe et la marmite de Papin, qui viennent elles-mêmes, par une longue filiation, de certaines formes passives primitives* »⁴⁴¹.

Lafitte soutient donc l'idée qu'il y a une chronologie : on a d'abord eu les machines passives peu composées, ensuite les machines actives et récemment les machines réflexes⁴⁴². Ces trois types se développent à des vitesses différentes. Pour Lafitte, l'apparition d'un des trois types primaires s'est fait aux dépens du type qui précède chronologiquement. En fait, « *les trois types primaires d'organisation continuent à se développer simultanément sans que rien puisse nous faire prévoir un arrêt dans le développement de l'un quelconque d'entre eux* ». En effet, si un d'entre eux disparaissait, le ralentissement de « *la poussée continue des forces de progrès* », agissant par le bas, entraînerait le déclin des types suivants.

Dans sa pensée, Lafitte souligne que l'analogie avec la biologie est renforcée en observant les phénomènes suivants⁴⁴³ : 1) la différenciation, c'est-à-dire « *l'isolement de toute fonction spéciale en un organe particulier* ». Alors qu'un composant réalisait plusieurs fonctions dans les machines anciennes, des composants spécifiques assurent chacune des fonctions (idée qui nous semble contraire à la pensée de Simondon) ; 2) La dégradation et la disparition de certains organes dans des machines plus évoluées (le dispositif planétaire de Watt a disparu des nouvelles machines à vapeur) ; 3) le déplacement de

⁴⁴¹ *Ibid.*, p. 76.

⁴⁴² *Ibid.*, p. 79.

⁴⁴³ Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, *op. cit.*, p. 99-101.

certaines organes : le balancier de Watt a quitté les machines à vapeur terrestres pour équiper les machines marines. Ces phénomènes justifient « *l'emploi, pour les machines, des termes de fonctions, d'organes, organismes, d'organisation, qui doit se faire dans un sens étroitement comparable au sens biologique* ».

La notion de *série* (et même de série convergente des objets techniques) apparaît aussi dans la pensée de Simondon. Il faut partir « *des critères de la genèse... [pour]... définir l'individualité et la spécificité de l'objet technique : l'objet technique individuel n'est pas telle ou telle chose, donnée hic et nunc, mais ce dont il y a genèse. L'unité de l'objet technique, son individualité, sa spécificité, sont des caractères de consistance et de convergence de sa genèse. La genèse de l'objet technique fait partie de son être. L'objet technique est ce qui n'est pas antérieur à son devenir, mais présent à chaque étape de ce devenir ; l'objet technique un est unité de devenir* »⁴⁴⁴. Ainsi, lorsque Simondon parle d'un objet technique, il ne parle pas d'un objet concret (utilisé dans une application spécifique), mais de l'objet pensé dans l'historique de son développement⁴⁴⁵. « *L'être technique évolue par convergence et par adaptation à soi ; il s'unifie intérieurement selon un principe de résonance interne* »⁴⁴⁶. Pour illustrer cette idée, Simondon cite alors l'exemple du moteur automobile⁴⁴⁷. Ce qui relie le moteur de 1910 au moteur de 1956 n'est pas uniquement d'ordre chronologique, ni même de l'ordre du gain en perfection (en termes de robustesse, par exemple, le moteur de 1910 est certainement supérieur à celui de 1956). Ce qui relie le moteur de 1910 à celui de 1956 est l'évolution des causalités réciproques et des formes de ses éléments. Dans le moteur de 1956, « *chaque pièce importante est tellement rattachée aux autres par des échanges réciproques d'énergie qu'elle ne peut pas être autre qu'elle n'est* »⁴⁴⁸. « *On pourrait dire que le moteur actuel [de 1956] est un moteur concret, alors que le moteur ancien est un moteur abstrait* »⁴⁴⁹. Dans le moteur ancien, tous les éléments (les pièces) interviennent chacune à leur tour. Tout échange d'énergie, en dehors des échanges prévus dans le fonctionnement théorique de l'élément, « *apparaît comme une imperfection* »⁴⁵⁰. L'exemple des ailettes du moteur que donne Simondon a été largement repris. Les ailettes-nervures d'un moteur moderne jouent à la fois un rôle de refroidissement mais aussi structurel en augmentant la rigidité à épaisseur de culasse plus faible. Ainsi, le développement d'une culasse nervurée (par rapport à une culasse lisse) « *n'est pas un compromis, mais une convergence* »⁴⁵¹. Cependant, la forme des ailettes-nervures optimisant la rigidité n'est pas nécessairement celle optimisant le refroidissement. Il reste donc un « *résidu d'abstraction dans l'objet*

⁴⁴⁴ Gilbert SIMONDON. *Du mode ...*, *op.cit.*, p. 22-3.

⁴⁴⁵ Maarten J VERKERK, Jan HOOGLAND, Jan VAN DER STOEP et Marc DE VRIES. *Philosophy of Technology. An Introduction for Technology and Business Students*, Abingdon, Oxon, Routledge, 2016, p. 107.

⁴⁴⁶ Gilbert SIMONDON. *Du mode ...*, *op.cit.*, p. 23.

⁴⁴⁷ *Ibid.*, p. 23-26.

⁴⁴⁸ *Ibid.*, p. 23.

⁴⁴⁹ *Ibid.*, p. 24.

⁴⁵⁰ *Ibid.*, p. 24. Comme le fait remarquer Simondon, c'est pourtant ainsi, que le cycle (thermodynamique) du moteur thermique est enseigné : chaque pièce fonctionne à son tour.

⁴⁵¹ *Ibid.*, p. 25.

technique, et c'est la réduction progressive de cette marge entre les fonctions des structures plurivalentes qui définit le progrès d'un objet technique »⁴⁵². « *L'objet technique existe donc comme type spécifique obtenu au terme d'une série convergente. Cette série va du mode abstrait au mode concret : elle tend vers un état qui ferait de l'être technique un système entièrement cohérent avec lui-même, entièrement unifié* »⁴⁵³. Dans un objet abstrait, il y a un rapprochement de plusieurs systèmes complets, ce qui le rend plus fragile : si un des sous-systèmes ne fonctionne plus, c'est le système dans son ensemble qui est menacé. Ainsi, un moteur à combustion interne refroidi par air est plus concret qu'un moteur refroidi par eau. Le refroidissement à air, c'est-à-dire les échanges radiatif et convectif avec l'environnement, ne « *peuvent pas ne pas se produire* ». Dans un refroidissement par eau, si la pompe entraînée par une courroie auxiliaire est défaillante, le moteur peut être endommagé. Avec un effet par thermosiphon, on pourrait dire que le refroidissement serait semi-concret. Ainsi, le refroidissement par eau peut être vu comme un résidu d'abstraction.

4.7.3 Régulation et automatisation des machines, relation hommes-machines

Le degré élevé d'automatisme est aussi une caractéristique importante des machines. D'après Mumford, l'automatisme est un des critères qui permet de distinguer l'outil de la machine. La machine permet d'atteindre un degré d'automatisme plus élevé que l'outil. La machine automatique est alimentée par une source extérieure d'énergie, présente des interrelations plus ou moins complexes entre ses parties et un genre limité d'activités.

Gehlen affirme que l'évolution d'ensemble d'une technique peut être expliquée par « *l'objectivation progressive du travail humain* » et « *la décharge toujours croissante de l'homme* »⁴⁵⁴. Cette évolution se fait en trois étapes : 1) l'outil : l'homme déploie la force et l'effort intellectuel ; 2) la machine : « *la force physique est objectivée par la technique* »⁴⁵⁵ ; 3) l'automate : il n'y a plus de participation physique ou intellectuelle. Ainsi, Gehlen déclare que « *dans l'automatisation, la technique a atteint sa perfection méthodique, et cet achèvement du processus d'objectivation technique du travail, entamé à la préhistoire et terminé à l'époque contemporaine, est une caractéristique de notre temps* »⁴⁵⁶.

La notion d'auto-régulation est aussi très forte chez Simondon qui s'intéresse au couplage homme-machine et distingue la mémoire vivante (celle de l'homme) et non vivante (celle de la machine) dans l'opération technique complexe d'une machine. Les deux types de mémoire permettent une auto-régulation, « *mais celle de l'homme permet une auto-régulation d'après un ensemble de significations*

⁴⁵² *Ibid.*, p. 26.

⁴⁵³ *Ibid.*, p. 26-27.

⁴⁵⁴ Arnold GEHLEN, *Anthropologische ...*, *op. cit.*, p. 188.

⁴⁵⁵ *Ibid.*, p. 188.

⁴⁵⁶ *Ibid.*, p. 188.

*valables dans le vivant et ne pouvant se développer qu'en lui ; celle de la machine fonde une auto-régulation qui a un sens dans le monde des êtres non-vivants »*⁴⁵⁷. Simondon distingue la machine sans auto-régulation et la machine automatique (avec auto-régulation). La première n'a pas besoin de l'homme, car elle répète continuellement la même action, définie préalablement et ce indépendamment du milieu. Par contre, la machine automatique a besoin de l'homme et le remplace moins que la machine sans auto-régulation⁴⁵⁸. L'homme lui est utile comme technicien, comme associé. En effet, la régulation permet à la machine d'être rattachée à un système technique dans lequel elle fonctionne⁴⁵⁹. Mais cette régulation même si elle est parfaite a besoin de la mémoire humaine. Cette mémoire prend mieux en compte, c'est-à-dire dans son ensemble, le milieu dans lequel la machine se trouve, car le vivant est capable d'intégrer et transformer des « *a posteriori en a priori* »⁴⁶⁰, nécessaires à ce type d'auto-régulation. L'homme a une vue d'ensemble des interactions entre les machines et assure l'auto-régulation de cet ensemble en même temps que l'opération s'accomplit. Pour Simondon, un moteur est bien un individu technique, car il nécessite une série d'automatismes qui permettent au cycle thermodynamique de se reproduire (par exemple, les lois de levées de soupapes)⁴⁶¹. Cette individualisation peut être très complète si le système comporte une auto-régulation comme le *régulateur* de Watt (régulateur à boules). La présence de l'homme dans la régulation d'un moteur reste toutefois nécessaire. Par exemple, si le moteur subit un accroissement de charge brusque, par exemple en entraînant une scie qui taille un tronc d'arbre, il pourrait « caler ». Ceci est dû au fait que le régulateur présente « *un délai trop long* »⁴⁶². L'ouvrier peut agir plus rapidement que le régulateur en agissant « *sur le levier du régulateur une demi-seconde avant que le volant de scie n'attaque le tronc* »⁴⁶³. Le régulateur de Watt est performant lorsque les variations de charge sont lentes et progressives. « *Une pareille incapacité devant les variations rapides s'explique par le fait que, dans les moteurs thermodynamiques, même quand il existe une auto-régulation, cette auto-régulation ne possède pas de canaux d'information distincts des effecteurs* »⁴⁶⁴.

Simondon utilise la notion de « feed-back » des automaticiens : « *le governor de Watt possède bien une voie de contre-réaction (feedback), mais cette voie ne se distingue pas de la voie effectrice qui permet au moteur de mouvoir un organe résistant* »⁴⁶⁵ « *Il y a dans cette indistinction de la voie effectrice (canal énergétique) et de la voie de réaction négative (canal d'information) un grave inconvénient qui diminue beaucoup l'efficacité de la régulation, et le degré d'individualisation de l'être*

⁴⁵⁷ Gilbert SIMONDON. *Du mode...*, *op.cit.*, p. 172-173.

⁴⁵⁸ Peut-être s'agit-il la distinction entre le métier et le moteur proposée par Jean-Baptiste BRASSEUR et François FOLIE, *Précis du cours...*, *op. cit.*, p. 1.

⁴⁵⁹ Gilbert SIMONDON. *Du mode...*, *op.cit.*, p. 174.

⁴⁶⁰ *Ibid.*, p. 175.

⁴⁶¹ *Ibid.*, p. 178.

⁴⁶² *Ibid.*, p. 178.

⁴⁶³ *Ibid.*, p. 178.

⁴⁶⁴ *Ibid.*, p. 179.

⁴⁶⁵ *Ibid.*, p. 179.

technique ». En effet, il est nécessaire que le moteur ralentisse pour que la régulation fonctionne (alors que la régulation vise précisément à ne pas voir le moteur ralentir). « *C'est cette indistinction entre le canal énergétique et le canal d'information qui marque l'époque thermodynamique et qui constitue la limite d'individualisation des moteurs thermiques* »⁴⁶⁶.

Simondon observe qu'au lieu d'utiliser le régulateur (« governor ») de Watt, si on pouvait mesurer le couple à l'arbre du moteur et ajuster par un canal d'information différent du canal énergétique la quantité de vapeur admise par le moteur on pallierait ce problème de ralentissement du moteur. C'est ce que permet l'utilisation des canaux d'information basés sur les courants faibles⁴⁶⁷. Ces canaux présentent eux-mêmes un rendement de transmission de l'information, ou « *rendement d'information* ». Simondon observe qu'« *un bon rendement en information va de pair avec un mauvais rendement énergétique* »⁴⁶⁸. Il va même plus loin en observant que le technicien en thermodynamique tend à construire des installations de grandes tailles car le rendement thermodynamique croît avec les dimensions. C'est moins le cas avec les machines électriques. A l'inverse, en augmentant la dimension d'un dispositif de transmission de l'information, on en diminue le rendement d'information, en raison des inerties et temps de transits plus importants⁴⁶⁹. Le technicien de l'information va donc chercher à diminuer la taille du système. Il y aurait donc un compromis à trouver entre rendement énergétique et rendement d'information. La volonté de privilégier le second aurait expliqué la tendance à la réduction des dimensions après 1946.

Lafitte explique⁴⁷⁰ que les machines réflexes les plus composées possèdent un système complet de sensibilité avec un organe détecteur, un organe transmetteur (des variations produites, sous une certaine forme, par l'organe détecteur), des organes de types relais ou servo-moteurs sur lesquels agissent les organes transmetteurs, puis des organes de réglage sur lesquels agissent les servo-moteurs. Ces machines très évoluées réagissent à une rupture d'équilibre de leur fonctionnement interne avec leur milieu extérieur. Elles présentent une indépendance vis-à-vis de l'homme. Grâce au développement de l'électricité, les machines réflexes se développent. Comme Simondon, Lafitte s'intéresse aussi à la relation homme-machine. Ainsi, il pense que par les développements des machines réflexes, « *l'homme, qui tend à se libérer de son assujettissement aux machines de sa création, échappera de plus en plus à leur astreinte. Dans certaines d'entre elles il ne fait déjà plus que les conduire et les entretenir. Dans d'autres, plus composées encore, il n'a déjà plus qu'un rôle de surveillance très générale et d'entretien* ». Lafitte prédit que l'homme se libérera de la machine⁴⁷¹. Ainsi, il déclare que dans la série des machines, le sens réflexe est « *toujours plus affirmé* » : l'homme se libère peu à peu de son obligation

⁴⁶⁶ *Ibid.*, p. 180-181.

⁴⁶⁷ *Ibid.*, p. 180.

⁴⁶⁸ *Ibid.*, p. 183.

⁴⁶⁹ *Ibid.*, p. 185.

⁴⁷⁰ Jacques LAFITTE, *Réflexions...*, op. cit., p. 82-83.

⁴⁷¹ *Ibid.*, p. 92.

à conduire et contrôler les machines lui-même. Les machines réflexes vont encore perfectionner leur organisation et voir leur composition croître. Elles conduiront l'homme à un machinisme supérieur et libérateur.

4.7.4 La non-obsolésence des mécanismes

L'étude de l'évolution des techniques entre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle illustre bien un fait : les mécanismes ne sont jamais obsolètes⁴⁷². Par exemple, alors que la turbine à gaz prend naissance au début du XX^e siècle⁴⁷³, on sera frappé de voir que la représentation schématique qu'en propose l'ingénieur allemand Barcow intègre un régulateur à boules pour le contrôle de l'alimentation en combustible (Figure 4-38).

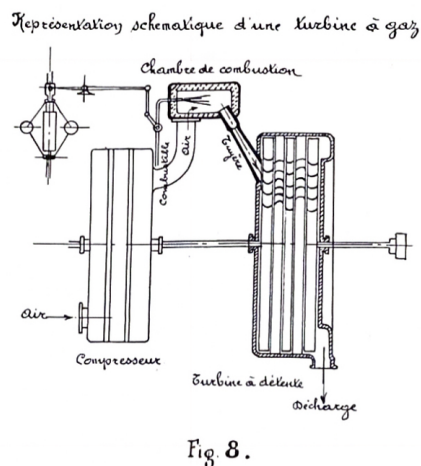


Figure 4-38 : « Représentation schématique d'une turbine à gaz ». Dans Rudolph BARCOW, *Mémoire sur les turbines à gaz*, présenté au Congrès de Mécanique appliquée à Liège, 1905.

L'idée n'est pas nouvelle. Au XVIII^e siècle, Leupold proposait déjà de ne pas voir la machine comme une « individualité inaccessible », mais comme un assemble d'éléments que l'on retrouve (identiquement ou presque) d'une machine à l'autre⁴⁷⁴.

Plus tard, Ferguson observe aussi ce phénomène et mentionne le balancier de Newcomen (qui permet d'obtenir un mouvement en ligne droite du piston dans un cylindre vertical) que l'on retrouve dans les systèmes de pompage du pétrole⁴⁷⁵. Il faut certainement chercher la raison dans la mémoire

⁴⁷² Cette idée fait écho à celle de Jean-Baptiste Fressoz que les matières ne sont jamais obsolètes.

⁴⁷³ Ce moteur à combustion interne est présenté comme combinant la « simplicité de construction de la turbine à vapeur et les avantages économiques des machines à combustion » d'après Rudolph BARCOW, « Mémoire sur les turbines à gaz », dans les *Actes de la Section de mécanique appliquée du Congrès international des mines...*, Liège, La Meuse, 1905, t. II, p. 169. Dans ce mémoire, Barcow nous apprend qu'il existe encore peu d'applications pratiques de la turbine à gaz et que « des résultats sérieux ne sont pas encore obtenus ». Voir *ibid.*, p. 184.

⁴⁷⁴ Yves DEFORGE, *Le graphisme technique, ...*, op. cit., p. 70.

⁴⁷⁵ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, op. cit., p. 15.

visuelle du concepteur⁴⁷⁶. Aussi, lorsqu'un ingénieur conçoit une nouvelle machine, il réutilise des composants familiers, dans des configurations réarrangées et parfois radicalement différentes⁴⁷⁷.

4.8 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons commencé par définir ce qu'est une machine thermique. Nous avons ensuite étudié un corpus de sources constitué des notes de cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle de trois professeurs de l'Université de Liège (de 1868 à 1913). Ces notes (ou « précis » ou « résumés ») de cours préfigurent le contenu d'un cours contemporain de thermodynamique appliquée (ou thermodynamique technique).

L'étude de ce corpus a permis d'observer la diffusion des principes de la thermodynamique (certains relativement récents) dans la formation des ingénieurs liégeois : propriétés des gaz et des vapeurs, concept d'énergie (et sa conservation), d'entropie, rendement maximum d'un moteur, état critique de la matière. Cette étude a également montré comment la pratique expérimentale s'est instituée dans l'enseignement.

Nous avons ensuite proposé une synthèse des connaissances théoriques en thermodynamique appliquées à la fin du long XIX^e siècle à l'Université de Liège. Cette synthèse devra nous permettre de mieux comprendre les études expérimentales décrites au Chapitre 5 (que mesure-t-on, pourquoi, comment analyse-t-on les mesures au vu des connaissances théoriques ?). Dans cette synthèse des connaissances, nous avons mis en évidence l'analogie entre la machine thermique et la machine hydraulique qui est largement exploitée par Dwelshauvers-Dery à la fin XIX^e siècle (notion de poids thermique, analogie entre les transferts de chaleur et les écoulements de fuite d'eau dans une machine hydraulique).

Nous nous sommes intéressés à l'utilisation des représentations graphiques et des modèles de machines dans l'enseignement, mettant en évidence le développement des diagrammes de cycles thermodynamiques et des schémas de machines. Tous deux concourent à la compréhension du fonctionnement cycliques des machines et pallient les limites des dessins.

Enfin, nous avons étudié la pensée de plusieurs auteurs qui se sont intéressés aux machines. Nous avons tenté d'illustrer leurs idées par des exemples liés aux machines abordées dans ce chapitre. Nous

⁴⁷⁶ Nous traduisons ici le mot anglais *Designer*. Le livre de Ferguson traite de l'utilisation des dessins pour le design, ce qui est propre à l'ingénieur et le contraire de l'artisan. Le dessin aide le « designer » à visualiser ses idées et permet à l'ouvrier de produire les objets. Il rappelle aussi que « *to design is to invent* ». *Ibid.*, p. 5 et 12.

⁴⁷⁷ Eugene S. FERGUSON, *Engineering and the Mind's Eye*, *op. cit.*, p. 64.

nous sommes particulièrement intéressés à l'évolution des machines, au degré d'automatisation, à la relation machine-homme et au concept de non-obsolésence des mécanismes.

CHAPITRE 5 La pratique expérimentale au Laboratoire de mécanique

5.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit le fonctionnement du Laboratoire de mécanique (celui de Jemeppe, qui sera plus tard celui de Liège). Nous avons également décrit l'état des connaissances scientifiques et techniques dans le domaine de la thermodynamique appliquée à la fin du long XIX^e siècle à Liège.

Dans ce chapitre nous voudrions étudier plus en détails les méthodes et les techniques expérimentales développées et employées au Laboratoire à l'occasion des essais de machines à vapeur. Nous voudrions savoir dans quelle mesure elles ont permis d'enrichir les connaissances théoriques.

Les essais de machines à vapeur doivent permettre d'en mesurer les performances (puissance, consommation de vapeur, rendement) en fonction de paramètres opératoires et de comprendre les sources de pertes. Hirn a développé dès 1856 une méthode expérimentale, un procédé d'essais de machines à vapeur basé sur un bilan calorimétrique⁴⁷⁸. Il s'agissait d'un bilan énergétique sur la machine dans lequel on exploite l'équivalent mécanique de la chaleur et on exprime que toute l'énergie entrante est égale à l'énergie sortante. Dwelshauvers-Dery, qui a séjourné en Alsace pour travailler avec Hirn, a certainement été formé à cette méthode et l'a reproduite et adaptée à la machine testée à Liège.

Il serait également intéressant d'apprécier les limites des techniques et méthodes expérimentales employées à Liège, leur évolution dans le temps (sur la période considérée dans ce travail, à savoir 1868-1913), ainsi que la rigueur et la créativité dont faisaient preuve les expérimentateurs.

5.2 Les instruments et techniques de mesures pour les essais de machines à vapeur

Nous commencerons par décrire les instruments de mesures et les techniques expérimentales utilisées dans le Laboratoire de Mécanique (lorsqu'il est à Jemeppe et lorsqu'il sera à Liège) pour étudier les machines à vapeur.

⁴⁷⁸ François SINIGAGLIA, « LA SURCHAUFFE appliquée à la machine à vapeur d'eau », dans les *Actes de la Section de mécanique appliquée du Congrès international des mines, ...*, Liège, La Meuse, 1905, t. II, p. 230-231.

5.2.1 Mesure du diagramme pression-volume (indicateur)

Le diagramme indicateur est le diagramme pression-volume de la machine. La mesure du diagramme indicateur permet de déterminer le travail moteur \mathcal{T}_m dont la signification a été donnée au Chapitre 4.

La mesure du diagramme pression-volume se fait au moyen d'un indicateur. Cet instrument, particulièrement précieux pour l'étude expérimentale des machines à vapeur, a été inventé par Watt et perfectionné par la suite. Remarquons qu'en première approximation, on pourrait utiliser la loi de Mariotte pour calculer le travail \mathcal{T}_m .

Nous reprenons ici la description, particulièrement claire, du fonctionnement de l'indicateur du cours de Mécanique appliquée de Hubert⁴⁷⁹. L'indicateur est composé d'un cylindre qui est connecté à l'espace mort de la machine par une tubulure équipée d'un robinet à triple voie. Ce robinet permet de mettre en communication le cylindre avec l'atmosphère, avec le cylindre de la machine à vapeur ou avec les deux simultanément. Dans le premier cas, l'indicateur mesure la pression atmosphérique (la ligne atmosphérique). Dans le troisième cas, la vapeur venant de la machine permet de purger l'indicateur en évacuant l'eau (liquide) vers l'extérieur. « *Le cylindre contient un piston qui, en s'élevant, comprime un ressort aussi élastique que possible et dont la tension équilibre la pression de la vapeur. La tige du piston porte un crayon appuyé sur une feuille de papier contenue dans un cadre qui reçoit un mouvement égal ou simplement proportionnel au déplacement du piston de la machine. Le crayon trace ainsi une courbe dont les abscisses sont proportionnelles à la course du piston de la machine et par conséquent au volume décrit par cet organe tandis que les ordonnées sont proportionnelles à la pression. La surface de cette courbe est donc, comme nous l'avons établi, proportionnelle au travail de la vapeur sur une face du piston pendant une course aller et retour.* »

L'indicateur dans sa version la plus élémentaire est représentée à la Figure 5-1. Il s'agit en réalité de l'indicateur de Watt.

⁴⁷⁹ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée I*, ULiège Library, MS4335, p. 285-286.

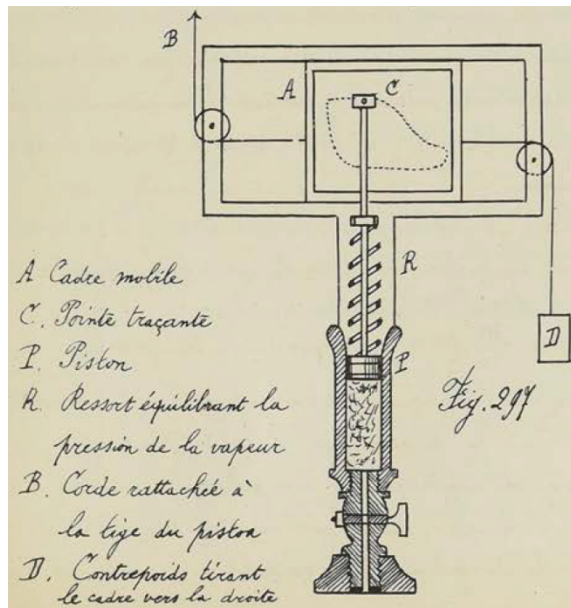


Figure 5-1 : Description des éléments constitutifs de base d'un indicateur. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée I*, ULiège Library, MS4335, Année académique 1905-1906, p. 285.

Le diagramme indicateur sert donc principalement à calculer le travail de la force motrice. « Il sert aussi à déterminer les conditions dans lesquelles se fait la distribution de la vapeur au cylindre. Le troisième objet auquel il peut servir est de déterminer le degré de régularité de la marche de la machine »⁴⁸⁰.

L'utilisation d'indicateurs à l'Université de Liège est ancienne. Comme nous l'avons vu précédemment (section 2.4), des indicateurs Mac Nought étaient déjà utilisés vers 1840 pour tester la machine à vapeur de Watt de l'atelier de Mécanique. On sait aussi que Dwelshauvers-Dery ramène de Londres en 1868 un indicateur de type Richards⁴⁸¹. De ses dires, celui-ci a rendu « *les plus grands services* ». Il s'agit probablement d'un des indicateurs utilisés au laboratoire de Jemeppe. La machine de ce laboratoire utilisait en effet deux indicateurs : un connecté au volume mort de gauche et l'autre au volume mort de droite. Au moins un des deux indicateurs était de type Richards. Le schéma d'un tel indicateur est donné à la Figure 5-2.

⁴⁸⁰ Pour le dernier point Dwelshauvers-Dery introduit le principe des vitesses virtuelles. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4489, ca. 1890.

⁴⁸¹ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Julien WEILER, *Referendum des Ingénieurs Enquête sur l'Enseignement de la Mécanique*, Liège, Marcel Nierstrasz, 1893, p. 39.

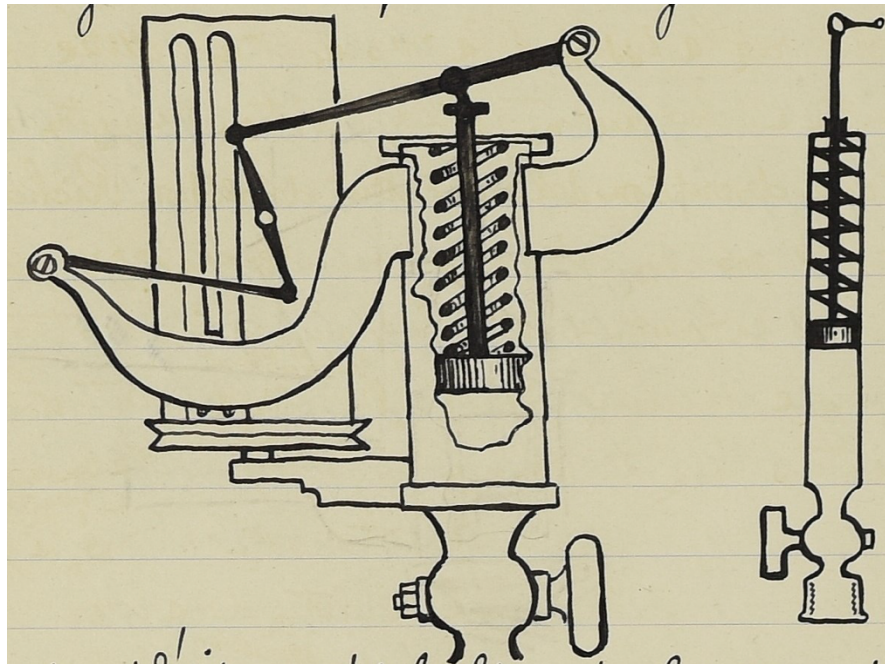


Figure 5-2 : Représentation schématique d'un indicateur Richards (gauche). Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

Pour les machines à haute pression et à vitesse élevée, il faut des indicateurs comportant des pièces pas trop lourdes (permettant ainsi de limiter leur inertie) et des courses les plus courtes possible pour diminuer l'accélération et donc l'influence de la masse⁴⁸². Sans prendre ces précautions, la mesure en serait altérée. Les constructeurs ont progressivement amélioré les indicateurs. On emploie par exemple des ressorts très durs et parfaitement élastiques (on peut observer ces ressorts sur la photographie de la Figure 5-3). Il faut aussi parfois amplifier le mouvement du piston de l'indicateur pour limiter les erreurs de lecture. Pour les mesures de vapeur à très hautes températures (vapeur surchauffée) ou de gaz de moteur, on place parfois le ressort en dehors du cylindre (afin d'éviter la variation de la raideur avec la température).

Le papier est enroulé sur un cylindre mobile sur son axe (Figure 5-3)⁴⁸³. Sur l'axe se trouve une poulie qui permet un accouplement avec une pièce mobile de la machine (et dont le mouvement est proportionnel au mouvement du piston). Le tambour, muni d'un ressort de rappel, tourne dans un sens ou dans l'autre en fonction de la course aller ou retour du piston. Il faut éviter les pertes de charge entre le cylindre et l'indicateur. La circonférence du tambour étant inférieure à la course du piston, on utilise un appareil réducteur. Il faut aussi limiter la longueur de la corde qui actionne le tambour, notamment en raison de la variation de sa longueur avec la tension et l'humidité, mais aussi à cause des frottements.

⁴⁸² Les recommandations sur les caractéristiques de l'indicateur proviennent de H. HUBERT, et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, p. 286-287.

⁴⁸³ Les informations sur le tambour proviennent de H. HUBERT, et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, p. 287-288.

Le déplacement du papier doit vraiment être proportionnel à la course du piston. On diminue l'inertie en diminuant la course du piston. On peut aussi diminuer le poids du piston (en utilisant un piston creux et en aluminium)⁴⁸⁴.

La Figure 5-3 montre une photographie d'un indicateur de type Garnier faisant partie des collections du Laboratoire de Thermodynamique actuel. Il est inscrit à la main «Indicateur dynamomètre pour Mach. Vap. Syst. GARNIER » sur la boîte qui le contient, mais nous n'avons pas retrouvé de trace de cet indicateur dans des publications.



Figure 5-3 : Indicateur de pression de type Garnier (largeur du papier : 10,3 mm). Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège. Photos par l'auteur (Août 2023 et Novembre 2021).

Au laboratoire de Liège, on utilisait deux indicateurs avec un système tige (T), excentrique (E) et balancier (B) qui permet de réduire la longueur de la corde à son minimum (Figure 5-4).

⁴⁸⁴ *Ibid.*

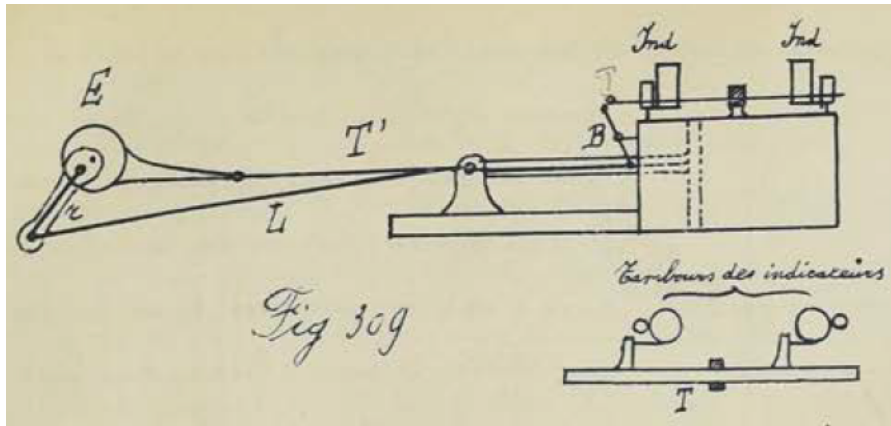


Figure 5-4 : Positionnement des indicateurs au Laboratoire de mécanique de Liège. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, Année académique 1905-1906, p. 289.

Comme l'explique Hubert⁴⁸⁵, « L'échelle des ordonnées ou la tare du ressort, doit être déterminée avec soin avant chaque essai demandant une grande exactitude ». On peut tarer en utilisant directement la vapeur de la chaudière et un manomètre à mercure « muni d'une échelle graduée en centimètres par exemple ». Avec un réducteur de pression on impose des pressions différentes dans le tuyau. On peut aussi tarer avec des poids (des disques en plomb) (Figure 5-5). Il ne faut pas oublier de chauffer préalablement l'indicateur à la température de la vapeur.

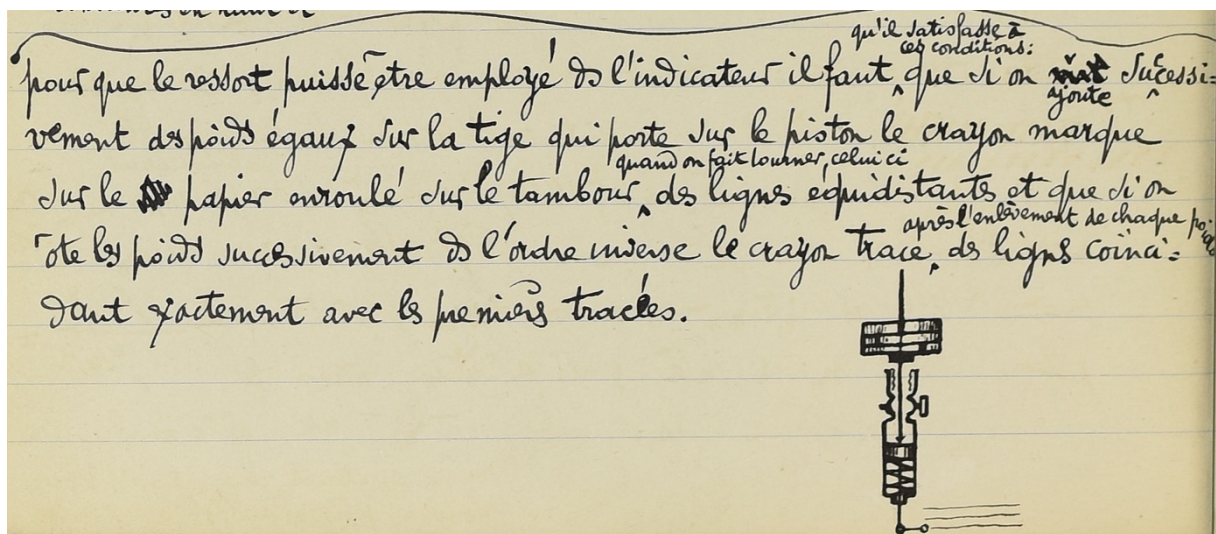


Figure 5-5 : Étalonnage d'un indicateur avec des poids en plomb. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

Les notes de cours de Mécanique appliquée de 1890⁴⁸⁶ expliquent la calibration des indicateurs et l'illustrent par des essais réalisés au Laboratoire de Jemeppe. « Le maniement de l'indicateur demande

⁴⁸⁵ H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, p. 290.

⁴⁸⁶ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

beaucoup d'attention et de délicatesse. L'appareil doit être soigneusement entretenu et huilé »⁴⁸⁷. Une fois que l'on connaît la variation de pression (en kilogrammes par mètre carré) qui entraîne un déplacement du crayon de 1 mm, on peut tracer la ligne de nulle pression. Pour ce faire, on mesure la pression atmosphérique (ou « barométrique ») et on la divise par la variation de pression liée à un déplacement de 1 mm du crayon (voir Figure 5-6).

Tare des indicateurs de Jemeppe:
 G. gauche ^{ressort} n°7 dont la tare est 1 mm rapportée une pression de $635 \frac{\text{kg}}{\text{mq}}$ (au dessus de zéro absolu)
 D. droite ^{ressort} n°5 tare = 1 mm = $1169 \frac{\text{kg}}{\text{mq}}$
 La disposition des indicateurs était la même de l'expérience type du 12 octobre 88.
 Ce jour là la pression barométrique était de $0^{\text{m}} 756$ de mesure à zéro de zéro
 cela se traduit par une pression de $0,756 \times 13596 = 10279 \frac{\text{kg}}{\text{mq}}$
 Donc pour le ^{ressort} n°7 gauche la distance entre la ligne atmosphérique
 et celle de nulle pression était $\frac{10279}{635} = 16 \text{ mm}$
 On peut donc tracer cette ligne de nulle pression à 16 mm au dessous de la ligne atmosphérique
 pour le ^{ressort} n°5 droite cette distance = $\frac{10279}{1169} = 8 \text{ mm}$
 La seconde partie de l'instrumente telle tare...

Figure 5-6 : Tare des indicateurs du Laboratoire de Jemeppe. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

On peut alors indiquer les lignes de nulle pression et de pression atmosphérique sur les diagrammes indicateurs (Figure 4-32).

Notons finalement, que pour connaître la puissance motrice, il faut connaître le travail par coup de piston ou par tour et la durée d'un tour. On peut utiliser un compte-tour (chronomètre). Nous illustrerons la méthode d'analyse des mesures de l'indicateur à la section 5.3.

5.2.2 Mesure du travail à l'arbre

5.2.2.1 Principe de fonctionnement d'un Frein de Prony

⁴⁸⁷ H. HUBERT, et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée I*, ULiège Library, MS4335, p. 292.

Dans le cas d'une machine à vapeur (ou d'une roue hydraulique), le travail utile \mathcal{T}_u est le travail disponible à l'arbre. Si on peut suspendre la marche des appareils entraînés par la machine à vapeur, ce travail peut être mesuré par un frein de Prony (un frein dynamométrique). Dans le cas contraire, on utilisera un dynamomètre de transmission⁴⁸⁸.

« Le Frein de Prony a pour principe d'absorber, par le frottement d'un collier sur une poulie, le travail moteur qu'il s'agit d'évaluer, puis de peser directement ce frottement »⁴⁸⁹. Comme l'explique Dwelshauvers-Dery⁴⁹⁰, on pourrait en théorie estimer le frottement par une corrélation (« loi de frottement »). Cependant, cette loi de frottement, dans laquelle la force de frottement est proportionnelle à un coefficient de frottement et à la pression normale, n'est pas utilisable en pratique. On doit faire appel à un subterfuge pour mesurer la force de frottement. « C'est pour cela que Mr. De Prony a pris la disposition suivante : je ferai équilibre à la force F égale et directement opposée au frottement a-t-il dit au moyen d'un effort que je saurai mesurer ».

Le principe détaillé du fonctionnement du frein de Prony est expliqué au moyen de la Figure 5-7⁴⁹¹. Une poulie P est calée sur l'arbre A de la machine à vapeur. La poulie est prise entre deux sabots en bois S et S' . Au moyen de boulons et d'écrous, on ajuste le serrage.

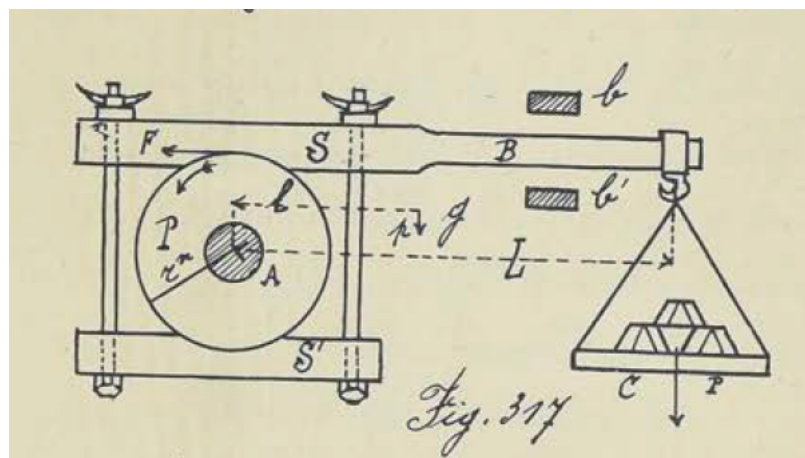


Figure 5-7 : Représentation schématique d'un frein de Prony. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, Année académique 1905-1906, p. 294.

Le sabot supérieur est prolongé par un bras B . Au bout de ce bras est suspendu le plateau d'une balance C sur lequel sont placés des poids P . Le déplacement du bras B est limité par deux butées b et

⁴⁸⁸ H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 292.

⁴⁸⁹ Jacques BUCHETTI, *Guide pour l'essai des machines à vapeur... vapeur*, Paris, Bernard Tignol, 1891, p. 164.

⁴⁹⁰ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

⁴⁹¹ Nous reprenons la description de son principe de fonctionnement du cours de Mécanique appliquée de Hubert que nous compléterons de différentes sources. Voir H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 294-299.

b' . On ajuste le serrage de manière à reproduire la même vitesse à l'arbre que celle obtenue par une machine entraînant des appareils. Le travail utile \mathcal{T}_u est donc converti en travail du frottement du frein et au final en chaleur. Pour éviter que le bras rentre en contact avec la butée b , il faut charger le plateau. On ajuste les poids de manière à obtenir l'équilibre. F représente l'effort qui appliqué tangentiellement à la circonférence de la poulie remplacerait les frottements. L est la distance horizontale entre le centre de l'arbre A et la verticale passant par le point d'attache du plateau. Le poids du frein est p et la distance de son centre de gravité à l'axe est l .

A l'équilibre du frein, la somme des moments des forces (par rapport à A) est nulle

$$F \cdot r - P \cdot L - p \cdot l = 0$$

On peut en déduire la puissance utile N [BHP], donnée en fonction de la vitesse n [tours par minute] par

$$N = \frac{2 \pi n (PL + pl)}{60 \cdot 75}$$

5.2.2.2 Utilisation du frein de Prony dans les différents laboratoires (de 1888 à 1937)

Le problème du frein présenté précédemment est qu'il n'est pas stable. La variation du moment du poids P est inverse à celle qui devrait rétablir l'équilibre si l'intensité du frottement augmente ou diminue. Dans le Laboratoire de Liège, ce problème de stabilité du frein a été solutionné en renversant le plateau du frein⁴⁹². Ainsi, le bras qui porte le plateau constitue le prolongement du sabot inférieur. Par conséquent, la variation du moment du poids tend à rétablir l'équilibre. A la Figure 5-8 présentant le frein de Prony du Laboratoire de Liège, la graduation i permet de mesurer l'inclinaison du système et calculer la longueur des bras de levier L et l du contrepois et du poids du frein.

⁴⁹² H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée I*, ULiège Library, MS4336, p. 296.

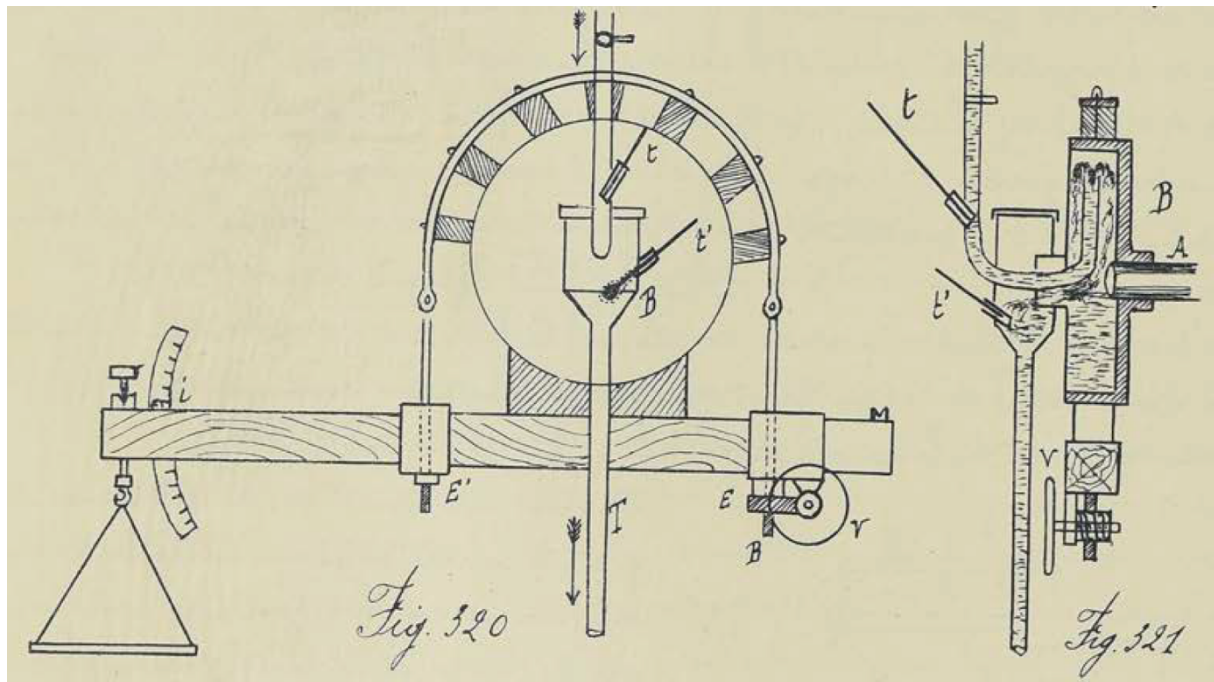


Figure 5-8 : Frein de Prony du Laboratoire de mécanique de Liège. Dans H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, Année académique 1905-1906, p. 296.

D'autres modifications ont été apportées. Notamment, la mâchoire supérieure est à présent composée d'une série de frottoirs en bois qui épousent la forme de la poulie. Les frottoirs sont attachés à une bande d'acier qui est fixée au bras en deux points au moyen de boulons traversants. Les frottoirs sont lubrifiés par de la graisse⁴⁹³. L'écrou E' est fixe. La surface extérieure de l'écrou E présente la « forme d'une roue dentée hélicoïdale et engrène avec une vis sans fin commandée par un volant V ». Ainsi, chaque tour de volant provoque une variation de la tension du frein (et donc du frottement) bien précise.

La Figure 5-9 donne une représentation schématique du frein seul (sans sa poulie), avec positionnement de son centre de gravité G_0 . Il s'agit du frein du Laboratoire de mécanique de Liège. L'abscisse du centre de gravité a été déterminée en plaçant le frein renversé sur un couteau placé à l'aplomb de l'axe 0 et en équilibrant le frein en plaçant des poids au point J (point de suspension du coutant portant le plateau)⁴⁹⁴. La charge d'équilibrage est de 3,579 kg et la masse entière du frein est de 178,278 kg.

⁴⁹³ Buchetti mentionne la possibilité d'utiliser un filet d'eau contenant 10% de savon noir dissous ou de l'huile, de la suif ou du saindoux. Voir Jacques BUCHETTI, *Guide pour l'essai des machines à vapeur... vapeur*, Paris, Bernard Tignol, 1891, p. 166.

⁴⁹⁴ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902, p. 37.

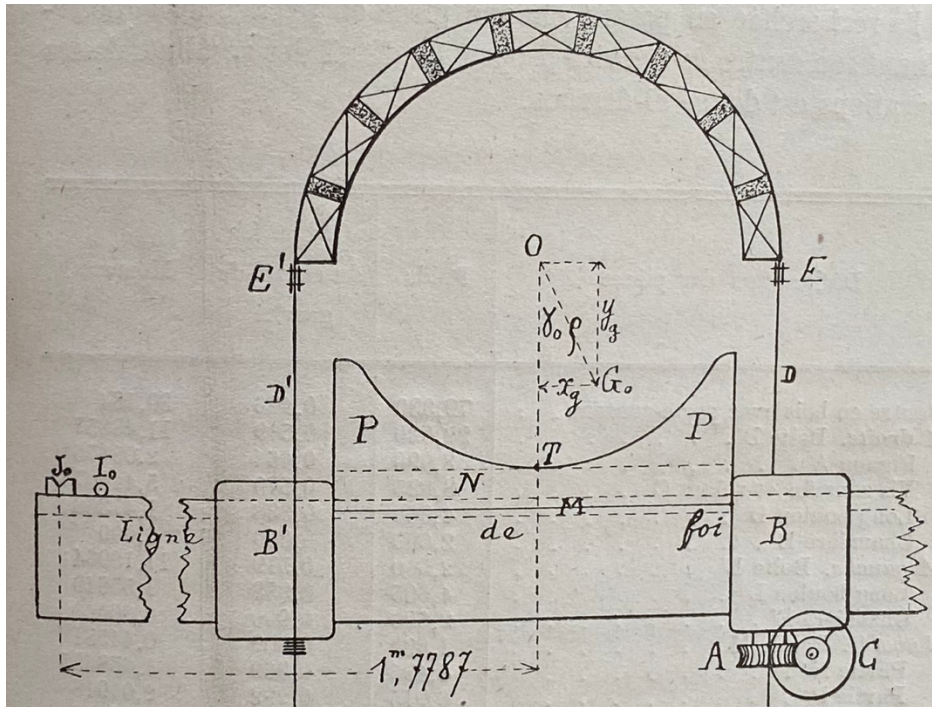


Figure 5-9 : Représentation graphique du frein seul (sans sa poulie). Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1902, p. 37.

La machine du Laboratoire de Jemeppe était déjà équipée d'un frein de Prony. Son accouplement à l'arbre de la machine à vapeur a été présenté à la Figure 2-8. La Figure 5-10 donne deux représentations schématiques du frein⁴⁹⁵. Dans la figure du bas, F^K [kilos] représente la résistance par frottement qui s'oppose au mouvement de la poulie, R^m [mètres] désigne le rayon de la poulie du frein, α des écrous, β des arrêts en bois qui empêchent le frein d'être entraîné par la poulie, γ un dynamomètre à ressort (que de Prony substitue aux arrêts en bois) et L est la longueur de la perpendiculaire à la direction $\delta\epsilon$ de l'effort Q passant par A et rejoignant la ligne $\delta\epsilon$.

A l'équilibre, le moment de l'effort Q^K [kilos] par rapport à l'axe A exercé par le dynamomètre est égal à celui de la force F égale et directement opposée au frottement. Ainsi $(QL)^{Km} = (FR)^{Km}$ et le travail du frein pour un tour de la machine est $(2\pi QL)^{Km}$. En réalité, dans le Laboratoire de Jemeppe, le dynamomètre a été remplacé par un plateau de balance supportant des poids et dont on connaît le bras de levier lorsque la poutre est horizontale.

Les dimensions du frein de Jemeppe sont données à la Figure 5-10 haut. Lorsque la poutre est horizontale, la distance entre la verticale passant par le centre de la poulie et la verticale passant par la chappe où est suspendu le couteau du plateau de la balance est de 1,782 m. Le rayon de la poulie est de

⁴⁹⁵ Nous reprenons les descriptions de ces figures de Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

0,35 m. Le poids du plateau de la balance et « de ses agrès » est de 10,1 kg. La poutre a préalablement été placée sur un couteau α pour en vérifier l'équilibre. Il s'avère qu'il a fallu placer à gauche (et non pas à droite) un poids de 3,4 kg à une distance de 1,782 m pour obtenir l'équilibre. Le poids mort du plateau est de 6,7 kg et non pas 10,1 kg. Lorsque la pointe du couteau de la balance se déplace d'une hauteur h de A en A' , on peut calculer l'augmentation du bras de levier.

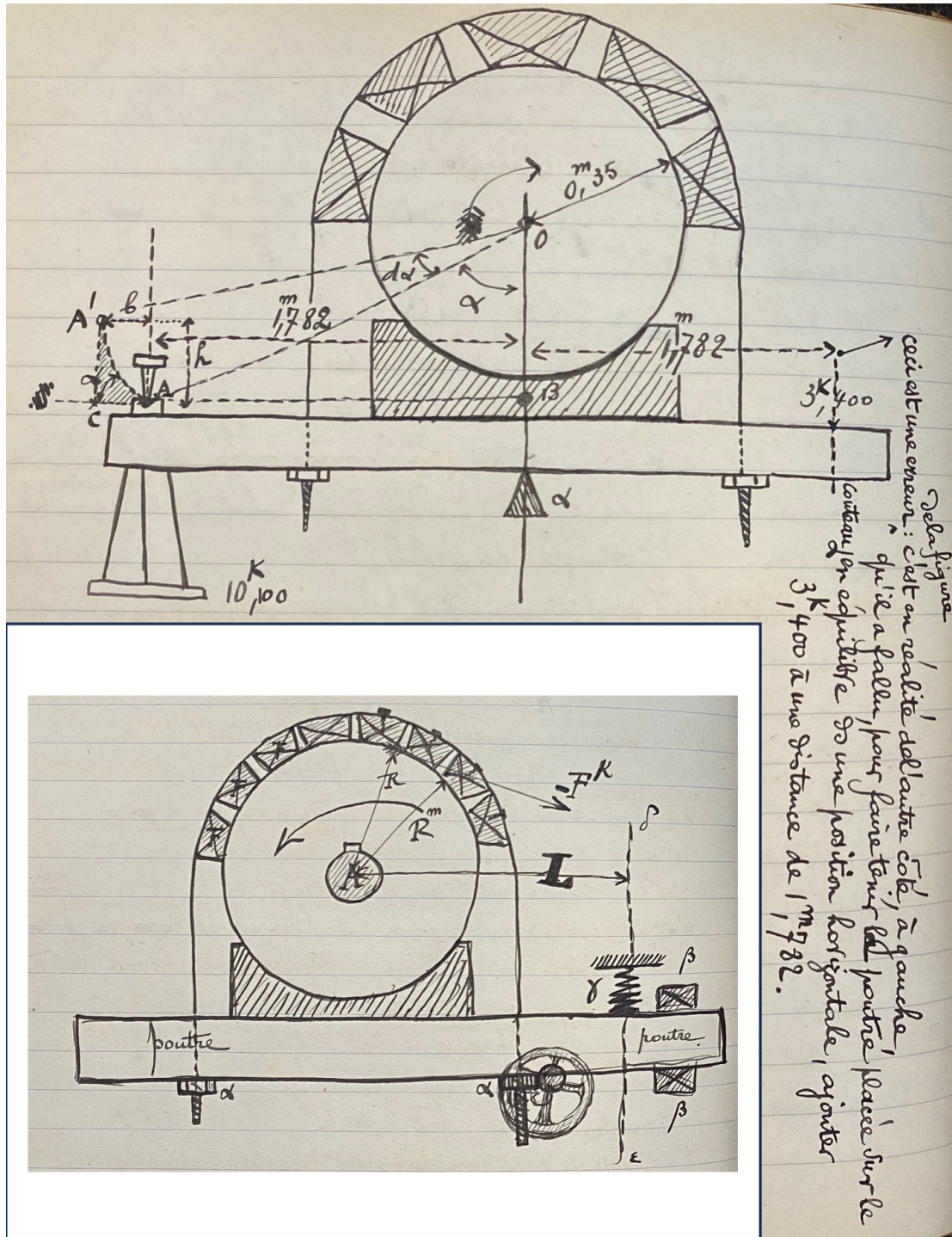


Figure 5-10 : Frein de Prony du Laboratoire de Jemeppe. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488, ca. 1890.

A la Figure 2-11 et à la Figure 2-12, on peut distinguer le frein de Prony installé au Laboratoire de Mécanique appliquée (Laboratoire de Liège). A la Figure 2-12, on peut distinguer en particulier le système de refroidissement du frein qui sera décrit plus loin et dont une représentation schématique est donnée à la Figure 5-8 (droite). La Figure 2-19 fournit une vue du frein de Prony de la machine à vapeur installée dans le Nouveau Laboratoire de Thermodynamique (vers 1937). Cette photographie est particulièrement intéressante, car on peut distinguer la poutre du frein.

5.2.2.3 Étude calorimétrique du frein

Afin d'assurer la régularité de la marche du frein⁴⁹⁶, la température de sa poulie doit en effet être constante. Il est donc nécessaire d'évacuer la chaleur dégagée par les frottements⁴⁹⁷. La Figure 5-8 (figure de droite) et la Figure 5-13 donnent des représentations des éléments constitutifs du système de refroidissement de la poulie du frein. La poulie *B* constitue une boîte creuse. Elle comporte une buselure par laquelle rentre un tube courbé qui amène de l'eau froide. L'eau remplit la poulie *B* et ressort par la buselure et part à l'égout par le tuyau *T*. A la Figure 5-13, *C* désigne un trop-plein et *D* la trémie qui recueille l'eau.

Le débit (volumique) d'eau de refroidissement du frein est mesuré au moyen d'un orifice circulaire par lequel s'écoule l'eau. Le débit d'eau est fonction du niveau d'eau par rapport au point le plus bas de l'orifice. Ce niveau d'eau est mesuré au moyen d'un flotteur. Nous détaillerons cette mesure à la section 5.2.6.

Les tuyaux d'amenée et de retour de l'eau sont équipés de tubulures dans lesquelles on a placé des thermomètres ((*t* et *t'*) ou (*t_i* et *t_f*)). A la Figure 5-13, *a* désigne un « dé » dans lequel est placé le thermomètre.

De manière très intéressante, Hubert montre⁴⁹⁸ comment le bilan sur l'eau de refroidissement permet de retrouver la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur *E* (si on néglige la chaleur rayonnée par le frein et si la poulie du frein atteint le régime de température).

$$M(q_2 - q_1)E = N \text{ 75}$$

⁴⁹⁶ Jacques BUCHETTI, *Guide pour l'essai des machines à vapeur... vapeur*, Paris, Bernard Tignol, 1891, p. 167.

⁴⁹⁷ Nous reprenons la description du refroidissement du frein du cours de Mécanique appliquée de Hubert et André, mais aussi des Données relatives à la machine à vapeur de Dwelshauvers-Dery. Voir H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 297 et voir Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902, p. 44-61.

⁴⁹⁸ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 298.

Avec $M [kg s^{-1}]$ le poids d'eau passé par la poulie par seconde, q_2 et q_1 les chaleurs du kg estimées grâce aux mesures des thermomètres t et t' (ou t_i et t_f) et $N [chevaux]$ la puissance utile. On retrouve que E est proche de 426. Hubert note qu'il est indispensable que les valeurs des températures t et t' soient évaluées avec précision, idéalement en 1/100 de degré.

5.2.2.4 Autres utilisations du frein

Le frein de Prony a été également utilisé par Hubert pour tester un moteur de 600 chevaux à gaz de haut-fourneaux construit par Cockerill⁴⁹⁹.

La mesure du travail moteur et du travail utile permet de déduire le rendement organique $\mathcal{T}_u/\mathcal{T}_m$. Il peut dépasser 90% pour les moteurs de grande puissance bien soignés⁵⁰⁰.

5.2.3 La mesure du travail des résistances passives

Hubert explique que le travail \mathcal{T}_f peut être mesuré en faisant marcher la machine à vapeur ou le moteur au gaz à vide⁵⁰¹. Dans ce cas, le travail indiqué est égal au travail des résistances passives. Il rappelle que la théorie de Pambour supposait \mathcal{T}_f proportionnel à \mathcal{T}_u mais que Thurston a établi que \mathcal{T}_f est à peu près indépendant de \mathcal{T}_u . Selon de Pambour⁵⁰², $\mathcal{T}_m - (1 + \delta)\mathcal{T}_u = \mathcal{T}_f = 2\pi RF$. On peut ainsi déduire δ en mesurant F par un essai à vide de la machine. On apprend que vers 1888, un essai à vide de la machine de Jemeppe n'a pas encore été réalisé et on suppose que $\delta = 0,14$ selon de Pambour.

5.2.4 La mesure des pressions au moyen d'un manomètre

Au Laboratoire de Jemeppe, vers 1888, on utilisait un manomètre à mercure à air libre pour mesurer la pression de la vapeur dans la chaudière⁵⁰³. Un dispositif similaire était utilisé au Laboratoire de Liège après 1897. Notons qu'à Jemeppe, un manomètre métallique indiquant la pression relative en atmosphères était également utilisé. La pression atmosphérique était quant à elle donnée par un baromètre.

⁴⁹⁹ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 299.

⁵⁰⁰ *Ibid.*, p. 300.

⁵⁰¹ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4335, p. 303 et 319.

⁵⁰² Dans cette équation, \mathcal{T}_f est « le travail des frottements inhérents à la machine marchant à vide ». Voir Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4489, ca. 1890.

⁵⁰³ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889, ff. 6.

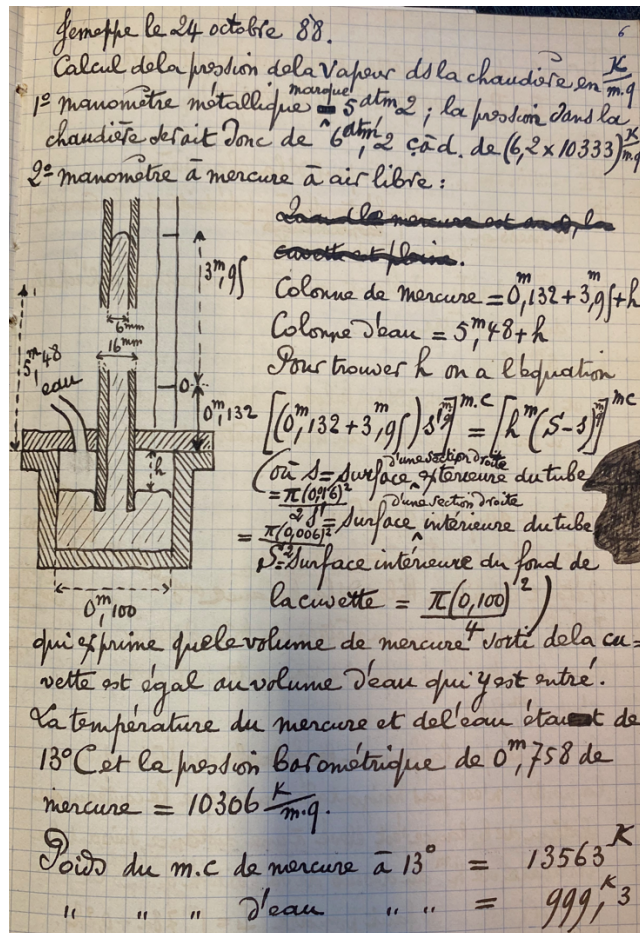


Figure 5-11 : Manomètre à mercure à air libre du laboratoire de Jemeppe. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889, ff. 6.

Le livre des Données relatives à la machine à vapeur nous fournit une description détaillée du manomètre à mercure⁵⁰⁴. Le manomètre sert à mesurer la pression p régnant dans la chaudière. Il est relié à la chaudière par un tube CN . Le tube se remplit d'eau formant une colonne d'une hauteur h de 4,874 mètres au dessus du plan AB (dessous du couvercle de la cuvette circulaire). La hauteur H est celle du mercure au dessus du plan AB . Cette hauteur se déplace devant une échelle EE (dont le zéro est à 0,132 m au-dessus du plan AB). L'échelle est en sapin et son coefficient de dilatation dans la direction des fibres est suffisamment faible pour ne pas devoir tenir compte de la dilatation. Cependant, la température joue un rôle significatif sur le poids du mètre cube d'eau et de mercure, ce qui exige d'en mesurer la température moyenne au moyen d'un thermomètre t placé entre les tubes. Si δ et Δ désignent respectivement le poids du mètre cube d'eau et de mercure à la température t , l'égalité des pressions des colonnes d'eau et de mercure sur le plan FG s'écrit : $p + (h + h')\delta = p_0 + (H + h')\Delta$. La hauteur h' est déterminée en exprimant que le volume occupé par l'eau entrant dans la cuvette est égal à celui de mercure expulsé (sans la présence de l'eau, le mercure atteint le niveau AB) : $h' = 0,0037 H$.

⁵⁰⁴ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 82-84.

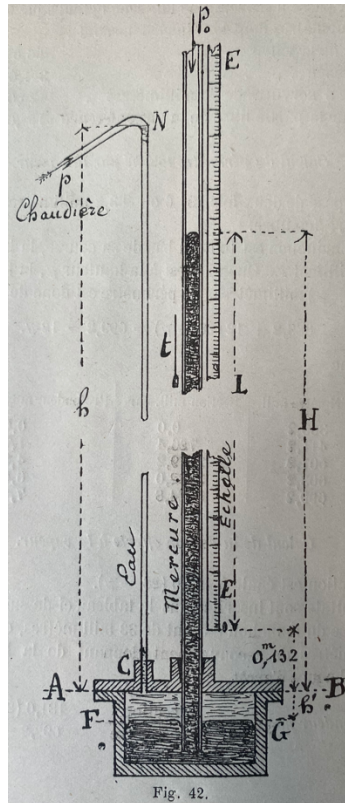


Figure 5-12 : Représentation schématique et dimensions du diagramme à mercure à air libre. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 82.

5.2.5 La mesure des températures

Dans les essais réalisés dans les années 1890, les températures sont mesurées avec des thermomètres au mercure. L'utilisation de thermocouples est arrivée au début du XX^e siècle. Nous y reviendrons plus tard. Ils sont précis au 1/10^e de degré. Les mesures sont également corrigées au moyen de la formule de Thorpe « pour tenir compte de la température de la colonne mercurielle qui ne plonge pas dans le dé baigné par la vapeur »⁵⁰⁵.

On apprend que les thermomètres ont été tarés par le *Physikalisch Technische Reichsanstalt* de Berlin, un centre national de métrologie créé en 1887 à l'initiative et sur la base des idées de Werner von Siemens et Hermann von Helmholtz⁵⁰⁶.

⁵⁰⁵ H. HUBERT et C. ANDRE, *Mécanique Appliquée 1*, ULiège Library, MS4336, p. 404.

⁵⁰⁶ <https://www.ptb.de/cms/en.html> consulté le 3 août 2023

5.2.6 La mesure des débits en volume

5.2.6.1 La mesure du débit d'eau de refroidissement du frein

5.2.6.1.1 Description du dispositif

Le débit d'eau de refroidissement du frein est mesuré au moyen d'un bac (F à la Figure 5-13) équipé de chicanes (pour amortir la vitesse et obtenir une nappe horizontale et tranquille) et d'un orifice circulaire en mince paroi (O à la Figure 5-13) par lequel l'eau se déverse. Le diamètre de cet orifice a été minutieusement mesuré et est de 0,020236 m. On mesure la hauteur du niveau d'eau par rapport au point le plus bas de l'orifice au moyen d'un flotteur (au dixième de millimètre près si possible). On peut déduire le débit en volume. Au moyen d'un thermomètre placé dans le bac (t_b à la Figure 5-13), on déduit le poids du mètre cube d'eau M et donc le poids d'eau [kg/s] qui passe dans la poulie par seconde. Le débit en volume est donné par la formule bien connue

$$m\pi r^2 \sqrt{2g(h' - r)}$$

Avec m le « coefficient de dépense », h' la hauteur du plan d'eau par rapport au point le plus bas de l'orifice et r le rayon de l'orifice. Le coefficient m est proche de 0,62 mais varie avec la hauteur $h' - r$. Dès lors, l'orifice a été taré : Dwelshauvers-Dery et ses collaborateurs ont mesuré le débit pour des hauteurs h' variant entre 0,04 et 0,290 mètre (limites usuelles lors des expériences)⁵⁰⁷. La hauteur h' est mesurée au moyen d'un flotteur H visible à la Figure 5-13. Ce flotteur est « composé d'un vaisseau cylindrique H en cuivre muni au centre d'un mât léger disposé suivant l'axe vertical et portant une échelle L divisée en millimètres qu'on peut faire glisser le long du mât et fixer en diverses positions suivant les besoins ». L'échelle monte et descend devant une pointe fixe horizontale K .

⁵⁰⁷ Nous ne détaillerons pas la méthode de tarage. Le lecteur intéressé consultera Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902, p. 46-49.

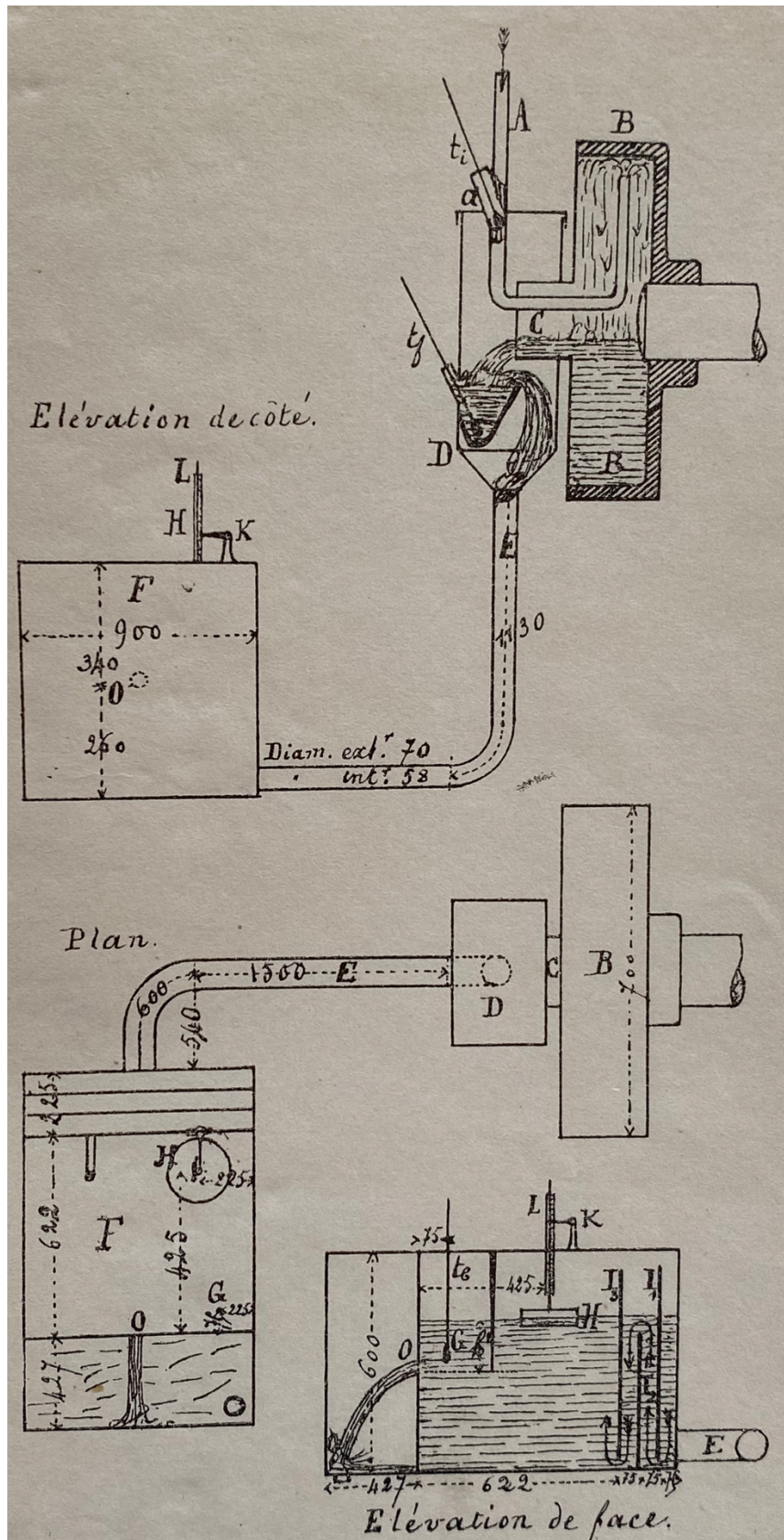


Figure 5-13 : Représentation schématique des éléments constituant le système de refroidissement de la poulie B du frein. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, Annexes

Le réglage⁵⁰⁸ de la pointe horizontale et du flotteur est important pour la précision de la mesure. Lorsque le bac est vide, on ajustera la position d'un pointe fine verticale M (au moyen d'une vis) de sorte qu'elle atteigne la position la plus basse de l'orifice. Pour ce faire, on utilisera une règle QQ' et un niveau à bulle d'air N . Une fois la position de M réglée, on remplira le bac très lentement jusqu'à ce que le plan d'eau affleure précisément la pointe M . Pour obtenir cette position, on finira de remplir le bac goutte à goutte. Aussi, afin que le plan d'eau ne soit agité par l'eau entrante, le bac sera muni de chicanes $I1$, $I2$ et $I3$. Lorsque l'eau atteint précisément la pointe M , on ajuste l'aiguille horizontale K de sorte qu'elle se positionne précisément devant le zéro. La mesure de la température de l'eau dans le bac est importante pour tenir compte de son influence sur la poussée d'Archimède (entre 4 et 30°C, il peut y avoir une variation de hauteur de plus d'un dixième de millimètre).

5.2.6.1.2 *Le tarage de l'orifice circulaire*

Nous avons estimé qu'il était intéressant de retranscrire dans ce travail la description de la méthode expérimentale employée pour tarer l'orifice de mesure du débit (c'est-à-dire la mesure expérimentale de la relation entre le coefficient de dépense m et la hauteur h' du niveau d'eau dans le bac)⁵⁰⁹. La méthode mise au point par Dwelshauvers-Dery atteste du soin tout particulier et de la rigueur employés lors des travaux expérimentaux.

A la Figure 5-14, B_1 désigne un grand réservoir de 27 mètres cubes qui assure toute la distribution d'eau du laboratoire. Il est posé sur une colonnade de sorte que son fond soit situé à 2,60 m du sol. Il est alimenté en eau de ville par le tuyau T_1 muni d'un robinet R_1 . On mesure le niveau de l'eau au moyen d'un flotteur F_1 qui déplace (au moyen d'une ficelle et de deux poulies) un indice I_1 devant une échelle E_1 . B_2 et B_3 sont en réalité un seul bac Il sert aussi au jaugeage de l'eau de condensation

Le bac B_2 est alimenté par le réservoir principal au moyen du tuyau T_2 équipé d'un robinet R_2 . Le niveau du réservoir est mesuré au moyen d'un flotteur F_2 qui déplace son échelle E_2 devant une pointe fixe I_2 (« index »). La pointe P est positionnée au niveau le plus bas de l'orifice, ce qui permet d'ajuster le zéro de l'échelle E_2 . La pointe I_2 est en effet une aiguille très fine dont on peut ajuster précisément la hauteur au moyen de vis. L'index I_2 est mesuré au moyen d'un cathétomètre.

⁵⁰⁸ Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902, p. 45-46.

⁵⁰⁹ Nous retranscrivons cette méthode de Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902, p. 46-60.

L'orifice circulaire en mince paroi (paroi biseautée) est percé dans une plaque qui peut être logée dans la paroi A . Les chicanes C , C' et C'' imposent à l'eau entrant dans le bac B_2 l'écoulement indiqué par les flèches, ce qui permet d'obtenir un plan d'eau parfaitement uni.

Le bac B_3 est un bac jaugeur. Le niveau N_3 de l'eau y est mesuré au moyen d'un tube de niveau muni de l'échelle E_3 . Le bac B_3 peut être vidé au moyen d'une soupape de fond S actionnée par une manivelle M . L'étanchéité de cette soupape a été vérifiée en laissant le bac rempli pendant 7 jours et en observant la variation (négligeable) du niveau de l'eau. La graduation de l'échelle E_3 a été réalisée par empotement. A cet effet une caisse rectangulaire de volume connu, appelée « bac alimentaire » est utilisée. Le bac B_3 est rempli en déversant de 1 à 5 caisses et en partant de graduations initiales différentes, ce qui permet d'obtenir une graduation suffisamment fine de l'échelle E_3 . Le volume d'une caisse est mesuré avec précision en remplissant la caisse jusqu'à un niveau mesuré par une pointe, en pesant l'eau en plaçant la caisse sur un plateau de balance et en mesurant la température de l'eau pour en déterminer la masse volumique (« poids du mètre cube d'eau »). La graduation E_3 est donnée entre 30 (0 mètre cube) et 710 mm (1,026494 mètre cube), par pas de 10 mm.

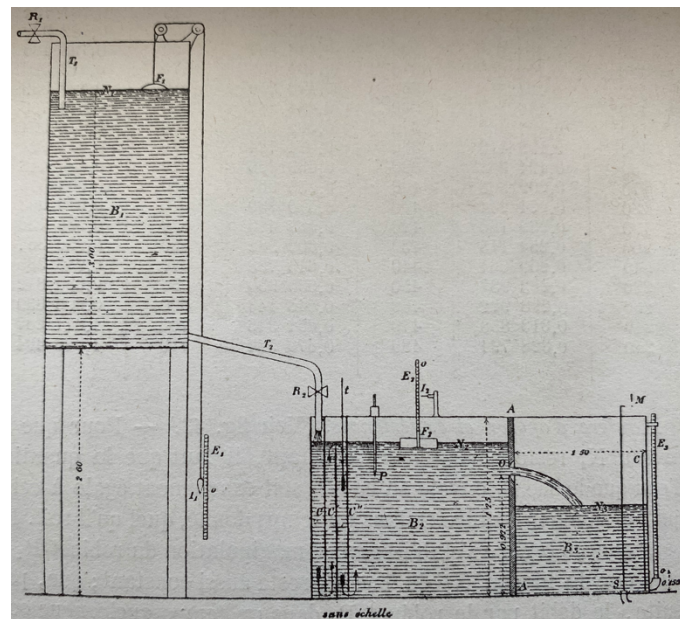


Figure 5-14 : Vue en élévation de « l'appareil employé pour tarer l'orifice circulaire en mince paroi du frein ». Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 52.

L'expérience de la calibration est menée de la manière suivante. L'observateur manipule le robinet R_2 de manière à obtenir approximativement la hauteur h' recherchée. Il manipule ensuite le robinet R_1 de manière à obtenir des niveaux N_1 et N_2 qui ne varient plus dans le temps. Sous cette condition de régime établi, le débit au travers de l'orifice O devient constant. Au moyen d'un chronographe, l'observateur mesure toutes les 5 minutes le niveau de l'échelle E_3 . Une des difficultés

rencontrées est associé au robinet R_1 : pour une ouverture donnée, le débit peut varier en raison des prises d'eau dans le voisinage.

Le coefficient de dépense est donné par $m = Q/Q'$, avec $Q' = 3601,317\sqrt{2gh}$ la masse d'eau théorique qui passe au travers de l'orifice après 1 heure mesurée par le chronographe (dont on sait qu'il retarde de 1,317 seconde par heure) et Q la masse d'eau mesurée au moyen du chronographe et de la lecture du niveau N_3 .

Sur base de 15 essais réalisés en mai et juin 1895, Dwelshauvers-Dery a pu corréler le coefficient de dépense (variant entre 0,62763 et 0,64849) à la hauteur h' .

5.2.6.2 La mesure du débit d'eau de refroidissement du condenseur

5.2.6.2.1 Description du dispositif

Le débit d'eau froide (eau de refroidissement du condenseur) est mesuré au moyen d'un bac jaugeur équipé d'un déversoir⁵¹⁰. Ce bac compartimenté est celui utilisé pour la calibration de l'orifice utilisé pour la mesure du débit d'eau de refroidissement du frein. Une représentation schématique, fournissant les dimensions est donnée à la Figure 5-15.

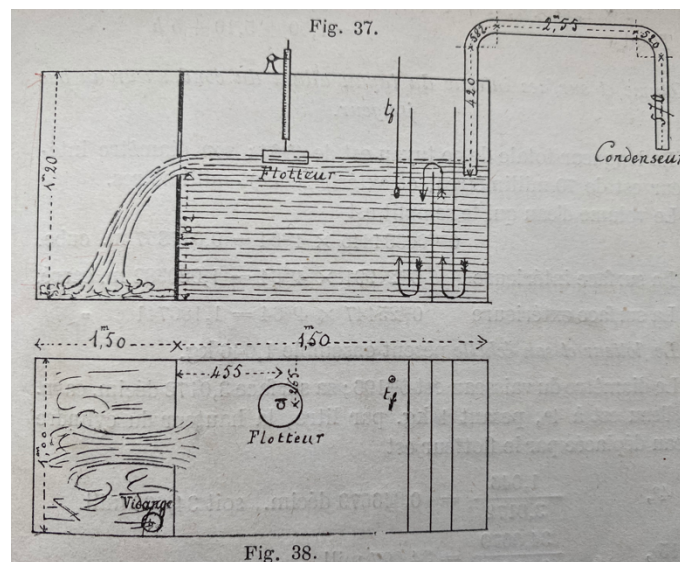


Figure 5-15 : Représentation schématique du bac jaugeur du condenseur. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 65.

⁵¹⁰ Nous reprenons la description de Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, p. 65-70.

Le déversoir est de forme rectangulaire avec une base de 0,075 m. Le seuil est situé à 1,02 m au-dessus du fond du bac. Un flotteur mesure la hauteur h [m] du niveau d'eau par rapport au seuil du déversoir. Son échelle indique donc le zéro lorsque le niveau de l'eau affleure le seuil du déversoir. Le flotteur est un vaisseau d'une surface de 3,0172 décimètres carrés. En tenant compte de son échelle, il pèse 1,046 kg. La dépense par heure (le volume après une heure ou « débit par heure ») est donnée par

$$Q = 3600 \frac{2}{3} l \sqrt{2g} h^{3/2} \times m = 797,22 h^{3/2} \times m \left[\frac{m^3}{\text{heure}} \right]$$

Avec m [-] le coefficient de dépense, $l = 0,075$ [m] la base du déversoir et h [m] la hauteur du niveau de l'eau par rapport au seuil du déversoir.

La longueur du tuyau reliant le condenseur au bac jaugeur est de 4,64 m. Ses diamètres intérieur et extérieur sont respectivement de 70 et 81 millimètres. Étant donné l'importante longueur, la photographie de la Figure 2-11 pourrait indiquer que le bac jaugeur se trouve de l'autre côté de la cloison vitrée.

5.2.6.2.2 *Le tarage du déversoir rectangulaire*

Le tarage du déversoir rectangulaire consiste à mesurer expérimentalement la relation entre m et h . Pour ce faire, les observateurs utilisent le compartiment jaugé du bac dans lequel se déverse l'eau du déversoir. Ce compartiment a été décrit précédemment. Il est équipé d'un tube indicateur donnant le volume d'eau dans le compartiment. Les observateurs ont mesuré le temps qui sépare deux passages successifs du niveau de l'eau entre 0 et 0,7 mètre par tranche de 0,1 mètre. Le temps écoulé pour passer de 0,6 à 0,7 mètre a été retenu. Il y correspond une variation de volume d'eau de 0,1510467 m³. Le temps est mesuré par un « *chronographe à rattrapante [sic] parfaitement réglé* ». Cette expérience est répétée pour différentes hauteurs du flotteur.

Le coefficient de dépense varie approximativement entre 0,6 et 0,63. Les points ont été placés sur un diagramme à grande échelle (une feuille de papier de 30 centimètres suffisait). Une courbe moyenne a été tracée pour s'affranchir des « *sinuosités inadmissibles* ». La courbe permet de déterminer m [-] et donc le débit Q [m³h⁻¹] pour des hauteurs h variant millimètre par millimètre entre 10 et 110 millimètres. La courbe passe presque exactement par 8 des points de mesure et « *ne s'écarte que très peu* » des 18 autres points.

5.2.6.3 La mesure du temps

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, la mesure du temps est essentielle dans l'étude expérimentale des machines thermiques. Mumford émet d'ailleurs l'idée que « *La machine-clé de l'âge industriel moderne* » est l'horloge et non pas la machine à vapeur⁵¹¹.

5.3 Analyses d'essais de machines à vapeur de la fin du XIX^e siècle

De manière à bien comprendre l'objectif d'un essai de machine à vapeur, nous reprenons ici la description et l'analyse de deux essais : un essai réalisé au Laboratoire de Jemeppe et un essai réalisé au Laboratoire de Liège.

5.3.1 Les essais du Laboratoire de Jemeppe

Le cahier de Laboratoire de Jemeppe décrit plusieurs essais, et leur analyse, réalisés les 24 octobre, 31 octobre, 8 novembre et 15 novembre 1888. Nous avons analysée l'essai du 15 novembre 88 qui semble être le plus complet en termes d'informations à notre disposition.

L'essai démarre à 8h50 le jeudi 15 novembre 1888 et s'arrête à 10h50. La charge sur le frein est de 100 kg. La pression atmosphérique, mesurée avec un baromètre, est de 764 mm de mercure. Les observateurs notent le niveau de l'eau dans la chaudière au début et à la fin de l'essai.

La pression de la chaudière est mesurée au moyen du manomètre à mercure à air libre décrit à la section 5.2.4, mais aussi au moyen d'un manomètre métallique.

Les pressions à l'intérieur du cylindre, à gauche et à droite du piston, sont mesurées avec des indicateurs. Il s'agit probablement d'un indicateur de type Richards. Le diagramme d'indicateur de gauche est reproduit à la Figure 5-16. L'observateur est G. Beer. Le numéro du ressort est indiqué ainsi que sa tare. Les surfaces des diagrammes d'indicateurs (de gauche et de droite) sont mesurées au moyen d'un planimètre. A gauche, la surface est de 2350 mm².

⁵¹¹ Lewis MUMFORD, *Technics and Civilization, op.cit.*, p. 38. La difficulté à reproduire un mouvement régulier fut levée par l'adoption du ressort à spirale dans la seconde moitié du XVII^e siècle et l'utilisation d'acier au creuset pour leur fabrication vers le milieu du XVIII^e siècle (d'après Bertrand GILLE (dir.), *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard, 1978, p. 703). L'utilisation de l'horloge mécanique s'est alors répandue en dehors des monastères (où elle fut inventée) et a régulé la vie des ouvriers et des marchands. Pour Mumford, elle a rendu possible la quantification précise de l'énergie, la standardisation et aussi l'automatisation. Notons aussi que l'horloge a servi de modèle à d'autres machines (notamment pour les engrenages). Marc Bloch reprend la même idée que Mumford en déclarant que « *Ce fut l'horloge à contrepoids qui, peu à peu généralisée à partir du XIV^e siècle, habitua nos ancêtres à ordonner leur existence d'après les battements sans caprice d'un implacable mouvement matériel. La mécanisation de la durée naquit de la mécanisation de son compteur* » ; voir Marc BLOCH, « Technique et évolution sociale, réflexion d'un historien », dans : Jean Cassou (dir.) *L'homme la technique et la nature*, Rieder, 1938 (repris dans Marc Bloch *Mélanges historiques*, Paris, CNRS éditions, 2011, p. 836.

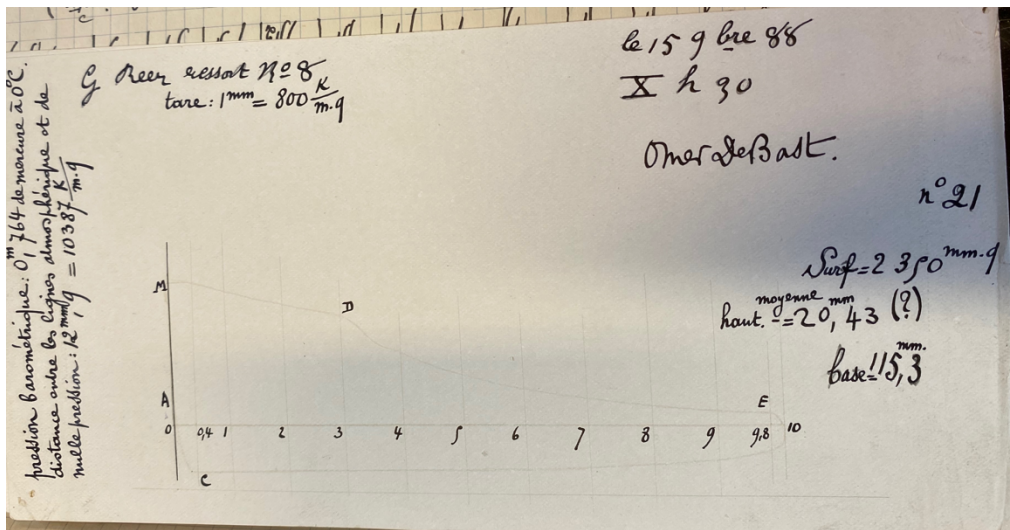


Figure 5-16 : Diagramme d'indicateur de gauche, essai du 15 novembre 1888. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889, ff. volant.

A partir des diagrammes d'indicateurs de gauche et de droite, un diagramme moyen a été déterminé et tracé sur du papier millimétré. L'aire du diagramme est ensuite déterminée probablement en additionnant des aires de rectangles, de trapèzes rectilignes et de trapèzes paraboliques⁵¹². Ainsi, le travail indiqué est de 720,09 kilogrammètres *par coup de piston*. Puisque le piston est à double effet, il y correspond un travail indiqué *par tour* de 1440,18 kilogrammètres.

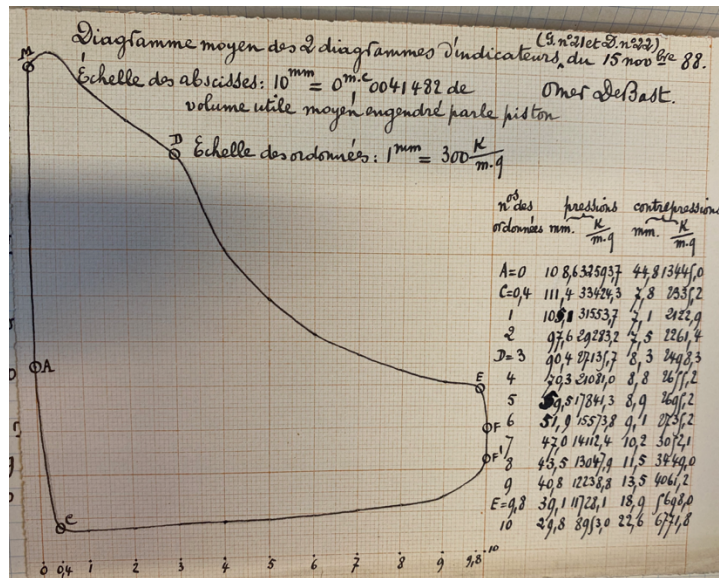


Figure 5-17 : « Diagramme moyen des 2 diagrammes d'indicateurs du 15 novembre 88 ». Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889, ff. volant.

⁵¹² Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894, p. 18-9.

Le compte-tours indique que la machine a décrit 7265 tours pendant l'essai, soit 14530 coups de piston puisque le piston est à double effet. Connaissant la durée de l'essai, on peut déduire le « travail »⁵¹³ en chevaux-vapeur, soit 19,38 chevaux.

Le travail au frein, par tour, est mesuré au moyen du frein de Prony décrit précédemment (section 5.2.2.2). Il est de 1194,684 kilogrammètres. Le rendement du mécanisme⁵¹⁴, défini comme le rapport du travail par tour au frein au travail indiqué par tour ($\mathcal{T}_u/2. \mathcal{T}_m$), est donc d'environ 83%.

Pour estimer la quantité d'eau qui est entrée dans le cylindre, les observateurs relèvent la quantité d'eau fournie à la chaudière par le « grand bac d'alimentation » (779,193 kilogrammes), ainsi que la variation de la quantité d'eau dans le réservoir cylindrique de la chaudière (elle passe de 635,239 à 644,804 kilogrammes) sur la durée de l'essai. La chaudière a donc fourni 769,628 kilogrammes d'eau vapeur et liquide (un « mélange de vapeur et d'eau »). Le bac du serpentín a recueilli 16,470 kilogrammes d'eau (liquide). La chaudière a donc fourni au cylindre 753,158 kilogrammes de vapeur sèche pendant la durée de l'essai, essai pour lequel il y a eu 14530 coups de piston. La quantité d'eau admise dans le cylindre par coups de piston est donc de 0,0518 kilogrammes.

La pression moyenne dans la chaudière pendant l'essai est de 61907,887 kilogrammes par mètre carré, ce qui correspond à une pression de 6,7 bars. La chaleur du kilogramme de vapeur saturée λ est de 655,045 calories par kilogramme. La chaleur Q qui entre dans le cylindre est donnée par $Q = M_a \lambda$ et est donc de 33,9540 calories par coup de piston.

Le volume d'eau qui s'écoule par seconde au condenseur est déterminé au moyen du déversoir. Connaissant la durée de l'essai et le nombre de coups de pistons, on peut déduire le volume écoulé par coup de piston soit 0,0011912 mètre cube. Le poids du mètre cube d'eau à la température moyenne du condenseur (température corrigée de 38,177°C) est de 993,004 kilogrammes. Le poids d'eau qui s'écoule au travers du déversoir par coup de piston est donc égal à 1,1828664 kilogrammes. Le poids d'eau froide M_e fourni au condenseur par coup de piston est donc égal à 1,1828664 – M_a , soit 1,1310664 kilogrammes. Cette quantité d'eau entre dans le condenseur à 11,6°C et en ressort à 38,177°C. On peut en déduire la chaleur C reçue par l'eau froide ($C = 30,10898757$ calories par coup de piston). La vapeur condensée quitte le condenseur à 38,177°C mélangée à l'eau froide. Elle possède encore une quantité de chaleur c égale à 1,9799514 calories par coup de piston. La chaleur totale K rejetée au condenseur est égale à $C + c$, soit 32,08893897 calories par kilogramme.

⁵¹³ On devrait plutôt parler de *puissance*.

⁵¹⁴ On l'appelle aussi rendement organique ou rendement mécanique, voir section. 5.2.2.4.

Le rayonnement extérieur E par coup de piston est estimé à 0,1707 calorie. Sur base de ces données, nous pouvons vérifier le bilan énergétique pour le système représenté en traits pointillés rouges à la Figure 5-18. Le résidu par coup de piston calculé par $Q - A \times T_u / 2 - E - K$ et exprimé en calories est tout à fait négligeable (0,8 pourcent de Q).

Le rendement de la machine à vapeur, défini par $A \times T_u / 2 Q$, est à 4,142%. Cette valeur est faible par rapport à la valeur maximale théorique.

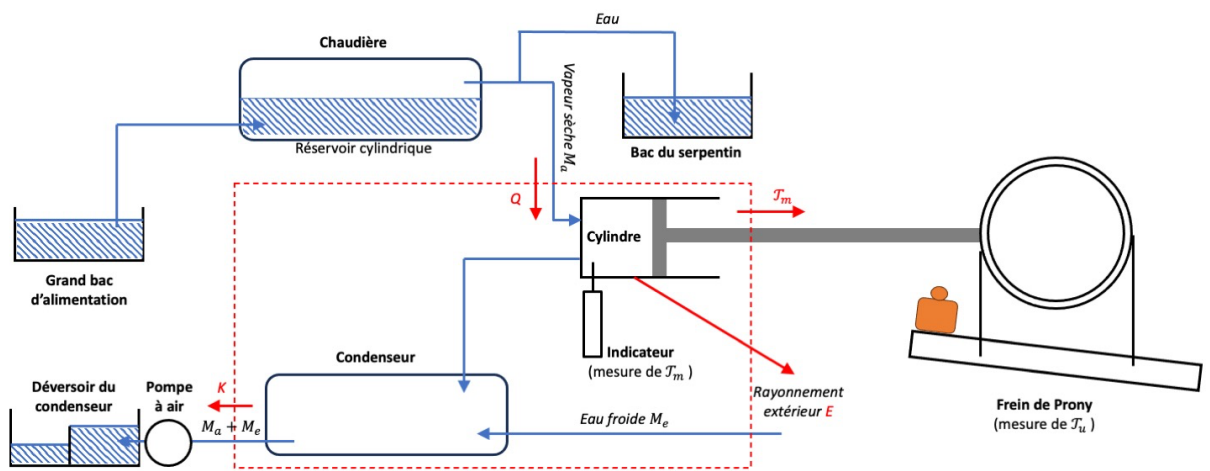


Figure 5-18 : Schéma de l'installation expérimentale du Laboratoire de Jemeppe

Comme nous l'avons vu précédemment (section 4.4.2), la force liée à l'inertie de la masse m peut être décrite. Si P désigne la pression résultante de la vapeur sur le piston, m la masse des pièces à mouvement de translation alternatif et φ l'accélération de la crosse de la bielle⁵¹⁵, cette force est égale à $P - m\varphi$. Le diagramme rectangulaire de $P - m\varphi$ peut par exemple être tracé (Figure 5-19).

⁵¹⁵ Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889, ff. 53.

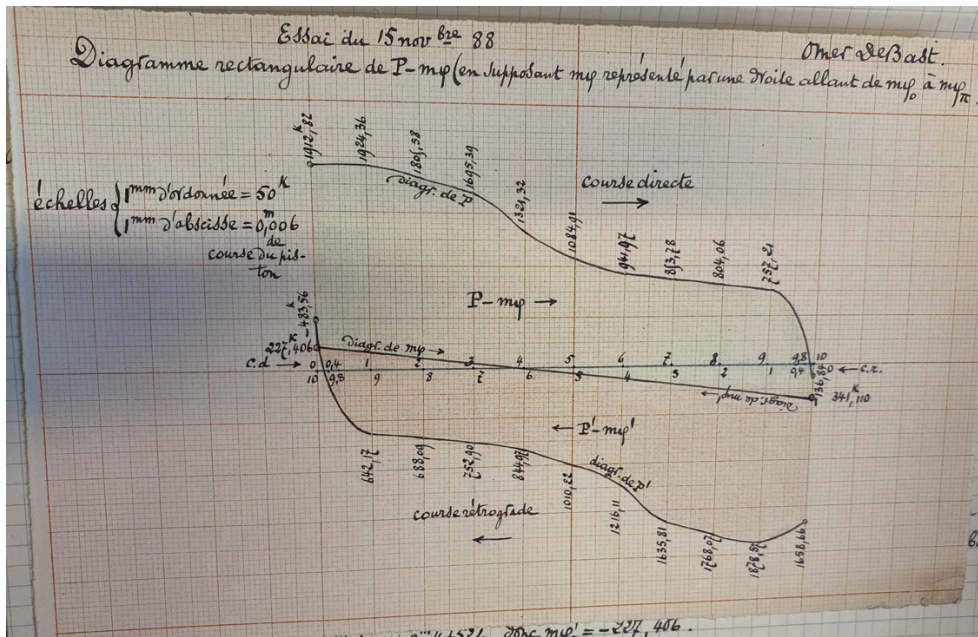


Figure 5-19 : « Diagramme rectangulaire de $P - m\phi$ », essai du 15 nov. 88. Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889, ff. volant.

L'utilisation du diagramme polaire a été introduite précédemment (section 4.4.2). Un tel diagramme, tracé pour l'essai du 15 novembre 1888 est montré à la Figure 5-20. F pourrait désigner les résistances passives et δ le coefficient proposé par de Pambour (voir section 5.2.3).

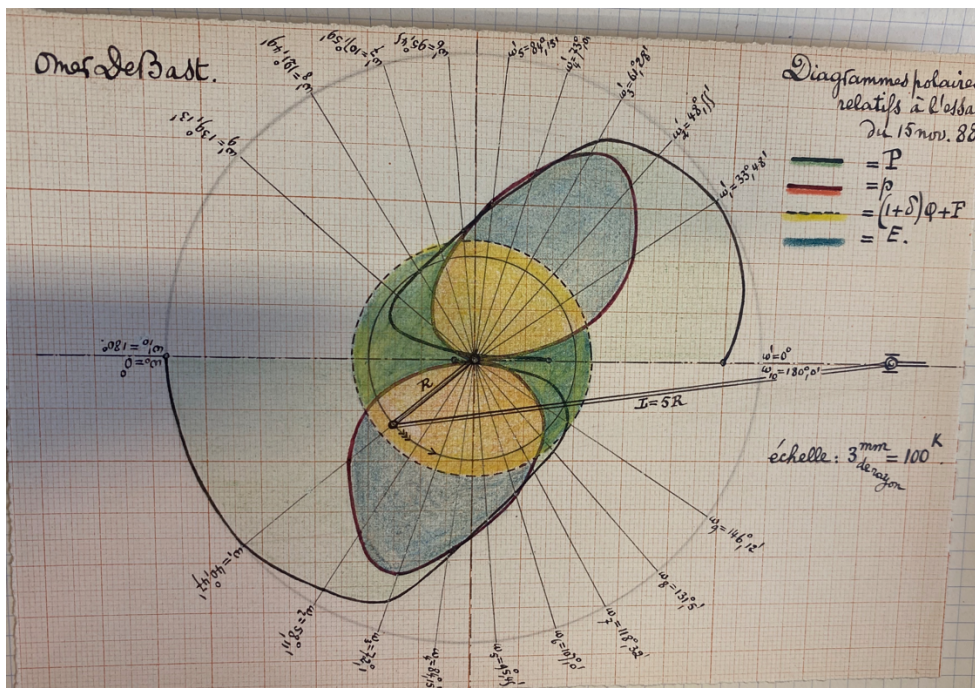


Figure 5-20 : « Diagrammes polaires relatifs à l'essai du 15 nov. 88 ». Dans Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889, ff. volant.

5.3.2 Les essais du Laboratoire de Liège

Nous avons également analysé un essai réalisé plus tard au Laboratoire de Liège. Comme nous l'avons vu à la section 2.11, le Laboratoire de Jemeppe a déménagé dans les murs de l'Université de Liège en 1892. La machine à vapeur à proprement parler est la même machine que celle de Jemeppe (machine à piston à double effet du constructeur Beer). La chaudière est également probablement la même (du constructeur De Naeyer). Par contre, la vapeur en sort surchauffée. Aussi, le condenseur n'est plus à injection, mais à surface.

L'essai réalisé date du 26 octobre 1893. Sa description est toute différente de celle de l'essai du 15 novembre 1888 au Laboratoire de Jemeppe. Alors que ce dernier est décrit dans des notes manuscrites (un « carnet d'observations »), l'essai réalisé à Liège est publié dans un document imprimé⁵¹⁶. On passe ainsi d'observations consignées dans un carnet probablement à des fins d'enseignement, à une description plus scientifique d'essais de machines à vapeur probablement destinée à être largement diffusée. La liste des observateurs et leur rôle ont été décrits à la section 3.2.3.

L'essai réalisée le 26 octobre 1893 est un essai « sans enveloppe ». Un essai avec enveloppe a été réalisé le 14 octobre 1893, mais nous ne l'avons pas analysé.

Comme pour les essais réalisés à Jemeppe, deux indicateurs permettent de mesurer les pressions sur les deux faces du piston. Les lignes horizontales et parallèles de pression atmosphérique et de nulle pression sont tracées. Pour chaque diagramme (gauche et droite), la pression moyenne est calculée (25044 kilogrammes par mètre carré à gauche et 25123 à droite, ce qui correspond à une pression moyenne de 25083,5). Le travail par coup de piston \mathcal{T}_m est égal au produit de cette pression moyenne par le volume utile engendré par le piston à chaque course (en mètres cubes), soit $\mathcal{T}_m = 25083,5 \times 0,0425 = 1066,05 \text{ km}$. La chaleur équivalente à ce travail est de 2,5084 calories.

De manière à calculer les travaux liés à la course directe (admission, détente, émission anticipée) et à la course rétrograde (émission, compression, admission anticipée), la méthode suivante est proposée⁵¹⁷. La base du diagramme est divisée en dix parties égales (numérotées de 0 à 10 pour la course utile et de 10 à 20 pour la contrepression). Les ordonnées sont mesurées aux 10^e de millimètres près. On rapporte dans un tableau les abscisses et ordonnées pour toute une série de points remarquables du diagramme. Connaissant la tare de chaque indicateur, les valeurs des ordonnées en millimètres peuvent

⁵¹⁶ Pour le premier, voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889. Pour le second, voir LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894.

⁵¹⁷ On retrouve une méthode similaire dans le Carnet d'observations du Laboratoire de Jemeppe en 1888. Voir Victor DWELSHAUVERS-DERY et Omer DE BAST, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889.

être converties en pression. Pour une même abscisse à gauche et à droite du piston, on calcule la pression moyenne. On peut alors « *surfacer les diverses portions du diagramme en les considérant comme des rectangles, des trapèzes ou des segments de parabole* »⁵¹⁸. En sommant ces travaux pris soit positivement soit négativement, on obtient un travail de 1063,77 km, ce qui est sensiblement égal à la valeur trouvée précédemment.

Tout comme pour l'essai de Jemeppe, les observateurs calculent un résidu sur les mesures, soit $Q - A \times T_m - E - K$. Ce résidu⁵¹⁹ est inférieur à 0,3 % de Q . Le rendement défini par $A \times T_m / Q$ est à 8,277%.

L'analyse de l'essai proposée par Dwelshauvers inclut une évaluation des échanges de chaleur entre les parois métalliques et la vapeur pendant les quatre périodes : admission, détente, émission et compression⁵²⁰. Les chaleurs échangées peuvent être calculées en exprimant les bilans d'énergie sur chacune des périodes, connaissant les énergies internes du fluide aux quatre points remarquables du cycle (début de la compression, début de l'admission, début de la détente et début de l'émission), connaissant les travaux liés aux quatre périodes (calculés au moyen du diagramme d'indicateur) et connaissant le poids de vapeur M_a admis par coup de piston. Une hypothèse est toutefois introduite : la vapeur est saturée au début de la compression, sans présence de liquide. Pendant la période d'admission, la vapeur cède de la chaleur (R_a) au métal. Pendant la détente, le métal restitue partiellement cette chaleur (R_d). Pendant l'émission, l'eau répandue en rosée sur le métal est vaporisée (R_e). Pendant la compression, ce sont les parois qui cèdent de la chaleur à la vapeur (R_c). La somme de toutes ces chaleurs échangées doit être égale à l'émission par rayonnement de la machine, ce que les bilans sur les mesures confirment. Ainsi, $E = R_f - R_e = R_c + R_a + R_d - R_e$, avec R_f la chaleur nette communiquée par la vapeur à la paroi. Dwelshauvers montre aussi que les chaleurs échangées sont un ordre de grandeur supérieures aux travaux. Il propose ensuite de tracer le diagramme des échanges. L'abscisse de ce diagramme représente le volume déplacé par le piston pendant chacune des périodes. Dans ce diagramme, représenté à la Figure 5-10, les chaleurs échangées pendant l'admission, la détente, l'émission et la compression sont représentées par des rectangles (l'aire de la surface du rectangle correspond à la chaleur échangée). Un diagramme similaire, mais plus ancien, a déjà été introduit à la Figure 4-4.

⁵¹⁸ LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894, p.18.

⁵¹⁹ On remarquera que les auteurs font intervenir le travail moteur et non pas le travail utile (non renseigné) dans le calcul du résidu.

⁵²⁰ LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894, p.21-31.

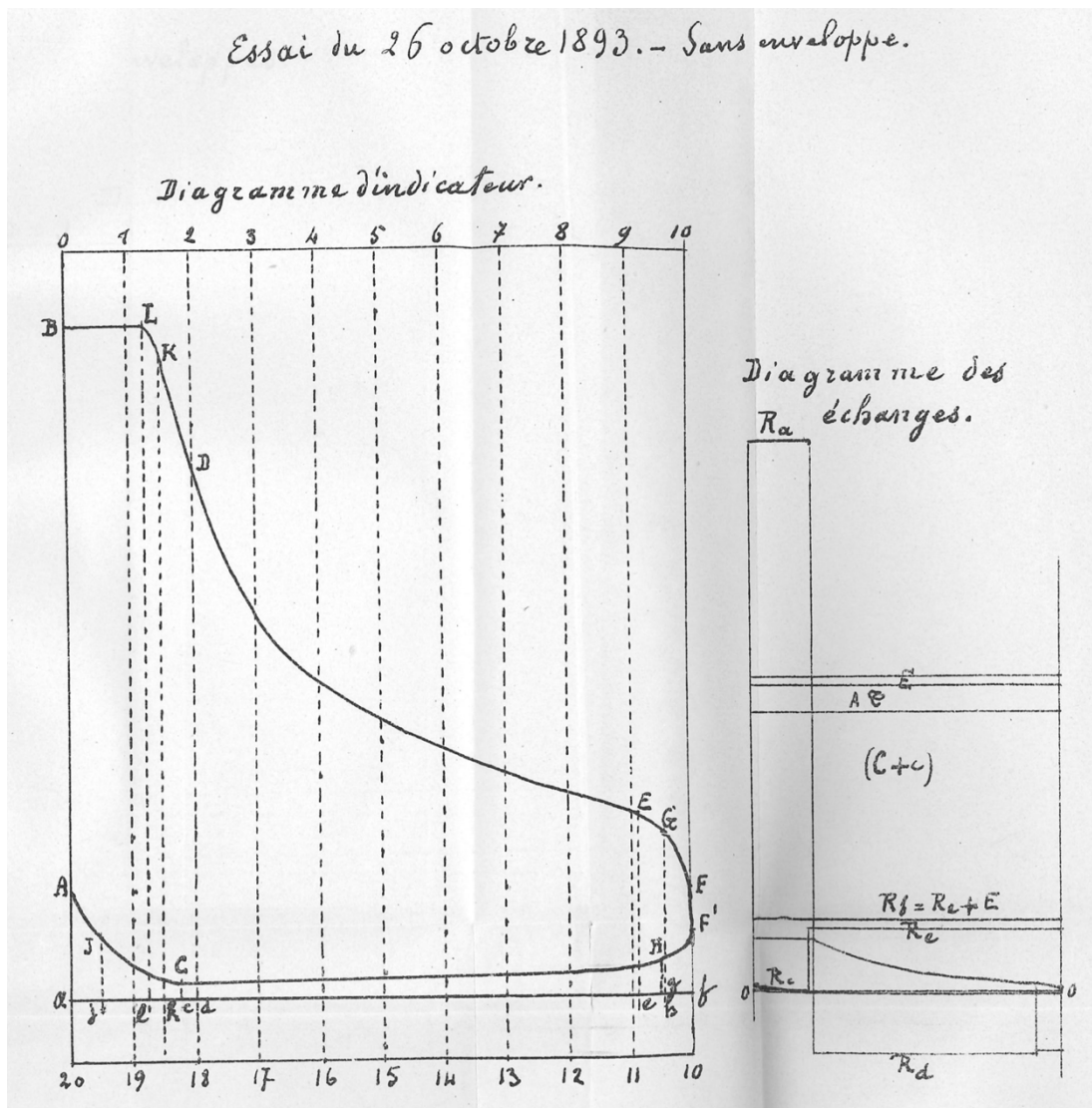


Figure 5-21 : Représentation du diagramme des échanges thermiques en vis-à-vis du diagramme d'indicateur, « Essai du 26 octobre 1893 – Sans enveloppe ». Dans LABORATOIRE DE MECANIQUE DE L'UNIVERSITE DE LIEGE, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894, planches.

5.3.3 Confrontation avec des méthodes d'analyse contemporaine

Comme le rappelle Heinz Otto Sibum, les historiens des sciences utilisent un grand nombre de méthodes pour étudier les pratiques anciennes, notamment l'étude de controverses⁵²¹. Il propose une approche complémentaire, consistant à reproduire des expériences historiques. Cette méthode anthropologique comprend trois stratégies qui se renforcent les unes les autres : construire une réplique du dispositif expérimental, employer le dispositif pour réaliser des expériences, étudier le « monde » dans lequel les expériences originelles ont eu lieu. Cette approche peut permettre de reconstruire des

⁵²¹ Heinz Otto SIBUM, « Reworking the Mechanical Value of Heat: Instruments of Precision and Gestures of Accuracy in Early Victorian England », *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, Volume 26, Issue 1, 1995, p. 75-76.

dimensions tacites des pratiques expérimentales anciennes (gardées secrètes et non décrites ou « victimes de substitutions par d'autres représentations formelles ou mécaniques ») et de « [relever] comment l'implication somatique détermine aussi la façon de se servir des instruments »⁵²². Ainsi Sibum reproduit-il dans les années 1990 le célèbre dispositif expérimental de Joule, décrit en 1850, qui devra permettre de quantifier l'équivalent mécanique de la chaleur.

Dans cette section, nous proposons une approche beaucoup moins ambitieuse (il n'est évidemment pas possible de reconstruire le laboratoire de machine à vapeur), mais qui devrait également permettre de compléter l'étude des pratiques expérimentales du Laboratoire de mécanique.

Nous avons ainsi analysé les mesures réalisées aux laboratoires de Jemeppe et de Liège avec un outil moderne d'analyse de machines et systèmes thermiques, le logiciel EES (*Engineering Equation Solver*). L'objectif était triple : 1) comprendre l'analyse des mesures faites au XIX^e siècle en reproduisant cette analyse ; 2) vérifier la précision des calculs réalisés au XIX^e siècle ; 3) observer si la méthode d'analyse des mesures diffère d'une approche moderne.

Nous avons tout d'abord voulu vérifier la précision des tables thermodynamiques concernant la vapeur d'eau. Dans l'essai du 15 novembre 1888 (Laboratoire de Jemeppe), la différence relative entre la chaleur totale de la vapeur (dénomination ancienne) et l'enthalpie de la vapeur (dénomination moderne) en entrée du cylindre est de 0,6% (la référence pour le calcul est probablement la même). Aussi, la chaleur rejetée dans l'eau froide au condenseur, pour ce même essai, par coup de piston est évaluée à 125976 joules en 1888 et 125739 joules avec EES. D'autres comparaisons ont ainsi pu confirmer que la précision des tables de propriétés de l'époque était très bonne.

Le 3^{ème} objectif est certainement le plus intéressant. L'analyse proposée par Dwelshauvers-Dery de l'essai du 15 novembre 1888 comporte une analyse des bilans énergétiques et une analyse dynamique de la machine. Nous nous concentrerons sur l'analyse des bilans énergétiques. Elle est très similaire à ce qui serait fait aujourd'hui, à quelques différences près :

- On ne parle pas d'enthalpie de la vapeur, mais de chaleur totale.
- La machine n'est pas considérée comme un cycle fermé. Comme le montre la Figure 5-18, le bilan énergétique est exprimé pour le système cylindre-condenseur. Alors que Carnot proposait en 1824 de considérer l'ensemble de la machine (chaudière, cylindre/piston, condenseur, pompes) pour en étudier le potentiel d'amélioration de performance, la machine à vapeur associée à son condenseur est encore le système d'intérêt. On peut avancer plusieurs raisons. Tout d'abord, la machine n'opère probablement pas en en cycle fermé. Rien n'est dit sur

⁵²² Jean-François BERT et Jérôme LAMY. *Voir les savoirs Lieux, objets et gestes de la science*, Paris, Anamosa, 2021, p. 296.

l'utilisation de l'eau en sortie du condenseur. Étant distillée, elle est probablement réutilisée dans la chaudière (voir section 4.4.5.3.2). Ensuite, la chaudière n'opère pas en régime stabilisé, puisque son contenu en eau est différent entre le début et la fin de l'essai. Enfin, la consommation d'énergie mécanique des pompes (pompe à air, pompe alimentaire⁵²³) n'est pas mesurée.

- La basse pression dans le condenseur n'est pas mesurée. Pour l'essai du 15 novembre 1888 au Laboratoire de Jemeppe, on pourrait l'évaluer en considérant la pression de saturation à la température de sortie de l'eau (38,177°C), mais cela est sans compter le sous-refroidissement de l'eau liquide condensée. La pression serait de 0,06826 kilogrammes par centimètre carré, ce qui est inférieur à la valeur typique mentionnée par Dwelshauvers dans son cours de mécanique appliquée (0,1033 K/cq, soit approximativement 1/10^e d'atmosphère).
- L'efficacité isentropique de la machine à piston n'est pas déterminée. Supposant une pression basse de 0,06826 K/cq, l'efficacité isentropique définie sur base de la puissance utile (puissance à l'arbre) serait de 17,03%. Elle serait de 18,37% dans le cas d'une pression basse de 0,1033 K/cq. Ces valeurs sont très basses par rapport à des valeurs obtenues avec des machines de détente modernes. Cela peut expliquer le faible rendement de la machine à vapeur.

5.4 Les mesures de températures par couples thermo-électriques

La mesure de températures au moyen de thermocouples a été introduite au laboratoire vers 1904. Le laboratoire a d'ailleurs été pionnier en la matière. L'utilisation des thermo-couples a permis de faire avancer le débat alors qu'une controverse divisait les scientifiques de l'époque qui cherchaient à comprendre ce qui expliquait la différence entre la performance théorique et la performance mesurée. Comme nous l'avons vu au chapitre 4, cette controverse⁵²⁴ portait sur l'état de la vapeur au début de la phase de compression (c'est-à-dire la fin de l'émission) et sur l'évolution suivie par le fluide au cours de cette phase. En ce qui concerne l'état de la vapeur, il était question de savoir si la vapeur était humide, sèche ou surchauffée. La controverse portait donc sur l'échange de chaleur plus ou moins important entre les parois métalliques et la vapeur. La mesure directe et instantanée de la température de la vapeur et de la paroi du cylindre pendant la phase de compression devait pouvoir répondre à ces questions. À côté du diagramme pression-volume, ces mesures devraient permettre de tracer des diagrammes de la température du fluide et des parois. En réalité, les travaux expérimentaux de l'époque se bornaient

⁵²³ Brasseur mentionnait déjà 3 pompes : la pompe à eau froide, la pompe alimentaire et la pompe à air. Voir Jean-Baptiste BRASSEUR et François FOLIE, *Précis du cours de mécanique appliquée (ouvrage posthume terminé d'après les manuscrits de l'auteur par F. Folie)*, Carmanne, Liège, 1868, p. 157-176.

⁵²⁴ Sur cette controverse, voir Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur et la mesure directe et instantanée de la température de la vapeur et des parois », *Revue universelle des Mines et de la Métallurgie, de la métallurgie, des travaux publics, des sciences et des arts appliqués à l'industrie*, Liège, 1904 (juillet), p. 67.

souvent à mesurer la température de la paroi du cylindre⁵²⁵. Aussi, pour être capable de suivre l'évolution de la température de la vapeur à l'intérieur du cylindre, il fallait disposer d'un thermomètre dont on pouvait « *considérer sa propre capacité calorifique comme nulle* »⁵²⁶. L'utilisation de thermomètres électriques et non pas à mercure devait apporter la solution. Parmi ces thermomètres, Duchesne cite l'utilisation, en 1901 dans le cadre d'un essai sur un moteur à gaz fait par F.W. Burstall⁵²⁷, d'un thermomètre exploitant la variation de la résistance ohmique d'un fil de platine avec la température⁵²⁸. Une autre catégorie de thermomètres électriques, qui sera utilisée à Liège, est le *couple thermo-électrique platine-argent*. Ce type de pyromètre exploite l'effet Seebeck découvert en 1821.

Duchesne nous apprend que les soudures argent-platine ont été réalisées en exploitant la découverte du Prof. Spring concernant la propriété de deux métaux de se souder lorsqu'ils sont portés à haute température pendant un certain temps⁵²⁹. La soudure a été réalisée en plaçant les fils pendant 8 jours dans une étuve à approximativement 300°C.

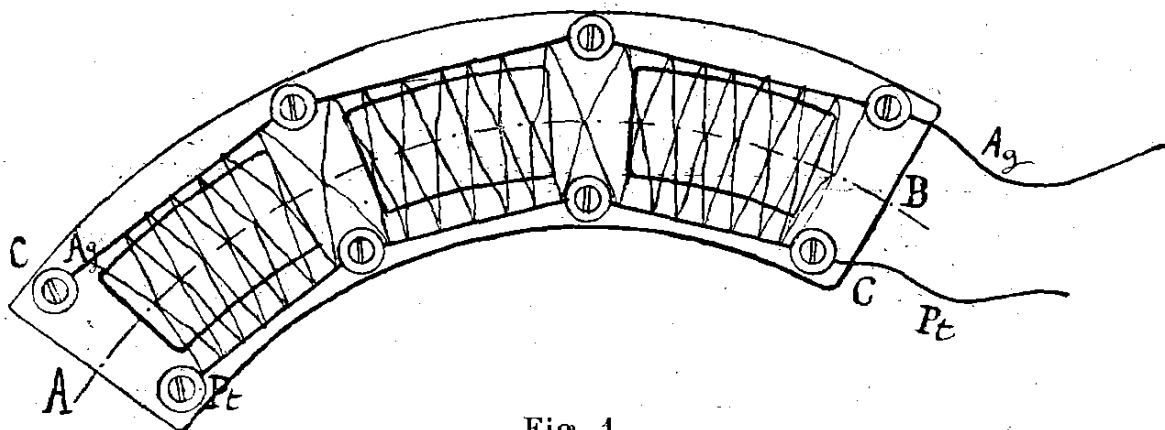


Fig. 1.

Figure 5-22 : Thermomètre à couple thermo-électrique utilisé pour la mesure de la température de la vapeur. Dans Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », 1904, p. 69.

Pour ce qui est de la mesure de la température de la vapeur, le dispositif imaginé par Duchesne⁵³⁰ est constitué d'un cadre en laiton avec 8 isolateurs en porcelaine placés en deux séries parallèles (Figure 5-22). Un fil d'argent et un fil de platine de 1 mm de diamètre relie 4 à 4 ces isolateurs. De ces fils part un réseau de fils plus fins de 0,028 mm. Les soudures (« ligatures ») de ces fils se situent sur la

⁵²⁵ Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *op. cit.*, p. 67-68

⁵²⁶ Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *op. cit.*, p. 69.

⁵²⁷ Probablement le Prof. Frederik William Burstall (1865-1934) de l'Université de Birmingham.

⁵²⁸ On appelle aujourd'hui ces thermomètres, des *thermomètres à résistance de platine*, RTD (Resistance Temperature Detector) ou PT100.

⁵²⁹ Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *op. cit.*, p. 70.

⁵³⁰ *Ibid.*, p. 69-72.

ligne A-B. L'ensemble des soudures permet d'obtenir une mesure de la température moyenne. « Ce cadre était fixé à la partie supérieure du cylindre dans un espace qui est le prolongement de la lumière d'admission et de la lumière d'échappement »⁵³¹. Les deux gros fils en argent et en platine sortaient du cylindre au travers de bourrages électriquement isolés et « plongeaient dans des vases remplis de glace fondante où elles étaient connectées avec les conducteurs se rendant aux bornes d'un galvanomètre ». Ce galvanomètre, après tarage, donnait la température de la vapeur. Duchesne note que la mesure a pu en partie être validée, car pendant l'admission et une partie de l'émission, le pyromètre donnait bien les températures de la chaudière et du condenseur.

Pour la mesure de la température de paroi, un pyromètre constitué de deux plaques de 0,02 mm de platine et d'argent est utilisé. Ces deux plaques, ou feuilles minces, sont fixées à la paroi cylindrique dans le volume mort (au moyen des pièces isolées A et B de la Figure 5-23). Des fils d'argent et de platine sont soudés aux feuilles du même matériau et sortent aussi par des bourrages pour plonger dans de la glace fondante.

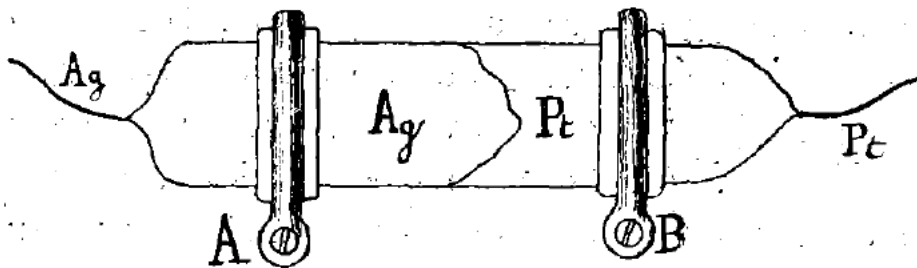


Fig. 2.

Figure 5-23 : Thermomètre à couple thermo-électrique utilisé pour la mesure de la température de la paroi. Dans Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », 1904, p. 71.

Le galvanomètre permet de mesurer le courant des soudures. Sa déviation balistique est fonction de la quantité d'électricité passée pendant l'intervalle de temps pendant lequel le galvanomètre est en circuit fermé. Lors des essais, cet intervalle de temps était d'un dixième de seconde. La température mesurée est donc la température moyenne pendant cet intervalle. Pour une machine tournant à 30 tours par minute, un dixième de seconde correspond à un vingtième de tour de manivelle. Afin de pouvoir diviser un tour de manivelle en 20 intervalles de temps pour lesquels une température moyenne est mesurée⁵³², il fallait être capable de fermer et puis d'ouvrir pendant un temps très court et régulier le circuit du couple thermo-électrique dans lequel se trouve le galvanomètre. Cette mesure est d'autant

⁵³¹ Armand DUCHESNE, « Les phénomènes thermiques dans les machines à vapeur », *Revue de Mécanique*, t. XIX, Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1906 (2e semestre, juillet), p. 8.

⁵³² On parlerait aujourd'hui d'une discrétisation d'un tour de manivelle en 20 intervalles et d'un pas de temps de $1/10^{\circ}$ de seconde.

plus difficile que le régime de la machine est précis à 2 tours près et qu'au sein d'un tour, la vitesse n'est pas constante.



Figure 5-24 : Galvanomètre balistique Carpentier. Institut Montefiore, Université de Liège, Coll. Maison de la Science, XIX^e siècle, Photo par l'auteur.

Dès lors, Armand Duchesne a imaginé un appareil dont nous reprenons la description ci-dessous⁵³³. Le dispositif, représenté à la Figure 5-25, se compose d'une table munie de vis calantes sur laquelle repose une tige verticale en cuivre (CD). Un poids P muni d'une glissière est maintenu en position haute sous l'effet d'un électro-aimant et peut tomber librement lorsque l'électro-aimant n'est plus alimenté en courant. MA , AB et BN désignent trois plaques de cuivre séparées par de l'isolant en feuille (ébonite). EF désigne une plaque de cuivre continue. La position des frotteurs f et f' dans la chute détermine les connections électriques du galvanomètre et donc la durée de la mesure de la température (EF est connecté à MA , AB ou BN). Sur le parcours MA , le galvanomètre est en court-circuit. Sur AB , il est en série avec les couples thermo-électriques, ce qui permet donc la lecture de la température. Sur BN , le galvanomètre est en circuit ouvert. Les hauteurs MA et MB sont choisies telles qu'elles correspondent à des temps de chute de $1/10^e$ et $2/10^e$ de seconde (selon la formule $H = \frac{1}{2} g t^2$). Le poids tombe déjà depuis $1/10^e$ de seconde lorsque la lecture de la température débute. L'utilisateur en tiendra compte dans l'analyse. Cela permet de limiter le frottement sur le parcours AB puisque le coefficient de frottement d'un corps en mouvement est plus faible que celui d'un corps au repos.

⁵³³ Cet appareil est décrit dans deux publications d'Armand Duchesne: Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *op. cit.*, p. 72-5 et Armand DUCHESNE, « Les phénomènes thermiques dans les machines à vapeur », *Revue de Mécanique*, t. XIX, Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1906 (2e semestre, juillet), p. 10-12.

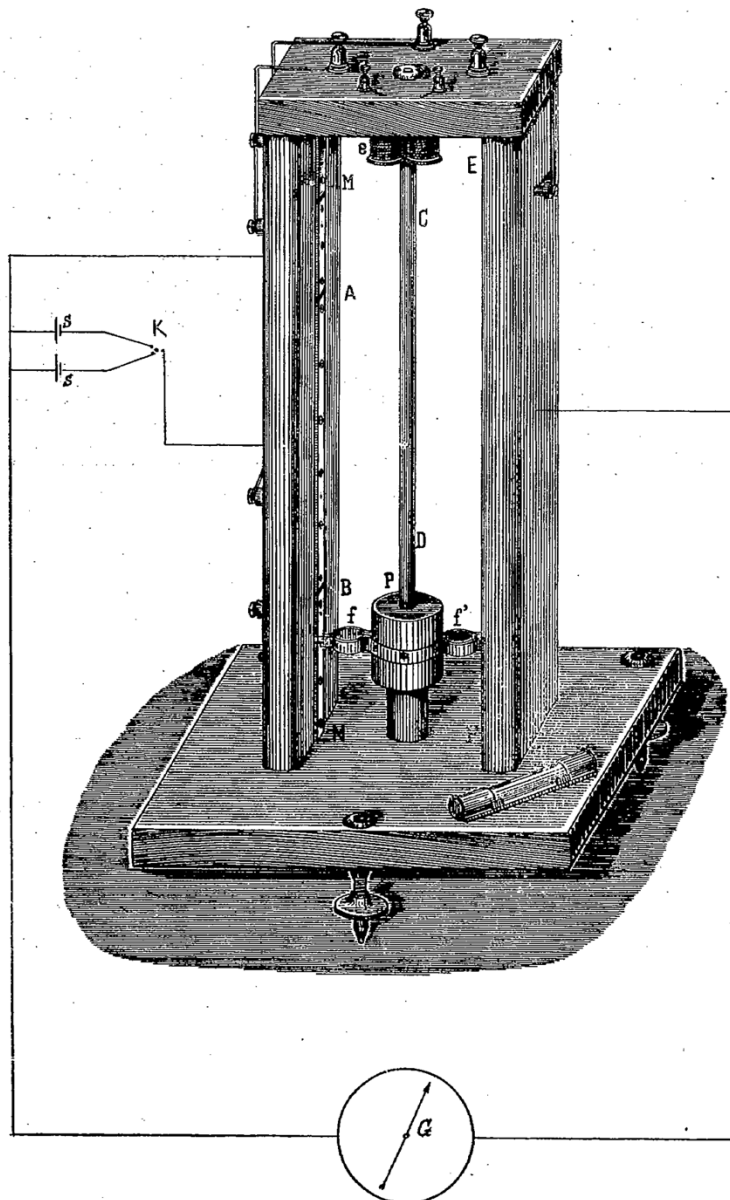


Figure 5-25 : Appareil permettant la mesure de la température moyenne de la vapeur et de la paroi intérieure au cylindre de la machine à vapeur pendant $1/10^e$ de seconde. Dans Armand DUCHESNE, « Les phénomènes thermiques dans les machines à vapeur », 1906, p. 10.

Un autre dispositif⁵³⁴ a été imaginé pour permettre de déclencher la chute du poids P pour toute position de la manivelle de la machine à vapeur. Ce dispositif, représenté à la Figure 5-26, comporte un électro-aimant alimenté par une pile n et deux bagues Dd et Ee sur lesquelles frottent deux frotteurs f et f' qui suivent le mouvement de la manivelle. La bague Dd présente une solution de continuité C dont la position est ajustable par l'observateur. Le dispositif présente deux circuits électriques : $ADEBFA$ et

⁵³⁴ Nous reprenons la description d'Armand DUCHESNE, « Les phénomènes thermiques dans les machines à vapeur », *op. cit.*, p. 11-12.

ABFA. Ces deux circuits doivent être ouverts simultanément pour permettre au poids *P* de tomber. Le circuit *ABFA* est ouvert par l'observateur. Le circuit *ADEBFA* est ouvert lorsque le frotteur *f* passe par la solution de continuité. Dans l'exemple de la Figure 5-26, l'observateur a placé le cran *C* pour permettre au poids *P* de tomber pour une position *oM* de la manivelle. Lorsque l'observateur est prêt à réaliser sa mesure, il ouvre le circuit *ABFA* et attend que le frotteur passe en *C*.

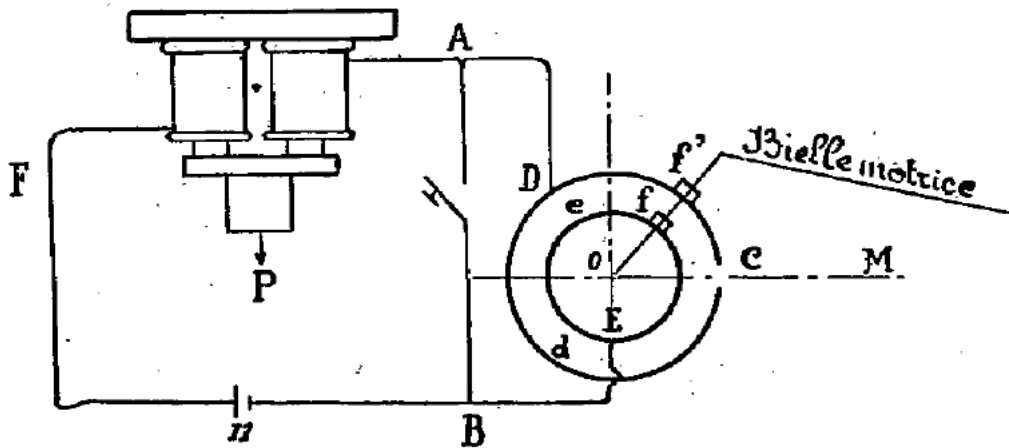


Figure 5-26 : Appareil permettant de sélectionner la position de la manivelle pour laquelle la mesure des températures de la vapeur et de la paroi est réalisée. Dans Armand DUCHESNE, « Les phénomènes thermiques dans les machines à vapeur », 1906, p. 11.

Des premiers diagrammes des températures, obtenus avec ce dispositif, sont publiés et décrits dans la Revue Universelle de juillet 1904. D'autres diagrammes seront publiés en 1906. Nous reproduisons un de ces diagrammes à la Figure 5-27. Il s'agit en réalité du diagramme original de 1904 et d'une reproduction de ce diagramme dans le cours de Mécanique appliquée d'Herman Hubert de 1905-1906⁵³⁵. Le diagramme en trait plein représente la température de la vapeur, celui en trait pointillé la température des parois. Les ronds désignent la température de saturation correspondant à la pression mesurée au moyen de l'indicateur. La détente démarre à 0,1 et se termine à 0,95 (pourcentage de la course). La compression commence à 0,9 et se termine à 1.0. On peut voir que pendant l'admission, la vapeur est saturée et à une température supérieure à celle des parois⁵³⁶. Au contraire, au cours de la détente, les parois sont plus chaudes que la vapeur qui est elle-même saturée. En fin de détente, la différence entre la température des parois et la température de la vapeur est de 18°C. Pendant l'émission, la température des parois chute, se stabilise un moment et puis augmente lorsqu'il n'y a plus de liquide à vaporiser (grâce à la chaleur provenant du cœur du métal). Au cours de la compression, la température

⁵³⁵ La reproduction d'un résultat d'essai expérimental démontre à nouveau l'importance accordée à l'étude pratique pour comprendre la théorie. Le diagramme reproduit est par ailleurs plus détaillé que l'original.

⁵³⁶ Nous reprenons la description de ces diagrammes de H. HUBERT et C. ANDRÉ, Mécanique Appliquée 2. ULiège Library, MS4336, p. 393-4. Des descriptions plus détaillées sont fournies dans les deux articles de Duchesne. Voir Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », op. cit. et Armand DUCHESNE, « Les phénomènes thermiques dans les machines à vapeur », Revue de Mécanique, t. XIX, Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1906 (2e semestre, juillet).

de la vapeur surchauffée augmente et devient supérieure à la température du métal. Le réchauffement des parois est limité par la faible masse de vapeur. Ces essais, et d'autres, démontrent l'entière siccité des parois en fin d'émission, ce qui met définitivement fin à la querelle eau contre métal qui agitait les thermodynamiciens de l'époque.

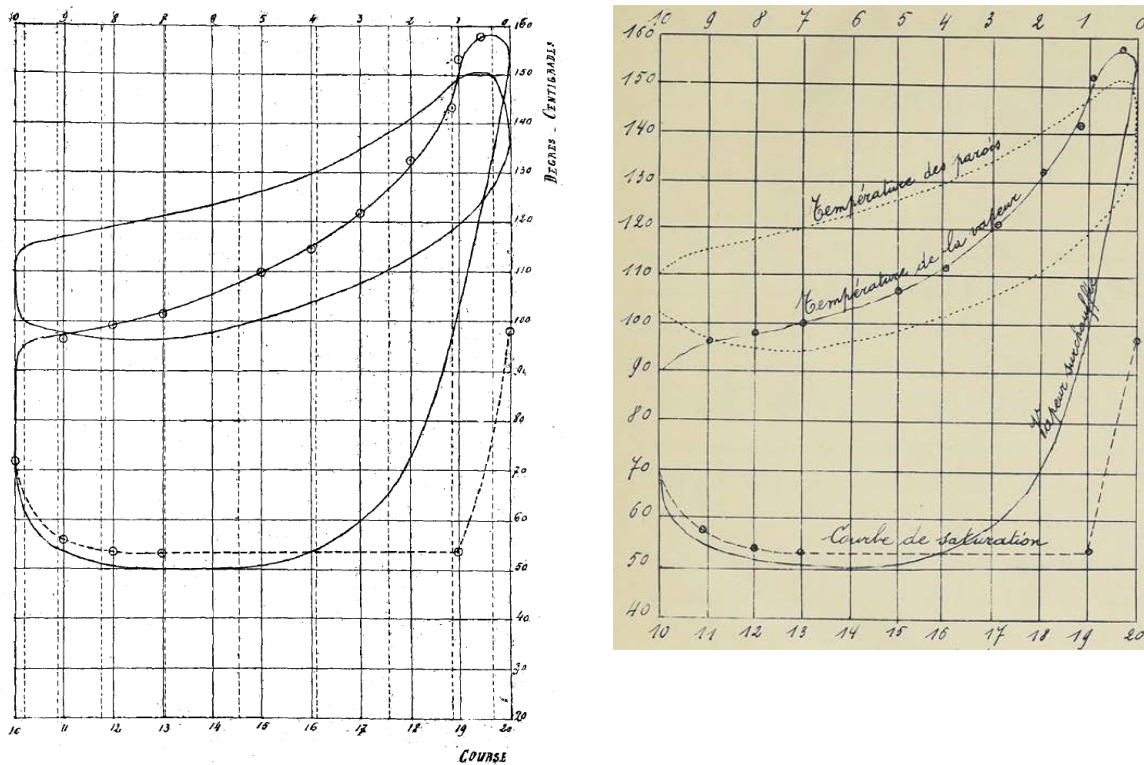


Figure 5-27 : Diagrammes des températures pour un tour de la machine. A gauche : diagramme original publié dans Armand DUCHESNE, « La théorie de la machine à vapeur... des parois », *Revue universelle des Mines...*, Liège, 1904, p. 80. A droite : reproduction dans le cours de H. HUBERT et C. ANDRÉ, *Mécanique Appliquée I*, ULiège Library, MS4336, p. 393.

5.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons décrit les instruments et moyens de mesures utilisés au Laboratoire de Jemeppe et au Laboratoire de Liège. Parmi ceux-ci, l'indicateur est un instrument de mesure particulièrement important pour analyser la performance de la machine à vapeur (l'expandeur à pistons à proprement parler). Tout aussi important est le frein de Prony. En recoupant diverses sources manuscrites et imprimées et des sources iconographiques (plusieurs photographies prises au Laboratoire de Liège vers 1918 et au Laboratoire du Val Benoît en 1937), nous avons su reconstituer une description très détaillée du frein.

Ce chapitre a également décrit plusieurs techniques de mesures originales qui attestent de la créativité du laboratoire liégeois : des mesures de débits au moyen de déversoirs (déjà vers 1880) et des mesures de températures par thermocouples (dès 1904).

Les méthodes de tarage et de réglage des instruments de mesure attestent de la rigueur dont font preuve les expérimentateurs. Ces méthodes sont décrites dans des publications scientifiques et des manuels à l'attention des élèves. Nous avons également mentionné au Chapitre 2 l'implication personnelle du Prof. Dwelshauvers-Dery dans les campagnes expérimentales et le rôle, qu'il nous semble jouer, de garant de la qualité des mesures. Il est fort probable que ces éléments tendent à renforcer le caractère scientifique de la *Mécanique appliquée aux machines* que revendique Dwelshauvers-Dery.

Enfin, nous avons analysé deux campagnes de mesures sur la machine à vapeur avec des outils contemporains. Faute de pouvoir reproduire l'expérience, cette approche a permis de comprendre les analyses de mesures faites au XIX^e siècle, ainsi que leurs limitations. Certaines mesures auraient pu être réalisées qui auraient permis de quantifier des indicateurs de performance auxquels on ne portait pas encore attention à la fin du XIX^e siècle (par exemple, l'efficacité isentropique de la machine de détente).

Ce chapitre a également apporté un éclairage sur l'impact de la pratique expérimentale sur le développement des connaissances théoriques en thermodynamique technique. L'utilisation de thermocouples a ainsi permis de mieux quantifier les échanges thermiques entre le métal et la vapeur à l'intérieur de l'expandeur à pistons.

Conclusions et perspectives

Conclusions principales

Histoire économique et sociale des techniques

Ce travail a permis de mieux comprendre le contexte industriel et académique dans lequel le Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège a été créé en 1887. Cette création s'inscrit dans la vague de créations de nombreux laboratoires d'essais de machines thermiques, principalement des machines à vapeur, en dehors de la Belgique (notamment en Allemagne, en Angleterre et aux Etats-Unis). Les difficultés liées à sa création ont été décrites et sont en partie liées à l'essor de la Mécanique Appliquée comme une nouvelle branche de l'ingénierie qui doit recevoir une reconnaissance académique : d'une part, l'étude pratique de la Mécanique Appliquée souffre de l'image de l'atelier aux méthodes expérimentales rudimentaires et d'autre part, certains ne voient l'étude de la Mécanique que sous l'angle des mathématiques⁵³⁷. Dwelshauvers-Dery et ses collaborateurs développent une activité de recherche expérimentales rigoureuse et créative dont ils « font la promotion » au travers de nombreuses publications. Dwelshauvers-Dery participe aux essais et donne parfois l'impression de se porter lui-même le garant de la qualité des mesures. Tous ces éléments contribuent à renforcer le caractère scientifique de la mécanique appliquée que Dwelshauvers-Dery revendique.

Bien que le processus de création du Laboratoire de Mécanique remonte aux années 1870, nous arrêtons la date de 1887, qui correspond à la première publication connue de résultats d'essais, comme date de création.

Dans ce travail, nous relevons la proximité qui semblait exister entre Liège et l'Allemagne. Nous avons identifié des relations industrielles entre Liège et certaines régions également industrielles d'Allemagne. Mais cette proximité semblait également exister sur le plan académique. Du moins, l'Allemagne, pionnière dans le domaine de la pratique expérimentale de la mécanique, sert de modèle à

⁵³⁷ Voir à ce sujet les travaux de Robert FOX et Anna GUAGNINI. "Laboratories, Workshops, and Sites. Concepts and Practices of Research in Industrial Europe, 1800-1914." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 29, n° 1, University of California Press, 1998 ; ainsi que ceux de Kenneth BERTRAMS, *Universités & entreprises : milieux académiques et industriels en Belgique 1890-1970*, Bruxelles, Le Cri édition, 2006.

la jeune Faculté technique et à son Service de Mécanique (jusqu'à s'équiper de mécanismes de Reuleaux et faire calibrer ses thermomètres à Berlin).

L'importance des collections de modèles mécaniques nous a aussi semblé remarquable. L'École d'ingénieurs de Liège y attachait déjà une importance particulière dans les années 1850 et nous retrouverons la trace de telles collections jusqu'à l'entre-deux guerres. Il s'agit encore d'une pratique courante dans les laboratoires de mécanique qui exposent, pour l'enseignement ou pour la promotion de la recherche, les pièces de machines ou autres objets techniques qu'ils ont conçus.

Le Laboratoire de mécanique de Liège et les autres laboratoires à l'étranger qui possédaient des installations d'essais de machines thermiques, créés pour la plupart au cours du dernier quart du XIX^e siècle, constituent les premiers laboratoires de thermodynamique appliquée. Tous ces laboratoires ont contribué au développement de la thermodynamique comme discipline de l'ingénierie. L'expérience acquise et enrichie par la suite a permis de développer bien des machines encore utilisées de nos jours (moteurs, frigos, pompes à chaleur) et aujourd'hui peu d'Écoles d'ingénieurs ne possèdent pas de laboratoire actif dans la thermodynamique, la thermique ou l'énergétique.

Ce travail a également permis de mieux comprendre le choix de la machine à vapeur (une machine plus que centenaire dans les années 1880) comme objet technique, alors que les moteurs électriques et à gaz commencent à se développer. D'une part, son utilisation dans la seconde moitié du XIX^e siècle était encore en pleine expansion. D'autre part, son développement jusque-là avait encore été relativement empirique laissant le champ libre aux méthodes scientifiques de la Mécanique appliquée expérimentale pour en accroître davantage les performances... tout en permettant à la Mécanique appliquée expérimentale elle-même de se développer.

Les liens entre le laboratoire et l'industrie nous paraissent aussi intéressants. Tout d'abord, nous retrouvons le principe de « recherche partenariale » : le laboratoire reçoit une machine ou un composant d'un industriel (et pendant de nombreuses années un local et de l'eau) et en contrepartie il en mesure les performances et l'étudie (c'est le cas de la machine à vapeur, mais peut-être aussi de la chaudière). Il s'agit d'un autre schéma de collaboration que celui mis en place au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, où le Laboratoire réalise des expertises technico-scientifiques pour le compte d'industriels et des pouvoirs publics. Aussi, la machine à vapeur testée par le Laboratoire de Liège est en réalité une machine spécialement conçue pour la recherche offrant de nombreux degrés de liberté dans son utilisation. L'équipe du Laboratoire participe aussi à l'analyse d'essais sur des machines sur site (des moteurs à gaz de grosses puissances et des machines à vapeur dans des usines). Cela montre l'intérêt qui existait déjà à l'époque pour le monde académique de travailler en partenariat avec l'industrie, principalement régionale (Beer, Cockerill, Valentin-Cocq et, un peu plus loin, De Naeyer).

Enfin, l'étude du fonctionnement du laboratoire a permis de mettre en évidence des similitudes très fortes avec le fonctionnement actuel d'un laboratoire : la notion d'équipe constituée de personnes aux qualifications très variées, le rôle important des techniciens, l'imbrication et la complémentarité de la recherche et de l'enseignement, la formation des étudiants à la recherche (voie que certains poursuivront), la difficulté à lever des fonds, la diffusion scientifique au travers des publications, le rayonnement et la mobilité des chercheurs et la complémentarité entre essais *en laboratoire* et essais *in situ*.

Histoire des sciences et des savoirs

L'analyse des connaissances en thermodynamique appliquée à la fin du XIX^e siècle à l'Université de Liège (rendue possible par l'étude d'un corpus de sources constitué de notes de cours de 1868 à 1913) a mis plusieurs éléments intéressants en évidence :

- 1) L'analogie entre le moteur thermique et le moteur hydraulique déjà présente dans l'œuvre de Carnot en 1824 est encore utilisée à la fin du XIX^e siècle, pour expliquer le rendement maximum d'un moteur à vapeur, mais aussi les pertes par échanges thermiques entre la vapeur et les parois. Le fait que l'enseignement des *moteurs thermiques et hydrauliques* fait partie des mêmes cours de Mécanique et de Physique industrielle, donnés par Dwelshauvers-Dery, apporte peut-être un élément de réponse. L'électricité, et donc les moteurs *électriques*, fait l'objet d'un cours spécial.
- 2) La notion de poids thermique pour illustrer le rendement maximal d'un moteur thermique (par analogie avec les moteurs hydrauliques qui exploitent la gravité) est tout à fait originale et n'avait pas encore été utilisée, à notre connaissance, dans d'autres traités de thermodynamique. Ce concept semble avoir disparu aujourd'hui.
- 3) Dwelshauvers-Dery voit les limites de la comparaison du rendement d'un moteur hydraulique et de celui d'un moteur thermique. Il propose des développements qui préfigurent la notion d'exergie (apparue dans les années 1940, mais déjà énoncée via le théorème de Gouy).
- 4) Lors des essais de mesure de performance de la machine à vapeur, celle-ci est encore analysée sous l'angle de l'expandeur à piston (couplé à son condenseur) et non pas encore comme un cycle fermé incluant la chaudière, l'expandeur, le condenseur et les pompes. Une des raisons peut être le régime de la chaudière qui n'est pas stabilisé (son volume en eau liquide varie entre le début et la fin de l'essai). Aussi, la boucle d'eau n'est pas fermée et l'appoint en eau doit certainement être réalisé (en raison des fuites de vapeur).

- 5) L'analyse des notes de cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle sur une période allant de 1868 à 1913 a permis d'observer la diffusion des théories et concepts plus ou moins récents de la thermodynamique dans la formation des étudiants liégeois, notamment les notions d'énergie et d'entropie (ces termes sont introduits dans les cours vers 1888-1889, alors que le terme « énergie » a été popularisé en 1849 et « entropie » défini en 1865) ou de rendement de Carnot.

Au travers de l'étude d'une controverse scientifique (« eau contre métal »), ce travail a apporté un éclairage sur les questions que la communauté scientifique se posait à la fin du XIX^e siècle. Le consensus a émergé, et la science (la thermodynamique appliquée) a progressé, grâce au développement de la recherche expérimentale sur les machines à vapeur. Des techniques de mesure de plus en plus précises et intrusives, notamment la mesure de températures au moyen de thermocouples et des méthodes expérimentales originales voient le jour et contribuent à faire avancer les connaissances théoriques.

Ce travail s'intéresse aussi à la contribution d'un chercheur en thermodynamique appliquée, contribution très différente de celles des chercheurs qui lui sont contemporains en thermodynamique classique⁵³⁸. Des rapports de l'Académie des Sciences de Paris résument parfaitement sa contribution. Pendant sa carrière (1868-1903), et surtout depuis la création de son Laboratoire vers 1890, Dwelshauvers-Dery a étudié de nombreuses questions pratiques liées aux machines à vapeur. Il a notamment imaginé une « méthode diagrammatique » qui permet de représenter les échanges de chaleur entre le métal et la vapeur⁵³⁹. Cette méthode qui exploite le diagramme indicateur permettait d'évaluer les échanges de chaleur. Comme le mentionne un rapport de l'Académie des Sciences (de Paris), même si la méthode restait approximative, elle permettait de tirer des conclusions intéressantes pour l'expérimentateur avisé⁵⁴⁰. L'influence des transferts de chaleur était déjà connue de Watt, Reech, Combes et Rankine, mais Hirn et ses collaborateurs l'ont démontré expérimentalement. L'Académie des Sciences de Paris juge que la méthode de Dwelshauvers-Dery pour quantifier les échanges de chaleur est certainement une traduction des idées de Hirn (avec qui il travaille de 1873 à 1875), « *mais une traduction claire, pratique, d'une application facile et qui réalisait d'importants perfectionnements* »⁵⁴¹. Le rapport de l'Académie souligne que la contribution de Dwelshauvers a été

⁵³⁸ Notons deux thermodynamiciens classiques célèbres, Willard Gibbs et Ludwig Boltzmann, seront élus correspondants pour la Section de Mécanique de l'Académie des Sciences à Paris la même année que Dwelshauvers (1900).

⁵³⁹ H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. Mai 1900, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

⁵⁴⁰ *Ibid.*

⁵⁴¹ H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. 4 décembre 1893, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

de diviser le cycle en quatre périodes. En réalisant ses propres expériences et en analysant les expériences des autres, Dwelshauvers-Dery a enrichi les connaissances de son époque en comprenant mieux l'influence (positive) sur le rendement économique d'une machine à vapeur de la surchauffe, de la vitesse de la machine (en montant jusque 410 tours par minutes) et de l'enveloppe⁵⁴². Il a aussi étudié l'effet de la compression sur la performance de la machine. Notons toutefois que dans ce travail, nous n'avons pas analysé sa contribution importante à la théorie des régulateurs⁵⁴³. Au travers de ses publications et de ses travaux, l'Académie des Sciences souligne que Dwelshauvers-Dery a fait connaître son nom dans le monde entier⁵⁴⁴.

Histoire de l'enseignement

Ce travail a démontré que c'est Victor Dwelshauvers-Dery qui a introduit, dès 1886, dans la formation des ingénieurs liégeois l'enseignement de la thermodynamique classique et technique. L'étude des machines frigorifiques sera introduite vers 1913 par Herman Hubert.

Nous avons également observé le développement de la pratique expérimentale, exploitant des laboratoires dédiés à cet effet (laboratoire de machine à vapeur, laboratoire de résistance des matériaux), dans la formation des ingénieurs à partir de 1887. Avant cela, les étudiants se formaient sur des machines à vapeur en service dans des ateliers. Les cours étaient (et ont encore été longtemps) illustrés par des modèles de pièces et mécanismes de machines. Les notes de cours s'enrichissent elles-mêmes en y illustrant la théorie par des résultats d'essais.

Alors que les laboratoires de thermodynamique prennent leur envol par rapport aux laboratoires de mécanique, qui incluent aussi des laboratoires d'essais de résistance des matériaux, l'enseignement de la Thermodynamique technique va progressivement se développer et se dissocier de celui de la mécanique appliquée. Ce travail a montré comment l'enseignement de la Thermodynamique technique est né ceux de la Mécanique et de la Physique industrielle.

⁵⁴² H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. Mai 1900, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

⁵⁴³ Dans un rapport de 1893, l'Académie des Sciences juge que cette contribution doit rester au second plan par rapport à la théorie des transferts de chaleur "qui est devenue classique dans toutes les Ecoles de mécaniciens". Voir H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. 4 décembre 1893, Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery*, Dossier de M. Dwelshauvers-Dery, Archives de l'Académie des Sciences à Paris.

⁵⁴⁴ H. LEAUTE, *Élection d'un Correspondant dans la section de Mécanique. 4 décembre 1893...*, *op. cit.*

Nous nous sommes intéressés à plusieurs objets techniques particuliers que nous avons étudiés plus en détail en termes de principes de fonctionnement, d'utilité et de représentations graphiques : la machine à vapeur, le régulateur à masses, et l'indicateur.

Ce travail contribue à décrire l'état des connaissances techniques, autour de ces 3 objets, à la fin du long XIX^e siècle. En particulier, le travail apporte un éclairage sur les performances des machines à vapeur et les moyens permettant de les améliorer. L'étude qui a été faite autour des régulateurs fait écho à la volonté des ingénieurs de perfectionner sans cesse l'automatisme des machines. Aussi, l'analyse croisée de notes de cours, de cahiers de laboratoire, de photographies et d'objets a permis de décrire le fonctionnement des composants (chaudière, expanseur à piston, condenseur, etc.) et instruments et moyens de mesures (frein de Prony, indicateur, mesures de débits d'eau au moyen de déversoirs) constituant le laboratoire d'essais de la machine à vapeur.

Certaines des techniques expérimentales qui voient le jour au début du XX^e siècle, comme la mesure de températures au moyen de thermocouples, ont été rendues possible par le développement de l'électricité et de la chimie (utile aux techniques de soudure). La mécanique appliquée a donc bénéficié du développement d'autres domaines de l'ingénierie.

Nous nous sommes aussi penchés sur la question de l'évolution des machines au début du XX^e siècle, alors que les moteurs à gaz et les turbines à vapeur se développent et que la turbine à gaz commence à être étudiée. Nous avons analysé la pensée de plusieurs auteurs (Simondon, Mumford, Gehlen et Lafitte) pour comprendre quels sont les mécanismes sous-jacents à l'évolution des machines. Nous soulignons l'importance de l'automatisation, la relation homme-machine et la non-obsolésence des mécanismes (la mémoire visuelle des ingénieurs et concepteurs explique que l'on retrouve des mécanismes d'une machine ancienne dans des machines plus modernes).

La reproduction des analyses de mesures faites au XIX^e siècle au moyen d'un logiciel de simulation contemporain a démontré la qualité des mesures et a permis de bien comprendre les méthodes d'analyse employées à l'époque (mais aussi d'en identifier les limites).

Finalement, nous avons étudié les représentations graphiques des machines, montrant l'évolution des dessins (en deux dimensions, en perspective, en projection orthogonale), l'apparition des schémas exploitant des représentations plus symboliques, et le développement des diagrammes thermodynamiques utiles à la compréhension du fonctionnement cyclique des machines.

Perspectives

Ce travail reste malgré tout inachevé. D'une part, d'autres sources devraient être analysées de manière à étayer les observations qui ont déjà été faites. Par exemple, l'analyse des publications au *Moniteur Belge* ou dans d'autres sources liées aux Ministères dont dépendaient les financements de l'École pourrait nous renseigner davantage sur les coûts de fonctionnement du laboratoire. Aussi, nous avons principalement analysé les notes de cours de Dwelshauvers-Dery et quelques-unes de ses publications scientifiques majeures, mais il reste un très grand nombre de publications à étudier.

Aussi, certaines observations listées plus haut pourraient faire l'objet de travaux futurs d'historiographie : les collections de modèles dans les Facultés techniques (nous nous sommes limités aux Universités de Liège et de Cornell), l'importance de la publication scientifique, le rôle des techniciens de Laboratoires de Mécanique, l'histoire de la résistance des matériaux (comme discipline de l'ingénieur) ou des chaudières. En ce qui concerne, ces deux dernières thématiques, les notes de cours étudiées dans ce travail (de 1868 à 1913), constituent un corpus très riche.

Nous nous sommes intéressés aux activités d'enseignement et de recherche sous le professorat de Dwelshauvers-Dery (1868-1903) et sous celui de Hubert (1904-1918, bien que nous nous sommes arrêtés en 1913). Nous avons pu observer l'émergence des travaux sur les moteurs au gaz et avons souligné l'introduction des machines frigorifiques (vers 1913) dans l'enseignement liégeois. L'étude de ces technologies, et du contexte dans lequel elles se sont développées, constituent une suite toute naturelle à ce travail.

Ce travail s'est principalement centré sur la contribution de Dwelshauvers-Dery à la compréhension des mécanismes de transferts de chaleur dans les machines à vapeur. Ses autres contributions, même si elles sont moins significatives, mériteraient d'être étudiées (notamment ses études sur les régulateurs).

L'analyse de la controverse « Eau contre métal » qui opposa plusieurs Écoles de thermodynamique appliquée à la fin du XIX^e siècle pourrait être approfondie. Comme le mentionne Pestre⁵⁴⁵, l'analyse de controverse est un outil méthodologique irremplaçable. Le suivi de la construction des théories et le suivi des arguments des divers acteurs montrent la nature ouverte des constructions et des preuves et permet de comprendre comment on en vient à énoncer l'accord, «... même s'il y a un dissensus dans les

⁵⁴⁵ Dominique PESTRE, *Introduction au Science Studies*, Paris, La découverte, 2006, p. 21.

premiers temps de la recherche, la science ne peut que se clore par un accord »⁵⁴⁶. L'analyse doit respecter certains principes : ne pas préjuger ce qui est réel (le monde, la nature) et ce qui est un préjugé de l'acteur de la controverse lorsqu'il propose un énoncé et traiter les acteurs avec symétrie. Ainsi, il serait intéressant d'également étudier les travaux de Zeuner de l'Ecole de Dresde (un protagoniste important de la controverse), mais aussi de « recueillir l'avis » des praticiens (notamment, les ingénieurs concepteurs de machines à vapeur de l'époque).

⁵⁴⁶ *Ibid.*, p. 40.

5.6 Sources manuscrites

Archives de l'Université de Liège

Fonds du Secrétariat Central

Dossier 97 « Dwelshauwers Victor Félix. Professeur émérite » [Le dossier comprend entre 150 et 200 pages. Les documents concernent à la fois Victor Dwelshauwers Père et Fils. Il s'agit d'éléments de correspondance avec l'Administrateur de l'Université de Liège et avec le Ministère de tutelle (Ministère de l'Intérieur, direction de l'instruction publique)]

Dossier 159 « Hubert Herman. Répétiteur » [Le dossier comprend entre 50 et 100 pages. Il s'agit d'éléments de correspondance avec l'Administrateur de l'Université de Liège, avec certains Ministères (Ministère des Sciences et des Arts (administration de l'Enseignement supérieur, des Sciences et des lettres), Ministère de l'Industrie et du travail et du ravitaillement), et avec l'Administration des Mines]

Dossier 262 « Faculté Technique 1883-1914 » [Le dossier comprend un ensemble de plusieurs dizaines de sous-dossiers sur des thématiques diverses liées à la gestion de la Faculté : Successions, Gestion des Locaux, Gestion du Personnel, Plaintes. Ces sous-dossiers comportent de nombreuses lettres à l'attention ou rédigées par le Recteur, les Doyens et les Professeurs et les Ministres. Les dossiers suivants ont été étudiées : « Locaux de la Faculté Technique » (plusieurs centaines de pages, entre 1900 et 1914), « Personnel des Ecoles spéciales » (plusieurs dizaines de pages, entre 1900 et 1904), « 1903, Succession Scientifique de M. Dwelshauwers » (20 pages, 1903), « 1896- Personnel de la mécanique » (3 pages, 1896), « Laboratoire de mécanique appliquée » (9 pages, entre 1890 et 1891)]

Dossier 415 « Crédit matériel » [le dossier comprend 32 sous-dossiers comprenant eux même de quelques-unes à quelques dizaines de pages volantes manuscrites (et quelques fois imprimées pour les dossiers les moins anciens) constituant des éléments de correspondance entre Ministres, Recteurs, Administrateurs, Doyens, Inspecteurs, etc. Parmi ces sous-dossiers figurent les demandes de crédits matériels entre 1880 et 1912]

Dossier 300 « Subsidés extraordinaires » [le dossier comprend plusieurs dizaines de sous-dossiers constituant des demandes de subsidés pour publications, voyages, etc entre 1870-1879 et 1925].

Manuscrits (Fonds Patrimoniaux)

Dwelshauvers-Dery, Victor, et Omer De Bast, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4488 à MS4498, ca. 1890 [11 cahiers (chacun 68 feuillets sauf le 3^e (78), non numérotés) ; format : 8°, 200 x 165 mm ; copiés par Omer De Bast].

Dwelshauvers-Dery, Victor, et Omer De Bast, *Laboratoire de Jemeppe*, ULiège Library, MS4525, ca. 1888-1889 [1 cahiers ; 54 ff ; copié par Omer De Bast ; comprend de nombreux feuillets volants de 9,4 cm x 19 cm].

Dwelshauvers-Dery, Victor, et Omer De Bast, *Physique Industrielle*, ULiège Library, MS4510 à MS4515, ca. 1888 [6 cahiers ; 68 feuillets non numérotés ; format : 8° ; copiés par Omer De Bast ; le cahier Ms4513 contient des feuilles volantes intitulées *Etude d'un essai de chaudière exécuté le 21 septembre 1887 sous la direction de M. le professeur Dwelshauvers-Dery*].

Dwelshauvers-Dery, Victor, *Mécanique Appliquée*, ULiège Library, MS4602, 1868-1869 [947 pages ; 140 x 225 mm; copiés par Omer De Bast].

Hubert, H., et C. André, *Mécanique Appliquée 1, Cours de l'année académique 1905-1906*, ULiège Library, MS4335, 1905-1906 [168 feuillets ; format : 288 x 225 mm; copiés par C. André].

Hubert, H., et C. André, *Mécanique Appliquée 2*, ULiège Library, MS4336, 1905-1906 [Ce manuscrit constitue de la suite du manuscrit MS4335 ; 111 feuillets ; format : 288 x 225 mm; copiés par C. André].

Hubert, H., et C. André, *Physique Industrielle*. ULiège Library, MS4341, 1906-1907 [308 pages].

Institut d'histoire ouvrière, économique et sociale (Seraing)

Raven, A, *Exposition Nationale 1880. Exposition de la Maison Beer A Jemeppe, Près Liège. (Belgique)*, Liège, Imp. et Lith. de J. Daxhelet, 1880. [Catalogue des machines présentées par la Maison Beer], cote de rangement ARC-IHO-GBR-INDUS065.

« Plan Industriel de la Ville de Liège ».

Archives de l'Académie des Sciences à Paris

Dossier de M. Dwelshauvers-Dery

[Une farde comportant notamment deux lettres de Dwelshauvers-Dery, Trois rapports de candidature (mai 1900, 4 décembre 1893 et s.d.) présentant les travaux de Dwelshauvers-Dery et un portrait de Dwelshauvers-Dery]

Léauté, H. *Election d'un Correspondant dans la section de Mécanique. Mai 1900. Rapport sur les Travaux de M. Dwelshauvers-Dery.*]

Archives du Conservatoire des Arts et Métiers de Paris

Registres des minutes de la correspondance de la Direction

Correspondance du 12 décembre 1884 au 13 avril 1886

Archives de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

Fonds manuscrit de la Bibliothèque de l'École des Mines

Fonds manuscrit des "Journaux de voyage de MM. les Elèves"

5.7 Sources imprimées

Association amicale des anciens élèves de l'École nationale supérieure des mines de Paris, *Bulletin mensuel de l'Association amicale des élèves de l'École nationale supérieure des mines, Notes techniques*, Lille, Imprimerie Lefebvre-Ducrocq, 1904, p. 17-31

Association française du Froid et Association belge du Froid, *La Revue générale du froid et des industries frigorifiques*, t. III, n° 10, Octobre 1922.

Association des Ingénieurs Sortis de l'École de Liège, *Mémorial du Cinquantenaire : 1847-1897*, Liège, Charles Desoer Imprimeur-Editeur, 1898.

Belpaire, Théo, « Note sur le second principe de la thermodynamique, » *Bulletins de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres, et des Beaux-Arts de Belgique*, 34, 1872, p. 509-526.

Brasseur, Jean-Baptiste et Folie, François, *Précis du cours de mécanique appliquée (ouvrage posthume terminé d'après les manuscrits de l'auteur par F. Folie)*, Liège, Carmanne, 1868.

Buchetti, Jacques, *Guide pour l'essai des machines à vapeur et la production économique de la vapeur : ouvrage contenant tout ce qui a rapport aux indicateurs simples, totalisateurs; les propriétés des vapeurs, l'analyse des diagrammes, le travail indiqué, la dépense de vapeur; les essais calorimétriques; les freins de Prony ordinaires, automatiques; essais de vaporisation, combustibles, proportions des générateurs; décrets*, Paris, Bernard Tignol, 1891.

Duchesne, Armand, « La théorie de la machine à vapeur et la mesure directe et instantanée de la température de la vapeur et des parois », *Revue universelle des mines, de la métallurgie, des travaux publics, des sciences et des arts appliqués à l'industrie*, Liège, Association des Ingénieurs sortis de l'École de Liège, 1904 (juillet).

Duchesne, Armand, « Les phénomènes thermiques dans les machines à vapeur », *Revue de Mécanique*, t. XIX, Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1906 (2e semestre, juillet).

Dwelshauvers-Dery, V., *Programme des cours de Mécanique appliquée et de Physique Industrielle professés à l'École des Mines de Liège*, Hector Manceaux Imprimeur-Editeur, Mons, Henri Manceaux, Libraire, Bruxelles, 1876.

Dwelshauvers-Dery, Victor, « Les machines à vapeur et leurs progrès », dans Louis Olivier, Dir., *Revue générale des sciences pures et appliquée*, t. Ier, n°5, Paris, Octave Doin, Editeur, 15 mars 1890, p. 129-36.

Dwelshauvers-Dery, Victor et Weiler, Julien, *Referendum des Ingénieurs Enquête sur l'Enseignement de la Mécanique*, Liège, Marcel Nierstrasz, 1893.

- Dwelshauvers-Dery, Victor, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898, 1902 [Le livre rassemble différents imprimés. 1^{er} fascicule : 1897 ; 2^e fascicule : 1898 (pages 91 à 95 sur la tare des thermomètres) ; un complément de 1902 (il remplace les pages 1 à 6 de 1897)]
- Figuier, Louis, *Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes*, Furne, Jouvet et Cie, 1891 (Tome 1 des Suppléments, p. 1-110).
- France, Ministère de l'instruction publique, *Revue des sociétés savantes / publiée sous les auspices du Ministère de l'instruction publique et des cultes. Sciences mathématiques, physiques et naturelles*, Deuxième série, t. XI, 1877, p. 14-17.
- Hubert, Herman, « Les moteurs thermiques autres que la machine à vapeur. Etude théorique et pratique sur les moteurs à gaz, à essence, à pétrole et à air chaud », *Revue universelle des mines, etc.*, Liège, 1892, 141 pages, 8 planches.
- Hubert, Herman, « Utilisation directe des gaz de hauts-fourneaux pour la production de la force motrice », Congrès International des Mines et de la Métallurgie, Paris, 1900.
- Hubert, Herman, et Witz, Aimé, *Essai d'un moteur à gaz de haut-fourneau à quatre temps et à double effet d'une puissance de 1500 chevaux*, (Extrait de la Revue universelle des mines, etc., t. XVI, 4^e série, p. 213, 50^e année, 1906), Liège et Paris, 1906.
- Hubert, Herman, *Résumé des Cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle de l'Université de Liège. t.I (Physique industrielle)*, Liège, Imprimerie H. Vaillant-Carmanne (S.A.), 1910, 411 p.
- Hubert, Herman, *Résumé des Cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle de l'Université de Liège. t.II (Résistance des matériaux)*, Liège, Imprimerie H. Vaillant-Carmanne (S.A.), 1910, 284 p. [version dédicacée par l'auteur à l'Association des Elèves des Ecoles Spéciales]
- Hubert, Herman, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.I - Physique industrielle*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, 601 p.
- Hubert, Herman, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.II - Résistance des matériaux*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, 1913, 352 p.
- Hubert, Herman, *Précis des cours de Mécanique appliquée et de physique industrielle de l'Université de Liège, 2e édition revue et augmentée, t.III - Lois générales du mouvement des machines. Etude des moteurs thermiques et des moteurs à pesanteur*, Paris, H. Dunod & E. Pinat et Liège, H. Vaillant-Carmanne, ca. 1910, 787 p.
- Jouguet, E, *Théorie des moteurs thermiques*, Paris, Octave Doin et fils, 1909.
- Laboratoire de Mécanique de l'Université de Liège, *Etude de deux essais de machine à vapeur*, Marcel Nierstrasz, 1894.

- Ministère de l'Intérieur, *Situation de l'Enseignement supérieur donné aux frais de l'Etat, Rapport triennal présenté aux chambres législatives par le Ministre de l'intérieur, années 1853, 1854 et 1855*, Bruxelles, Emm. Devroye, Imprimeur du Roi, 1858, p. 24-28.
- Raven, A, Exposition Nationale 1880. Exposition de la Maison Beer A Jemeppe, Près Liège. (Belgique), Liège, Imp. et Lith. de J. Daxhelet, 1880. [Catalogue des machines présentées par la Maison Beer. Coll. Institut d'histoire ouvrière, économique et sociale (Seraing)].
- Reuleaux, Franz, *Cinématiques. Principes Fondamentaux d'une Théorie Générales des Machines*. (Debize, A. Trad.), Liège, Librairie Marcel Nierstrasz, 1877.
- Reuleaux, Franz, *Cinématiques. Principes Fondamentaux d'une Théorie Générales des Machines*. (Debize, A. Trad.), Atlas de 8 Planches Représentant 96 Figures, Liège, Librairie Marcel Nierstrasz, 1877.
- Scientific American* , Vol. 53, No. 16, 17 octobre 1885, couverture et p. 247-8.
- Société industrielle (Mulhouse, Haut-Rhin). Auteur du texte. Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse, 1877.
- Université de Liège, Actes du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées, Liège, du 25 juin au 1er juillet 1905 : section de mécanique appliquée, t.I., 1905.
- Université de Liège, Actes du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées, Liège, du 25 juin au 1er juillet 1905 : section de mécanique appliquée, t.II., 1905.
- Université de Liège, Actes du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées, Liège, du 25 juin au 1er juillet 1905 : section de mécanique appliquée, t.III., 1905.
- Université de Liège, Actes du Congrès international des mines, de la métallurgie, de la mécanique et de la géologie appliquées, Liège, du 25 juin au 1er juillet 1905 : section de mécanique appliquée, t.IV., 1905.
- Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'Ecole des Mines, inauguration des Instituts Universitaires du Val-Benoît (Novembre 1937) », Edition de la Revue Universelle des Mines, Liège, 1937.
- Willans, Pierre Willam, « Essais sur les Conditions économiques d'une machine à vapeur sans condensation fonctionnant comme machine simple, compound ou à triple expansion », *Bulletins de l'Institut des Ingénieurs civils de Londres*, Mémoire inséré dans les vol. XCIII (1887-1888) et XCVI (1888-1889) (Hubert, Herman, trad.) (Extrait de la *Revue Universelles des Mines, etc.*, 3^e série, t. V., p. 1, et t. VII, p. 159, 33^e année, 1889), Liège et Paris, Desoer, 1889, 116 p., 7 planches [livre dédicacé par Hubert à l'Association des Élèves des Écoles Spéciales de Liège].
- Willans, Pierre Willam, « Essais sur une machine à vapeur à condensation, fonctionnant comme machine simple, compound ou à triple expansion », *Proceedings of the Institution of civil*

Engineers (Londres), (Hubert, Herman, trad.) (Extrait de la *Revue Universelles des Mines, etc.*, t. XXVI., 3^e série, p. 57, 38^e année, 1894), Liège et Paris, Desoer, 1894, 116 p., 6 planches [la planche n°1 est manquante].

Williquet, Camille et Herman Hubert, *Code de l'industrie & des mines*, Hector Manceaux, Mons, 1889.
« Experimental Engine for the Liege School of Mines. Constructed by M. Charles Beer, Engineer, Jemeppe », *Engineering*, Décembre 1880, p. 516-517

5.8 Sources matérielles

6 modèles de la collection de modèles cinématiques de Franz Reuleaux construits en 1882. Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège.

1 modèle d'un indicateur de Beer, Maison de la Métallurgie et de l'Industrie de Liège. Numéro d'inventaire : 0000.002.043.

2 indicateurs datant de la fin du XIX^e siècle, Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège.

5.9 Sources iconographiques

Université de Liège - Dommages de guerre - Laboratoire de mécanique - Salle des machines, Photographie, 17 x 22 cm, Fonds photographique des dommages de la guerre 1914-1918 faits aux bâtiments de l'Université de Liège (positifs), Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43205, 1918. [la machine à vapeur des ateliers Beer]

Morin, L. *Université de Liège - Faculté technique - Laboratoire de mécanique appliquée*, Photographie, 35 x 45 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43230, s.d. [la machine à vapeur des ateliers Beer]

Morin, L. *Université de Liège - Faculté technique - Laboratoire de mécanique appliquée*, Photographie, 45 x 35 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43233, s.d. [Probablement une chaudière]

Morin, L. *Université de Liège - Faculté technique - Laboratoire de mécanique appliquée*, Photographie, 35 x 45 cm, Musée Wittert ULiège, Numéro d'inventaire 43234, s.d. [Collection de modèles cinématiques, notamment ceux de Reuleaux]

Références bibliographiques

- BABBAGE, Charles, « On a Method of Expressing by Signs the Action of Machinery », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 2, N°1/3, 1826, page 250-65.
- BAUDET, Jean C., *Histoire des techniques De l'outil au Système*, Paris, Vuibert, 2016.
- BERT, Jean-François et LAMY Jérôme. *Voir les savoirs Lieux, objets et gestes de la science*, Paris, Anamosa, 2021.
- BERTRAMS, Kenneth, *Universités & entreprises : milieux académiques et industriels en Belgique 1890-1970*, Bruxelles, Le Cri édition, 2006.
- BLOCH, Marc, « Technique et évolution sociale, réflexion d'un historien », dans : Jean Cassou (dir.) *L'homme la technique et la nature*, Rieder, 1938 (repris dans Marc Bloch *Mélanges historiques*, Paris, CNRS éditions, 2011, p. 833-838).
- ÇENGEL, Yunus A. et BOLES, Michael A., *Thermodynamics, An Engineering Approach*, 5th Edition. McGraw-Hill Higher Education, 2006.
- Cornell University, Reuleaux Kinematic Mechanisms Collection, <https://digital.library.cornell.edu/collections/kmoddl>, Consulté le 4 novembre 2021.
- DEFORGE, Yves, *Le graphisme technique, son histoire et son enseignement*, Champ Vallon (collection milieux), 1981.
- FERGUSON, Eugene S., *Engineering and the Mind's Eye*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 1992.
- FONTANON, Claudine, « Le laboratoire expérimental de mécanique », Dans : Michel Le Noel et Raymond Saint-Paul (dir.), *Le Conservatoire National des Arts et Métiers au cœur de Paris : 1794-1994*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Délégation à l'Action Artistique de la Ville de Paris, 1994, p. 171-176.
- FOX, Robert et GUAGNINI, Anna, "Laboratories, Workshops, and Sites. Concepts and Practices of Research in Industrial Europe, 1800-1914", *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, vol. 29, n° 1, University of California Press, 1998.
- FRESSOZ, Jean-Baptiste, « « The age of » et ses problèmes. Du phasisme matériel dans l'écriture de l'histoire », *Revue d'histoire du XIXe siècle*, 64, 2022, 173-188.
- GILLE, Bertrand (dir.) *Histoire des techniques*, Paris, Gallimard, 1978.
- HANLON, Robert T., *Block by block: The Historical and Theoretical Foundations of Thermodynamics*, Oxford University Press, 2020.
- HANOCQ, C., "Hubert (Herman), ingénieur, professeur à l'Université de Liège (1849-1922)." Dans *Biographie nationale / Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique*, 305-310. Bruxelles, Belgique, Emile Bruylant, 1964.

- HOUBERECHTS, André, *Traité de thermodynamique technique*, Louvain, Librairie Universitaire et Paris, Dunot, 3^e édition, 1962.
- INSTITUT DE FRANCE, *Index biographique de l'Académie des sciences : du 22 décembre 1666 au 1er octobre 1978 / Institut de France*, Paris, Gauthier-Villars, 1979
- KLEIN, Martin, J., « The Scientific Style of Josiah Willard Gibbs », dans Duren, Peter (ed.), *A Century of Mathematics in America - part II* », American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, 1988, p. 99-119.
- LAFITTE, Jacques, *Réflexions sur la science des machines*, Cahiers de la nouvelle journée, 21, Paris, Librairie Bloud & Gay, 1932.
- LEBOUTTE, René, PUISSANT, Jean et SCUTO, Denis, *Un siècle d'histoire industrielle (1873-1973). Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, industrialisation et sociétés*, Paris, Éditions Sedes, 1998.
- LEBRUN, Pierre, BRUWIER, Marinette, DHONDT, Jan et HANSOTTE, Georges, « Essai sur la révolution industrielle en Belgique 1770-1847 » (t. II, vol. 1.), dans *Histoire Quantitative et Développement de la Belgique au XIXe Siècle*, Bruxelles, Palais des Académies, 2^e ed., 1981.
- MALM, Andreas, *FOSSIL CAPITAL The Rise of Steam Power and the Roots of Global Warming*, London et New York, Verso, 2016.
- MICHOTTE, Fritz, “L'évolution Des Prix de Détail En Belgique de 1830 à 1913”, *Bulletin de l'Institut Des Sciences Économiques*, vol. 8, no. 3, 1937, p. 345–57. *JSTOR*, <http://www.jstor.org/stable/40742639>, Consulté le 8 août 2022.
- MUMFORD, Lewis, *Technics and Civilization* (1^e éd. 1934), (trad. fr. *Technique et civilisation*, Marseille, Parenthèses, 2016).
- OFFENSTADT, Nicolas (dir.), *Les mots de l'historien*, Presses Universitaires du Mirail, 2009 (2^e édition revue et corrigée, 1^e éd. 2004).
- PESTRE, Dominique, *Introduction au Science Studies*, Paris, La découverte, 2006.
- PROST, Antoine, *Douze leçons sur l'histoire*, Paris, Editions du Seuil, 2014 (Edition augmentée, 1^e éd. 1996, Coll. Points).
- SCHOLLIERS, Peter, « A century of real industrial wages in Belgium, 1840-1940 », dans P. Scholliers et V. Zamagni, eds., *Labour's reward, real wages and economic change in 19th and 20th century Europe* (Aldershot, 1995).
- SIBUM, Heinz Otto, « Reworking the Mechanical Value of Heat: Instruments of Precision and Gestures of Accuracy in Early Victorian England », *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, Volume 26, Issue 1, 1995, p. 73-106.
- SIMONDON, Gilbert, *Du mode d'existence des objets techniques*. Editions Aubier, 2012 [Edition revue et corrigée de l'ouvrage original de 1958].
- VAN NECK, Anne, *Les débuts de la machine à vapeur dans l'industrie belge (1800-1850)* (Unpublished doctoral dissertation), Université libre de Bruxelles, Faculté de Philosophie et Lettres, Bruxelles, 1975.
- VAN NECK Anne, « Les débuts de la machine à vapeur dans l'industrie belge : 1800-1850 », dans: *Bulletin de la Classe des lettres et des sciences morales et politiques*, t. 68, 1982. p. 245-265.
- VERKERK, Maarten J, HOOGLAND, Jan, VAN DER STOEP, Jan et DE VRIES, Marc. *Philosophy of Technology. An Introduction for Technology and Business Students*, Abingdon, Oxon, Routledge, 2016.

A. Chronologie de développement des machines à vapeur

Tableau A-1 : Synthèse de la chronologie de développement et des caractéristiques principales des machines à vapeur remarquables (chaque innovation est soulignée)

	Date d'invention	Période d'utilisation	Utilisation	Caractéristique du mouvement	Caractéristiques du piston.	Caractéristiques du cylindre	Différentes phases du fonctionnement	Pression Haute	Pression basse
<i>Machine de Newcomen (1663-1729)</i>	Constitue la majorité des machines sous le Régime français	Exclusivement pour l'exhaure des Mines et des carrières	Mouvement linéaire : Un balancier est utilisé pour imposer un mouvement linéaire à la tige du piston de la pompe	Simple effet. Pression atmosphérique sur la face supérieure. Pression variable sur la face inférieure (pression de la chaudière, puis dépression suite à la condensation).	Cylindre vertical	Admission : piston monte et la tige de la pompe descend. Condensation : piston descend et la tige de la pompe monte	Peu élevée.	Sous-atmosphérique. Condensation à l'intérieur du cylindre par injection d'eau.	
<i>Machine à simple effet de Watt (1736-1819)</i>			Mouvement linéaire : Un balancier est utilisé pour imposer un mouvement linéaire à la tige du piston de la pompe	Simple effet. Pression de la vapeur de la chemise sur la face supérieure (proche de la Patm). Pression variable sur la face inférieure.		Admission : la pression de la chaudière fait monter le piston. Échappement : descente du piston sous l'effet de son poids. Chasse vapeur vers condenseur.	Peu élevée	Sous-atmosphérique. <u>Condenseur</u> <u>d'une pompe</u> <u>pour extraire</u> <u>l'eau condensée</u> <u>et l'air.</u>	
<i>Machine à simple effet de Watt améliorée</i>				Pression variable sur la face supérieure (pression de la chaudière, ainsi le « coup de piston » qui entraîne la tige de la pompe est produit par la vapeur de la chaudière.		Admission (du PMH au PMB) : volume au-dessus de la face supérieure mis en communication avec chaudière ; espace en-dessous de la face inférieure mis en communication avec condenseur. Échappement : alimentation fermée ; faces supérieures et inférieures mises en communication. Poids de la pompe soulève le piston via le balancier.			

Machine de Watt à double effet	Brevet de 1782 (pour le double effet et la détente)	Première construction et mise en service en Angleterre en 1783-1784	Exclusivement pour l'exhaure des Mines et des carrières	Mouvement rotatif : Un balancier est relié à un système bielle-manivelle qui transforme le mouvement linéaire en un mouvement rotatif d'un arbre (un volant est nécessaire).	Double effet.	Cylindre vertical	« Détente de la vapeur » : entre le PMH et le PMB, seule une fraction de la course est réservée à l'admission, le reste est réservé à la détente. Utilisation d'un régulateur à boule pour ajuster la quantité de vapeur admise.	Peu élevée.	Sous-atmosphérique. Condenseur séparé. Utilisation d'une pompe pour extraire l'eau condensée et d'une pompe pour fournir l'eau pour la condensation.
Machine de Trevithick	Vers 1797	Utilisation dans une usine de puddlage en 1801 en Angleterre.	Locomotives et industrie (train de puddlage)					Pression élevée.	Pression atmosphérique. Pas de condenseur.
Machine d'Evans	1804 (USA)				Double effet				Pression atmosphérique. Pas de condenseur.

	Date d'invention	Période d'utilisation	Utilisation	Caractéristique du mouvement	Caractéristiques du piston.	Caractéristiques du cylindre	Différentes phases du fonctionnement	Pression Haute	Pression basse
<i>Machine de Woolf à détente (« Compound »)</i>	Brevet de 1781 de Hornblow et.	Réactualisation de la machine par Woolf dès 1804. Son associé Edwards en fabrique au moins jusque dans les années 1830	Les machines d'Edwards se sont répandues en France et en Belgique. La machine à balancier reste indiquée pour l'extraction de l'eau ou du minerais,	La machine d'Edwards avait un balancier.		La machine comporte é cylindres		Haute pression	La machine d'Edwards avait un condenseur.
<i>Machine de Cornouaille</i>			Utilisation dans les années 1840 pour le pompage des eaux en Belgique.		Simple effet		Détente poussée sur 9/10 de la course du piston. Forte réduction de la consommation de combustible.	Pression élevée.	
<i>Machine de Cartwright</i>	1804 (USA)	Introduite en Belgique/France au début du XIXe siècle par les frères Périer	Extraction de la houille	Suppression du balancier Utilisation de 2 bielles/2 manivelles		Vertical			

	Date d' invention	Période d' utilisation	Utilisation	Caractéristique du mouvement	Caractéristiques du piston.	Caractéristiques du cylindre	Différentes phases du fonctionnement	Pression Haute	Pression basse
<i>Machine à cylindre horizontal (Taylor)</i>	William Symington la réalise pour la première fois en Angleterre en 1802..	Construite en Angleterre par Taylor et Martineau dès 1825. Adopté en Angleterre seulement dans les années 1840		Utilisation d' un système manivelle.		<u>Horizontal</u>			
<i>Machine Corliss</i>	1867						Système de distribution avec 4 obturateurs cylindriques, permettant des <u>grandes vitesses du piston.</u>		

B. Chronologie de la vie de Victor Dwelshauvers-Dery

Tableau A-2 : Dates importantes dans la carrière de Victor Dwelshauvers-Dery

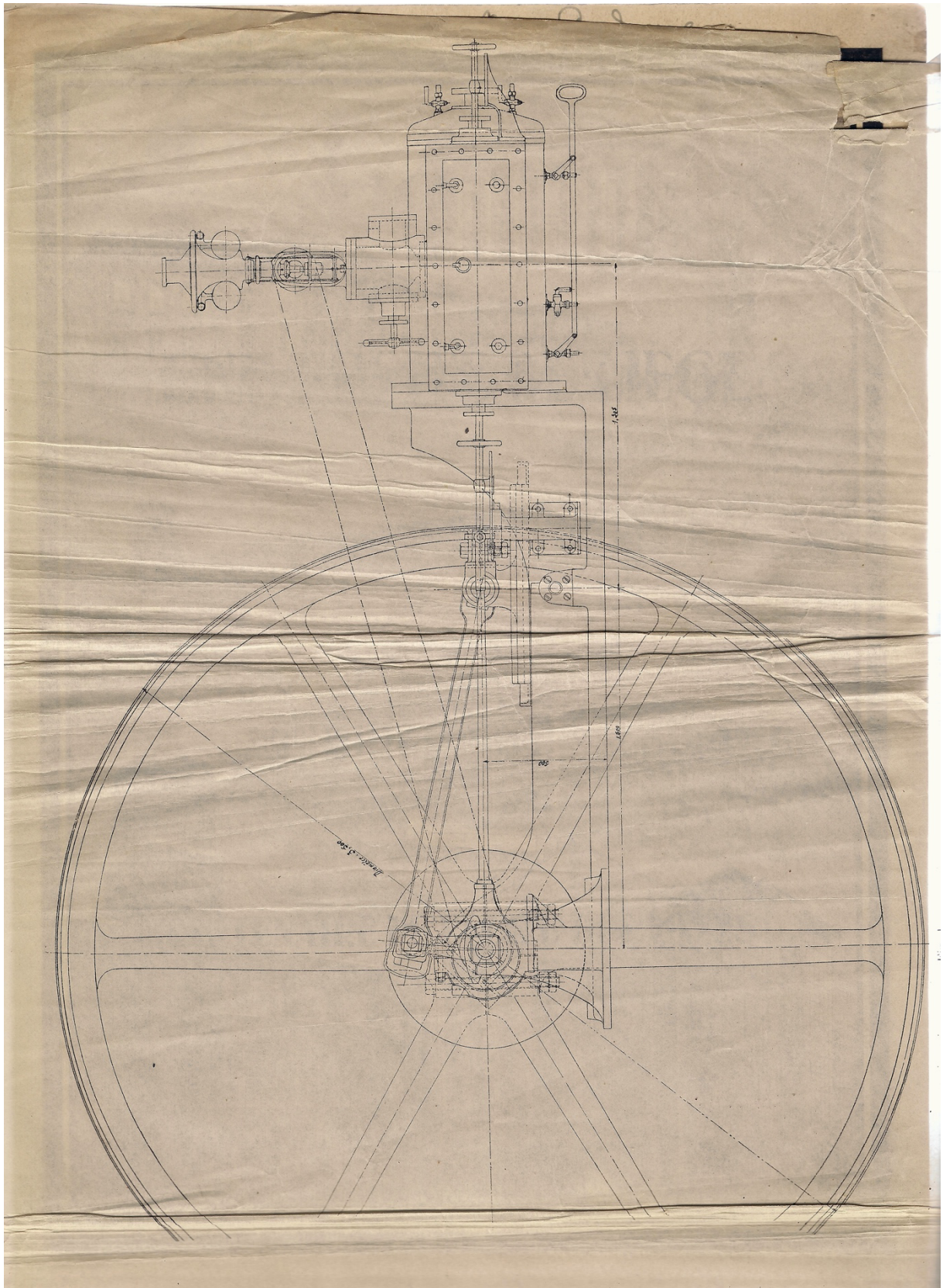
Date	Évènement lié à la thermodynamique	Évènement lié à la vie de Dwelshauvers	Évènement lié à la vie de Hubert	Source
1824	Publication du livre de Carnot			
1834	Publication du mémoire de Clapeyron « Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur »			
1836		Naissance à Dinant (Belgique) le 25 avril		
1842	Équivalent mécanique de la chaleur (Mayer)			
1843	Équivalent mécanique de la chaleur (Joule)			
1849	Thomson écrit « <i>An account of Carnot's Theory</i> ». Lancement du terme Thermodynamique et acceptation du mot énergie (selon le sens de Young)		Naissance à Liège le 19 mai	
1861		Diplômé ingénieur mécanicien		Association des Ingénieurs Sortis de l'École de Liège, Mémorial du Cinquantenaire : 1847-1897, Liège, Charles Desoer Imprimeur-Editeur, 1898.
1862		Voyage à Londres. Il ramène un indicateur de type Richards		Dwelshauvers-Dery, Victor, et Julien Weiler, <i>Referendum des Ingénieurs Enquête sur l'Enseignement de la Mécanique</i> , Liège, Marcel Nierstrasz, 1893, p. 39.

1868		Attribution du cours de mécanique appliquée à l'Université de Liège		
20 février 1869		Naissance de Victor Félix Dwelshauvers		www.geneanet.org
1872			Admission au corps des Mines	Association française du Froid..., <i>La Revue générale</i> ..., t. III, n° 10, Octobre 1922, 375.
1881			Entrée à l'Université de Liège (Répétiteur puis Chargé de cours)	Association française du Froid..., <i>La Revue générale</i> ..., t. III, n° 10, Octobre 1922, 375.
Du 21 au 23 février 1887		Premiers essais au laboratoire de Jemeppe		« Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège (document manuscrit de Dwelshauvers, p. 16).s
Août 1887		Voyage en Angleterre		« Succession Scientifique de M. Dwelshauvers-Dery », Dossier 262 (« Faculté Technique 1883-1914 »), Fonds du secrétariat Central, Archives de l'Université de Liège (document manuscrit de Dwelshauvers, p. 16).
20 mai 1897		Décès de Françoise Félicie Dery (épouse)		www.geneanet.org
1892		Transfert de son laboratoire dans le centre de Liège (Quai des États-Unis)		

1895			Essai d'un moteur à gaz de 8 chevaux à la Société. John Cockerill à Seraing	Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, « Centenaire de l'Ecole des Mines,... », Edition de la Revue Universelle des Mines, Liège, 1937, p. 196.
18 juin 1900		Élu correspondant pour la section de mécanique		Institut de France, <i>Index biographique de l'Académie des sciences : du 22 décembre 1666 au 1er octobre 1978 / Institut de France</i> , Paris : Gauthier-Villars, 1979
			VIIIe Congrès général des mineurs allemands à Dortmund.	Association française du Froid..., <i>La Revue générale ...</i> , t. III, n° 10, Octobre 1922, 375.
1904		Départ à la retraite	Nommé Professeur ordinaire	
1908			Congrès international du froid à Paris.	Association française du Froid..., <i>La Revue générale ...</i> , t. III, n° 10, Octobre 1922, 375.
15 mars 1913		Décès à Liège		
1914			Exil en Angleterre	
1917			Secrétaire Général du Ministère des Affaires Économiques (Gouvernement du Havre)	Association française du Froid..., <i>La Revue générale ...</i> , t. III, n° 10, Octobre 1922, 375.
1919			Promotion à l'éméritat	Association française du Froid..., <i>La Revue générale ...</i> , t. III, n° 10, Octobre 1922, 375.
1922			Décès à Spa le 30 septembre	

C. Vues en plan et en élévation de la Machine à vapeur de Beer installée au Laboratoire de Mécanique

Ces vues sont tirées des planches issues de Victor DWELSHAUVERS-DERY, *Données relatives à la machine à vapeur*, Liège, Charles Desoer, 1897, 1898 et 1902.



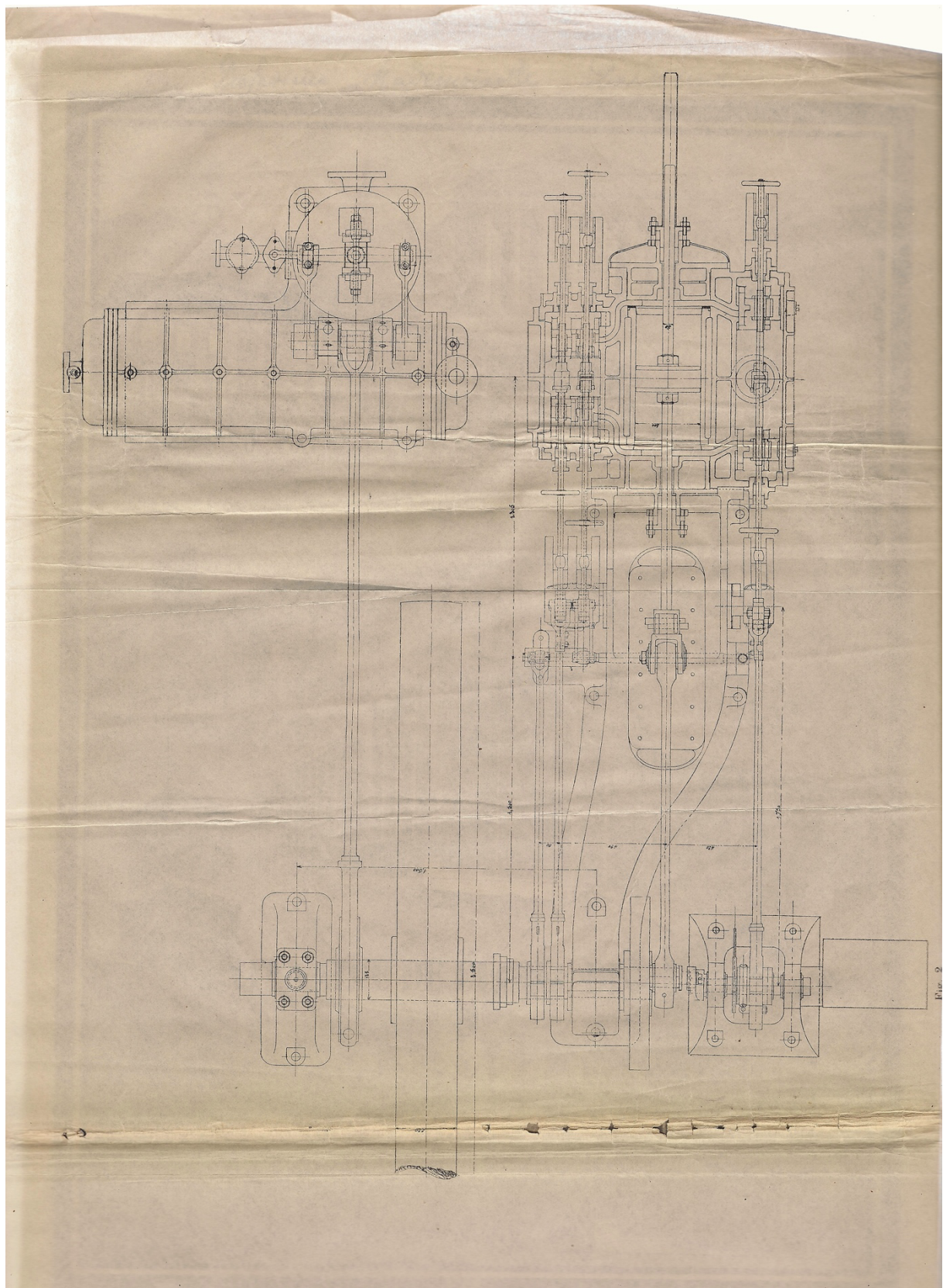


Figure A.1 : Vues en élévation et en plan de la machine à vapeur de Beer

D. Évolution des prix de détails en Belgique (Michotte, 1937)

Tableau A-3 : Évolution des prix de détail en Belgique de 1871 à 1913 (extrait de Michotte (1937))

	Lait 1 litre	Lait battu 1 L	Fromage mou 1 kg	Beurre 1 kilo	Pommes de terre 100 kg	Sirop 1 kg	Chicorée 1 kg	Savon brun 1 kg	Chêne 1 stère	Hêtre 1 stère	Bois blanc 1 stère	Braises 1 hect.*	Charbon 500 kg	Huile de Colza 1 L	Huile de lin 1 L
1871	0.15	0.09	0.21	3.06	9.50	0.80	0.28	0.43	7.00	9.50	7.00	1.50	11.00	0.99	0.79
1872	0.15	0.10	0.20	2.78	8.00	0.40	0.31	0.46	10.00	17.00	10.00	1.75	13.00	0.85	0.84
1873	0.15	0.10	0.20	2.94	7.70	0.59	0.40	0.48	10.00	16.00	14.00	1.80	19.00	0.79	0.77
1874	0.16	0.10	0.22	3.20	8.50	0.41	0.40	0.46	11.00	15.50	14.50	1.90	12.00	0.68	0.67
1875	0.18	0.10	0.22	3.20	6.80	0.72	0.44	0.41	12.00	16.50	8.50	2.00	12.50	0.71	0.60
1876	0.18	0.10	0.22	3.36	9.80	0.72	0.44	0.48	9.50	14.00	8.50	2.00	12.50	-	-
1877	0.19	0.08	0.25	3.16	10.5	0.75	0.39	0.40	8.00	14.50	8.50	2.00	11.20	0.92	0.72
1878	0.20	0.09	0.24	2.88	9.80	0.72	0.35	0.42	8.50	14.50	9.75	2.00	10.00	0.73	0.67
1879	0.20	0.09	0.27	2.85	11.50	0.68	0.32	0.39	8.50	14.50	9.75	2.00	10.00	0.72	0.62
1880	0.20	0.10	0.27	3.20	10.30	0.65	0.35	0.34	8.50	16.00	11.00	2.00	10.00	0.72	0.66
1881	0.20	0.09	0.36	3.24	7.40	0.64	0.34	0.36	8.50	16.00	11.00	2.00	10.00	0.68	0.62
1882	0.19	0.08	0.32	3.10	9.00	0.63	0.32	0.35	8.50	13.50	9.00	2.00	10.00	0.71	0.60
1883	0.19	0.08	0.34	3.18	10.00	0.59	0.30	0.35	8.50	14.00	8.50	2.00	10.00	0.80	0.52
1884	0.19	0.08	0.39	2.80	6.50	0.59	0.29	0.34	8.00	13.00	8.00	2.00	10.00	0.71	0.49
1885	0.19	0.17	0.40	2.66	5.00	0.56	0.29	0.32	8.00	13.00	8.00	2.00	10.00	0.57	0.54
1886	0.16	0.15	0.40	2.70	5.30	0.52	0.28	0.29	7.00	11.00	7.00	1.80	8.00	0.50	0.51
1887	0.15	0.14	0.40	2.60	7.00	0.49	0.27	0.29	11.50	12.00	9.00	1.80	8.00	0.51	0.52
1888	0.14	0.09	0.38	2.60	8.80	0.26	0.26	0.25	12.00	12.00	9.50	2.00	9.00	0.60	0.54
1889	0.14	0.07	0.31	2.60	8.20	0.47	0.26	0.24	11.00	11.56	9.00	3.25	10.87	0.68	0.56
1890	0.13	0.07	0.34	2.48	6.40	0.52	0.29	0.32	11.25	12.50	9.00	4.25	14.00	0.67	0.56
1891	0.14	0.07	0.26	2.60	9.10	0.58	0.26	0.27	10.50	12.00	9.00	3.50	12.00	0.66	0.53
1892	0.14	0.09	0.23	2.78	8.20	0.56	0.24	0.27	9.50	11.50	8.50	3.00	10.50	0.64	0.53
1893	0.15	0.09	0.28	2.73	4.80	0.52	0.23	0.26	10.00	11.00	9.00	2.75	10.50	0.62	0.51
1894	0.15	0.09	0.28	2.52	5.70	0.51	0.29	0.26	10.00	12.00	8.50	3.00	11.00	0.53	0.51
1895	0.17	0.08	0.26	2.44	7.00	0.50	0.24	0.26	10.00	12.50	10.00	2.00	11.00	0.51	0.47
1896	0.13	X	0.27	2.48	5.30	0.48	0.23	0.26	9.50	12.00	9.00	2.00	12.00	0.52	0.49
1897	0.12	0.07	0.25	2.56	6.00	0.45	0.21	0.26	9.50	12.00	9.00	2.20	13.00	0.59	0.47
1898	0.11	0.06	0.23	2.57	7.00	0.44	0.21	0.22	9.50	12.00	9.00	2.20	13.00	0.55	0.44
1899	0.15	0.05	0.22	2.60	5.50	0.44	0.21	0.23	9.50	12.00	10.00	2.80	14.00	0.51	0.43
1900	0.14	0.06	0.40	2.78	5.80	0.49	0.22	0.27	11.50	12.00	10.50	3.60	17.00	0.67	0.70
1901	0.14	0.07	0.40	2.72	6.40	0.48	0.24	0.35	11.50	12.00	11.00	3.75	12.50	0.68	0.70
1902	0.14	0.04	0.40	2.72	6.60	0.46	0.26	0.31	12.00	13.00	11.00	3.75	12.50	0.62	0.70
1903	0.13	0.07	0.37	2.76	9.00	0.46	0.30	0.31	13.00	12.50	11.00	3.50	13.00	0.56	0.58
1904	0.13	0.06	0.33	2.76	7.60	0.38	0.26	0.26	13.50	12.00	11.00	1.40	12.00	0.54	0.44
1905	0.13	0.05	0.33	2.80	8.20	0.35	0.25	0.24	8.50	10.50	7.50	6.50	13.50	0.55	0.44
1906	0.13	0.07	0.33	2.90	8.80	0.38	0.27	0.25	9.00	11.00	8.00	8.00	14.00	0.68	0.55
1907	0.17	0.10	0.39	2.88	7.80	0.50	0.26	0.24	9.75	13.00	7.50	6.00	13.75	0.85	0.60
1908	0.16	0.09	0.22	2.89	7.80	0.45	0.29	0.33	9.50	13.00	7.25	6.00	14.00	0.84	0.53
1909	0.17	0.09	0.40	2.94	7.80	0.48	0.26	0.27	8.50	13.00	8.00	6.00	14.00	0.73	0.57
1910	0.17	0.10	0.50	3.06	8.00	0.48	0.28	0.29	9.50	13.00	8.50	6.50	10.00	0.61	0.87
1911	0.16	0.10	0.50	3.20	10.70	0.50	0.32	0.33	8.50	13.00	8.00	7.00	12.00	0.71	0.98
1912	0.19	0.24	0.60	3.22	8.40	0.55	0.55	0.34	9.00	13.00	8.00	15.00	16.00	0.72	0.82
1913	0.19	X	X	3.08	6.40	0.55	0.29	0.32	8.50	12.50	8.00	14.00	17.00	0.72	0.59
1914	0.18	X	X	X	X	0.55	0.29	0.31	10.00	12.00	9.00	14.00	16.00	0.80	0.59

* à partir de 1905, par 100 kilos

Tableau A-4 : Évolution des prix de détail en Belgique de 1871 à 1913 (extrait de Michotte (1937)) – Suite

	Farine 1 kg	Pain from. 1 kg	Pain seigle 1 kg	Viande 1kg	Riz 1 kg	Café 1 kg	Figues 1 kg	Sel 1 kg	Sucre en pain 1 kg	Poivre 1 kg	Vinaigre 1 L	Cassonade 1 kg	Stockvisch 1 kg	Hareng pièce	Morue 1 kg	Amidon & kg
1871	0.49	0.50	0.29	1.38	0.32	2.34	0.50	0.17	1.62	2.00	0.13	1.46	0.25	0.09	0.47	X
1872	0.50	0.48	0.20	1.52	0.33	2.31	0.56	0.14	1.92	2.50	0.13	1.55	0.26	0.10	0.52	X
1873	0.55	0.50	0.22	1.64	0.33	2.92	0.60	0.11	1.86	2.70	0.13	1.60	0.42	0.15	0.69	X

1874	0.52	0.50	0.22	1.50	0.34	3.31	0.50	0.12	1.60	2.80	0.13	1.53	0.40	0.10	0.76	X
1875	X	0.50	0.20	1.48	0.34	3.30	0.44	0.11	1.50	2.90	0.13	1.42	0.32	0.09	0.74	X
1876	0.40	0.50	0.20	1.45	0.39	3.56	0.60	0.10	1.50	2.95	0.13	1.47	0.36	0.10	0.78	X
1877	0.44	0.55	0.25	1.55	0.34	3.33	0.45	0.08	1.74	2.40	0.12	1.55	0.38	0.12	0.79	X
1878	0.42	0.55	0.25	1.56	0.38	3.33	0.45	0.08	1.48	2.50	0.11	1.41	0.32	0.12	0.64	X
1879	0.41	0.55	0.25	1.50	0.34	2.94	0.56	0.08	1.40	2.00	0.12	1.53	0.33	X	0.59	X
1880	0.41	0.55	0.30	1.44	0.34	2.55	0.56	0.08	1.50	2.00	0.11	1.43	0.32	X	0.70	X
1881	0.41	0.50	0.30	1.43	0.31	2.32	0.62	0.08	1.53	2.00	0.11	1.40	0.31	X	0.61	X
1882	0.43	0.50	0.30	1.50	0.30	2.30	0.50	0.08	1.40	2.00	0.11	1.20	0.31	X	0.62	X
1883	0.34	0.50	0.30	1.60	0.27	1.78	0.55	0.06	1.32	2.00	0.11	1.10	0.40	X	0.80	X
1884	0.32	0.45	0.28	1.58	0.27	1.80	0.52	0.04	1.30	2.30	0.12	1.08	0.39	X	0.77	X
1885	0.29	0.37	0.23	1.45	0.27	1.75	0.49	0.05	1.08	2.35	0.12	1.18	0.38	X	0.75	X
1886	0.26	0.32	0.20	1.35	0.26	1.83	0.48	0.05	1.06	2.65	0.12	1.17	0.30	X	0.85	X
1887	0.27	0.25	0.18	1.00	0.25	2.40	0.46	0.05	1.04	2.60	0.13	1.16	0.34	X	0.93	X
1888	0.30	0.30	0.20	1.05	0.24	2.45	0.43	0.05	1.10	2.80	0.13	1.13	0.33	X	0.91	X
1889	0.29	0.30	0.20	1.13	0.24	2.39	0.39	0.05	1.20	2.40	0.13	1.16	0.32	X	0.77	X
1890	0.29	0.30	0.20	1.20	0.28	3.03	0.47	0.05	1.04	2.50	0.13	1.27	0.30	X	0.70	X
1891	0.34	0.30	0.20	1.08	0.30	3.07	0.52	0.05	1.10	2.50	0.13	1.10	0.35	X	0.72	X
1892	0.29	0.25	0.15	1.10	0.26	2.87	0.46	0.05	1.10	2.50	0.13	1.10	0.39	X	0.80	X
1893	0.27	0.25	0.15	1.06	0.25	2.88	0.44	0.05	1.10	1.85	0.13	1.20	0.32	0.08	0.95	0.53
1894	X	0.25	0.15	1.14	0.23	2.73	0.38	0.05	1.06	1.80	0.13	1.16	0.30	0.05	0.95	0.48
1895	0.19	0.25	0.20	1.14	0.23	2.86	0.37	0.05	0.88	1.25	0.12	1.10	0.32	0.05	0.96	0.46
1896	0.20	0.25	0.20	1.08	0.21	2.65	0.37	0.04	0.88	1.25	0.12	0.95	0.30	0.06	0.84	0.45
1897	0.21	0.25	0.20	1.03	0.22	2.27	0.39	0.04	0.82	1.25	0.10	0.75	0.45	0.06	0.95	0.45
1898	0.28	0.25	0.20	1.04	0.25	1.82	0.38	0.04	0.88	1.60	0.10	0.84	0.44	0.08	0.95	0.46
1899	0.27	0.25	0.20	1.25	0.27	1.50	0.38	0.04	0.92	2.00	0.10	0.88	0.45	0.07	0.99	0.50
1900	0.22	0.25	0.20	1.15	0.27	1.45	0.38	0.05	0.92	2.00	0.11	0.85	0.55	0.13	1.09	0.50
1901	0.21	0.25	0.20	1.12	0.26	1.52	0.39	0.05	0.96	2.00	0.11	0.83	0.54	0.10	0.89	0.50
1902	0.24	0.26	0.22	1.18	0.26	1.45	0.38	0.05	0.94	2.00	0.11	0.80	0.44	0.07	0.83	0.49
1903	0.21	0.28	0.24	1.38	0.25	1.30	0.45	0.05	0.86	2.00	0.11	0.77	0.41	0.07	0.79	0.47
1904	0.25	X	X	1.20	0.25	1.27	0.42	0.05	0.57	1.75	0.09	0.53	0.47	0.06	0.75	0.46
1905	0.23	0.21	0.17	1.50	0.25	1.41	0.41	0.05	0.55	1.90	0.09	0.63	0.45	0.05	0.70	0.44
1906	0.24	0.21	0.17	1.48	0.28	1.81	-	0.05	0.62	2.00	0.10	0.59	0.60	0.07	0.65	0.47
1907	0.25	0.23	0.16	1.62	0.27	1.74	-	0.05	0.60	1.70	0.09	0.60	0.55	0.07	0.62	0.46
1908	0.28	0.26	0.17	1.78	0.28	1.81	0.58	0.05	0.61	1.70	0.10	0.62	0.49	0.05	0.70	0.47
1909	0.33	0.28	0.19	1.67	0.27	1.59	X	0.05	0.60	1.70	0.10	0.58	0.51	0.06	0.65	0.47
1910	0.29	0.26	0.17	1.63	0.28	1.81	X	0.05	0.61	1.70	0.09	0.57	0.42	0.06	0.63	0.46
1911	0.25	0.23	0.17	1.80	0.27	2.33	X	0.05	0.66	1.70	0.10	0.57	0.48	0.06	0.66	0.46
1912	0.25	0.27	0.18	1.75	0.34	3.08	X	0.05	0.67	1.80	0.10	0.56	0.49	0.06	0.74	0.46
1913	0.25	0.25	0.13	1.80	0.36	3.28	X	0.05	0.62	1.85	0.12	0.55	0.47	0.07	0.79	0.49

E. Salaire nominaux et coût de la vie de 1835 à 1939

Tableau A-5 : Salaires nominaux (en francs belges) et indice du coût de la vie (1913=100)

	<i>Mining</i>	<i>Manufacturing</i>		<i>Construction</i>	<i>Agriculture</i>	<i>Civil</i>	<i>Cost of</i>
	<i>year</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>week</i>	<i>day</i>	<i>servants</i>	<i>living</i>
		<i>year</i>	<i>year</i>			<i>year</i>	<i>(1913=100)</i>
1878	842	1 013	913				108
1879	809	1 009	901	23.6			110
1880	920	1 047	965	23.6	2.04	1 452	106
1881	931	1 052	967				109
1882	926	1 033	925				105
1883	1 006	1 088	989				109
1884	914	1 052	953	26.0		1 477	101
1885	812	1 081	938	26.0			94
1886	783	1 095	943				96
1887	815	1 096	940				96
1888	869	1 092	959				92
1889	932	1 124	1 013				100
1890	1 117	1 136	1 058		1.96	1 442	93
1891	1 086	1 136	1 054	26.0			98
1892	957	1 141	991	26.0			99
1893	887	1 095	961	26.0			89
1894	941	1 106	999	25.3			89
1895	948	1 132	987	26.7	1.98		90
1896	980	1 107	1 016	26.7			87
1897	1 023	1 149	1 032	26.7		1 439	90
1898	1 097	1 125	1 066	28.8			92
1899	1 168	1 130	1 091				89
1900	1 413	1 160	1 189	28.2			93
1901	1 247	1 156	1 105	28.2		1 448	94
1902	1 177	1 175	1 110	28.2			91
1903	1 206	1 172	1 123	28.2			98
1904	1 155	1 155	1 105	28.2			96
1905	1 129	1 145	1 090	28.2			100
1906	1 342	1 210	1 139	28.2			95
1907	1 477	1 212	1 150	28.2			102
1908	1 401	1 178	1 186	35.2			102
1909	1 275	1 237	1 214	35.2			103
1910	1 325	1 244	1 249	35.2	2.41	1 500	104
1911	1 339	1 233	1 273	35.2			108
1912	1 406	1 240	1 327	35.2			105
1913	1 539	1 230	1 366	35.2		1 500	100
1914	1 234		1 337			1 500	100
1915	988						145
1916	1 255						261
1917	1 690						535
1918	2 356						841
1919	3 687			72.5		2 853	374
1920	6 484			148.2		4 300	475
1921	5 918			160.3		4 350	420
1922	5 926			162.6		4 350	398
1923	7 440			187.7		4 350	470
1924	8 816			160.0		5 053	533

	<i>Mining</i> year	<i>Manufacturing</i> <i>I</i> year	<i>Manufacturing</i> <i>II</i> year	<i>Construction</i> week	<i>Agriculture</i> day	<i>Civil</i> <i>servants</i> year	<i>Cost of</i> <i>living</i> (1913=100)
1925	7 894			167.1		6 250	567
1926	9 316			181.8	20.96	6 805	729
1927	12 290			198.9	23.95	9 639	822
1928	12 400			281.5	28.54	10 266	867
1929	14 681			363.8	28.63	10 916	951
1930	15 553			322.5	28.54	11 600	956
1931	12 757			275.0	26.94	11 750	894
1932	9 356			228.2	25.28	10 805	864
1933	10 028			239.2	24.19	10 439	843
1934	10 068			204.8	24.19	10 600	812
1935	9 753			206.4	23.47	9 837	814
1936	10 725			211.4	24.43	10 656	847
1937	13 504			223.1	26.39	11 939	884
1938	14 128			237.2	26.78	13 154	893
1939	13 819			221.7	26.97	12 512	914

(source : Peter SCHOLLIERS, « A century of real industrial wages in Belgium, 1840-1940 », dans P. SCHOLLIERS et V. ZAMAGNI, eds., *Labour's reward, real wages and economic change in 19th and 20th century Europe* (Aldershot, 1995), p. 203-205)

« Manufacturing I » est une moyenne pondérée de 3 professions (charpentier, conducteur et surveillant) de 1840 à 1875 et de 7 professions industrielles (charpentier, conducteur et surveillant, maçon, imprimeur, distillateur et journalier) de 1870 à 1913.

« Manufacturing II » est une moyenne pondérée de 4 professions industrielles (mineur, métallurgiste, travailleurs du zinc et du coton) de 1840 à 1850, de 6 professions industrielles industrielles (mineur, métallurgiste, ingénieurs, travailleurs du zinc, du lin et du coton) de 1855 à 1914.

F. Lexique

Formulation ancienne	Formulation actuelle
Coefficient de dépense	Coefficient de décharge
Dé	Doigt de gant
Dépense en une heure	Débit volumique horaire
Poids du mètre cube d'eau	Masse volumique
Température d'ébullition	Température d'évaporation

**G. Mémoires présentés au Congrès international de mécanique
appliquée de Liège en 1905**

1	Groupe A 1 ^{ère} question	« <i>SUR LES VOLANTS ELASTIQUES</i> »	Tome I	L. Lecornu	Ingénieur en chef des Mines Professeur à l'Ecole polytechnique et à. L'Ecole supérieure des Mines de Paris	France
2	Groupe A 2 ^{ème} question	« <i>THEORIE DE LA RESISTANCE DES PISTONS</i> »	Tome I	Ch. Hannock	Ingénieur	Belgique
3	Groupe B 1 ^{ère} question	« <i>DIMENSIONS DES MOTEURS ET MODE DE CLASSIFICATION</i> »	Tome I	Ch. de Herbais de Thun		
4	Groupe B 1 ^{ère} question	« <i>SUR LA THEORIE DES MOTEURS THERMIQUES. Comparaison des machines à feu interne et des machines à feu externe</i> »	Tome I	M. Jouguet	Professeur à l'Ecole des Mines de Saint- Etienne	France
5	Groupe B 2 ^{ème} question	« <i>ESSAIS DES MOTEURS</i> »	Tome I	R. E. Mathot et Ch. de Herbais de Thun		
6	Groupe B 3 ^{ème} question	« <i>LES MEILLEURS GAZ PAUVRES</i> »	Tome I	Aimé Witz	Professeur à la Faculté libre des Sciences de Lille	France

7	Groupe D 1 ^{ère} question	« BASES DU CALCUL DES TURBINES A VAPEUR »	Tome I	Donat Banki	Professeur à Budapest	
8	Groupe E 1 ^{ère} question	« LA SURCHAUFFE appliquée à la machine à vapeur d'eau »	Tome I	François Sinigaglia	Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique de Naples	Italie
9	Groupe D 1 ^{ère} question	« CONSIDERATIONS SUR LES TURBINES A VAPEUR à chutes de vitesse »	Tome II	A. Rateau	Professeur à l'Ecole des Mines de Paris	France
10	Groupe D 1 ^{ère} question	« NOTE SUR LA CONSTRUCTION DES TURBINES A VAPEUR et leurs résultats industriels »	Tome II	R. Mouchot	Directeur du Bureau Technique de la Société Brown- Boveri et Cie	
11	Groupe D 1 ^{ère} question	« NOTE SUR LE développement des turbines à vapeur et spécialement sur leur application à la propulsion des navires »	Tome II	G. Hart	Ingénieur Attaché au Service Maritime entre La France et l'Angleterre	
12	Groupe D 1 ^{ère} question	« Sur les turbines- pompes centrifuges à haute pression et à grande vitesse »	Tome II	M. Hoffstedt	Professeur à l'Ecole Polytechnique de Stockholm	Suède
13	Groupe D 1 ^{ère} question	« TURBINES A VAPEUR DE LAVAL à disque unique et DE LAVAL-BREGUET à disques multiples »	Tome II	K. Sosnowski	Directeur de la Société de Laval	

14	Groupe B 1 ^{ère} question	« <i>CONSIDERATIONS SUR LE Rendement théorique des Moteurs à explosion à compression préalable</i> »	Tome II	J. Boulvin	Professeur à l'Université de Gand	Belgique
15	Groupe B 3 ^{ème} question	« <i>MODE DE REGLAGE. Cycles et Construction des Moteurs à combustion interne</i> »	Tome II	R. E. Mathot		
16	Groupe B 1 ^{ère} question	« <i>Influence de l'action des parois sur le rendement des moteurs à gaz</i> »	Tome II	L. Letombe	Ingénieur des Arts et Manufactures	
17	Groupe B 5 ^{ème} question	« <i>Mémoire sur les turbines à gaz</i> »	Tome II	Rudolph Barcow	Ingénieur à Charlottenburg	Allemagne
18	Groupe B 5 ^{ème} question	« <i>LA TURBINE A GAZ (Système Armengaud-Lemale)</i> »	Tome II	René Armengaud	Ingénieur à Paris	France
19	-	« <i>DISTRIBUTION DE L'ENERGIE PAR L'ELECTRICITE. MOTEURS COLLECTIFS ET MOTEURS INDIVIDUELS</i> »	Tome II	Gustave L'HOEST	Ingénieur en chef, inspecteur de direction aux chemins de fer de l'Etat belge	Belgique
20	Groupe E 1 ^{ère} question	« <i>Applications de la vapeur surchauffée</i> »	Tome II	M. Compère	Ingénieur-Directeur de l'Association parisienne des Propriétaires	France

					d'appareils à vapeur	
21	Groupe E 1 ^{ère} question	« <i>PRODUCTION ET EMPLOI DE LA VAPEUR SURCHAUFFEE DANS LES LOCOMOBILES. Les locomobiles à vapeur surchauffée de R. Wolf</i> »	Tome II	Karl Heilmann	Ingénieur Diplômé	
22	Groupe F 3 ^{ème} question	« <i>NOTE SUR LA Chaudière Solignac-Grille</i> »	Tome II	G. Hart	Ingénieur attaché au service maritime entre la France et l'Angleterre	
23	Groupe D 2 ^{ème} question	« <i>NOTE SUR LES VENTILATEURS à Turbines multiples à haute pression (Système E. Farcot. Fils,)</i> »	Tome II	E. Farcot fils	Ingénieur- Constructeur à Paris	France
24	-	« <i>Quelques Considérations sur les Compresseurs d'air</i> »	Tome II	Joseph François	De l'ancienne firme Dubois et François	
25		« <i>Sur les Machines Frigorifiques.</i> »	Tome III	M. L. Marchis	Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.	France
26		« <i>Sur la transmission par courroie à tension artificielle en particulier l'Enrouleur Leneveu</i> »	Tome III	M. P. Daubresse	Professeur à l'Université de Louvain	Belgique

	Groupe E 5 ^{ème} question	« Note sur le générateur Leroux à grand volume d'eau et à circulation forcée »	Tome III	Charles De Keyser	Ingénieur- Professeur à l'Ecole polytechnique de Bruxelles	Belgique
27		« Rapport sur la Marche en parallèle des Alternateurs »	Tome III	M. P. Boucherot	Délégué de la Société Internationale des Electriciens	
28	Groupe B	« L'EVOLUTION DE LA Construction des grands Moteurs à Gaz en Belgique »	Tome III	Herman Hubert	Inspecteur général des Mines, Professeur à l'Université de Liège	Belgique
29		« Détermination du rendement volumétrique et du rendement dynamique D'UN COMPRESSEUR D'AIR »	Tome III	L. Calmeau	Ingénieur à la Société de la Vieille- Montagne	
30		« QUELQUES ANTIQUITES MECANIQUES DE LA BELGIQUE »	Tome IV	V. Dwelshauvers- Dery	Professeur Emerite à l'Université de Liège, Correspondant à l'Institut de France	Belgique
31		« LA VAPEUR D'EAU SURCHAUFFEE et son application aux machines à piston »	Tome IV	Hector Pouleur	Ingénieur civil des mines et des constructions navales	
32		« UN SYSTEME D'ENVELOPPE	Tome IV	Georges Duchesne	Ingénieur des Mines	Belgique

		<i>PARTICULIEREMENT EFFICACE »</i>			Secrétaire de la section de Mécanique du Congrès	
33		« <i>EMPLOI DE LA SURCHAUFFE DANS LES LOCOMOTIVES DES CHEMINS DE FER DE L'ETAT BELGE</i> »	Tome IV	J. B. Flamme	Inspecteur général des Chemins de fer de l'Etat Belge	
34		« <i>POMPES CENTRIFUGES POUR HAUTES PRESSIONS MUES PAR TURBINES A VAPEUR</i> »	Tome IV	M. A. Rateau	Professeur à l'Ecole Supérieure des Mines (Paris)	France
35		« <i>NOTE SUR UN NOUVEAU SYSTEME DE GAZOGENE</i> »	Tome IV	M. Gunnar Dillner	Ingénieur à Stockholm	Suède

H. Tables des matières des différents cours de mécanique appliquée et de physique industrielle

I. Cours de mécanique appliquée de 1868-1869 (Dwelshauvers)

Première partie (cinématique des pièces fixes et mobiles)	2
Chapitre premier : Pièces	3
Chapitre II – Guides du mouvement	53
1° Mouvement circulaire	53
2° Guide du mouvement rectiligne	67
Chapitre III	
1° Boîte à bourrage (stuffing box)	
III Robinets	81
IV Pistons	82
VI Distribution de la vapeur	93
Chapitre IV – Transformation des mouvements	111
Roues d'engrainages	112
Section 4 : Mécanisme simple fermé par l'accouplement d'une bielle et d'une manivelle	163
Machine d'épuisement	195
Systèmes divers de détente	227
1° par deux glissières	227

Système de détente Meyer	233
Distribution Farcot	234
Section IV Tiroirs équilibrés	237
Section V Renversement de la marche dans les machines à vapeur	237
Théorie des coulisses	244
Deuxième partie: Résistances des matériaux	263
<i>Non indexé</i>	
Troisième partie : Théorie des machines	500
Chapitre I: Théorèmes généraux et définitions	502
Travail des forces	502
Applications usuelles	510
Chapitre II: Principes généraux de la dynamique	528
1° Travaux virtuels	528
2° principe de d'Alembert	532
3° forces vives	536
Chapitre III: Théorie Générale des machines	543
1 forces qui produisent le mouvement	543
du mouvement produit	548
3 ^{ème} section des régulateurs du mouvement	558
Chapitre IV: mesure du travail des machines	568
1 travail utile, frein dynamomètre:	568
2 ^{ème} section mesure du Travail moteur	583
indicateur de Watt,	583
son usage pour régler la distribution ;	
3 travail des résistances passives ;	
4 lois de variations de la puissance du fluide moteur	
Chapitre V Principes de thermo-dynamique	618
1 hypothèses et principes fondamentaux (principes et constitution des corps)	618
Mots clefs :	
<i>Température</i>	619
<i>Travail de disgrégation</i>	621
<i>Mesure des températures</i>	624
<i>Lois de Mariotte et de Gay Lussac (gaz parfait)</i>	626
<i>Coefficient de dilatation d'un gaz parfait</i>	627
<i>Mesures de Regnault</i>	628
<i>Mesure des quantités de chaleur</i>	629
<i>Chaleur spécifique</i>	630
<i>Chaleur spécifique des gaz (cp et cv)</i>	632
<i>Détermination de l'équivalence mécanique de la chaleur</i>	634
2 Lois de la thermo-dynamique	637
La première loi	637
Théorème de Cazin	643
Théorème de Rankine	645
Cycle fermé composé de courbes adiabatiques et isothermes	648
<i>Différents énoncés de la deuxième loi</i>	652
<i>Notion de poids thermique $G = Q/\tau$</i>	652
Cycles non-réversibles	659
Section 3 moteurs thermiques en général	663
Chapitre VI Théorie des moteurs à air chaud	672
1 de l'air considéré comme gaz parfait	672
2 cas d'un trajet non réversible appliquée à un gaz parfait	677
3° de l'écoulement d'un gaz parfait	681

4° Moteur d'Ericsson	
5° Moteur Stirling Lambereau	
6° Moteur Joule	
Chapitre VII Théorie des moteurs à vapeur	686
1° Propriétés de la vapeur d'eau	
<i>Injecteur Giffard</i>	711
2° du cycle des machines à vapeur parfaites	
3° du cycle des machines à vapeur réelles	
A machines sans espace mort	
B influence de l'espace mort	
C Condensation et alimentation	
4° formules employées à la construction des machines à vapeur	
Chapitre VIII : Régulateurs du mouvement	
1° Volant	
2° Régulateur à forces centrifuges	
3° Machines d'épuisement	
4° Machine d'extraction	
Chapitre IX Moteurs hydrauliques	863

II. Cours de mécanique appliquée de 1905-1906 et de physique industrielle de 1906-1907 (Herman Hubert)

<u>Mécanique appliquée, cours de l'année académique 1905-1906 (tome 1)</u>	
Introduction	1
1 ^{ère} partie : Résistance des matériaux	
Chapitre I – Généralités	6
Chapitre II – Du solide de résistance et de ses déformations simples	40
Chapitre III – Etude expérimentale des propriétés élastiques des métaux	57
Chapitre IV – Extension simple. Calcul des dimensions et de la déformation des pièces	113
Chapitre V – Calcul des corps soumis à la compression simple	120
Chapitre VI – Calcul des corps soumis au cisaillement simple	122
Chapitre VII – Calcul des corps soumis à la flexion simple	126
Chapitre VIII – Calcul des corps soumis à la torsion simple	177
Chapitre IX – Déformations composées	185
Chapitre X – Déformations composées des arcs	195
Chapitre XI – Résistance des pièces longues comprimées ou chargées debout	199
Chapitre XII – Résistance des pièces enveloppes	212
2 ^e partie : Etude générale du mouvement des machines	230
Chapitre I – Equation générale du mouvement des machines	230
Chapitre II – Régulation du mouvement des machines	320
3 ^e partie – Etude spéciale des différentes classes de moteurs industriels	366

Mécanique appliquée, cours de l'année académique 1905-1906 (tome 2)

Chapitre I – Des moteurs à vapeur à piston	369
Chapitre II – Des moteurs à gaz tonnant à piston	450
Chapitre III – Des moteurs hydrauliques à piston	519
Chapitre IV – Des turbomachines en général	530
Chapitre V – Des moteurs hydrauliques considérations générales	549
Chapitre VI – Des roues hydrauliques	571

Cours de physique industrielle 1906-1907

Introduction	1
Chapitre I – Des combustibles et de la combustion	6
Chapitre II – Des foyers	141
Chapitre III – Propriétés générales des gaz et des vapeurs	172
Chapitre IV – Du tirage	211
Chapitre V – Transmission de la chaleur	222
Chapitre VI – Des chaudières à vapeur	233

Le présent travail s'intéresse à l'émergence de la thermodynamique appliquée, ou thermodynamique technique, comme discipline scientifique à l'Université de Liège à la fin du long XIX^e siècle. Sous l'impulsion du Professeur Victor Dwelshauvers-Dery et au terme d'un long parcours, un Laboratoire de mécanique est mis en place autour d'une machine à vapeur qui deviendra un objet d'étude et d'enseignement. La pratique expérimentale se diffuse dans la formation des ingénieurs et simultanément, Victor Dwelshauvers-Dery développe une activité de recherche qui lui vaudra une reconnaissance internationale.

Le premier chapitre présente le contexte historique dans lequel s'inscrit le processus de mise en place du nouveau Laboratoire de mécanique, en abordant à la fois des aspects économiques (l'histoire industrielle de la région liégeoise), techniques (le développement des machines à vapeur) et pédagogiques (l'histoire de l'École d'ingénieurs de l'Université de Liège).

Le second chapitre détaille la chronologie de la création du Laboratoire (de ca. 1870 à 1887), tout en mentionnant les installations qui étaient mises à la disposition des élèves dès les années 1830, ainsi que l'évolution du Laboratoire entre 1887 et 1937. Ce chapitre positionne également la création du Laboratoire liégeois dans un contexte international de développements d'autres laboratoires de mécanique à la même époque.

Le troisième chapitre décrit le fonctionnement du Laboratoire en insistant sur les rôles joués par ses différents membres (professeur, assistants, répétiteurs, élèves, machinistes, préparateurs). Les données financières du Laboratoire sont analysées à la lumière du budget global de l'institution et du coût de la vie en Belgique à la fin du XIX^e siècle.

Dans le quatrième chapitre, l'analyse des supports des cours de Mécanique appliquée et de Physique industrielle entre 1868 et 1913 est présentée. Cette analyse permet de montrer l'émergence de la thermodynamique appliquée comme nouvelle discipline de l'ingénieur et discipline scientifique à part entière. Ce chapitre insiste sur le concept de machine (thermique) : ses définitions, ses représentations et son évolution à la fin du XIX^e siècle. Ce chapitre fournit aussi une description de l'état des connaissances scientifiques et techniques autour de la thermodynamique appliquée aux machines thermiques à l'Université de Liège entre 1868 et 1914. Cette description illustre la diffusion des concepts de la thermodynamique, une science encore jeune, dans une université belge. Ce chapitre présente également une controverse scientifique qui agitait différentes écoles de thermodynamique technique à la fin du XIX^e siècle au sujet de l'état de la vapeur d'eau à la fin de son parcours dans le cylindre d'une machine à vapeur.

Enfin, le dernier chapitre étudie plus en détail les méthodes et les techniques expérimentales développées et employées au Laboratoire de mécanique à l'occasion des essais de la machine à vapeur. Les instruments de mesures sont décrits et l'originalité et la rigueur des méthodes expérimentales sont soulignées. Deux essais de la machine à vapeur (réalisés en 1888 et 1893) sont présentés et analysés au moyen d'un outil numérique moderne pour l'étude de la thermodynamique appliquée. Ce chapitre présente également l'émergence de l'utilisation des thermocouples pour la mesure intrusive et à haute fréquence des températures, ce qui a permis de faire progresser la compréhension des phénomènes physiques inhérents aux machines thermiques.

Mots-clefs :

Thermodynamique appliquée, thermodynamique technique, mécanique appliquée, physique industrielle, machine à vapeur, machine, diagramme thermodynamique, laboratoire, instrument de mesure.