



Bulletin de la Sabix

Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de
l'École polytechnique

19 | 1998

Jean-Victor Poncelet (1788-1867)

Jean-Victor Poncelet (1788-1867) ou le Newton de la mécanique appliquée

Quelques réflexions à l'occasion de son cours inédit à la Sorbonne

Konstantinos Chatzis



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/sabix/857>

ISSN : 2114-2130

Éditeur

Société des amis de la bibliothèque et de l'histoire de l'École polytechnique (SABIX)

Édition imprimée

Date de publication : 1 juin 1998

Pagination : 69-97

ISBN : ISSN 2114-2130

ISSN : 0989-30-59

Référence électronique

Konstantinos Chatzis, « Jean-Victor Poncelet (1788-1867) ou le Newton de la mécanique appliquée », *Bulletin de la Sabix* [En ligne], 19 | 1998, mis en ligne le 29 mai 2012, consulté le 02 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/sabix/857>

Ce document a été généré automatiquement le 2 mai 2019.

© SABIX

Jean-Victor Poncelet (1788-1867) ou le Newton de la mécanique appliquée

Quelques réflexions à l'occasion de son cours inédit à la Sorbonne

Konstantinos Chatzis

Introduction

« Malheureusement, ou heureusement peut-être, les marques honorables d'intérêt que m'avaient values quelques travaux et inventions se rattachant à l'art de l'ingénieur, de la part de MM. les Inspecteurs généraux de l'Artillerie et du Génie, Valé, Baudrand, ainsi que de M. Arago, examinateur de l'École d'application de Metz, firent qu'on me proposa, en 1823 et 1824, de créer à cette école un Cours sur la science des machines, que la récente introduction de l'industrie anglaise en France y faisait vivement désirer. Ce fut sinon avec répugnance, du moins avec un vif sentiment de regret, que je consentis enfin, en 1825 [sic]¹, à accepter cette tâche laborieuse à laquelle je n'étais nullement préparé, et qui allait, en me privant de tout loisir, ajourner indéfiniment la publication des travaux géométriques qui devait faire suite au premier volume du *Traité des propriétés projectives des figures* (...) »².

- 1 A en croire ses dires, Poncelet a épousé la mécanique contraint et forcé. Rares sont, dans l'histoire, les exemples d'une violence aussi productive et bénéfique pour le développement de la science. Les quarante ans qui séparent la nomination de Poncelet au poste de professeur du Cours de mécanique appliquée aux machines à l'École d'application de l'artillerie et du génie, véritable départ de sa carrière de mécanicien, de la rédaction de ce texte plein de regrets, vont en effet consacrer l'auteur comme l'un des plus grands mécaniciens de son époque. Celle-ci apparaît pourtant comme une moisson exceptionnelle, si on rappelle les noms de : S.-D. Poisson (1781-1840), Cl.-L.-M.-H. Navier (1785-1836), G.-G. de Coriolis (1792-1843), A. Cauchy (1789-1857), G. Lamé (1795-1870), A. Barré de Saint-Venant (1797-1886)... Surnommé le « Newton de la mécanique appliquée »,

Poncelet n'en reste pas moins un auteur dont l'œuvre en mécanique, unanimement appréciée, n'a toujours pas suscité le volume d'études historiques qu'elle mérite³.

- 2 Le présent article n'est autre chose qu'une invitation à la (re)découverte de ce « vénérable Nestor de la mécanique appliquée »,
- 3 pour employer l'expression d'un autre célèbre mécanicien, situé de l'autre côté du Rhin cette fois, F. Reuleaux⁴. A cet effet nous esquisserons d'abord un tableau rapide de la mécanique au début du XIX^e siècle. Dans une deuxième partie nous ferons un portrait succinct de Poncelet mécanicien. Enfin nous présenterons un cours qu'il a professé à la Sorbonne dans les années 1840. Plusieurs mécaniciens de l'époque s'y réfèrent, l'utilisent et parfois même en reproduisent des extraits. Pourtant il est resté inédit et l'auteur l'a laissé sous forme d'un manuscrit presque définitif, conservé par la Bibliothèque de l'École polytechnique. Nous le désignerons comme « Cours 1840-41 ».

Mécanique rationnelle *versus* mécanique physique

- 4 Deux traditions coexistent au tournant des XVIII^e et XIX^e siècles en matière de mécanique⁵. D'une part une tradition théorique, hautement mathématisée, la *mécanique rationnelle*⁶, science déductive qui, partant d'un petit nombre de principes généraux (voire d'un seul) s'applique à en déduire, à l'aide de l'analyse mathématique, toutes les conséquences qu'ils peuvent contenir. D'autre part une tradition, que l'on pourrait qualifier aujourd'hui de *mécanique appliquée*, qui, sans exclure le formalisme mathématique, fait volontiers appel à l'expérimentation. Résolument tournée vers les applications, elle regroupe des travaux d'une utilité pratique dans les domaines tels que l'hydraulique⁷, la résistance des matériaux⁸, les moteurs (surtout hydrauliques à l'époque)⁹, les machines simples (le levier, le tour ou treuil, le plan incliné et leurs combinaisons les plus élémentaires).
- 5 La mécanique rationnelle dotée en 1788 de son manifeste, la *Mécanique analytique* de Lagrange, se présente comme une discipline bien constituée, forte de ses concepts de base, ses premiers principes (principe des vitesses virtuelles, principe de d'Alembert) et ses méthodes mathématiques (calcul des variations).
- 6 Au contraire, la mécanique appliquée à l'aube du XIX^e siècle offre le spectacle d'un champ déjà labouré mais sans plan d'ensemble. Elle a déjà produit une série de travaux marquants dus à plusieurs ingénieurs-savants du XVIII^e siècle, dans leur majorité sortis de l'École du génie de Mézières¹⁰ — citons, entre autres : P.-L.-G. Du Buat (1734-1809) pour l'hydraulique¹¹, J.-Ch. Borda (1733-1799) pour les moteurs hydrauliques¹², Ch.-A. de Coulomb (1736-1806) pour la résistance des matériaux et l'équilibre des machines simples en ayant égard au frottement¹³ —, mais ces contributions à l'art de l'ingénieur restent peu nombreuses, ponctuelles et relativement isolées les unes des autres, dépourvues d'un cadre théorique unificateur.
- 7 Inégalement développées, ces deux traditions poursuivent au cours du XVIII^e siècle des trajectoires parallèles : à quelques rares exceptions près (pensons à l'usage du principe des forces vives chez Borda et chez Coulomb) la mécanique rationnelle des géomètres se garde bien de s'infiltrer dans les territoires de la pratique occupés par les ingénieurs savants.
- 8 La situation que nous venons de décrire connaîtra dans les années 1820 des mutations substantielles. A l'origine de ce changement on trouve la mise en place d'un système d'enseignement scientifique et technique, organisé autour de l'École polytechnique,

fondée en 1794¹⁴ et ses écoles d'application. *Savant*, le jeune polytechnicien apprend, lors de son passage à l'École-mère, la mécanique rationnelle et le langage mathématique qui l'habilite¹⁵; *ingénieur*, il se familiarise dans les écoles d'application, École des ponts et chaussées¹⁶ et École de l'artillerie et du génie¹⁷ notamment, avec les contributions de ses « ancêtres » du siècle des Lumières. Participant à ces deux traditions séparées jusqu'alors, le polytechnicien devient ainsi à l'aube du XIX^e siècle un acteur d'une mutation qui ne laissera indemne ni la mécanique théorique ni la mécanique appliquée.

- 9 Afin de réaliser la tâche que les Lumières leur ont transmise : « éclairer les arts par la lumière de la théorie », quelques jeunes ingénieurs passés par l'École polytechnique dans les années 1800-1820, après avoir cherché dans un premier temps les ressources nécessaires pour la réalisation de leur projet du côté de la mécanique rationnelle — le concept de travail, *pilier conceptuel* de la théorie scientifique des machines, éclôt en effet à l'intérieur du paradigme lagrangien¹⁸ — vont abandonner celle-ci au profit d'une nouvelle mécanique qu'ils vont baptiser *mécanique physique et expérimentale*, dite aussi *mécanique industrielle* ou *mécanique terrestre*. De quoi s'agit-il au juste ?
- 10 Loin d'être un complément appliqué, un supplément d'âme utilitaire, la nouvelle mécanique est vouée, dans l'esprit de ses protagonistes, à se substituer à la mécanique rationnelle en la dépassant. Pourquoi vouloir dépasser la théorie existante et ne pas se contenter de « l'appliquer » aux problèmes posés par la pratique ? Pour une seule raison mais de taille. Œuvre de mathématiciens, *de géomètres* selon l'appellation de l'époque, la mécanique rationnelle est en réalité une mécanique *d'êtres fictifs*, traitant des systèmes abstraits — solides indéformables et fluides parfaits — que l'on ne rencontre jamais tels quels dans la réalité. Si dans certains cas l'assimilation des corps de la nature aux systèmes abstraits de la mécanique rationnelle fournit à l'ingénieur des résultats approximatifs jugés satisfaisants pour les besoins de la pratique, les problèmes qui intéressent le praticien dans le domaine des machines, de la construction, de l'hydraulique..., échappent pour la plupart à l'emprise de son calcul. D'où le projet d'une science plus réaliste et plus riche que la mécanique rationnelle, capable de commercer avec efficacité avec les corps de la nature. Comment passer des objets fictifs aux corps réels, de la mécanique des géomètres à celle des ingénieurs ?
- 11 L'édification de la nouvelle mécanique fait intervenir deux types d'opération. D'abord un recours intense à l'observation et à l'expérimentation, d'où sa qualification d'expérimentale. Mais en même temps ce projet ne se place pas sous les auspices d'un « positivisme » austère, qui ne fait confiance qu'aux mesures, se refuse d'aller au delà de ce qui échappe aux sens, ignore délibérément les hypothèses non directement vérifiables ou les utilise comme des moyens commodes de calcul. S'appuyant sur des observations et des résultats expérimentaux, la nouvelle mécanique s'aventure cependant dans la voie des hypothèses hardies, que ni mesure expérimentale ni observation directe ne peuvent fonder. Tandis qu'elle hérite de la pratique expérimentale des ingénieurs-savants du siècle des Lumières, elle pénètre dans la structure intime de la matière. Les corps ne sont continus qu'en apparence ; ils sont formés en réalité de molécules, exerçant les unes sur les autres des attractions et des répulsions¹⁹.
- 12 D'où vient cette nouvelle conception ? Si le polytechnicien du début du XIX^e siècle apprend à l'École la mécanique rationnelle formalisée par les soins de Lagrange, il vit cependant dans une France scientifique dominée par la figure de Laplace. Admirateur de Newton et de sa mécanique céleste qui ne reconnaît que des points libres et des forces attractives, Laplace rêve d'appliquer la démarche du savant anglais à l'étude de tous les

phénomènes terrestres. Il propose alors d'abandonner la représentation lagrangienne des corps considérés comme *des milieux continus* — dont les divers éléments, impénétrables les uns aux autres, se gênent mutuellement — au profit d'une *description moléculaire* de la matière, censée serrer de plus près la nature véritable des corps physiques. Tout corps naturel est appréhendé désormais comme un ensemble de molécules, véritables centres des forces, maintenues à de petites distances par les forces attractives et répulsives²⁰.

- 13 Le paragraphe suivant, signé par Laplace, deviendra ainsi une sorte de manifeste pour la nouvelle mécanique physique, et il sera souvent cité et reproduit par ses promoteurs :

« Tous les phénomènes terrestres dépendent de ce genre de forces [des forces attractives et répulsives qui ne sont sensibles qu'à des distances imperceptibles], comme les phénomènes célestes dépendent de la gravitation universelle. Leur considération me paraît être maintenant le principal objet de la Philosophie mathématique. Il me semble même utile de l'introduire dans les démonstrations de la Mécanique, en abandonnant les considérations abstraites de lignes sans masse, flexibles ou inflexibles, et de corps parfaitement durs. Quelques essais m'ont fait voir que, en se rapprochant ainsi de la nature, on pouvait donner à ces démonstrations autant de simplicité et beaucoup plus de clarté que par les méthodes usitées jusqu'à ce jour » (P.S. Laplace (avril 1827), *Traité de Mécanique céleste*, T. V, livre XII, ch. I, in *Œuvres complètes*, Paris : Gauthier-Villars, 1878-1912, p. 112)²¹.

- 14 Ainsi cette nouvelle mécanique à la fois théorique et pratique, en cherchant à rendre compte du comportement des corps rencontrés dans la nature, vise à éclairer les « arts mécaniques » selon les vœux du siècle des Lumières que les fondateurs de l'Ecole polytechnique ont entre temps fait leurs.
- 15 Mais en considération de son *utilité pratique*, elle ne doit pas rester l'apanage des seuls ingénieurs, rompus au calcul intégral et différentiel. Une toute autre population, composée de petits industriels, de contremaîtres, de chefs d'atelier et même d'ouvriers, est également concernée par la mécanique physique. La diffusion de la nouvelle discipline auprès de ceux qui ne maîtrisent pas l'analyse, devient pour certains de ses créateurs une opération presque consubstantielle au projet de sa constitution. Comment la rendre accessible au plus grand nombre, et plus particulièrement quel langage mathématique lui donner ?

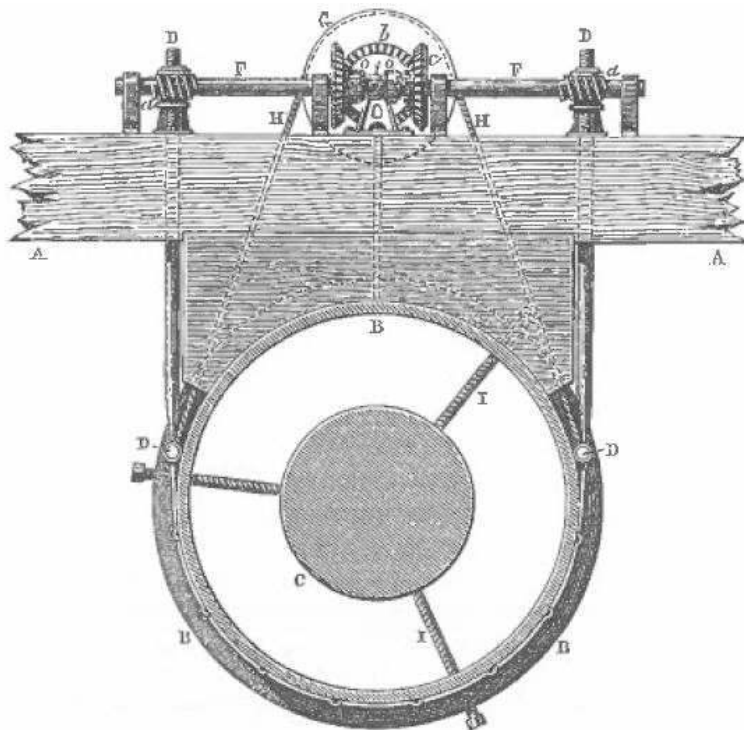
Poncelet-mécanicien

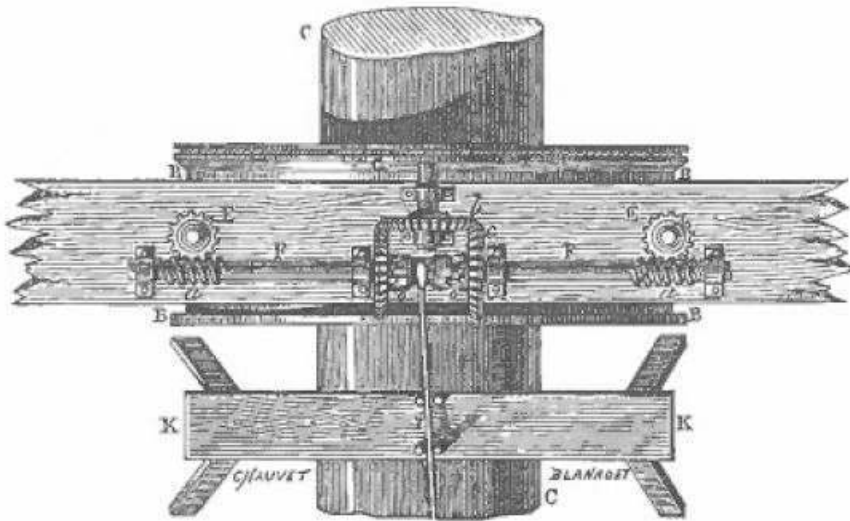
- 16 Le projet de la mécanique physique et expérimentale sera un projet collectif, mobilisant une pléiade de polytechniciens en France pendant la première moitié du XIX^e siècle. Poisson, Navier, Coriolis, Cauchy, Saint-Venant, auxquels on peut ajouter J.-B. Bélanger (1790-1874)²², A. Morin (1795-1880)²³ et H.-E. Tresca (1814-1885)²⁴..., pour ne citer que quelques noms marquants, vont participer à un titre ou à un autre à la création de cette science de l'ingénieur. Mais s'il fallait choisir un seul nom pour l'associer à la nouvelle mécanique, ce devrait être celui de Poncelet. Non pas pour ses découvertes sensationnelles, car il n'en a pas à son actif. Pas en mécanique en tout cas. Mais si le Poncelet mécanicien, contrairement au Poncelet mathématicien qui figure parmi les fondateurs de la géométrie projective, n'a pas créé « l'événement » dans le champ de la mécanique, rares sont les domaines de la mécanique physique et de ses applications à

l'art de l'ingénieur qui ont échappé à l'emprise de son génie. Poncelet sera ainsi tour à tour :

- *inventeur*. On lui doit, entre autres : un pont-levis présenté en Comité des Fortifications en 1820 et massivement utilisé depuis ; les roues hydrauliques qui portent son nom ; un appareil dynamométrique pour mesurer le travail des moteurs et des machines ; un appareil pour découvrir expérimentalement les lois du mouvement varié des machines ...²⁵ ;
 - *théoricien de la nouvelle mécanique physique*. Il propose alors une représentation géométrique de la constitution moléculaire de la matière, à l'aide de laquelle il traite de plusieurs phénomènes macroscopiques, comme l'élasticité et la déformation des corps²⁶ ;
 - *expérimentateur*. Il réalise et dirige plusieurs programmes d'expérimentation sur l'écoulement de l'eau à travers les orifices, sur le travail des moteurs...²⁷ ;
- 17 Théoricien et expérimentateur, Poncelet sera celui qui ira le plus loin dans la voie *des applications de la théorie mécanique à l'art de l'ingénieur*. Il sera le père incontestable de la théorie moderne des machines, en traitant en détail moteurs et mécanismes de toutes sortes²⁸, et produira des contributions durables en matière de résistance des matériaux (résistance aux chocs notamment)²⁹. Simultanément par des cours, des articles et des rapports il diffusera largement les connaissances mécaniciennes de son époque auprès de publics appartenant à des catégories sociales très diverses, composés d'élèves-ingénieurs, d'ingénieurs-praticiens, mais aussi d'industriels, d'artisans et d'ouvriers (voir *infra*).

Fig. 1 - Mécanisme propre à régulariser spontanément l'action du frein dynamométrique.





Poncelet, J., Cours de mécanique appliquée aux machines, 2ème partie. Paris : Gauthiers-Villars. 1876, p. 321.

- 18 Il faudrait de longs développements pour rendre compte de l'ampleur des contributions de Poncelet. Cependant, à travers quelques exemples nous allons essayer de donner une idée de la facture générale de son projet, de ses motivations premières et de ses traits caractéristiques.

Poncelet-théoricien de la mécanique physique

- 19 Pour développer la nouvelle discipline, capable d'être utilement introduite dans le monde des ateliers et des arts mécaniques, les créateurs de la mécanique physique et expérimentale n'hésiteront pas à disséquer la matière afin de déduire de sa constitution intime (et invisible), des conclusions théoriques et pratiques sur les comportements observés des corps naturels.
- 20 Poncelet sera un des tout premiers théoriciens de cette conception des corps considérés comme des ensembles de molécules, envisagées comme autant de points matériels, maintenues à des petites distances par les forces attractives et répulsives. Il fournira à cette hypothèse centrale une représentation géométrique à partir de laquelle il discutera plusieurs phénomènes qui se manifestent à l'échelle macroscopique. Il adhère à un *réalisme scientifique*, qui procède à l'aide de *modèles*. Ceux-ci postulent l'existence *des entités théoriques*, non directement observables mais non pas moins réelles pour autant (ici les molécules), et contiennent des *hypothèses* sur le comportement de ces entités. Grâce à ces hypothèses relatives au comportement *des entités inobservables*, le savant « réaliste » peut rendre compte des *propriétés observables* des corps, telles que l'élasticité par exemple³⁰.
- 21 A ce « modèle » général de la constitution moléculaire de la matière Poncelet apportera des *spécifications*. A l'instar de Poisson, il propose d'appréhender, à chaque instant, *l'action totale* entre deux molécules, tantôt attractive, tantôt répulsive, en fonction de leur distance respective, comme *une différence de deux forces*, l'une constamment attractive,

l'autre constamment répulsive, toutes deux décroissantes quand la distance entre les molécules croît :

« (...) dans l'état d'équilibre ordinaire des corps [quand aucune force extérieure n'est appliquée], les molécules sont maintenues entre elles, à distance, par une force attractive et une force répulsive qui se balancent exactement ou sont égales, et que, suivant que cette distance est agrandie ou diminuée par l'action d'une cause ou force étrangère agissant dans la direction de la droite qui unit les centres des molécules, c'est l'attraction qui l'emporte sur la répulsion, ou la répulsion qui l'emporte, au contraire, sur l'attraction (...)» (*Introduction à la Mécanique Industrielle...*, op. cit., p. 257).

- 22 Par ailleurs Poncelet proposera le premier une représentation graphique de l'évolution de l'intensité de ces forces en fonction de la distance qui sépare les deux molécules. A partir de son modèle moléculaire de base, représenté par ces deux courbes, il explique des phénomènes qui se manifestent sur le plan macroscopique, comme l'élasticité — c'est à dire la propriété qu'ont les corps de reprendre leur forme primitive quand la force extérieure qui s'exerçait sur eux cesse d'agir³¹, ceci à condition que cette force n'ait pas dépassé une certaine limite, mesurée par *l'intervalle maximum* entre ces deux courbes. En effet, suite à l'application d'une force extérieure, la distance initiale entre les molécules (celle qui correspond à l'état d'équilibre ordinaire)

« ira progressivement en diminuant [force de compression] ou en augmentant [force de traction] »,

- 23 jusqu'à ce qu'une nouvelle position d'équilibre entre la force extérieure et l'action moléculaire soit établie. Si la force extérieure vient tout à coup à cesser son action, les molécules, sollicitées désormais par la seule force moléculaire, répulsive ou attractive, qui correspond à leur nouvelle position, tendront à revenir vers leur position primitive (celle de l'équilibre naturel), qu'elles vont regagner après une série d'oscillations décroissantes. Le corps retrouve ainsi sa forme initiale. En s'appuyant toujours sur son modèle, Poncelet ramène (et explique) les différences observées entre différents types de matériaux (caoutchouc et pierre par exemple) en matière d'élasticité, à *Informe* des deux courbes géométriques qui représentent l'action moléculaire pour chaque matériau (*Introduction à la Mécanique Industrielle...*, op. cit., pp. 264-266).

Poncelet-expérimentateur

- 24 Poncelet, théoricien de la nouvelle mécanique, va s'illustrer également comme promoteur de sa composante expérimentale.
- 25 Avec son camarade ingénieur du Génie J.-A. Lesbros, il va entreprendre de 1827 à 1829, une série d'expériences visant à déterminer les lois de l'écoulement de l'eau à travers les orifices³². Abondant en résultats numériques, le document final se veut également un manuel du bon expérimentateur. Les auteurs s'expliquent en effet longuement sur la raison d'être des expériences entreprises, la manière précise dont ils ont procédé, les choix opérés en matière de présentation des résultats acquis. A quoi bon être si prolige ?
- 26 A cause de la nouveauté de l'entreprise. En décidant d'entreprendre cette série d'expériences, Poncelet et Lesbros se proposent *d'introduire de façon systématique la méthode expérimentale* dans un ensemble de savoirs développés jusqu'alors en grande partie sans faire appel à l'expérimentation.

- 27 En effet, du côté de la *mécanique rationnelle* le recours à l'expérience prend la forme d'une « expérience de pensée », c'est-à-dire d'une construction mentale de situations expérimentales possibles dont l'issue se laisse aisément prévoir à partir des données habituelles de l'expérience antérieure³³. Ainsi Lagrange en 1798 fait appel à un train de poulies imaginaires afin de démontrer le principe des vitesses virtuelles, qu'il place à la base de la *mécanique rationnelle*³⁴. La situation dans le domaine de la *mécanique appliquée* est évidemment différente³⁵. Mais peut-on considérer que les expériences de ce temps constituent une véritable démarche expérimentale au sens actuel du terme ?
- 28 Expérimenter, c'est une opération complexe, non réductible à la production, à l'aide de dispositifs matériels, d'une série de nombres bruts. *Des protocoles d'expérimentation*, qui fixent les conditions de production de résultats considérés *comme valides*, sont également indispensables. Mais il y a plus. La question de l'*exposition* des résultats obtenus devant un public compétent est aussi cruciale. Comment convaincre du bien fondé des résultats obtenus tous ceux qui n'étaient pas des témoins directs du travail de l'expérimentateur ? Si l'expérimentation a besoin d'une « technologie de production de connaissances valides » (protocoles d'expérimentation), des « technologies littéraires »³⁶, c'est-à-dire des moyens d'exposition qui permettent d'établir le consensus des pairs, lui sont également indispensables pour la réussite de son entreprise. Les travaux expérimentaux des ingénieurs-savants du XVIII^e siècle ne répondent que de manière très insuffisante à ces stipulations, qui font d'un nombre présenté dans un rapport non pas une simple opinion personnelle mais une connaissance scientifique valide et cataloguée comme telle par la communauté scientifique. La prolixité de nos auteurs s'explique par leur volonté de réunir dans un *corps de doctrine explicite cet ensemble de conditions qui définissent une expérience réussie*.
- 29 Ils commencent le rapport en exposant la raison d'être des expériences entreprises :
- « On n'a point jusqu'ici manqué d'expériences bien faites sur les divers phénomènes que présentent les masses fluides en mouvement à travers les orifices ou dans les conduites : (...) Mais, parmi ces nombreuses expériences, il faut en distinguer de deux espèces : les unes ont eu pour but de vérifier quelques points de doctrine ; les autres ont eu spécialement pour objet l'établissement de règles sûres pour la solution des questions usuelles sur le mouvement de l'eau, et l'on a tâché de s'y rapprocher le plus possible des circonstances ordinaires de la pratique. Ce sont particulièrement ces dernières expériences que nous avons eues en vue ; c'est à elles que se rapportent les travaux entrepris par Couplet, Mariotte, Bossut, Michelotti, Dubuat, Smeaton (...) ; c'est à de telles expériences enfin qu'on doit une foule de connaissances utiles et des formules appropriées aux divers besoins de l'industrie et des services publics »³⁷.
- 30 Poncelet et Lesbros s'inscrivent donc délibérément dans la tradition de la mécanique appliquée du XVIII^e siècle. Mais aussitôt annoncée leur adhésion aux idéaux de cette tradition, ils expriment leur scepticisme au sujet de la qualité des résultats obtenus jusqu'alors dans le domaine qu'ils se proposent d'étudier :
- « (...) dans les expériences dont il s'agit [à savoir des expériences relatives au coefficient de contraction de la veine], on n'a point assez *varié les données* pour arriver à ces lois indépendamment de toute vue systématique, et de manière à bannir de la question toute espèce d'empirisme ; presque toujours on s'est borné à quelques résultats isolés, relatifs à des appareils ou trop éloignés des circonstances ordinaires de la pratique, ou trop éloignés des hypothèses qui servent de base aux formules théoriques (...) [c'est nous qui soulignons] » (p. 12).

- 31 *Première règle* à respecter donc si l'on veut produire des résultats qui ne soient pas entachés de contingence et de « localisme » : il faut *suffisamment varier les circonstances* dans lesquelles sont faites les expériences afin de séparer « l'accidentel » de « l'essentiel » (du constant)³⁸.
- 32 Mais ce n'est pas tout. La lecture critique des expériences déjà faites révèlent d'autres « vices » de méthode :
- « [les expériences] présentent toute l'incertitude attachée aux observations isolées, faites dans des circonstances distinctes, par des observateurs différents, et sur des *appareils qui ne se prêtent point directement aux évaluations rigoureuses*. En effet, la grandeur même des dimensions des appareils est presque toujours un obstacle qui s'oppose à la rectitude des conséquences, vu la faiblesse de nos facultés physiques et morales, et la nécessité d'amener dans les observations le concours de plusieurs intelligences. Aussi croyons-nous qu'on atteindra plus avantageusement le but de toute recherche expérimentale, relative aux questions usuelles de l'hydrodynamique, en opérant sur des appareils de moyennes dimensions, dont les proportions et la disposition se rapprochent convenablement de celles de la pratique, et en observant ensuite, à l'aide d'expériences spéciales, la loi des variations que subissent les résultats quand on passe du petit au grand » [c'est nous qui soulignons] (pp. 27-28).
- 33 Le bon expérimentateur doit être par conséquent très attentif aux questions ayant trait aux dimensions des appareils utilisés ainsi qu'à la question des échelles (passage du petit au grand).
- 34 Mais une expérience, même réalisée selon les règles de la méthode, qui serait attestée uniquement par le seul expérimentateur ne dépasse pas le stade d'une *prétention à la connaissance*. Le consensus de la communauté des pairs est indispensable pour que cette prétention devienne connaissance acceptée. D'où l'impératif, pour l'expérimentateur, de communiquer, à travers des comptes rendus circonstanciés, à tous ceux qui n'ont pas assisté à ses expériences, non seulement les résultats obtenus mais aussi *la façon* dont ceux-ci ont été produits :
- « Il fallait bien, dans un premier travail, entrer dans le développement nécessaire pour faire apprécier l'étendue, le degré d'exactitude de nos moyens d'opérer, et pour inspirer aux personnes qui nous liront et nous jugeront, toute la confiance que nous avons nous mêmes dans les conséquences de nos recherches expérimentales » (p. 30).
- 35 Un certain luxe dans le détail, la reconstitution fidèle des gestes composant la scène expérimentale sont mobilisés pour assurer le lecteur du rapport, devenu « participant virtuel », que les expériences, dont il a le récit minutieux, ont produit réellement les résultats indiqués. Dans cette démarche qui vise à établir la confiance, les erreurs commises, les tâtonnements et les hésitations qui scandent le parcours de l'expérimentateur, les accidents survenus, sont tous des éléments importants du rapport :
- « Nous avons particulièrement insisté sur les fautes qui ont été commises et les accidents qui sont survenus lors de l'établissement des parties principales de l'appareil, parce que leur connaissance pourra donner l'éveil à ceux qui voudraient répéter ou entreprendre de pareilles expériences, et que l'aveu même de ces fautes, et les soins que nous avons pris pour mettre nos opérations à l'abri de leur fâcheuse influence, loin de nuire à la bonne opinion qu'on pourrait concevoir des résultats de notre travail, ne peuvent, au contraire, que contribuer à en augmenter la certitude aux yeux des lecteurs éclairés » (pp 43-44).
- 36 Un homme qui rapporte les expériences infructueuses, qui ne dissimule ni les difficultés rencontrées ni les gestes ratés, est un homme de bonne foi, quelqu'un dont l'amour de la

vérité n'est pas contaminé par des préoccupations d'ordre personnel, telles que l'orgueil. La confession et l'aveu des « péchés » commis lors de l'expérimentation font donc partie intégrante du comportement adéquat du bon expérimentateur qui cherche à établir la confiance et, à travers elle, la vérité partagée. L'expérimentateur, illustration de cette « bête d'aveu » qu'est devenu l'homme en Occident d'après Foucault ?³⁹

Poncelet, les limites de l'expérimentation et le dialogue avec la tradition

- 37 Or les expériences, aussi importantes qu'elles soient pour la constitution de la mécanique physique et le perfectionnement de l'art de l'ingénieur, ont leurs limites. Parmi celles-ci, la question du temps. Instantanées ou presque, les expériences sont muettes devant l'effet de la *durée* sur l'évolution à long terme des phénomènes étudiés. *Quid* par exemple de la résistance d'une pièce, non pas à une charge momentanée, ou de courte durée, mais à des charges permanentes ? Expérimentateur, Poncelet sera aussi le théoricien des limites de l'expérimentation. Pour compléter les blancs laissés par l'expérimentation, il recommande le recours à l'observation des constructions du passé, ayant passé avec succès l'épreuve du temps, ainsi qu'au jugement des hommes de métier. Regardons de plus près comment il met le commerce entre « l'observation active » (l'expérimentation) et « l'observation passive » (le comportement des constructions existantes) au service de la résistance des matériaux.
- 38 En 1833, Louis Vicat, ingénieur des ponts et chaussées, passé à la postérité comme le « père du béton », publie dans l'organe de presse officiel de son corps, un article pionnier sur la résistance des matériaux⁴⁰. S'appuyant sur un certain nombre d'expériences réalisées par ses soins, il expose pour la première fois de façon claire les deux genres de résistance dont est susceptible un même corps par rapport au temps. Vicat nomme *résistance instantanée* (ou force portante, ou force tirante instantanée), la limite des efforts qui produisent la rupture d'un corps solide en un temps très court, et *résistance permanente* (ou force portante, force tirante permanente), la limite des efforts que ce corps peut supporter « indéfiniment » sans altération subséquente. Si la première de ces résistances peut être mesurée directement par des expériences de courte durée (quelques minutes, quelques heures au plus), la seconde échappe à une estimation directe, obtenue dans les conditions artificielles de l'expérimentation. Il convient donc pour Poncelet de recourir à des données fournies par l'étude des constructions existantes qui ont résisté pendant un temps suffisamment long à l'action de forces connues et appréciées mécaniquement Comment procéder ?
- « Ainsi, par exemple, sachant par le calcul que, dans une construction existante, les molécules d'un corps ont supporté, d'une manière durable, et sans altération apparente, un certain effort sur l'unité de surface des sections, on compare cet effort à celui qui, d'après les expériences directes, est capable de produire, en un temps plus ou moins court, la rupture complète d'un prisme de même espèce ; et l'on en conclut, pour tous les *cas analogues* [c'est nous qui soulignons], le rapport de la résistance permanente à la résistance instantanée. Cette méthode est celle des anciens ingénieurs et expérimentateurs, notamment des Belidor, des Musschenbroek, des Buffon, des Duhamel, des Perronet, des Rondelet, des Gauthey, etc. »⁴¹
- 39 Loin de prôner la rupture avec les pratiques des grands ingénieurs du siècle des Lumières au profit d'un « recommencement radical » de la science de l'ingénieur moderne,

Poncelet veut accueillir la tradition, dont l'étude peut révéler par ailleurs des « profondeurs théoriques » souvent insoupçonnées⁴², au sein du projet de la nouvelle mécanique physique et expérimentale.

De la façon dont la théorie éclaire et guide la pratique

- 40 Bruno Belhoste a procédé à une analyse minutieuse de la façon dont la théorie a été mise par Poncelet au service de ses travaux sur les roues hydrauliques⁴³. Nous aimerions développer ici un autre exemple du commerce entre théorie et pratique réalisé par Poncelet, relevant du domaine de la résistance des matériaux cette fois.
- 41 Le phénomène « de la rupture par compression » a posé pendant longtemps problème à l'ingénieur. En effet, on ne voit pas clairement pourquoi le rapprochement des parties du corps, produit par la compression, peut en être une cause de rupture⁴⁴. S'appuyant sur la conception moléculaire de la matière, Poncelet proposera à la fois une *explication* théorique du phénomène de la rupture par compression, et des *règles pratiques de dimensionnement* des pièces pour éviter une telle éventualité. Pour comprendre le cheminement de sa pensée, il faut au préalable s'attarder un peu sur un autre phénomène que l'intuition saisit plus facilement, la rupture d'un corps sur lequel s'exercent des forces de traction.
- 42 Dans son *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides*, E. Mariotte (1620-1684) remarquait que les
 « parties étendues ne rompent que parce que leur extension vient à dépasser une certaine proportion » c'est nous qui soulignons]⁴⁵.
- 43 La nouvelle mécanique physique donnera sa caution théorique à cette remarque de Mariotte. Qu'est-ce que la rupture, sinon l'éloignement, au delà d'une certaine limite, des molécules qui composent les corps soumis aux forces de traction, éloignement qui fait que les forces de répulsion l'emportent sur celles d'attraction ? Une nouvelle pratique de dimensionnement des pièces contre la rupture par traction, imposant comme condition de résistance à la rupture une limite non pas *aux efforts* (tensions) exercé aux sections — règle proposée par Galilée et jouissant d'une grande popularité depuis parmi les ingénieurs —, mais aux *dilatations éprouvées* par le corps soumis à des forces extérieures, s'imposera alors petit-à-petit en France et sur le continent, grâce aux positions prises par des savants tels que Poncelet (*Cours 1840-41* : 38^e leçon. De la résistance des solides) et Saint-Venant⁴⁶.
- 44 Mais la rupture par compression ? Poncelet, raisonnant dans les limites du paradigme moléculaire, sera le premier à ramener la résistance aux *compressions* longitudinales à la résistance aux *extensions* transversales qui les accompagnent quand les faces latérales du corps soumis à la compression sont libres. Pourquoi ? A cause du jeu des actions moléculaires (*Cours 1840-41*, 39^e leçon). Prenons l'exemple d'un prisme soumis à des forces de compression. Tout *rapprochement* de deux molécules (m, m'), situées sur une même parallèle aux arêtes du prisme, *tend à écarter* l'une de l'autre deux autres molécules (n, n'), situées de façon symétrique par rapport à la ligne mm' , à cause du développement des forces répulsives qui naissent du changement des distances entre les membres de deux couples, (m, m') et (n, n'), des molécules.
- 45 De l'explication théorique aux règles pratiques, le passage est facile à réaliser. S'appuyant sur le résultat obtenu par Poisson, selon lequel la dilatation transversale par suite de la

contraction longitudinale est, pour les prismes isotropes, égale à $1/4$, Poncelet propose la règle pratique suivante : afin d'éviter la rupture par compression d'un prisme, la contraction de celui-ci ne doit pas dépasser le quadruple de la dilatation reconnue dangereuse dans le cas de la rupture par extension.

Rôle de Poncelet dans la propagation du savoir

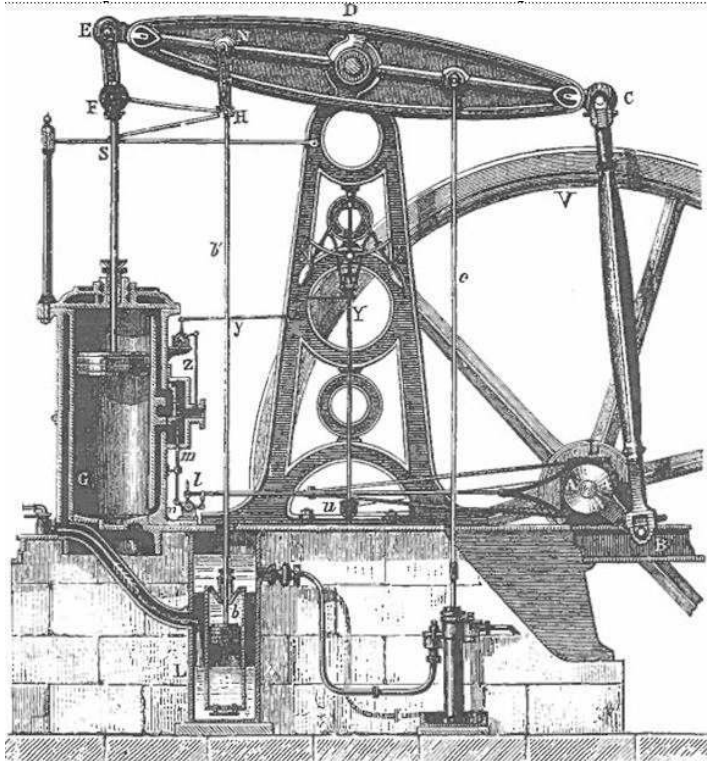
- 46 Poncelet va participer activement à la diffusion de connaissances relatives à la mécanique et à l'art de l'ingénieur auprès de plusieurs types de public. Il fera appel pour cela à plusieurs canaux de diffusion.
- 47 En premier lieu, *celui de l'enseignement*. De 1825 à 1834, il fonde et dispense le cours des machines à l'Ecole de l'artillerie et du génie de Metz devant un public d'élèves ingénieurs sortis de l'École polytechnique et destinés à une carrière militaire⁴⁷. En même temps qu'il élabore le premier enseignement complet de la science moderne des machines au siècle dernier, il s'applique à mettre à la portée de la communauté de l'industrie les notions fondamentales relatives à l'action et au travail des forces. Répondant à l'appel lancé par Charles Dupin⁴⁸, qui exhortait de sa chaire de mécanique appliquée aux arts au Conservatoire des arts et métiers les jeunes polytechniciens à imiter son exemple et à créer des enseignements industriels adressés au plus grand nombre dans leurs villes de garnison, Poncelet enseigne, de 1827 à 1830, la mécanique industrielle aux ouvriers de la ville de Metz, en se passant totalement du calcul infinitésimal⁴⁹. Tout en rendant hommage à l'initiateur du projet, Ch. Dupin⁵⁰, Poncelet a su doter la littérature scientifique (et didactique) de l'époque d'une œuvre tout à fait personnelle, que l'on peut regarder comme un modèle d'exposition de la mécanique physique et de ses applications à un public d'un niveau d'instruction faible en mathématiques⁵¹.
- 48 Après la province, la capitale. La carrière d'enseignant de Poncelet se termine à la Sorbonne. Appelé à la Faculté des Sciences de Paris, en 1838, avec la mission d'y créer un Cours de mécanique physique et expérimentale, Poncelet crée et enseigne pendant dix ans la nouvelle mécanique (cf. 3eme partie de l'article).
- 49 Mais il ne s'adresse pas uniquement à des élèves. A côté de ses travaux didactiques, plusieurs articles à l'attention des ingénieurs-praticiens élargissent la diffusion de ses idées. Il s'évertue à mettre sous forme facilement exploitable par les praticiens des résultats contenus dans la littérature technique de l'époque. De même qu'il adapte le langage mathématique de ses cours au niveau d'instruction de son public, il se conforme constamment, dans ses travaux de vulgarisateur, aux *us et coutumes* de la communauté des praticiens. Parmi les premiers à utiliser des méthodes graphiques pour résoudre des problèmes qui se présentent à l'ingénieur, tels que la stabilité des voûtes, traités à la même époque par voie analytique⁵², Poncelet n'hésite pas à revenir, plus tard, à des solutions analytiques quand il constate que l'approche graphique, contrairement à ses attentes, ne semble pas avoir provoqué, auprès des praticiens, l'engouement espéré :
- « Lorsque j'entrepris ce travail, en 1835, je n'avais en vue que les cas les plus usuels de chaque question, et la traduction en constructions graphiques des nouvelles formules de M. Audoy, relatives aux demi-revêtements. Cette tentative, eu égard aux complications des expressions analytiques, m'avait, en effet, réussi au-delà de ce que j'avais d'abord espéré, et je me serais borné à ce mode de solution qui me semble convenir plus particulièrement aux ingénieurs chargés de la rédaction des projets, si je ne m'étais aperçu que beaucoup d'entre eux lui préférèrent encore des tables numériques et les règles ou formules empiriques d'un calcul ou d'un énoncé

faciles, quand bien même elles ne tiendraient pas compte de tous les éléments essentiels de la question »L.-J.⁵³. Et il continue : « Cette considération m'a engagé à rechercher si sans trop sacrifier sous le rapport de l'exactitude, il ne serait pas possible d'abrégier les calculs pour les cas les plus usuels, au moyen de tables numériques suffisamment étendues, ou de règles, de formules empiriques suffisamment simples »⁵⁴.

- 50 Mû par sa volonté de diffuser le savoir, il se fait aussi, si besoin est, *historien*. Fréquemment sollicité en sa qualité d'académicien (depuis 1834) de la section Mécanique de produire des rapports sur des travaux soumis à l'Académie, Poncelet, à l'instar d'autres ingénieurs de l'époque⁵⁵, n'hésite pas à faire procéder à l'état de l'art de la question abordée, et à proposer aux ingénieurs un panorama historique des principales théories concernant le sujet traité⁵⁶.
- 51 Avançant dans l'âge, Poncelet-historien va s'adresser, au delà du cercle des mécaniciens, à un public beaucoup plus large, incluant le philosophe et celui qui gouverne la Cité. Élu Président de la Classe des Machines lors de l'Exposition universelle de Londres en 1851, il reprend sa plume d'historien, et rédige un rapport monumental, épais de quelque 1200 pages, relatant les découvertes et inventions relatives aux outils et machines manufacturières depuis la nuit des temps jusqu'à son époque⁵⁷. A quoi bon faire l'histoire des choses périmées ? Pour plusieurs raisons :
- d'abord pour faciliter l'éclosion des inventions à venir : « Ne l'oublions pas d'ailleurs (...) la comparaison des procédés nouveaux avec les anciens devient la source la plus féconde des progrès futurs, par l'enchaînement inévitable de ce qui est ou sera à ce qui a été ; l'esprit, aussi que la nature, ne *marchent jamais par sauts*, même dans les inventions mécaniques, si souvent attribuées au hasard par l'ignorance ou l'envie » (...) (*Poncelet I*, pp. VII-VIII).
 - ensuite pour faciliter les rapports entre les inventeurs et la collectivité : « En réunissant ainsi (...) tous les faits qui peuvent concerner principalement l'invention des machines et des outils, mais surtout les inventeurs, si souvent oubliés même dans les traités spéciaux, je crois, (...) avoir rendu des services durables non-seulement aux industries qui s'y rapportent, mais aussi aux hommes qui, appelés à les réglementer et diriger ou à les juger et encourager, manquaient, dans une matière aussi épineuse, de données établies sur des documents suffisamment authentiques, étrangers aux passions du moment ou aux menteuses traditions d'ateliers (...) » (*Poncelet I*, p. VII). Et pour ceux qui sont sceptiques envers l'utilité de ce type de travail historique, Poncelet a la parole suivante : « A l'égard de l'importance propre que peut avoir, aux yeux des philosophes et peut-être à ceux des gouvernants, cette étude historique, il suffit de rappeler brièvement que l'émancipation de la race humaine date de l'invention des premiers outils ou instruments ». Et le mécanicien continue : « Il ne faut pas trop oublier, non plus, que la renaissance des lettres et des arts dans notre Occident moderne est contemporaine de l'invention de la boussole, de la poudre à canon, des horloges à poids, à ressorts ou pendules, de l'imprimerie mécanique à types mobiles, des tours à combinaisons et même de la puissance motrice de la vapeur d'eau, qu'une science plus avancée et plus moderne a rendue l'esclave obéissante, universelle, de nos volontés et des besoins de nos industries, sans faire rougir ni gémir l'humanité, sans blesser la morale ni la religion des *peuples*. » (*Poncelet I*, p. VIII-IX).
- 52 Poncelet, spécimen du polytechnicien-scientiste, héritant du siècle des Lumières à la fois sa vision de l'histoire comme progrès continu de la Raison, sa croyance, quasi religieuse, dans les effets bénéfiques de la science, et sa volonté de devenir maître de la nature ? Le personnage est plus complexe. Si, incontestablement, Poncelet met dans la science et ses applications aux arts l'espoir d'une amélioration du bien-être du plus grand nombre, il se

garde bien de se faire l'avocat inconditionnel de son époque, qu'il évoque souvent dans des termes peu flatteurs. Époque de progrès ? Déjà une comparaison avec les « anciens » relativise, d'après l'auteur, nos mérites de « modernes ».

Fig. 2 Cours de mécanique appliquée aux Machines, première partie. Manivelles conduisant un balancier à mouvement alternatif.



Paris : Gauthier-Villars, 1874, p. 143.

- 53 En effet, si nous, modernes, surpassons les anciens « de beaucoup en tout ce qui touche à la multiplication, à la vulgarisation et à la reproduction rapide, économique, des objets de consommation ou de jouissances matérielles, artistiques et intellectuelles », nous les « égalons (...) à peine dans les productions qui se rattachent à l'esprit et au jugement, au goût et à l'imagination. » (Poncelet II, p. 3). Baignant, bon gré mal gré, dans l'atmosphère romantique de son époque, Poncelet est également sensible aux critiques que nombre de ses contemporains lancent contre la société industrielle qui est en train de naître sous leurs yeux : destructrice du lien social car individualiste, foyer de chômage et de bas salaires, suite à l'introduction massive de machines dans la production, concurrence oblige, la société qui sort du siècle des Lumières est accusée de promouvoir le culte de l'argent et celui de l'intérêt personnel au détriment des valeurs du désintéressement et de l'abnégation⁵⁸. Commentant son propre parcours, Poncelet écrit :

« Plus tard, lorsqu'il parut négliger l'étude de cette Géométrie pour se livrer à renseignement des Sciences mécaniques et industrielles, il n'avait, en réalité, d'autre but que de se rendre utile à la classe ouvrière et à la jeunesse de nos Écoles ; il voulait leur inspirer l'amour des vérités éternelles de la science, la haine de l'intrigue et des sophistiques subtilités d'un charlatanisme cupide, qui signale une époque, où, parmi tant de conquêtes de l'esprit moderne, on déplore avec chagrin des aberrations, des passions de lucre qui déshonorent notre caractère, nos mœurs, et jusqu'à notre littérature nationale. »⁵⁹.

- 54 Comme plusieurs propos de l'auteur, glanés dans différents passages de son œuvre, en témoignent⁶⁰, Poncelet modère l'optimisme de son projet polytechnicien, fils spirituel du siècle des Lumières, par une certaine dose de déception « romantique », répandue parmi ses contemporains, et que la polémique avec Cauchy au sujet de ses travaux en géométrie projective ne fait qu'alourdir d'une amertume personnelle.

Le cours de mécanique physique et expérimentale à la Sorbonne

- 55 La Sorbonne marque la dernière étape dans l'activité d'enseignement de Poncelet. Après avoir enseigné à l'École de l'artillerie et du Génie ainsi qu'à la Mairie de Metz, revenu dans la Capitale, il va dispenser un cours de mécanique physique et expérimentale à la Faculté des Sciences, de 1838 à 1848. Contrairement aux autres prestations didactiques de l'auteur, qui vont connaître plusieurs éditions, son enseignement à la Sorbonne est resté jusqu'à nos jours inédit. Et ceci, en dépit de l'existence d'un manuscrit de quelque cinq cents pages de format A3, reprenant, par les soins de Morin, le cours de l'année 1840-41, et dont l'état de rédaction en vue d'une publication prochaine est très avancé (le manuscrit est doté en effet d'un avant-propos). Nous ne savons pas les causes qui ont conduit Poncelet lui-même, et son épouse après la mort de celui-ci⁶¹, à renoncer au projet de l'édition du manuscrit.
- 56 Quoi qu'il en soit, le public des mécaniciens de l'époque s'est trouvé définitivement privé d'accès direct à un ouvrage important et comportant des matériaux originaux par rapport aux autres publications de l'auteur. Cependant, même non publié le cours n'en est pas moins partiellement accessible aux contemporains de Poncelet par voie indirecte. En effet, en 1852, H. Resal, polytechnicien et ingénieur des mines, auditeur du cours⁶², publie un livre de mécanique élémentaire, enrichi d'une annexe qui reprend les leçons de Poncelet consacrées à la cinématique théorique⁶³. P.-F. Michon, ingénieur du Génie, professeur de Construction à l'École de l'artillerie et du génie de 1843 à 1848, utilise les notes du cours que Poncelet lui a communiquées afin de bâtir son cours de résistance des matériaux⁶⁴. Les cours de Morin au Conservatoire national des arts et métiers contiennent plusieurs renvois au cours de son maître à la Sorbonne⁶⁵. Saint-Venant enfin, dans son édition critique du cours de Navier (*Navier, 1864*), consacre de nombreux passages aux contributions de Poncelet dans le domaine de la résistance des matériaux, en s'appuyant sur les notes du cours de la Sorbonne, prêtées par l'auteur en 1858⁶⁶.
- 57 Renvoyant le lecteur pour plus de détail à l'annexe de notre article, nous aimerions donner ici une présentation générale du cours, qui attend toujours son historien. Avant d'en décrire les différentes parties, deux remarques sur la facture d'ensemble du cours. A une seule note près, comportant le signe de l'intégrale, les mathématiques utilisées sont élémentaires : géométrie, arithmétique, algèbre élémentaire, trigonométrie et logarithmes. Austère en mathématiques, le cours abonde en revanche en descriptions d'instruments et appareils de mesure dont la théorie et le mode d'usage sont minutieusement présentés. Qu'il s'agisse de la vitesse, de la force, du travail., dès qu'une notion est introduite, Poncelet expose immédiatement les moyens dont on dispose pour en mesurer l'intensité et les lois d'évolution.
- 58 Le cours débute par un *Résumé des notions fondamentales relatives à la constitution et aux propriétés physiques des corps*, mécanique physique oblige. A peu près identique à la partie

correspondante de *l'Introduction à la mécanique industrielle* de 1841, cette partie du cours peut se passer de commentaires. En revanche la section suivante mérite une attention particulière. Intitulée *Du mouvement considéré sous le point de vue géométrique*, elle constitue le premier cours de cinématique théorique en France comme dans le monde. En 1834 Ampère suggérait la création d'une science du mouvement des corps abstraction faite des conditions de sa production. Il donnait à cette science à venir le nom de cinématique du mot grec *kinêma* (mouvement)⁶⁷. Quatre ans plus tard, Poncelet relève le défi, fonde la cinématique théorique et inaugure une tradition dans l'enseignement de la mécanique en France qui débute désormais par la cinématique⁶⁸. La référence à Ampère est explicite.

« Le mouvement considéré en lui même, d'une manière purement géométrique, constitue une science à part, intermédiaire entre la géométrie et la mécanique proprement dite. Cette science qui a été nommée, par Mr. Ampère, *cinématique*, et que l'illustre Carnot, dans son exil à Magdebourg, se proposait d'édifier sous le titre de *Théorie des mouvements géométriques*, nous semble, aussi qu'à ces profonds penseurs, devoir constituer, désormais, la base fondamentale de la mécanique, indépendamment même de ses applications à la composition et au jeu des machines » (*Cours 1840-41*, § 37).

- 59 Ayant droit d'exister de façon indépendante de ses applications, la nouvelle science enseignée par Poncelet ne rompt pas pour autant le cordon ombilical avec la pratique.

« Nous ne nous proposons pas d'ailleurs de traiter ici, d'une manière approfondie, les diverses propriétés du mouvement, propriétés dont quelques unes ont spécialement occupé plusieurs des géomètres de notre époque, mais bien de présenter les notions indispensables à l'intelligence des théories générales de la mécanique et de la science des machines » (*Ibid.*).

- 60 En effet, Poncelet n'oublie pas la partie appliquée de la cinématique, à savoir les mécanismes. Il consacre à l'étude de ceux-ci la première, et la plus longue partie de la Section, alors que la cinématique théorique constitue la deuxième partie. Conviction bien pesée ou choix de circonstance ? Poncelet avoue lui-même que la marche inverse aurait été plus logique et qu'il aurait suivi volontiers cet ordre dans la présentation de la Section, « si nous n'avions pas eu la crainte de rester trop longtemps dans les généralités abstraites » (*Cours 1840-41*, §152). Quoi qu'il en soit, il montre dans ce cours pour la première fois que le mouvement le plus général d'un corps solide se réduit à celui d'une surface gauche qui roule et glisse sur une autre surface gauche fixe dans l'espace, avec laquelle elle se raccorde constamment (§180-2). Il introduit également pour la première fois la notion d'accélération géométrique et parvient ainsi à poser les bases de la science qu'Ampère appelait de ses vœux.

- 61 La deuxième section du cours est intitulée *Des forces considérées en elles-mêmes et abstraction faite du mouvement qu'elles produisent ou empêchent*. Après l'étude du mouvement, abstraction faite des forces qui le produisent, les forces, abstraction faite des mouvements quelles engendrent ? A la *Cinématique* Poncelet ferait succéder alors *la Statique*, suivant toujours l'ordre préconisé par Ampère ? La réponse est négative, en fait il ne suit pas les habitudes de l'époque et combine deux matières envisagées jusqu'alors de façon séparée : *les effets des forces*, sujet abordé en règle générale lors de l'étude des moteurs dans le cadre de la mécanique appliquée, et *la Statique* proprement dite, qui fait partie de la mécanique théorique⁶⁹. Il « unifiera » par ailleurs les deux disciplines par un usage systématique du concept de *travail*. Les premières leçons de cette partie sont consacrées effectivement à cette notion. Après avoir défini la notion de force et présenté les instruments permettant de donner à la définition une traduction opérationnelle, Poncelet aborde longuement le concept de travail. Définitions théoriques et instruments de mesure cernent le concept.

L'auteur continue en proposant le calcul direct du travail moteur ou résistant développé dans la détente et la compression lente des gaz, des solides et des liquides, ainsi que le travail dû à l'action motrice de la vapeur d'eau dans les machines à vapeur. Il enchaîne sur le travail relatif à la compression cubique et à la détente ou à l'extension des liquides et des solides, et sur la composition, l'équilibre et le travail des forces. Cette partie du cours comporte aussi des leçons :

- sur les expressions diverses du travail virtuel des forces ainsi que sur une méthode générale pour le calculer ; sur des applications relatives à l'équilibre et au travail des forces dans les machines simples (treuil, plan incliné...);
- sur l'impossibilité du mouvement perpétuel et le travail des moteurs animés. Vient ensuite la statique au sens propre qui occupe l'espace de neuf leçons (leçons 29 à 37). Poncelet traite de façon théorique et complète l'équilibre et la composition des forces sur un plan mais aussi dans l'espace, le cas particulier des forces parallèles, les centres de gravité, les questions ayant trait au travail, équilibre et stabilité des systèmes pesants, l'équilibre des systèmes articulés ou funiculaires et de la chaînette (il fait appel ici au polygone funiculaire, qui avec le polygone des forces constitueront les notions de base de la future statique graphique). Il n'oublie pas les applications en abordant des questions relatives aux ponts-levis, à la stabilité des voûtes, ou aux ponts suspendus.

62 La troisième section du cours est consacrée à la *résistance des matériaux*. On y trouve une analyse des phénomènes de l'extension (traction), de la compression, du glissement (cisaillement), de la flexion et de la torsion, appliquée à l'étude des prismes, isostatiques et hyperstatiques⁷⁰, dotés de différents types de section (rectangulaire, circulaire,...) et chargés de diverses façons. Le cours est encore une fois très complet et de très haut niveau théorique, faisant leur place aux nouveaux concepts de son temps. Poncelet se réfère ainsi au cours éphémère dispensé en 1837-38 par Saint-Venant (*Leçons de Mécanique...*, *op. cit.*) à l'École des ponts et chaussées, celui-ci constituant le premier enseignement de résistance des matériaux éclairé par la théorie de l'élasticité. Poncelet lui emprunte ses considérations sur le glissement, phénomène sur lequel un autre ingénieur des ponts et chaussées, Vicat, avait attiré l'attention des ingénieurs en 1833 (« Recherches expérimentales... », *op. cit.*). Il n'hésite pas à adapter des résultats originaux obtenus analytiquement par Saint-Venant au public fréquentant la Sorbonne en les traitant de façon géométrique (voir par exemple Navier 1864, pp. 374-76, 512-19). Pauvre en mathématiques, la résistance des matériaux professée par Poncelet n'a rien à envier à l'enseignement dispensé au début des années 1840 dans les grandes écoles, telles que l'École des ponts et chaussées et l'École centrale des arts et manufactures, où la question de la flexion des prismes est traitée à l'aide de l'équation différentielle de la ligne élastique⁷¹. Elle les surpasse même sur plusieurs points par son étendue théorique (glissement, théorie de la compression), et permet à Poncelet de donner une preuve supplémentaire de son génie géométrique, qui le rend capable d'aborder et de résoudre des questions théoriques complexes sans passer par l'analyse.

63 En conclusion nous espérons avoir montré l'intérêt d'une étude approfondie de l'œuvre de Poncelet dans le domaine de la mécanique. Il a contribué de façon remarquable, d'une part au développement des connaissances, et d'autre part, à leur diffusion aussi bien dans les milieux « savants » que chez les constructeurs. On peut le considérer comme un précurseur de la collaboration entre la recherche et l'industrie dont l'importance, à la fois pour les entreprises et les économies nationales, n'est plus à démontrer. Dans les champs plus particuliers de l'élasticité et de la résistance des matériaux on peut sans doute

s'interroger sur ce qu'il est advenu du modèle des forces attractives et répulsives liant les molécules auquel Poncelet s'est rallié. Les modèles de milieux continus sont à la base de tels progrès dans les calculs de résistance des structures les plus diverses ! Et pourtant, c'est en œuvrant à l'intérieur du paradigme moléculaire que des grands mécaniciens, pensons surtout à Barré de Saint-Venant, ont pu obtenir des résultats toujours valables. Curieuse histoire qui veut que les produits survivent aux processus qui les ont fait naître : pour employer une célèbre image, le modèle des forces attractives et répulsives serait-il une sorte d'échelle nécessaire pour monter, mais que l'esprit repousse une fois installé au sommet ?

ANNEXES

Table des matières du cours de Poncelet professé à la Sorbonne pendant l'hiver 1840-41, établie à partir du manuscrit : Mécanique physique et expérimentale, rédaction de Morin, 1841

Avant-propos, 6 pages.

Première partie

Résumé des notions fondamentales relatives à la constitution et aux propriétés physiques des corps

- §1 États principaux des corps
- §2 Solides
- §3 Liquides
- §4 Gaz
- §5 Changements d'état des corps
- §6 Divisibilité des corps
- §7 Fluides
- §8 Solides
- §9 La matière est-elle divisible à l'infini ?
- §10 Atomes, molécules et particules. Impénétrabilité de la matière
- §11 porosité des corps
- §12 Preuve générale de la porosité
- §13 Compressibilité des corps
- §14 Elasticité des corps
- §15 Élasticité des solides, oscillations et vibrations dans les solides
- §16 Dilatabilité des corps
- §17 Notions sur le calorique ou la chaleur considérés comme un fluide particulier
- §18 Application de la dilatabilité aux arts

- § 19 Résultats d'expérience
- §20 Idée de la constitution intime des corps
- §21 Attractions, répulsions moléculaires
- §22 attractions et répulsions à distance.
- §23 De la pesanteur et de ses effets
- §24 Unité de poids
- §25 Poids absolus et relatifs
- §26 Densité
- §27 Densité de l'eau, fixation de l'unité de poids
- §28 La pesanteur spécifique
- §29 Du poids, de la densité et de la pression des gaz
- §30 Loi de la compression des gaz
- §31 Pression atmosphérique
- §32 mesure de la pression de l'air et du gaz ; baromètre
- §33 manomètre
- §34 Densité, poids spécifiques des gaz
- §35 Loi de l'égalité de pression dans les fluides
- §36 Conclusion et réflexions générales.

Section I : Du mouvement considéré sous le point de vue géométrique

- §37 : présentation générale.

Chapitre I : Notions préliminaires et fondamentales

- §38 Espace
- §39 Mesurage des longueurs et des angles
- §40 Indication succincte des divers autres instruments de précision
- §41 Repos et mouvement absolu ou relatif
- §42 Continuité du mouvement
- §43 Distinction des mouvements d'après la nature du chemin parcouru §44
Considérations géométriques fondamentales
- §45 Notions relatives aux cordes, aux arcs et aux tangentes considérés comme
éléments des courbes
- §46 Des moyens physiques et géométriques d'obtenir les courbes du mouvement
- §47 Du temps et de sa mesure
- §48 Mesure du temps à l'aide du pendule
- §49 Division, représentation géométrique du temps
- §50 Distinction des mouvements par rapport à la durée
- §51 Mouvement, vitesse uniformes
- §52 Mouvement périodique constant, vitesse moyenne
- §53 Données expérimentales relatives à certains mouvements uniformes ou
périodiques
- §54 Système de représentation graphique
- §55 Conventions et observations générales relatives aux systèmes de coordonnées
§56 Équation du mouvement uniforme
- §57 Cas du mouvement varié, recherche de la vitesse

- §58 Remarques générales sur l'emploi des courbes pour représenter les lois du mouvement
- §59 Indication succincte du système de coordonnées polaires
- §60 Exemple relatif aux lois expérimentales du mouvement planétaire découvertes par Kepler
- §61 Conséquences géométriques de ces lois
- § 62 Vitesse angulaire.

Chapitre II

4e leçon

- §61 Des divers procédés à l'aide desquels on peut obtenir expérimentalement la loi du mouvement des corps
- §62 Cas d'un mouvement parallèle assez lent
- §63 Procédés mis en usage par Galilée et Coulomb
- §64 Perfectionnement de ces procédés
- §65 Notions relatives au mouvement de rotation des solides
- §66 Méthodes d'observation relatives à ces cas
- §67 Appareils de Mattei et de Grosbert pour apprécier la vitesse des projectiles
- §68 Appareils à indications successives et spontanées
- §69 Bandes à indications continues de M. Eytelwen
- §70 Tambours cylindriques à indications continues.

5e leçon

- §71 Appareil à plateau circulaire ou disque tournant
- §72 Moyens de précision relatifs aux instruments de rotation à indication continue
- §73 Appareil fondé sur la combinaison de deux mouvements circulaires excentriques.

Chapitre III : Des transformations géométriques du mouvement

- §74 Notions préliminaires
- §75 Classification adoptée par Monge, Hachette, Lanz et Betancourt §76 Des moyens d'assurer la direction du mouvement de translation ou de rotation
- §77 Cordes, courroies, chaînes en usage
- §78 *Ce paragraphe qui n'a pas de titre traite du guidage des pièces par rainures ou galets*
- §79 Transformation du mouvement rectiligne en rectiligne : coin, plan incliné.

6e leçon

- §80 Transmission par le liquide
- §81 Poulies de renvoi fixes
- §82 Transmission du mouvement dans des plans différents
- §83 La poulie mobile
- §84 Poulies mouflées
- §85 Treuil simple ou ordinaire
- §86 Treuil différentiel
- §87 Observation sur l'effet des enroulements successifs de la corde §88 Appareil à bandes continues et à fusées compensatrices

- §89 Transformation du mouvement circulaire en mouvement rectiligne et vice versa
- §90 Transmission au moyen de bandes
- §91 Transmission par contact ou cordon croisé
- §92 Compensateur.

7e leçon

- §93 Transmission par les cames
- §94 Propriété particulière de la développante du cercle
- §95 Emploi de la développante comme came
- §96 Rainure en spirale
- §97 Came ou rainure cycloïdale
- §98 Rainure en hélice §99 Vis et son écrou
- § 100 Machine à diviser les lignes droites
- §101 Vis différentielle ou micrométrie de M. de Prony.

8e leçon

- §102 Transformation du mouvement circulaire continu en circulaire continu
- §103 Rapport des vitesses de transmission
- §104 Des cercles primitifs ou circonférences primitives
- §105 Assemblages et combinaison des roues
- §106 Transmission à des axes qui se rencontrent
- §107 Roues d'angles ou cônes roulants
- §108 Cônes et cercles moyens primitifs
- §109 Joint universel ou de Cardan
- §110 Transmission entre deux axes perpendiculaires qui ne se rencontrent pas au moyen de la vis sans fin
- § 111 Machine à diviser les limbes des instruments de précision
- § 112 Transmission à des axes situés d'une manière quelconque dans l'espace.

9e leçon

- §113 Des cames et engrenages conduisant des roues parallèles
- §114 Recherche des axes virtuels de rotation et de glissement relatifs
- §115 Rapport suivant lequel se fait la transmission des vitesses angulaires
- §116 Vitesse angulaire relative des deux systèmes
- §117 Observations générales
- § 118 Condition du simple roulement des cames
- § 119 Condition du tracé pour une loi arbitraire de transmission des vitesses
- § 120 Conditions de l'invariabilité du rapport des vitesses angulaires
- § 121 Tracé des cames et des courbes des dents propres à satisfaire à cette condition particulière
- §122 Procédé mécanique.

10e leçon

- §123 Tracé général par des arcs de cercle
- §124 Observations diverses
- §125 Diverses courbes génératrices adoptées
- §126 Épicycloïde conduisant un fuseau

- §127 Epicycloïde conduisant un flanc droit
- §128 Cycloïde et développante conduisant rectilignement un fuseau et un flanc droit
- §129 Développantes se conduisant entre elles
- §130 Condition du tracé des roues dentées cylindriques à axes parallèles
- §131 Exemple de la manière dont on satisfait à ces conditions
- §132 Lanternes et crémaillères à fuseaux
- §133 Engrenage inférieur §134 Roues à développantes.

11e leçon

- §135 Vis sans fin
- §136 Exécution de la division des roues
- §137 Détermination des saillies et des creux
- §138 Roues des grandes machines
- §139 Roues d'angle ou coniques. Transformation du mouvement circulaire continu ou alternatif en mouvement circulaire ou rectiligne alternatif et vice-versa
- §140 Cames et ondes
- §141 Manivelle et excentrique
- §142 Observations relatives aux vitesses de transmission
- §143 Excentriques régulateurs et discontinus.

12e leçon

- §144 Balancier des pompes et presses hydrauliques
- §145 Pied de biche. Levier de la garousse. Balancier à double secteur circulaire
- §146 Cylindre oscillant de Mr Cavé
- §147 Balancier à manivelle et à mouche
- §148 Parallélogramme articulé de Watt
- §149 Conditions à remplir dans l'établissement du parallélogramme §150 Disposition directe du parallélogramme
- §151 Transformation spéciale du mouvement circulaire continu en rectiligne alternatif.

Chapitre IV : Composition et décomposition des mouvements absolus ou relatifs et des aires

13e leçon

- §152 Présentation
- §153 Parallélogramme des chemins et des vitesses simultanées
- §154 Cas du mouvement varié ou curviligne
- §155 Méthode de Roberval pour tracer les tangentes
- §156 Exemple relatif à la conchoïde des anciens
- §157 Exemple relatif à l'ellipse
- §158 Remarques diverses sur cette application
- §159 Composition des mouvements simultanés indépendants ou relatifs
- §160 Composition d'un nombre quelconque de vitesses simultanées et indépendantes.

14e leçon

- §161 Parallélépipède des vitesses dans l'espace
- §162 Construction géométrique générale de la résultante des vitesses dans l'espace
- §163 Méthode de calcul pour déterminer la résultante de leur vitesse simultanée dans un plan
- §164 Cas où les vitesses simultanées sont en nombre quelconque dans un plan
- §165 Cas où les vitesses sont situées à volonté dans l'espace
- §166 Théorème des moments de Varignon
- §167 Extension de ce théorème
- §168 Composition et décomposition des mouvements des milieux en systèmes invariables
- §169 Composition des mouvements de translation des corps
- § 170 Composition des mouvements de rotation dans un plan ou autour d'axes parallèles
- §171 Recherche directe du mouvement résultant
- §172 Démonstration plus simple des mêmes résultats
- §173 Couples de rotation : composition d'un nombre quelconque de rotations
- §174 Composition des mouvements de rotation autour d'axes qui se coupent
- §175 Grandeur de la vitesse résultante §176 Conséquences et remarques diverses
- §177 Composition et décomposition d'un nombre quelconque de rotations
- §178 Mouvement le plus général d'un corps dans un plan ou parallèlement à ce plan
- §179 Principes relatifs au déplacement virtuel du corps
- §179bis Application du principe à la détermination des vitesses virtuelles des corps
- §180 Mouvement le plus général d'un corps ou système invariable dans l'espace
- §181 Remarques et conséquences diverses
- §182 Décomposition du mouvement le plus général d'un corps par rapport à trois axes fixes donnés.

15e leçon

- §183 Des mouvements relatifs ou apparents : Considérations générales sur ces mouvements
- §184 Composition, détermination géométrique du mouvement relatif §185 Remarque concernant le mouvement apparent
- §186 Mouvement relatif ou apparent de deux points
- §187 Vitesse relative d'écartement ou de rapprochement de deux points
- §188 Courbe du mouvement relatif
- §189 Mouvement relatif d'un point ou d'un plan mobiles autour de centres ou d'axes de rotation parallèles
- §190 Du glissement relatif des solides en contact
- §191 Examen de quelques cas spéciaux.

Section II : Des forces considérées en elles-mêmes et abstraction faite du mouvement qu'elles produisent ou empêchent.

16e leçon

- §192 Récapitulatif de 1-15 et annonce de la section. Notions préliminaires

- §193 Inertie de la matière
- §194 Loi de l'inertie
- §195 Définition des forces
- §196 Effets des forces
- §197 Dénomination générale des forces
- §198 Nature et composition des forces
- §199 Deux forces sont égales quand étant substituées l'une à l'autre dans les mêmes circonstances elles produisent le même effet ou qu'elles détruisent successivement une troisième force qui leur est directement opposée
- §200 Mesure effective des forces de tension ou de traction par les poids §201 Réflexion sur l'usage des instruments à ressort ou dynamomètres §202 Instruments de la même espèce mais plus parfaits
- §203 Remarque relative à l'action de la pesanteur, ou aux poids.

17e leçon

- §204 Notions fondamentales relatives à la pesanteur et au poids des corps
- §205 Hypothèse relative à la concentration des forces élémentaires §206 Mesure des pressions uniformes des solides et des fluides
- §207 Point d'application, direction, sens, intensités et représentations des forces simples.
- *Mode d'action des forces sur les corps :*
- §208 Action directe
- §209 Réaction, principe de la réaction
- §210 Hypothèses admises en mécanique
- §211 De l'inertie considérée comme une force
- §212 Action combinée et réciproque des forces
- §213 Exemple de l'action combinée des forces
- §214 Observation sur l'équilibre des forces.

18e leçon

- *Du travail mécanique des forces et de sa mesure :*
- §215 Notions générales
- §216 Mesure du travail quand la résistance est constante
- §216 Mesure du travail quand la résistance est variable
- §217 Manière de le calculer directement
- §218 Méthode générale de quadrature des courbes
- §219 Mesure du travail quand la force agit obliquement au chemin §220 Manière de calculer ce travail
- §221 Valeur de l'effort moyen
- §222 Divers exemples de travail mécanique
- §223 Observations et distinctions relatives au travail mécanique
- §224 De l'élévation verticale des fardeaux
- §225 Des autres moyens d'évaluer le travail
- §226 Dénominations et conventions.

19e leçon

- *Des instruments qui servent à découvrir expérimentalement la loi des efforts, le travail des moteurs et les aires.*
- §227 Présentation de la section
- §228 Idée générale des appareils employés pour mesurer la tension variable dans les cylindres à vapeur
- §229 Indicateur de Watt, perfectionné par M. Macnaught
- §230 Dynamomètres à disque tournant
- §231 Dynamomètre à bandes
- §232 Compteur dynamométrique à disque tournant
- §233 Principe fondamental à son établissement
- §234 Observations sur cet appareil.

20e leçon

- §235 Application du précédent appareil à la mesure du travail des axes de rotation
- §236 Appareil de M. Morin
- §237 Appareil antérieurement proposé pour le même objet
- §238 Autres dispositifs de cette espèce
- §239 Planimètre de MM. Oppikofer et Ernst
- §240 Théorie de l'instrument
- §241 Réflexion sur l'usage de cet instrument et de ses analogues.

21e leçon

- *Calcul direct du travail moteur ou résistant développé dans la détente et la compression lente des gaz, des solides et des liquides.*
- §242 présentation générale
- §243 Calcul du travail dans le cas où la compression et la détente s'opèrent dans un cylindre
- §244 Application numérique à un exemple
- §245 Expression élémentaire du travail dû à la compression ou à la détente des gaz
- §246 Formule générale pour calculer le travail relatif à une détente ou à une compression lente quelconque
- §247 Formule approximative
- §248 Principales conséquences relatives au travail produit par la détente et la compression graduelle des gaz
- §249 Rapprochement concernant la chaleur et le travail mécanique.

22e leçon

- *Travail dû. à l'action de la vapeur d'eau dans les machines à vapeur*
- §250 Notions générales sur la constitution des machines à vapeur
- §251 Manière de procéder au calcul approximatif de l'effet utile des machines à vapeur
- §252 Expression générale et théorique du travail moteur
- §253 Application numérique relative aux machines à basse pression de Watt
- §254 Coefficient de réduction du travail théorique pour les machines de Watt à basse pression et à condensation

- §255 Autre application relative aux machines à détente et à condensation
- §256 Réduction à faire subir aux résultats du calcul
- §257 Coefficients de réduction du travail théorique pour la machine de Watt à basse pression, à détente et condensation
- §258 Réflexions concernant les méthodes de calcul qui précèdent.

23e leçon

- *Travail relatif à la compression cubique et à la détente ou à l'extension des liquides et des solides*
- §259 Compression cubique des liquides
- §260 Expression de MM. Colladon et Sturm
- §261 Recherche du travail dû à cette expression
- §262 Application numérique
- §263 Evaluation approximative du travail produit par la chaleur appliquée à la dilatation du mercure
- §264 Travail relatif au changement de volume des solides
- §265 Observations particulières
- §266 Travail résistant ou résistance vive d'élasticité des solides
- §267 Résistance vive du solide à la rupture, et conséquences.

24e leçon

- *Composition, équilibre et travail des forces*
- §268 Condition du travail mécanique
- §269 Travail virtuel et résistant de deux forces appliquées au même point
- §270 Travail de la résultante d'un nombre quelconque des forces appliquées à un point
- §271 Remarque essentielle
- §272 Conséquence relative à l'état d'équilibre des forces appliquées à un même point
- §273 Expressions diverses du travail virtuel des forces
- §274 Méthode générale pour calculer ce travail
- §275 Expression remarquable du travail des forces pour le cas de la rotation dans un plan
- §276 Théorème des moments relatifs aux forces concourantes dans un plan
- §277 Travail et moment des rotations des forces dans le cas de l'espace
- §278 Principes généraux relatifs à la transformation du travail et à l'équilibre des forces
- §279 Equilibre et travail de deux forces appliquées à des points différents d'un corps solide
- §280 Conséquence relative à la transformation d'une force
- §281 Composition d'un nombre quelconque de forces appliquées à un corps solide
- §282 Remarque sur cette composition et conséquences diverses
- §283 Conditions spéciales de l'équilibre des forces appliquées à un solide.

25e leçon

- §284 Influence de l'inertie
- §285 Observations générales relatives à la constitution physique des corps
- §286 Réflexions concernant la mécanique moléculaire

- §387 Principe de la transmission du travail des forces dans un système de molécules constituées d'une manière quelconque
- §288 Simplification relative au travail des forces moléculaires
- §289 Conséquence particulière
- §290 Considérations relatives à l'état d'équilibre des gaz et des liquides
- §291 Décomposition du travail des forces appliquées à un système solide déformable.

26e leçon

- §292 Principes concernant le travail relatif moléculaire ou de déformation des solides
- §293 Principe de la transmission du travail dans les systèmes composés
- §294 De la manière dont on tient compte expérimentalement de certaines réactions moléculaires
- §295 Remarque concernant les actions au contact des pièces solides §296 Applications diverses relatives à l'équilibre et au travail des forces dans les machines élémentaires
- §297 Condition de l'équilibre statique dans les machines géométriques ou abstraites
- §298 Équilibre des forces dans la poulie et les moufles
- §299 Équilibre dans le treuil et les roues
- §300 Plan incliné et vis
- §301 Équilibre dans les leviers de différents genres
- §302 Transposition des forces dans quelques autres systèmes.

27e leçon

- §303 Dernier exemple relatif à la pompe hydraulique
- §304 Réflexions générales sur la transmission du travail pour les machines
- §305 Impossibilité du mouvement perpétuel ou d'accroître le travail, d'en créer de toutes pièces
- §306 Considérations finales relatives au travail des moteurs.
- *Travail des moteurs animés*
- §307 Notions préliminaires
- §308 Des moteurs animés
- §309 Condition du maximum de travail journalier
- §310 Résultats de l'expérience relatifs aux moteurs animés.

28e leçon

- §311 Tableau du travail mécanique journalier fourni par les moteurs animés appliqués aux machines
- §312 Roues motrices à chevilles et à tambour
- §313 Appréciation des efforts exposés à la circonférence
- §314 Des roues à marcher ou à liteaux
- §315 Grues, treuils à manivelles servant à soulever les fardeaux
- §316 Grue à manivelle
- §317 Manèges
- §318 Exemple relatif à l'établissement des machines à soulever les fardeaux
- §319 Réflexions sur ces calculs.

29e leçon

- *Statique des corps solides*
- §320 Préambule
- §321 Équilibre relatif à la rotation et à la translation. Équilibre et composition des forces situés dans un plan
- §322 Condition de l'équilibre pour des forces quelconques appliquées à un système invariable
- §323 Autre manière de découvrir les conditions de cet équilibre
- §324 Résultante des forces quelconques appliquées à un corps dans un plan
- §325 Cas d'impossibilité. Couples
- §326 Cas particulier où le système contient un point ou un axe fixe.
- *Équilibre et composition des forces ou des moments dans l'espace.*
- §327 Condition de l'équilibre des forces quelconques appliquées à un système invariable
- §328 Considérations géométriques relatives à la projection des moments et des aires dans l'espace
- §329 Composition et décomposition des moments et des aires
- §330 Conséquences relatives à l'équilibre et à la composition des forces dans l'espace.

30e leçon

- *Cas particulier des forces parallèles*
- §331 Préambule
- §332 Forces parallèles dans un plan
- §333 Cas de deux forces parallèles
- §334 Forces parallèles dans l'espace. Condition de l'équilibre
- §335 Détermination des résultantes
- §336 Du centre des forces parallèles
- §337 Détermination de ce centre
- §338 Cas spéciaux ; centre des moyennes distances.
- *Du centre de gravité*
- §339 Notions préliminaires
- §340 Hypothèses d'après lesquelles on détermine la position du centre de gravité
- §341 Méthode expérimentale.

31e leçon

- §342 Règles géométriques pour déterminer la position du centre de gravité des corps homogènes
- §343 Principales conséquences
- §344 Centre de gravité des lignes ou périmètres
- §345 Méthode spéciale pour les lignes courbes
- §346 Centre de gravité de l'arc du cercle
- §347 Centre de gravité des aires
- §348 Centre de gravité du quadrilatère et des polygones
- §349 Centre de gravité du trapèze, du secteur et du segment de cercle §350 Centre de gravité de la pyramide triangulaire.

32e leçon

- §351 Centre de gravité des pyramides, des cônes et des prismes obliques à bases quelconques
- §352 Centre de gravité des polyèdres et plus spécialement des prismes et des pyramides à base quelconque
- §353 Méthode approximative
- §354 Théorème sur la cubature des prismes et des cylindres tronqués §355 Extension de ce théorème
- §356 Méthode centro-basique
- §357 Propriétés des forces concourantes
- §358 Conséquence relative au centre de gravité des corps.

33e leçon

- *Travail, équilibre et stabilité des systèmes pesants*
- §359 Préambule
- §360 Théorème général relatif au travail de la pesanteur
- §361 Principales conséquences
- §362 Effet de l'excentricité des roues sur le mouvement et l'équilibre des machines
- §363 Extension du théorème précédent aux machines en général
- §364 Divers états d'équilibre du corps pesant
- §365 Principe relatif à la position du centre de gravité des systèmes pesants en équilibre stable, et conséquences particulières
- §366 Alternatives d'équilibre présentées par un même système de corps pesants
- §367 Principe de l'équilibre des ponts-levis.

34e leçon

- §368 De l'équilibre de la balance ordinaire
- §369 Condition

NOTES

1. La nomination est intervenue en réalité le 1er mai 1824. C'est le cours qui a commencé en 1825.
2. J.-V. Poncelet, *Traité des propriétés projectives des figures*, t. 1, Paris : Gauthier-Villars, 1865 (Ire éd. 1822), p. VII.
3. Voir la bibliographie contenue dans R. Taton, "Poncelet, Jean-Victor", in *Dictionary of Scientific Biography*, vol. XI, New York : Charles Scribner's Sons, 1975, pp. 76-82. Saluons une exception notable, la contribution de B. Belhoste et L. Lemaître, "J.-V. Poncelet, les ingénieurs militaires et les roues et turbines hydrauliques" (in B. Belhoste et al., *Le moteur hydraulique en France au XIXe siècle : concepteurs, inventeurs et constructeurs, Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, n° 29, 1990, pp. 33-89), travail exemplaire sur un aspect important de l'œuvre mécanique de Poncelet. Deux ouvrages : H. Tribout, *Un grand savant, le général Jean-Victor Poncelet, 1788-1807* (Paris : G. Saffroy, 1936) ; *Notice sur la vie et les ouvrages du Général J.-V. Poncelet, par le Général Didion* (Paris : Gauthier-Villars, 1869), contiennent plusieurs informations sur la vie du savant, et une liste de ses travaux.

4. *Cinématique, principes fondamentaux d'une théorie générale des machines* (1875), Paris, F. Savy, 1877, p. 13.
5. Ce qui suit va paraître trop stylisé aux yeux d'un spécialiste en histoire de la mécanique. Le lecteur intéressé pourrait enrichir le tableau de la mécanique au seuil du XIXe siècle en se reportant aux travaux de I. GrattanGuinness : *Convolutions in French Mathematical Physics*, Bale : Birkhauser, 1990, ch. 5 ; "The Varieties of Mechanics by 1800", *Historia Mathematica*, n° 17, 1990, pp. 313-338.
6. Voir rapidement : Dugas, R. *A History of Mechanics*, Éditions du Griffon : Neuchâtel, 1955 ; E. Mach, *La mécanique, exposé historique et critique de son développement* (1904), Sceaux : J. Gabey, 1987.
7. Voir H. Rouse, et S. Ince, *History of Hydraulics*, Iowa, Iowa Institute of Hydraulic Research (State university of Iowa), 1957.
8. Sur la résistance des matériaux au XVIIIe siècle, voir les tableaux d'ensemble dans : S.P. Timoshenko, *History of Strength of Materials*, New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1953 ; E. Benvenuto, *An Introduction to the History of Structural Mechanics*, New York : Springer, 1991 ; K. Pearson et I. Todhunter, *A History of Elasticity*, Cambridge : Cambridge University Press, 1886-1893.
9. Sur les moteurs hydrauliques au XVIIIe siècle, voir B. et J.-F. Belhoste, "La théorie des machines et les roues hydrauliques", in B. Belhoste et al., *op. cit.*, pp. 1-17 ; J.-P. Sérès, *Machine et communication*, Paris : Vrin, 1987.
10. Sur l'École du génie de Mézières, voir l'article récent de B. Belhoste, "L'École du génie de Mézières. L'alliance entre théorie et pratique", *La Recherche*, n° 300, juillet/août 1997, pp. 40-45.
11. H. Rouse, et S. Ince, *op. cit.*, pp. 129-134.
12. H. Rouse, et S. Ince, *op. cit.*, pp. 123-126 ; B. et J.-F. Belhoste, *op. cit.*, pp. 1-17.
13. Gillmor, C.S. *Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in eighteenth-Century France*, Princeton : Princeton University Press, 1971 ; J. Heyman, *Coulomb's memoir of statics*, Cambridge : Cambridge University Press, 1972.
14. Sur la création de l'École polytechnique, voir : B. Belhoste, « Les origines de l'École polytechnique. Des anciennes écoles d'ingénieurs à l'École centrale des Travaux publics », *Histoire de l'éducation*, n° 42, 1989, pp. 13-53 ; J. Langins, « La préhistoire de l'École polytechnique », *Revue d'histoire des sciences*, 144, 1991, pp. 61-89.
15. Sur l'enseignement de la mécanique à l'École polytechnique, voir K. Chatzis, "Mécanique rationnelle et mécanique des machines", in B. Belhoste et al. (dir.), *La formation polytechnicienne, 1794-1994*, Paris : Dunod, 1994, pp. 95-108.
16. Sur l'École des ponts et chaussées, voir A. Picon, *L'invention de l'ingénieur moderne. L'École des ponts et chaussées, 1747-1851*, Paris, Presses de l'ENPC, 1992 ; K. Chatzis, "Die älteste Bauingenieurschule der Welt — die Ecole des ponts et chaussées (1747-1997)", *Bautechnik*, n° 11, nov. 1997, pp. 776-789.
17. Belhoste, B. et Picon, A. (dir.) *L'École d'application de l'artillerie et du génie de Metz (1802-1870). Enseignement et recherches*, Paris : Musée des Plans-Reliefs, 1996.
18. Sur la naissance du concept de travail, voir K. Chatzis, "Économie, machines et mécanique rationnelle : la naissance du concept de travail chez les ingénieurs-savants français, entre 1819 et 1829", *Annales des Ponts et Chaussées*, nouvelle série, N° 82, 1997, pp. 10-20.
19. ¹⁹ Sur cette opposition entre mécanique analytique (rationnelle) et mécanique physique, voir, entre autres, P. Duhem, *L'évolution de la mécanique* (1903), Paris : Vrin, 1992, ch. VIII.
20. Sur la physique laplacienne, voir I. Grattan-Guinness, *Convolutions op. cit.*, ch. 7.
21. A. Barré de Saint-Venant, le met en exergue à son *Mémoire sur les théorèmes de la mécanique Générale* (mémoire présenté le 14 avril 1834 à l'Académie des Sciences), Fonds Saint-Venant, carton n° 19, Archives de l'École polytechnique ; J.-V. Poncelet s'y réfère dans son *Cours 1840-41*, § 286 (note). Un autre polytechnicien, G.-G. de Coriolis, co-fondateur avec Poncelet de la science moderne des machines, et à qui on doit le concept de travail mécanique, se rallie également dans les années 1820 au paradigme laplacien (*Du calcul de l'effet des machines*, Paris : Carilian-Gœury,

1829, ch. III). Sur la mise en œuvre de la conception moléculaire de la matière dans le domaine de l'élasticité, par les polytechniciens Poisson, Navier, et Cauchy, voir : K. Pearson et I. Todhunter, *op. cit.* ; A. Dahan-Dalmedico, "Etude des méthodes et des "styles" de mathématisation : la théorie de l'élasticité", in R. Rashed (éd.), *Sciences à l'époque de la Révolution française*, Paris : A. Blanchard, pp. 349-442. Même un mécanicien comme G. Lamé, auteur d'un ouvrage classique sur l'élasticité des corps solides dans lequel il développe l'approche lagrangienne (milieux continus), se déclare, dans la première leçon de son livre, adepte de la *conception moléculaire* de la matière. Après avoir défini la pression (nommée force élastique) dans un système de points matériels, d'abord, dans un milieu continu ensuite. Lamé écrit : "Ainsi, la première définition que nous avons donnée de la force élastique, non seulement est seule complète, mais en outre peut servir à l'explication d'autres phénomènes. Toutefois, nous adoptons la seconde : éclaircie par les considérations précédentes, appuyée sur l'analogie avec les tensions, elle fait pressentir, en peu de mots, le rôle important des forces élastiques dans les phénomènes qui nous occupent" (G. Lamé, *Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*, Paris : Bachelier, 1852 (2^{ème} éd. 1866 chez Gauthier-Villars), p. 12). Nous pensons que le jugement de R. Fox (réitéré dans son "Laplacian physics", in R.C. Olby et al. (éds), *Companion to the History of Modern Science*, Londres : Routledge, 1990, pp. 278-294) sur la trajectoire de la physique laplacienne souffre de la non "inclusion" de la mécanique physique dans le champ d'analyse. Au moment où le projet laplacien semble être abandonné par les physiciens, vers 1820 d'après Fox, il gagne, en fait, la faveur constante de plusieurs grands mécaniciens.

22. Sur Bélanger, voir K. Chatzis, « Un aperçu de la discussion sur les principes de la mécanique rationnelle en France à la fin du siècle dernier », *Revue d'histoire des mathématiques*, n° 1, 1995, pp. 235-270 ; ID., « Mécanique rationnelle... », *op. cit.*

23. Cl. Fontanon, : « Un ingénieur militaire au service de l'industrialisation : Arthur-Jules Morin (1795-1880) », in B. Belhoste et al., *op. cit.*, pp. 90-118.

24. B. Belhoste, : « Tresca, Henri Edouard (1814-1885) », in Cl. Fontanon et A. Grêlon (dir.), *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers, i. 2 : « L-Z »*, INRP-CNAM, 1994, pp. 624-632.

25. Voir *Notice sur la vie et les ouvrages du Général...*, *op. cit.*

26. Voir notamment son *Introduction à la Mécanique industrielle, physique et expérimentale*, Metz : Mme Thiel éditeur et Paris : L. Mathias, 1841(2^{ème} éd.) ; Paris : Gauthier-Villars, 1870 (3^{ème} éd.).

27. Voir par exemple l'imposant J.-V. Poncelet et J.-A. Lesbros, *Expériences hydrauliques sur les lois de l'écoulement de l'eau à travers les orifices rectangulaires verticaux à grandes dimensions*, Paris : Imprimerie Royale, 1832.

28. Voir J.-V. Poncelet, *Cours de Mécanique appliquée aux machines*, Paris : Gauthier-Villars, 1874 (1^{ère} partie) ; 1876 (2^e partie). Il s'agit d'une édition posthume de son cours lithographié à l'École de l'artillerie et du génie de Metz. Sur ce cours, voir K. Chatzis : Jean-Victor Poncelet et la "science des machines à l'École de Metz : 1825-1870", in B. Belhoste et A. Picon (dir.), *op. cit.*, pp. 32-42.

29. Sur les contributions de Poncelet dans le domaine de la résistance des matériaux, voir : K. Pearson et I. Todhunter, *op. cit.*, t. I, pp. 531-540 ; S.P. Timoshenko, *op. cit.*, pp. 87-90. Les multiples notes et les appendices produits par Saint-Venant à l'occasion de la troisième édition des leçons de Navier données à l'École des ponts et chaussées, restent, de loin, la meilleure source dont on dispose sur les contributions de Poncelet en matière de résistance des matériaux. Voir Cl.-L.-M.-H. Navier, *Résumé des Leçons données à l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines. 1^{ère} Partie concernant les leçons sur la résistance des matériaux et sur l'établissement des constructions en terre, en maçonnerie et en charpente, 1^{ère} section. De la résistance des corps solides*, 3^{ème} éd. avec des notes et des appendices par M. Barré de Saint-Venant, Paris : Dunod, 1864 (désormais cité comme (Navier, 1864).

30. Nous utilisons ici le vocabulaire de E. McMullin, "Structural Explanation", *American Philosophical Quarterly*, vol. 15, n° 2, 1978, pp. 139-147. Sur la question du réalisme scientifique,

voir, entre autres : R. Harré, *The Principles of Scientific Thinking*, Londres : Macmillan, 1970 ; J. Leplin (éd.), *Scientific Realism*, Berkeley, University of California Press, 1984.

31. Rappelons que cette définition de l'élasticité est novatrice pour l'époque et fait surface à l'intérieur du paradigme de la mécanique moléculaire. En effet, jusqu'alors, l'élasticité était définie au sein de la mécanique rationnelle par l'entremise du phénomène du choc. Voici ce que Coriolis, *op. cit.*, écrit à ce sujet : "Le plus ordinairement, on a défini jusqu'à présent l'élasticité d'une bille en disant qu'elle est parfaitement élastique, lorsqu'après avoir choqué perpendiculairement un plan fixe ou mobile, elle reprend en sens contraire une vitesse relative par rapport à ce plan, égale à la vitesse relative avec laquelle elle est venue le frapper ; ou bien en disant que deux billes sont parfaitement élastiques lorsque la vitesse que chacune perd ou gagne par l'effet de leur choc devient double de ce qu'elle serait s'il n'y avait d'élasticité. Ces définitions ont l'inconvénient d'attribuer à des corps la propriété de produire toujours certains phénomènes de mouvement, qui cependant tiennent tout autant aux circonstances du choc et aux dimensions des corps qu'à la nature de leur organisation mécanique. Il est donc bien plus convenable de définir l'élasticité comme nous l'avons fait (...) [à savoir comme la propriété d'un corps de "produire, quand il change de forme, des attractions ou répulsions mutuelles entre des points infiniment voisins, lesquelles actions reprennent les mêmes valeurs quand les distances reviennent les mêmes" (p. 94)] ; de cette manière, elle reste une *propriété constante de l'organisation de certains corps*, laquelle produit dans le choc diverses circonstances dont on peut toujours se rendre compte" (p. 103) [c'est nous qui soulignons]. Voir aussi, les propos similaires de Navier dans *Résumé des Leçons de mécanique données à l'École Polytechnique*, Paris : Carilian-Gœury et V. Dalmont, 1841, pp. 257 et 266.

32. J.-V. Poncelet, et J. A. Lesbros, : *op.cit.* Le mémoire est lu à l'Académie des Sciences le lundi 16 novembre 1829. Il a été examiné, et approuvé, par une commission composée par G. Riche de Prony, Cl.-L.-M.-H. Navier et P.-S. Girard (voir Rapport de MM. De Prony, Navier et Girard, "Sur un mémoire de MM. Poncelet et Lesbros", *Annales des Ponts et Chaussées*, 1831, 2e semestre, pp. 287-302).

33. Sur la notion d'expérience de pensée, et ses fonctions dans un processus de démonstration, voir : T.S. Kuhn, "A Function for Thought Experiments" (1964), et "Mathematical versus Experimental Tradition in the Development of Physical Science"(1976), in *The Essential Tension*, Chicago : The University of Chicago Press, 1977, pp. 241-265 et 31-65 respectivement.

34. Voir l'introduction de P. Bailhache dans sa réédition critique de L. Poinsot, *La théorie générale de l'équilibre et du mouvement des systèmes* (1805), Paris : Vrin, 1975. Sur l'emploi d'une poulie imaginaire par Navier dans ses raisonnements au sujet du travail des machines, voir K. Chatzis, "Économie...", *op. cit.*

35. Sur le travail expérimental des ingénieurs savants du XVIIIe siècle, dont Coulomb, voir les passages appropriés dans Ch. Licoppe, *la formation de la pratique scientifique, le discours de l'expérience en France et en Angleterre (1630-1820)*, Paris : La Découverte, 1996.

36. Nous empruntons cette expression à S. Shapin, "Une pompe de circonstance. La technologie littéraire de Boyle" (1984), in Callon et B. Latour (dir.), *La science telle qu'elle se fait*, Paris : La Découverte, 1991, pp. 37-86. L'influence de cet article est manifeste dans les paragraphes qui suivent

37. J.-V Poncelet, et J.-A. Lesbros, : *op. cit.*, pp. 9-10.

38. Cette règle, qui a une longue préhistoire, sera systématisée plus tard par J. S. Mill dans son *System of Logic* (1843) (Voir : J. Losee, *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*, Oxford : Oxford University Press, 1992 (3e éd.)).

39. Foucault, M. : *Histoire de la sexualité*, t. I : "La volonté de savoir", Paris : Gallimard, 1976. Dans cet ouvrage, l'auteur s'intéresse au jeu de rapports de plus en plus serrés développés depuis le XIXe siècle entre les pratiques de l'aveu et l'obtention de la vérité dans les domaines de la justice, de la médecine, de la pédagogie, dans les rapports familiaux, dans les relations amoureuses, dans

l'ordre le plus quotidien... Il reste à savoir si ces similarités sont accidentelles ou si elles reflètent des connivences plus profondes.

40. L.-J. Vicat, : "Recherches expérimentales sur les phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent la rupture ou l'affaissement d'une certaine classe de solides", *Annales des Ponts et Chaussées*, 1833, 2e semestre, pp. 201-268. Sur les contributions de Vicat-expérimentateur, voir K. Pearson et I. Todhunter, T. I, *op. cit.*, pp. 394-402.

41. *Introduction à la Mécanique industrielle...*, *op. cit.*, p. 299-300.

42. "La comparaison des résultats numériques fournis par les formules rigoureuses avec ceux qui dérivent de la formule de transformation relative au profil général de Vauban, m'a conduit à reconnaître que cette règle, telle qu'elle nous a été transmise par Belidor, pour les revêtements et les demi-revêtements, n'était pas simplement fondée, comme on le suppose ordinairement, sur une longue expérience des constructions, mais bien sur une théorie géométrique précise, dont je crois avoir été assez heureux pour retrouver le principe, ce qui permettra désormais, non de copier servilement une règle sanctionnée par l'usage et le temps, mais bien de varier suivant les circonstances et dans des vues économiques, ainsi que le faisait lui-même notre illustre ingénieur, le mode de solution générale dont il nous a offert un type particulier dans l'établissement de son profil" (J.-V. Poncelet, *Mémoire sur la stabilité des Revêtements et de leurs fondations*, Paris, Bachelier, 1840, pp. 10-11).

43. Belhoste, B. et Lemaître, L. : *op. cit.*

44. Un ingénieur des Lumières, Musschenbroek, a même avancé que la rupture par compression est un phénomène "impossible" et qu'un pilier serait, en réalité, capable de supporter tous les fardeaux s'il ne se courbait pas (Sur Musschenbroek, voir E. Benvenuto, *op. cit.*, pp. 280-284).

45. Cité par B. de Saint-Venant dans son *Historique*, contenue dans (*Navier 1864*), p. cc. Voir aussi E. Benvenuto, *op. cit.*, pp. 265-68.

46. Voir ses *Leçons de Mécanique appliquée faites par intérim*, par M. de Saint-Venant, 1837-38 : 1re partie : "Résistance des Matériaux et des Constructions", Paris, 1838 (lith.). Remarquons que les deux méthodes ne donnent pas toujours des résultats identiques. Les deux pratiques de dimensionnement vont continuer à coexister tout au long du XIXe siècle (Voir K. Pearson et I. Todhunter, *op. cit.*). L'auteur d'un manuel classique des années 1930, écrit à ce propos : "It will be apparent from the preceding evidence that the correctness of any one of the theories outlined above is yet to be definitely established, and that the criterion for elastic breakdown is still an open question" (cité par W. Addis, *Structural Engineering, the Nature of Theory and Design*, New York : Ellis Horwood, 1990, p. 92).

47. Sur ce cours, qui a connu plusieurs éditions, voir K. Chatzis, "Jean-Victor Poncelet..." *op. cit.* Il a été traduit en allemand par Schnuse, Darmstadt, 1845-59 (voir H. Tribout, *op. cit.*).

48. Sur Ch. Dupin, voir R. Fox, "Dupin, Charles (1784-1873)", in Cl. Fontanon et A. Grelon (dir.), *op. cit.*, pp. 469-478.

49. La première édition (lithographiée) de ce cours, rédigée par les soins du capitaine du Génie Gosselin, est intitulée *Cours de mécanique industrielle par M. Poncelet* (Paris : impr. de Clouet (s.d.)), et forme un recueil comportant trois parties : *Résumé des leçons du Cours de mécanique industrielle, 1827-1828* ; *Cours de mécanique industrielle, professé de 1828 à 1829, 2e partie* ; *Cours de mécanique industrielle, professé du mois de janvier au mois d'avril 1830, 3e et dernière partie sur le mouvement des machines et des moteurs*. Poncelet se penchera, plus tard, de nouveau sur ce cours. Il en ressortira *l'Introduction à la Mécanique industrielle...*, *op. cit.* Le livre est traduit en allemand par Hallbaner et Kuppler, Nuremberg, 1841-45 (voir H. Tribout, *op. cit.*).

50. Voir J.-V. Poncelet, : *Discours prononcé le 5 novembre 1827, à l'ouverture du cours de mécanique industrielle de Metz*, Metz, Imprimerie de C. Lamort, 1827.

51. Nous ne pouvons pas entrer dans le détail du cours dispensé aux ouvriers messins. Citons un passage significatif de la philosophie de l'enseignement : " ce qu'il vous importe le plus de retenir et de bien posséder, c'est le sentiment de la proportionnalité, c'est la théorie des proportions ou

de l'égalité des rapports considérés, soit numériquement, soit géométriquement ; car, à défaut de calculs transcendants, cette théorie devient la base essentielle, indispensable même, de tout raisonnement, de toute recherche sur les grandeurs. En un mot, la théorie des proportions est pour l'enseignement industriel, ce que l'algèbre est pour l'enseignement mathématique le plus relevé" (*Ibid.*, p. 3).

52. *Solution graphique des principales questions, sur la stabilité des voûtes*, Paris : Imprimerie et fonderie de Fain, 1835. "L'objet de ce mémoire, n'est point de construire géométriquement les différentes formules analytiques, qui ont été données par M. Le colonel Audoy (...). Nous nous proposons de montrer comment, en opérant directement sur l'épure de la voûte elle-même, on peut obtenir graphiquement tous les éléments de la question, sans avoir à s'inquiéter de la nature particulière de l'intrados et de l'extrados ; ce qui fait rentrer la méthode dans la classe de celles qui ont été recommandées, par Coulomb, dans son *Mémoire sur les murs de revêtements et l'équilibre des voûtes*. De telles méthodes, si elles n'ont pas le mérite de la rigueur qu'apportent avec elles les formules algébriques, ont au moins l'avantage de s'étendre uniformément à tous les cas, de s'adresser à toutes les intelligences, et de se concilier très-bien avec la nature des travaux qu'exige la rédaction des projets" (*Ibid.*, pp. 3-4).

53. *Mémoire sur la stabilité des Revêtementsop.cit. p.11*

54. *Ibid.*, p. 9.

55. Voir, par exemple : Cl.-L.-M.-H. Navier, "Détails historiques sur l'emploi du principe des forces vives dans la théorie des machines et sur diverses roues hydrauliques", *Annales de Chimie et de Physique*, n° 19, 1818, pp. 146-159 ; A. Barré de Saint-Venant, Historique dans (*Navier, 1864*).

56. Voir par exemple, son *Examen historique et critique des principales théories concernant l'équilibre des voûtes*, Paris : Bachelier, 1852.

57. Exposition Universelle de 1851, Travaux de la Commission française sur l'industrie des nations, publiés par ordre de l'empereur, T. III, 1ère partie, 1ère section, Vie jury, *Machines et outils propres aux manufactures*, par M. Le Général Poncelet, pp. 1-618 + (Avant-propos, pp. I-XI) ; 1ère partie, 2ème section : Vie jury, *Machines et outils appropriés aux arts textiles*, par M. le Général Poncelet, pp. 1-535, Paris : Imprimerie Impériale, 1857. Nous les citons comme *Poncelet I* et *Poncelet II*, respectivement.

58. Voir par exemple, P. Benichou, *Les temps des prophètes. Doctrines de l'âge romantique*, Paris : Gallimard, 1977 ; J.-P. Daviet, *La société industrielle en France, 1814-1914*, Paris : Seuil, 1997.

59. J.-V. Poncelet, : *Applications d'analyse et de géométrie*, T. I, Paris : Mallet-Bachelier, 1862, p. vj.

60. .Voir, par exemple : " (...) un juste témoignage des services rendus par M. Gosselin à l'enseignement de la Mécanique pratique et la récompense d'un zèle d'autant plus honorable, qu'il avait sa source dans un sentiment tout-à-fait désintéressé et assez rare en ce siècle d'industrialisme" (*Introduction à la Mécanique industrielle*, op. cit., p. vj) ; "(...) aux inventeurs des arts mécaniques, presque tous condamnés à vivre dans l'obscurité et la misère pendant leur courte apparition au milieu d'un monde qui ne les comprend pas et les repousse, tantôt par la crainte, plus ou moins fondée, d'une fâcheuse mais inévitable concurrence et, par suite, d'un abaissement quelconque dans le profit et le travail des mains-d'œuvre (...)" (*Poncelet I*, p. VI).

61. Dans la notice que Ch. de Comberousse a consacré aux éditions posthumes de deux autres cours de Poncelet, établies par les soins de X. Kretz, en se référant au cours à la Sorbonne, il informe le lecteur de l'époque qu'une "lettre adressée par Mme Poncelet à M. le Président de l'Académie des Sciences et lue par M. Le Secrétaire perpétuel dans la séance du 9 février 1874 nous permet de compter sur cette dernière et importante publication, qui couronnera dignement les profonds travaux de Poncelet sur la Mécanique" (*Notice sur l'introduction à la mécanique industrielle et sur le cours de mécanique appliquée aux machines de J.-V. Poncelet*, Paris : Gauthier-Villars, 1874, p. 15).

62. A propos des auditeurs du cours, on a l'information suivante : "Ce cours était un intermédiaire indispensable entre la Mécanique rationnelle et les applications les plus utiles aux

machines et à l'industrie. Il comblait une lacune immense. Aussi son cours fut suivi avec assiduité par tous les professeurs qui voulaient se pénétrer du véritable esprit de la Mécanique" (*Notice sur la vie et tes ouvrages...*, *op. cit.*, p. 38). Resal, H. : *Éléments de mécanique*, Paris : Didot, 1851-1852 (1ère éd.) ; 2ème éd. revue et corrigée, Paris : Mallet et Bachelier, 1862.

63. Resal, H. : *Éléments de mécanique*, Paris : Didot, 1851-1852 (1ère éd.) ; 2ème éd, revue et corrigée, Paris : Mallet et Bachelier, 1862.

64. Michon, P.-F. : *Instruction sur la résistance des matériaux, suivie d'applications aux pièces droites et aux fermes de charpente des bâtiments*, Metz, École de l'artillerie et du génie, 1848 (lith.) : "Les notes que cet illustre savant a bien voulu nous communiquer, nous ont servi de guide dans la rédaction de cette instruction, et notre seul regret sera de ne pouvoir les développer autant que nous l'aurions désiré" (*Ibid.*, p. 2).

65. Voir par exemple : A. Morin, *Résistance des matériaux*, Paris : Hachette, 1862 (3ème éd.), §§ 108, 275, 278, 578

66. Saint-Venant a copié les notes prêtées par Poncelet. Son exemplaire personnel, intitulé "Notes de M. Poncelet, lui ayant servi pour son cours de Mécanique industrielle à la Faculté des Sciences en 1840", se trouve dans les Fonds Saint-Venant, carton 39, Archives de l'École polytechnique

67. A.-M. Ampère, *Essai sur la philosophie des sciences*, Paris, Bachelier, 1834.

68. Voir K. Chatzis, "Un aperçu de la discussion...", *op. cit.*

69. Poncelet est conscient de son originalité : "En adoptant, pour l'exposition de la mécanique, le plan indiqué par ce géomètre philosophe [il s'agit d'Ampère), nous regrettons qu'il ail conservé à l'étude spéciale des propriétés des forces le nom de statique, qui ne peut se rapporter qu'à un état de repos absolu ou relatif, et c'est ce qui nous a empêché de donner aux divisions principales de cette première partie du cours les dénominations de *cinématique*, *statique* et *dynamique* admises par M. Ampère" (*Cours 1840-41*, § 20).

70. Structures hyperstatiques : des structures dont les réactions et les efforts intérieurs (moments de flexion, efforts tranchants), ne peuvent pas être calculés à l'aide des équations d'équilibre donnée par la mécanique rationnelle (cas des systèmes isostatiques), et demandent l'intervention des déformations élastiques. Une poutre appuyée d'un bout et encastrée de l'autre est, par exemple, une structure hyperstatique.

71. Nous avons consulté : pour l'Ecole des ponts et chaussées, J.-B. Bélanger, *Notes sur la mécanique appliquée aux principes de la stabilité des constructions et à la théorie dynamique des machines*, 1842-43, Paris : École Royale des Ponts et chaussées, 1843 (lith.) ; de Guillebon, *Notes prises par tes élèves au cours de mécanique. 1re partie : Résistance des solides*, 1840-41 (lith.) ; pour l'Ecole centrale : J.-B. Bélanger, *Théorie de la résistance de la flexion plane des solides dont les dimensions transversales sont petites relativement à leur longueur*, Paris : Mallet-Bachelier, 1858.

AUTEUR

KONSTANTINOS CHATZIS

Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés (LATTS) École nationale des ponts et chaussées (ENPC)