

JOURNAL
DE
MATHÉMATIQUES
PURES ET APPLIQUÉES

FONDÉ EN 1836 ET PUBLIÉ JUSQU'EN 1874

PAR JOSEPH LIOUVILLE

ANATOLE DE CALIGNY

**Expériences sur le moteur hydraulique à flotteur oscillant. -
Principes de quelques-unes de ses modifications**

Journal de mathématiques pures et appliquées 1^{re} série, tome 12 (1847), p. 347-393.

http://www.numdam.org/item?id=JMPA_1847_1_12_347_0



NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Gallica de la Bibliothèque nationale de France
<http://gallica.bnf.fr/>

et catalogué par Mathdoc
dans le cadre du pôle associé BnF/Mathdoc
<http://www.numdam.org/journals/JMPA>

*Expériences sur le moteur hydraulique à flotteur oscillant. —
Principes de quelques-unes de ses modifications ;*

PAR M. ANATOLE DE CALIGNY.

La principale expérience a été approuvée par l'Institut, le 7 octobre 1844.

Description de l'appareil et objet de ces expériences.

Le moteur hydraulique de mon invention, objet de ces expériences, a été décrit dans un Rapport de M. Combes, tome IV de ce Journal, page 243, ainsi que dans deux Rapports favorables faits à l'Académie des Sciences, le premier, rédigé par M. Coriolis, le 13 janvier 1840, le second, par M. Lamé, le 7 octobre 1844. La description suivante de l'appareil d'essai que j'ai exécuté aux bassins de Chaillot, sous les auspices de M. l'ingénieur en chef Mary, suffira pour rappeler en quoi consiste ce système, qu'il ne faut confondre ni avec mes machines à élever de l'eau, ni avec mes fontaines intermittentes, sur lesquelles diverses Notes ont été publiées dans les tomes III, VI et VIII de ce Journal. M. Corot, ingénieur civil, ancien élève de l'École centrale des Arts et Manufactures, attaché à la direction des eaux de Paris, a bien voulu m'aider dans la plupart des expériences suivantes, dont j'ai répété les principales devant une Commission de l'Institut et deux réunions de savants, dont faisaient partie plusieurs inspecteurs généraux et plusieurs ingénieurs en chef des Ponts et Chaussées, ainsi que divers membres du Conseil de la Société d'Encouragement.

Un tuyau de 0^m,4 de diamètre intérieur et de 20 mètres de long, formé de la réunion de plusieurs tuyaux de fonte à emboîtement, de 2^m,5 de long chacun, était couché horizontalement sur le fond d'un des bassins de Chaillot. Un tuyau vertical en zinc, de 1^m,75 de long et de

même diamètre intérieur, était raccordé avec ce tuyau horizontal au moyen d'un coude en fonte, aussi de même diamètre et de 1 mètre environ de rayon intérieur, formé de deux tuyaux à bride. Cet ensemble composait ainsi un large tuyau d'une forme analogue à un L.

Sur le sommet de la partie verticale était disposé un réservoir en zinc de 1^m,50 de diamètre et de 0^m,50 de haut. Mais, comme on l'avait fait carré pour le fixer dans l'angle du réservoir, il s'était voilé, et ne gardait plus l'eau qu'à 0^m,34 au-dessus du sommet du tuyau vertical terminé par un anneau en cuivre de 0^m,02 de large, mais de même diamètre intérieur que le tuyau.

L'eau était versée dans ce réservoir par un grand tonneau de jauge, contenant environ 10 mètres cubes, et auquel était adapté un gros robinet vanne que l'on ouvrait quand on voulait faire fonctionner l'appareil. Ce robinet était disposé de manière que le mouvement de l'eau affluente ne pouvait que nuire à son introduction dans le tuyau vertical, à cause de la force centrifuge qui en résultait autour de l'orifice de ce tuyau, afin de ne pas faire estimer trop haut l'effet utile.

L'entrée de l'eau du bassin quadrangulaire dans le tuyau vertical était alternativement interrompue et rétablie au moyen d'une sorte de vanne cylindrique ou soupape annulaire ouverte à ses deux extrémités, de 0^m,50 de haut, formée de deux tuyaux en zinc concentriques, réunis par le bas et par le haut au moyen de deux couronnes annulaires, de façon à ne contenir que de l'air dans leur intervalle. Le diamètre du plus large de ces deux tuyaux était de 0^m,44, celui du tuyau intérieur était de 0^m,36. Ce dernier tuyau était entièrement et invariablement ouvert à ses deux extrémités. Cette soupape annulaire était soudée sur un anneau plat en cuivre de 0^m,02 de large, semblable au siège fixe dont nous avons déjà parlé. Elle était tout simplement guidée, dans cet *appareil provisoire*, au moyen de trois tringles en fer de 0^m,32 de saillie, réunies inférieurement, pour la solidité, par un petit cercle en zinc. La soupape et ces tringles qui lui étaient soudées pesaient en tout 17^{kil},5 environ. Sa percussion sur son siège était insignifiante, et il eût été facile d'ailleurs de l'amortir par des moyens connus.

Cette soupape était en partie équilibrée au moyen d'un balancier en fer dont chaque bras avait environ 1 mètre de long, et qui était mobile autour d'un tourillon de 0^m,02 de diamètre. Une de ses extrémités

embrassait la soupape annulaire au moyen d'une fourche qui y était adaptée de chaque côté par des tourillons de 0^m,009 de diamètre. Le poids du balancier était de 9^{kil},50. Le contre-poids était suspendu à l'autre bras du balancier au moyen d'une queue en fer mobile à cette extrémité, à laquelle elle tenait par un anneau. On le réglait de manière que la soupape conservât assez de poids pour bien fermer. On l'a fait varier sans que cela eût bien de l'importance. Quant à l'effet utile définitif, un excès de 5 ou 6 kilogrammes sur le contre-poids suffisait pour tenir la soupape fermée. Cette queue portait inférieurement une rondelle en zinc de 0^m,23 de diamètre, qui venait périodiquement s'enfoncer dans un seau ordinaire contenant de l'eau jusqu'à une certaine hauteur. Il résultait de cette disposition tenant lieu d'un corps mou, que la soupape, lorsqu'elle était levée à la hauteur voulue, s'arrêtait sans balloter d'une manière gênante pour l'écoulement de l'eau dans le système.

Le flotteur en zinc, qui utilisait le travail de l'eau motrice, était formé d'un cylindre d'à peu près 0^m,28 de diamètre et d'un peu moins de 1 mètre de long, c'est-à-dire de 0^m,98 environ, mais les extrémités étaient arrondies. Il portait un cône à chacune de ces extrémités. Le cône inférieur avait un côté à peu près égal à ce diamètre. Le cône supérieur avait 0^m,50 de côté, et portait à son sommet une tubulure pour y introduire de l'eau, et une armature de 0^m,13 de long, destinée à l'attacher à une corde de 0^m,02 de diamètre, qui, passant sur deux poulies de renvoi, tenait à son autre extrémité un déclic ordinaire, qui accrochait périodiquement un mouton du poids de 55 kilogrammes, soulevé à chaque période à une hauteur de 1^m,62.

Le flotteur cylindrique dont je viens de parler passait librement au milieu de la soupape annulaire, ouverte, comme je l'ai dit, à ses deux extrémités, et à laquelle cette forme donnait aussi l'avantage capital de laisser la colonne liquide dans le tuyau de conduite abandonnée librement à elle-même, quand l'écoulement du bief supérieur était interrompu, sans que la colonne oscillante subît aucune interruption; en un mot, sans qu'il fût possible de produire un *coup de bélier*, quand même on l'aurait voulu.

Voici maintenant comment la machine fonctionne. Le tuyau vertical étant une première fois rempli d'eau, comme je l'expliquerai plus

loin, quoiqu'il soit toujours ouvert à ses deux extrémités, la soupape annulaire *flotte*, et permet à l'eau du bief supérieur de s'introduire dans le tuyau vertical. La vitesse s'engendre alors graduellement dans le tuyau de conduite, en vertu de la hauteur du niveau du bief supérieur au-dessus de celui du bief inférieur. La pression motrice se compose de deux parties, de la pression de l'eau dans le réservoir, ou bief supérieur, sur le siège de la soupape annulaire, et de la pression de l'eau contenue dans le tuyau vertical au-dessus du niveau du bief inférieur jusqu'à ce siège fixe. En vertu de cette dernière pression, il y a une époque à laquelle le tuyau tend à débiter plus d'eau que ne peut en fournir le réservoir supérieur par l'orifice resté libre en vertu de la levée de la soupape. Alors il se produit une véritable succion, ou *non-pression*, et la soupape retombe sur son siège de la manière suivante. Il se présente, à l'époque dont je viens de parler, un phénomène intéressant. Pendant que la soupape est ouverte, de manière à conserver dans son tuyau central une colonne liquide annulaire comprise entre les parois de ce tuyau et le flotteur cylindrique remonté, ce flotteur et cette colonne liquide annulaire semblent rester en repos. Mais à l'instant où la vitesse voulue est acquise dans le tuyau de conduite, cette colonne, soutenue ainsi pendant un certain temps, comme le serait une sorte de colonne manométrique, à un niveau un peu moins élevé que celui du réservoir supérieur, mais sensiblement constant, descend tout à coup, et cesse de soutenir latéralement la soupape, qui tombe brusquement sur son siège.

Cet effet provient évidemment d'un phénomène de *non-pression* qu'il est naturel d'attribuer à une succion d'une espèce particulière, analogue à celle qui a été étudiée par D. Bernoulli, etc. On avait d'ailleurs tout le temps nécessaire pour s'assurer de la stabilité dont il s'agit, car la durée totale du temps pendant lequel la soupape ne reposait pas sur son siège était d'un peu plus de 4 secondes [*].

[*] Je n'ai peut-être pas assez remarqué, dans mon dernier Mémoire, que ce système de *succion* pourrait, à la rigueur, suffire pour faire fermer le *piston-soupape* n° 1. On conçoit, du reste, que si la percussion de l'eau affluente a commence par entraîner le *piston-soupape* aspirant, que je rappelle, il finit par se trouver dans la sphère d'action de ce phénomène. Le tuyau tend à débiter plus d'eau qu'il ne peut en venir à cette

Cette opération étant finie, la colonne liquide, abandonnée à son libre mouvement dans le tuyau de conduite toujours ouvert à ses deux extrémités, puisque la soupape est annulaire, descendait autour du flotteur cylindrique, et lui permettait d'agir par son propre poids sur la résistance à vaincre. On le voyait bientôt entièrement découvert. La colonne liquide, en vertu de son mouvement acquis, descendait à une certaine profondeur au-dessous du niveau du bief inférieur. Elle remontait ensuite et rencontrait le flotteur qui, à la fin de sa descente, venait y éteindre sa vitesse, tout en décrochant le mouton parvenu au haut de sa course. Alors cette colonne enveloppait graduellement le flotteur; au premier instant de sa rencontre, elle bouillonnait un peu autour de son cône inférieur, puis elle lui donnait bientôt, en vertu de sa pression latérale graduellement croissante, une vitesse de bas en haut à peu près égale, en général, à la sienne propre. Enfin la colonne, arrivée au haut de sa course, entr'ouvrait la soupape, qui, permettant à l'eau du bief supérieur de se poser sur l'eau remontante, contribuait avec elle à remettre les choses dans l'état où elles étaient avant la descente du flotteur, c'est-à-dire à rétablir la colonne de niveau avec le bief supérieur, et ainsi de suite indéfiniment.

On voit que, dans cette expérience, ce n'est pas l'eau qui *travaille* immédiatement; elle ne travaille qu'à relever le flotteur, dont le poids, abandonné ensuite à lui-même, agit directement sur la résistance à vaincre. La descente du flotteur durait environ 3 secondes, et son ascension 2 secondes. La durée totale de chaque période était d'à peu près $9\frac{1}{2}$ secondes; il y en avait cinquante-sept en 9 minutes environ.

Pour transformer le mouvement alternatif du flotteur en mouve-

époque par l'orifice de plus en plus diminué. Il y a donc une cause de succion croissante encore plus intense que pour l'expérience décrite dans le texte, et, par conséquent, une cause très-probablement suffisante pour faire fonctionner le système sans *cataracte*. Quant à la queue inférieure du *piston-soupape* qui porte le *boulet*, ou la surface quelconque sur laquelle peut agir la percussion de l'eau affluente pour commencer à le faire baisser, il est à peine nécessaire d'ajouter que cette queue pourrait être articulée de manière à ne pas augmenter la profondeur des fondations. Au reste, quand le tuyau sera tout entier horizontal, il n'y aura plus à s'embarrasser d'aucun coude. Le piston sera toujours facile à manœuvrer par un moyen quelconque.

ment circulaire, on aurait pu, si ce flotteur avait été guidé, le faire travailler en partie de bas en haut, en réglant sa densité d'une manière convenable. Il est évident qu'on aurait pu le faire monter beaucoup moins vite, puisqu'il se repose un certain temps au haut de sa course. On conçoit donc que si un volant l'avait fait convenablement émerger au haut de cette course, cela aurait suffi pour que l'on eût pu sans beaucoup de difficulté rendre la durée de la course ascendante égale à celle de la course descendante, d'autant plus qu'à la fin de la période, la vitesse dans le sens vertical est nécessairement très-affaiblie quand on emploie un volant. Mais on peut diminuer cette élévation au-dessus de l'eau en faisant plonger un peu plus profondément, au moyen du même volant, le flotteur dans la colonne remontante. Si c'était ici le lieu, je donnerais le détail des dimensions qui peuvent favoriser la transformation de mouvement, au moyen des variations de diamètre du tuyau vertical. Il suffit de remarquer, relativement à cette expérience, que la colonne liquide descend au-dessous du flotteur et le rencontre dans sa course remontante. Or, pour augmenter la durée de cette époque du mouvement, il aurait suffi d'élargir convenablement le bas du tuyau vertical, puisqu'il faut d'autant plus de temps pour éteindre ou pour engendrer une quantité donnée de force vive, que les pressions refoulantes ou motrices sont moindres. Il en serait d'ailleurs résulté que le flotteur aurait pu descendre plus longtemps, même à partir du moment où il aurait rencontré la colonne remontante, parce que, si le tuyau avait été plus gros autour de sa base, il aurait pu y pénétrer plus profondément, par la raison même que le liquide refoulé autour de lui aurait eu, pour une course donnée du flotteur, moins de hauteur et moins de vitesse. Mais ces considérations conduisant à des recherches assez délicates, j'en ferai le sujet d'un Mémoire distinct de ce travail, quand je les aurai d'ailleurs confirmées par de nouvelles études expérimentales sur ce système ainsi considéré comme une espèce particulière de *roue hydraulique verticale*.

On fera, en général, débiter à la machine un peu plus d'eau que cela n'est nécessaire, afin de pouvoir tenir compte des irrégularités accidentelles. Ainsi que je le remarquerai plus loin, quand elle débite un peu trop d'eau, il en remonte un peu au bief supérieur à chaque période, de sorte que cela n'a pas beaucoup d'inconvénients.

Dans cet appareil d'essai, le flotteur cylindrique n'était pas guidé; il ballottait, abandonné à lui-même dans la colonne liquide, etrencontrait même quelquefois la paroi du tuyau ou les guides de la soupape. C'est par cette raison que j'avais plus allongé le cône supérieur que le cône inférieur. Quant à ce dernier, je pense que, pour ces conditions de l'appareil, sa forme doit être dans une bonne exécution, considérée plutôt comme celle d'une poupe que comme celle d'une proue; car il resterait principalement à considérer le mouvement de l'eau relativement à ce cône, pendant que le flotteur se tient en repos après avoir accroché le mouton à la fin de sa course ascensionnelle, et forme alors, par sa position dans le centre du tuyau, un orifice annulaire au sommet de ce tuyau. On peut remarquer que, dans sa course remontante, le frottement de la colonne liquide autour de lui n'est pas entièrement perdu pour l'effet, puisqu'il l'aide à acquérir sa vitesse ascensionnelle jusqu'à l'époque où celle-ci est devenue à peu près égale à celle de cette colonne.

A cause des ballottements du flotteur non guidé dans cet appareil provisoire, et du surcroît de course nécessaire pour faire accrocher sûrement le mouton, qui n'était pas non plus établi très-solidement, j'avais donné à l'oscillation remontante plus de force que cela n'eût été nécessaire si l'on avait employé une machine mieux exécutée, et surtout un mode moins défectueux d'application pour le moteur. Il en résultait que non-seulement le flotteur remontait, en général, à 0^m,15 plus haut que cela n'était nécessaire, mais qu'à chaque période, il rentrait dans le réservoir supérieur une certaine quantité d'eau qui en gonflait visiblement la surface environnante, après avoir traversé deux fois le système en augmentant sans utilité le chemin et la valeur des résistances passives. Aussi, quand le tonneau de jauge achevait de se vider, la machine fournissait un certain nombre de périodes avec un niveau moins élevé dans le bief supérieur et une dépense d'eau bien moindre; ce qui était même remarqué à la simple vue par tous les observateurs, puisque le robinet de jauge *ne coulait plus plein*.

Lorsque le réservoir ou bief supérieur était entièrement plein d'eau, la hauteur de son niveau au-dessus de celui du bief inférieur était de 1^m,28. Mais le réservoir supérieur ayant une étendue limitée, la

chute motrice moyenne était nécessairement moindre, puisque sans cela l'eau qui arrivait du tonneau de jauge aurait coulé par-dessus les bords pendant que la soupape était fermée. Il est facile de voir que, surtout si l'on a égard aux ondes qui augmentaient les chances de versement, le niveau moyen, qui eût été à considérer dans un réservoir de largeur indéfinie, n'était pas à plus de $1^m,26$ au-dessus du niveau du bief inférieur, en faisant même abstraction de ce que le niveau montait un peu dans le bief inférieur pendant l'expérience. Cette remarque est de peu d'importance, mais il est bon de se représenter comment les choses se passent le plus exactement possible. La machine ne s'arrêtait que lorsque cette hauteur de chute était notablement réduite; mais nous admettrons d'abord $1^m,26$ de chute, quand nous dirons que la machine donne un effet utile d'environ 60 pour 100, mesuré directement au moyen de la levée périodique du mouton.

En considérant seulement quelques oscillations pour des chutes moindres, j'ai trouvé des effets utiles sur lesquels je donnerai plus loin des détails.

J'ai mesuré directement le poids qui imprimait au flotteur et au mouton suspendus aux deux extrémités de la corde la vitesse nécessaire pour faire décrocher le déclic arrivé au haut de sa course. Il en résulte que, si l'on mesurait l'effet utile au point d'application du moteur, et non sur l'outil même, ce qui serait juste, puisqu'on agit ainsi pour apprécier l'effet de tous les autres moteurs, des roues hydrauliques par exemple, il faudrait augmenter l'effet utile de 0,60 d'une certaine quantité. Je reviendrai sur ces estimations.

Le mouton, alternativement soulevé, est d'ailleurs le moyen le plus direct, mais le plus désavantageux, d'estimer l'effet utile de ce moteur; car, pour le faire accrocher et décrocher, il faut un surcroît de travail dont il ne serait pas seulement question si le flotteur était *invariablement* attelé à l'outil; si, par exemple, cet outil était une pompe, une scie, un soufflet, une grande cisaille, une machine à polir, etc. On voit même que, pour plusieurs de ces applications, dans beaucoup de circonstances, le flotteur pourrait être directement attelé sans poulies de renvoi. Ici les deux poulies étaient en cuivre, leur diamètre était de $0^m,20$, celui de leurs boulons était de $0^m,03$; la corde qui se pliait dessus avait un diamètre de $0^m,02$. Elle était souvent mouillée au moment des

essais. Les *filets* en bois, le long desquels s'élevait le mouton, avaient une section carrée d'environ 0^m,03 de côté. Le mouton ballottait quelquefois le long de ces filets, à cause de la mauvaise exécution de l'appareil.

Parmi les expériences, je décrirai particulièrement celle qui a été faite, le 14 octobre 1843, à la dernière séance, celle à laquelle assistait M. Lamé, qui a rédigé le Rapport à l'Institut. On s'était montré généralement satisfait de la première, faite quelques jours auparavant, le 10 octobre. Mais comme il était survenu un accident pendant l'opération, je ne la trouvais pas suffisante pour fixer l'opinion d'une manière définitive; je demandai à recommencer un autre jour, et l'appareil fonctionna avec la régularité désirable, le flotteur ne sautant plus qu'à 0^m,15 au-dessus de la limite de sa course ascensionnelle utile. J'ai fait une centaine d'expériences de ce genre. Comme leurs résultats ne varient que de quelques centièmes, et que leurs différences, dont au reste je rendrai compte, peuvent être attribuées jusqu'à un certain point aux imperfections de l'exécution, je me bornerai à discuter principalement celle qui a reçu la sanction académique, ne pouvant d'ailleurs tenir à quelques centièmes dans l'effet utile d'un appareil d'une exécution aussi imparfaite. Il suffit de rappeler en peu de mots le nombre considérable de mes essais, et de dire que le maximum d'effet résultait surtout, comme cela est d'ailleurs évident, de l'attention que j'avais d'empêcher autant que possible le flotteur de sauter au-dessus de la limite utile de sa course ascensionnelle, quand il n'y avait qu'un petit nombre d'observateurs, que peu m'importait de recommencer l'expérience en prenant le temps nécessaire pour remplir au besoin le tonneau, et en modérant la chute motrice de manière que l'eau ne versât jamais au-dessus des bords du bassin supérieur.

Description de l'expérience faite le 14 octobre 1843.

Le tonneau de jauge avait 2^m,10 de diamètre, il était sensiblement cylindrique; la petite différence, provenant de ce que les cercles en fer avaient été enfoncés par le haut, était plus que compensée par des pertes d'eau dont on n'a pas tenu compte. L'expérience a duré 9 mi-

nutes, à partir du moment où l'on a commencé à compter les périodes devenues suffisamment régulières. Depuis cet instant, l'eau a baissé de 2^m,05 dans le tonneau; le volume débité est donc de 7,100 mètres cubes en négligeant les dix-millièmes. Mais, à partir du moment où l'on a arrêté la soupape pour interrompre l'écoulement du bief supérieur, il a fallu un certain temps pour fermer le gros robinet vanne du tonneau, qu'il ne m'a jamais été possible de fermer en moins de 20 secondes. Ce robinet était à cette époque entièrement ouvert et ne coulait pas plein à beaucoup près; le temps pendant lequel on a baissé la vanne était plus que double de la durée d'une période. On trouve de diverses manières qu'environ $\frac{1}{5}$ de mètre cube n'est point entré dans l'appareil, ce qui réduit le débit réel à 6^mc,9, surtout si l'on a égard à d'autres petites pertes dont on parlera plus loin.

Le bassin en zinc et la soupape perdaient un peu d'eau: on a constaté qu'en 9 minutes cette perte était d'environ $\frac{1}{10}$ de mètre cube, ce qui réduirait à 6,8 le débit réel de l'eau passée dans la machine. Mais comme une partie de cette perte se faisait par la soupape, il est juste de remarquer que cette soupape est entr'ouverte pendant près de la moitié du temps. Pour y avoir égard dans l'estimation totale, nous ne tenons pas compte de ce qu'à partir du moment où la soupape était fermée pour achever d'arrêter définitivement la machine, quand la hauteur de chute était notablement diminuée, le flotteur remontait encore presque à la hauteur nécessaire pour que le déclic accrochât le mouton. Or nous avons dit que le travail du système était employé à relever le flotteur, de sorte que cette considération devait être présentée; elle fait d'ailleurs plus que compenser ce que nous venons de négliger.

Le nombre des périodes était compté en même temps par plusieurs observateurs; et, pour confirmer leurs notes, chaque fois que l'on entendait le coup de mouton, on jetait une pierre dans un seau. Enfin, pour tenir compte de ce que la machine était employée à relever le flotteur, on a retiré la première pierre, et le nombre de celles qui restaient s'est trouvé de 57. Le mouton montait sensiblement, en vertu de sa vitesse acquise, au-dessus de 1^m,62; mais on a négligé le petit surcroît d'effet utile qui en résultait. On entendait le coup de la pièce de bois qui portait la tenaille avant que le mouton cessât de

monter. Cette quantité négligée ne m'a semblé, au reste, qu'environ $\frac{1}{100}$ de l'effet, au plus.

Le travail dépensé est le poids de $6^m,8$ d'eau, tombé de $1^m,26$. Le travail recueilli est le poids du mouton de 55 kilogrammes, élevé 57 fois à $1^m,62$. Le rapport de ce travail au premier est donc $\frac{507,87}{856,80}$; de sorte que l'effet utile est, en définitive, d'environ 0,60.

MM. les Commissaires de l'Institut, ayant pris le maximum de la chute de $1^m,28$, et n'ayant pas tenu compte des $\frac{3}{10}$ environ de mètre cube qui ne sont pas entrés dans la machine, ont trouvé une différence d'ailleurs très-petite entre ce résultat et celui auquel ils sont parvenus. Enfin, à cause d'un accident survenu pendant l'expérience précédente, à laquelle assistait M. Poncelet, celle du 10 octobre, la personne qui comptait les périodes et qui avait cessé quelques instants de s'en occuper en ayant omis quatre, ils ont pris une moyenne entre les résultats de ces deux expériences, et se sont arrêtés au chiffre 0,55. Pour une machine d'une exécution aussi imparfaite, je ne tiens pas à une si petite différence; mais, pour mieux étudier le système, je crois devoir faire observer que l'expérience du 10 octobre avait duré $9^m,20^s$; que la hauteur du cylindre d'eau débitée avait été de $2^m,12$. Dans l'expérience du 14 octobre, qui a duré 9 minutes seulement, la hauteur du prisme d'eau dépensée n'a été que de $2^m,05$. On voit que ces deux résultats s'accordent assez bien quant au débit. Or la durée de chaque période était réglée d'une manière analogue à ce qui se présente dans l'oscillation d'un pendule, malgré les imperfections de l'appareil. Si donc on a compté 57 coups de mouton en 9 minutes dans l'expérience régulière, pour laquelle on a mis beaucoup plus de soin dans la manière de vérifier ce nombre, en confiant même ce soin à plusieurs personnes habituées à ce genre d'observations, pendant l'expérience qui a duré 20 secondes environ de plus, on aurait dû compter deux périodes de plus, au lieu de deux de moins, comme on l'a noté: ce qui fait une omission de $\frac{4}{55}$ dans l'expérience du 10 octobre.

On sera peut-être étonné de voir que la durée de la période diffère très-peu de la durée des périodes d'oscillation, quand on ôte le flotteur. Il y a, comme on le verra plus loin, des causes de compensation dans la distribution des vitesses; en général, la présence du flotteur tend à diminuer, sous certains rapports, la durée de la pé-

riode. Ainsi, quand on met la colonne en oscillation en y plongeant alternativement le flotteur, le nombre des oscillations augmente dans un temps donné, relativement à ce qu'il est quand on ôte le flotteur et qu'on laisse ensuite la colonne abandonnée à elle-même. On peut s'en rendre compte jusqu'à un certain point, d'après ce que j'ai dit dans le tome III de ce Journal, en considérant ce qui se passe quand le flotteur est invariablement suspendu au haut de sa course. Alors sa présence forme un rétrécissement au sommet du tuyau, et il en résulte une augmentation dans le nombre des oscillations, dont j'avais donné la loi depuis longtemps, et dont j'ai ici vérifié de nouveau l'existence.

Études sur cette expérience et sur ses détails.

En donnant ce chiffre de 0,55, MM. les Commissaires de l'Institut « s'empressent de reconnaître que ce résultat obtenu sur un appareil » dont la construction, dirigée avec une stricte économie, laissait » beaucoup à désirer, ne doit être considéré que comme un *minimum*. » On ne peut douter, en effet, que la machine hydraulique de M. de » Caligny, employée plus avantageusement, construite avec plus de » soin et dans de nouvelles proportions que les dernières expériences » ont indiquées, ne puisse donner un effet utile notablement plus » élevé. »

Si j'ai rapporté les vérifications précédentes, c'est surtout parce qu'il ne me paraît pas impossible d'examiner en quoi peuvent consister les défauts de l'appareil, au moyen de mesures particulières, qui ont d'ailleurs l'avantage de mieux faire étudier les principes sur lesquels il repose. Voici d'abord une expérience que j'ai souvent répétée, et que je montrai, le 10 octobre, à plusieurs membres du Conseil de la Société d'Encouragement, à la fin de la séance.

Le robinet du tonneau étant fermé, et le réservoir supérieur en zinc étant plein d'eau, j'obtenais deux périodes de la machine, après l'avoir mise en train de la manière suivante avant de laisser la soupape s'ouvrir. Le mouton étant accroché, j'enfonçais le flotteur dans le liquide que contenait le tuyau, en pesant sur la corde; je le laissais relever ensuite par le contre-poids, et ainsi de suite, jusqu'à ce que ces immersions alternatives dans la colonne liquide de plus en plus ascen-

dante, mise en oscillation par ce moyen, eussent fait parvenir le liquide assez haut pour faire ouvrir la soupape annulaire, ce qui suffisait pour mettre la machine en train. On peut remarquer, en passant, que ce moyen d'*amorcer* l'appareil constitue une véritable pompe qui n'a point besoin de soupape.

Dans les expériences dont j'ai déjà rendu compte, j'*amorçais* la machine par des introductions alternatives de l'eau du bief supérieur sur la colonne de plus en plus ascendante, en ouvrant alternativement la soupape; mais ici j'avais un grand intérêt à ménager l'eau du réservoir en zinc. Le travail de l'eau étant, comme je l'ai dit, employé à relever le flotteur, je ne comptais pas le premier coup de mouton.

On obtenait deux périodes au moyen d'une baisse de 9 centimètres; mais à la seconde, il est vrai, le flotteur ne remontait pas tout à fait assez haut pour accrocher le mouton. Afin d'y parvenir, il fallait, en *amorçant* la machine, faire en sorte de rejeter une certaine quantité d'eau dans le réservoir supérieur, et encore j'y suis rarement parvenu. Cette circonstance laisse sans doute un peu de vague sur le résultat de cette expérience, qui n'est intéressante que pour indiquer la limite de ce qu'on pouvait faire avec un appareil si mal construit. Cependant il est clair qu'on ne pouvait pas faire gonfler beaucoup l'eau dans les environs de la soupape, sans la faire verser par-dessus les bords du bassin en zinc, quoiqu'elle redescendît immédiatement par l'ouverture de la soupape. Si l'on admettait moyennement sur la surface une augmentation d'épaisseur de 0^m,01 environ, cela ferait une baisse de 0^m,05 par période.

Les parois du réservoir quadrangulaire en zinc étant voilées, je craindrais d'induire en erreur si je calculais le volume d'eau dépensé au moyen de l'espace abandonné par la baisse du niveau supérieur. D'ailleurs, les personnes qui, dans plusieurs séances, ont vu fonctionner la machine, ont remarqué elles-mêmes la baisse notable qui se présentait à la fin de chaque épreuve, sans que cela empêchât d'obtenir encore plusieurs périodes. Or ce qui est important, c'est moins une diminution de quelques centièmes *sur la chute totale*, que la baisse *relativement à la hauteur du niveau au-dessus du siège fixe de la soupape annulaire*. Il ne s'agit plus seulement d'une

baisse moyenne, mais de la limite de celle pour laquelle la machine peut encore fonctionner. Ce qui fait l'importance de cette observation, c'est que la dépense d'eau de la machine provient immédiatement de la hauteur du niveau supérieur au-dessus du siège fixe de la soupape, laquelle retombe, comme je l'ai expliqué dans le paragraphe I, au moment où la colonne liquide tend à débiter plus d'eau qu'il ne peut en venir du bief supérieur. Or, si la vitesse d'écoulement de l'eau de celui-ci est, à la limite, proportionnelle à la racine carrée de cette hauteur, il en sera de même de la vitesse dans le grand tuyau horizontal. La force vive emmagasinée dans le système sera comme cette même hauteur, et, en définitive, le débit à chaque période lui sera aussi à peu près proportionnel dans certaines limites. Sans doute il y a quelque chose d'hypothétique dans l'estimation rigoureuse du débit d'après ce phénomène, que je n'ai encore pu étudier d'une manière tout à fait complète; mais il m'a semblé cependant utile d'indiquer le résultat auquel on serait conduit par ces considérations, en ne donnant ce résultat que pour valoir ce que de raison.

En partant de ces données, il est facile de voir que, dans les circonstances où les périodes sont assez peu nombreuses pour qu'on en puisse trouver d'aussi régulières que si la machine était réglée à peu près comme dans le cas où le flotteur serait guidé, on parvient à un effet utile d'environ les deux tiers du travail dépensé par la chute.

Mais pour être sûr de faire accrocher le mouton quand il y avait beaucoup de périodes, je débitais ordinairement plus d'eau qu'il n'en fallait pour que le flotteur atteignît la limite de sa course, comme il le faisait quand il ne rencontrait point les parois. Il sautait à $0^m,15$ de haut au-dessus de la limite de sa course *utile*, dans l'expérience du 14 octobre. Voyons comment on doit avoir égard à cette circonstance dans le calcul de l'effet produit.

Le flotteur retombait de la hauteur $0^m,15$, mais, il est vrai, en refoulant dans le bief supérieur, par la soupape ouverte, un volume d'eau analogue à celui qui était déplacé par cette descente. Cependant le travail employé à relever le flotteur à $0^m,15$ de plus que cela n'est nécessaire était loin d'être restitué par la rentrée de ce volume d'eau,

puisqu'en retombant le flotteur était retenu brusquement par son anneau de suspension, et restait à peu près en repos. Or, pendant cette descente, son travail a été employé en partie à lui faire acquérir de la vitesse et à augmenter celle de la colonne annulaire liquide qui l'entourait, en ayant à surmonter des résistances passives, et en exerçant une réaction sur la tête de la colonne liquide généralement ascendante. En définitive, plus de la moitié du travail développé par cette descente de $0^m,15$ est en pure perte; le flotteur étant soulevé de plus de $\frac{1}{11}$ de la course, ce $\frac{1}{11}$ eût été utilisé entièrement, s'il avait été attelé invariablement à un outil qu'il n'eût pas fallu accrocher *alternativement*. D'ailleurs l'eau rentrée alternativement dans le bief supérieur donne lieu à un surcroît dans la valeur et le chemin des résistances passives, par la raison même qu'elle augmente l'amplitude de l'oscillation sans utilité.

Enfin, « pour apprécier plus exactement l'effet du moteur, il eût » fallu tenir compte des résistances passives du mécanisme additionnel, telles que le frottement des poulies, l'inertie du dé clic, etc. » Cette remarque, admise dans ces termes par MM. les Commissaires de l'Institut, est conforme à ce qui se passe dans la pratique des usines; car c'est sur l'arbre d'une roue hydraulique, par exemple, qu'on mesure l'*effet utile*, et non sur l'outil qu'elle fait mouvoir.

On peut encore se former une idée des résistances dont il s'agit. Il ne suffit pas de connaître le poids nécessaire pour vaincre la résistance des poulies, celle de la flexion de la corde, etc., mais le poids nécessaire pour faire décrocher le dé clic au haut de sa course, en faisant plonger le flotteur dans la colonne remontante qui le rencontre avant que sa descente soit finie. J'ai trouvé, par des mesures directes, que ce poids ne différait pas beaucoup de $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{11}$ de celui du mouton, quelquefois un peu moins. Mais il est juste de remarquer qu'une partie de la force vive, développée par cette quantité, est employée à augmenter la course du flotteur. Or, en vertu des lois du mouvement accéléré, on pourrait se former une idée de cette force vive, puisque la course de $1^m,62$ est parcourue en 3 secondes environ, et que la colonne remontante ne rencontre le flotteur que vers la fin de cette course. Ayant remarqué que le mouton s'élevait en vertu de la vitesse acquise à environ $0^m,015$ au-dessus de la limite $1^m,62$ que nous avons

admise dans nos calculs, autant qu'il m'a été possible de l'observer sans appareil disposé dans le but de faire cette expérience secondaire, on peut se rendre compte de la manière dont se dépense le travail de ce poids supplémentaire. Plus de la moitié de ce travail qui est ici perdue serait employée utilement dans une machine où le flotteur serait toujours attelé à la résistance sans intermédiaire, sans cordes, ni poulies, ni déclat.

Je trouve, au moyen des mesures directes et des considérations qui en résultent, qu'en définitive, l'effet produit par le moteur ne devait pas différer beaucoup de 0,70 du travail dépensé par la chute; que même ces mesures permettent de discuter les imperfections de l'appareil et peut-être, à certains égards, d'en connaître les propriétés d'une manière plus complète qu'on ne l'eût fait avec une exécution moins imparfaite.

Il y a encore un sujet d'études intéressantes sur la manière dont se distribue le travail perdu, en supposant une exécution moins imparfaite de la machine, mais en considérant le tuyau de conduite avec les défauts quelconques qu'il avait à la fin de ces expériences, à partir de l'époque où l'on a commencé à pouvoir mesurer d'une manière positive l'effet utile du nouveau moteur, après avoir fait beaucoup d'expériences préliminaires, dont je rendrai compte dans l'ouvrage que je prépare.

Études sur l'emploi des résistances passives dans ce moteur.

Le frottement provenant du simple balancement de la colonne liquide absorbe une quantité de travail en résistances passives bien plus grande que la somme des autres causes de déchet. Cette remarque, que je vais justifier, est d'autant plus essentielle, qu'il en résulte qu'il suffira d'augmenter dans certaines limites le diamètre du tuyau en L, pour diminuer le déchet total d'une manière importante: c'est le point essentiel des études suivantes.

Abstraction faite de la valeur rigoureuse des coefficients des résistances passives, nous admettons simplement les chiffres fournis par les observations sur le tuyau en L, dans l'état où il était à la fin de ces expériences. Il suffit, pour se rendre compte de l'influence du simple

balancement de la colonne liquide sur le déchet total, d'appliquer, avec la modification dont je vais parler, les formules que j'ai établies dans le tome III de ce Journal, et que M. Coriolis a depuis retrouvées par d'autres méthodes, en rappelant d'ailleurs, dans un de ses Rapports à l'Institut sur mes recherches, celui du 20 août 1838, que j'y étais parvenu le premier *par d'ingénieux moyens géométriques*.

La modification dont il s'agit consiste dans la manière de tenir compte de l'influence exercée sur le travail en frottement, par la présence du flotteur pendant l'ascension de la colonne liquide.

Le flotteur avait une densité plus grande que celle de l'eau; mais il était relevé en vertu de l'action d'un contre-poids qui, joint au déclic et formant ordinairement en tout 14 kilogrammes environ, était indispensable pour le faire *flotter*. Pour ce sens du mouvement, la corde est bien moins tendue et ses résistances passives bien moindres que dans le mouvement en sens contraire; cependant il faut en tenir compte: ce qui fait plus que compenser une petite incertitude sur le poids nécessaire pour vaincre ces résistances passives. Les choses étant alors, quant à l'ascension du flotteur, dans un état analogue à ce qui se présenterait s'il avait une densité moindre que celle de l'eau, on va voir que cette ascension permet, en général, au système liquide de développer un peu plus de vitesse que si cette pièce était retenue en équilibre de haut en bas. La surface de la colonne liquide est d'ailleurs, bien entendu, descendue à la profondeur nécessaire pour remonter à la limite de sa course ascensionnelle, malgré la présence du flotteur supposé en repos invariable. Il semble, au premier aperçu, qu'il y a ici un paradoxe; ceci exige quelques développements.

Si le flotteur, descendu au-dessous du niveau du bief inférieur, était supposé dans un repos invariable, il occuperait la place d'un volume de liquide égal à son propre volume; il faudrait donc que le niveau de la colonne oscillante partît de plus bas pour arriver au haut de sa course, puisqu'en vertu de l'occupation permanente de l'espace dont il s'agit, il resterait à l'eau qui descend moins de chemin à parcourir pour développer sa force vive.

Mais si l'on suppose que le point de départ de la colonne soit à une profondeur convenablement calculée d'après la remarque précédente, et que l'on fasse, pour un moment, abstraction des résistances pas-

sives, la densité du flotteur étant, par hypothèse, moindre que celle de l'eau, son ascension est une cause d'addition de force vive au système, parce qu'en s'élevant, il fait passer de l'eau à la place qu'il abandonne. Il est clair que, s'il était dans un vase d'eau en repos, son ascension ferait descendre le centre de gravité du système. Enfin, pour ne laisser aucun nuage sur la manière dont le travail se distribue en vertu de cette ascension dans la colonne liquide oscillante, il suffit de remarquer que, lorsqu'elle est finie, l'espace occupé primitivement par le flotteur est rempli d'eau. Or le flotteur se trouve alors en entier au-dessus du niveau du bief inférieur; et comme le niveau de la colonne liquide oscillante était parti de plus bas que lorsqu'il n'y avait pas de flotteur, il y a eu, en définitive, plus d'espace envahi par le liquide au-dessous du niveau du bief inférieur; cela rend compte de la raison pour laquelle le flotteur a pu être soulevé malgré le travail résistant de son poids.

L'expérience, d'ailleurs, prouve que, dans l'intérieur de la colonne liquide, le flotteur ne monte point par soubresauts; il serait donc rigoureux de tenir compte, dans le calcul du travail en frottement, du surcroît quelconque de force vive qui pourrait provenir, comme je l'ai expliqué, du mode d'action du flotteur pendant son ascension, parce qu'à une augmentation de force vive correspond une augmentation de résistances passives dans le balancement de la colonne oscillante. Mais, comme la différence de densité entre l'eau et le flotteur n'était pas très-grande, et que le flotteur finissait par avoir, en général, une vitesse analogue à celle de l'eau qui l'enveloppait, cette remarque est plus intéressante pour la théorie que pour l'estimation réelle des effets de la machine. D'ailleurs, les résistances passives occasionnées par le flotteur, surtout dans les premiers instants de sa rencontre avec la colonne remontante, diminuent d'une quantité quelconque les vitesses du système; il y a des effets de résistances passives compensés, en quelque sorte, dans les calculs qui ne porteraient que sur des quantités très-secondaires ici, et d'une détermination trop délicate pour mériter d'être étudiées en ce moment relativement à une expérience aussi imparfaite.

La correction à faire sur la profondeur de l'oscillation, dans le calcul du déchet, à cause du mouvement du flotteur, ne provient point

de l'oscillation descendante, puisque le flotteur ne fait guère que suivre la colonne liquide dans le sens de ce mouvement. La dernière moitié de l'oscillation descendante est parfaitement dégagée du flotteur; mais il faut tenir compte, dans la première moitié, de la manière dont se distribuent la valeur et le chemin des résistances passives. La hauteur de l'eau qui engendre de la vitesse dans le tuyau pendant que l'eau motrice y pénètre est moindre que la hauteur moyenne d'où celle-ci partirait, si le tuyau était prolongé en dessus, et qu'elle en descendît pour engendrer la même vitesse, au lieu de sortir du bief supérieur. Il faut en tenir compte dans l'application des formules. Au reste, il y a une sorte de compensation provenant de ce que le flotteur suspendu occupant un certain volume au-dessous du niveau du bief supérieur, la quantité d'eau sortie de ce bief pour engendrer la force vive qui le serait par un égal volume d'eau, si le flotteur était enlevé, descend d'une hauteur plus grande que celle du centre de gravité du flotteur.

Ces considérations secondaires ont ici peu d'importance. On pourra faire le calcul à peu près comme pour les résistances passives d'une oscillation libre dans un tuyau vertical.

Pour appliquer à l'oscillation remontante les formules que je rappelle au commencement de ce paragraphe, il faudrait réduire les choses au degré de simplicité où elles seraient si, le flotteur étant supprimé, la colonne liquide partait de la profondeur nécessaire pour avoir, en arrivant à la hauteur du niveau du bief inférieur, à peu près la quantité de force vive qu'elle doit avoir après être partie de plus bas, quand on suppose le flotteur invariablement fixé à la limite inférieure de sa course. Cette détermination est facile à obtenir au moyen des principes que j'ai exposés dans les tomes III et VI de ce Journal. On trouve d'ailleurs, au moyen des mêmes principes, que le calcul du déchet établi de cette manière peut être plutôt au-dessus qu'au-dessous de sa véritable valeur, à cause de la manière dont la présence du flotteur modifie le chemin parcouru par les résistances passives. Ainsi, il y a diverses causes de compensation, et, en définitive, on peut se servir, dans une simple approximation comme celle dont il s'agit, de mes formules sur le mouvement oscillatoire dans les tuyaux cylindriques indéfiniment prolongés dans le sens vertical. Mais il faut

avoir égard à la manière de les employer que j'ai prescrite, et se servir, pour déterminer la somme des coefficients des résistances passives qui se présentent dans le simple balancement de la colonne liquide, des observations *directes* faites sur le déchet dans la hauteur de la colonne remontante, lorsqu'on a ôté le flotteur à la fin des expériences.

Quant aux irrégularités secondaires qui résultent nécessairement du principe de l'oscillation, elles se réduisaient à peu de chose lorsque la machine était bien réglée et en assez bon état. Lorsque les spectateurs ne regardent pas monter le flotteur dans l'intérieur du tuyau en L, ils peuvent craindre qu'il n'y ait des soubresauts, à cause de ce qui se passe à la limite de l'ascension, mais il n'en est pas ainsi; seulement, à la fin de l'ascension, le flotteur monte à une certaine hauteur au-dessus du point où cela est nécessaire, pour accrocher plus sûrement le mouton. Or il est indispensable de faire observer que, dans le cas où il s'agirait de faire fonctionner un outil qui serait toujours attelé au flotteur, ce soubresaut, qui est dans ce modèle un défaut essentiel, serait *impossible*. En effet, la résistance industrielle tiendrait le flotteur *suspendu*, si, par hypothèse, elle ne pouvait être surmontée que par la totalité ou la presque totalité du poids du flotteur, découvert en vertu de la descente ultérieure de la colonne liquide.

A l'époque où la colonne remontante rencontre le flotteur, qui descend encore, il se présente un bouillonnement momentané autour de son cône inférieur, et, par suite, une cause quelconque de ballonnement dans le flotteur, quand il n'est pas guidé. Mais il est clair que, s'il est guidé, cette cause insignifiante de perte de travail est sans inconvénient, et se confond avec celles dont l'effet est alternativement *restitué* en vertu de l'augmentation de profondeur dans le point de départ due à une dépense d'eau motrice plus considérable que cela ne serait nécessaire si l'on n'avait pas à tenir compte des irrégularités *éventuelles*. La limite de ces irrégularités sera déterminée, bien entendu, dans chaque machine, et, lorsqu'elles ne se présenteront pas, il rentrera à chaque période, dans le bief supérieur, une partie du surcroît de débit destiné à y avoir égard dans tous les cas, pour que l'appareil ne soit jamais arrêté, excepté dans des circonstances

très-rares, ainsi que cela arrive pour toutes les machines hydrauliques.

Je n'entrerai pas ici dans le détail des calculs, n'ayant pour but, dans ce Journal, que d'exposer des principes. Voici, au reste, les données numériques au moyen desquelles le lecteur pourrait facilement vérifier le résultat principal, en relisant au besoin les deux Mémoires que j'ai rappelés, ou même celui de M. Coriolis, inséré dans le tome III de ce Journal.

Ayant retiré le flotteur du système, j'ai mis la colonne liquide en oscillation par l'introduction alternative d'une tranche de liquide, en soulevant alternativement la soupape, comme je l'ai dit plus haut. Je tenais ensuite cette soupape invariablement fermée, lorsque la colonne remontante avait versé par-dessus ce *tuyau-soupape*, en passant par l'espace libre à son intérieur; car il faut toujours se souvenir que la soupape est disposée de manière à ne jamais boucher *transversalement* le tuyau. Je laissais retomber la colonne liquide, la soupape étant toujours fermée, c'est-à-dire son anneau inférieur reposant invariablement sur le siège annulaire fixe, et je notais la hauteur à laquelle parvenait la colonne remontante. Je craignais d'abord que l'air introduit dans le liquide par le mode de mise en train n'altérât notablement les résultats, cela faisait évidemment quelque chose; mais les bulles d'air du sommet de la colonne paraissaient, en définitive, peu importantes. D'ailleurs, j'ai répété un grand nombre de fois cette expérience, en retrouvant toujours assez sensiblement le même déchet à cette époque de mes essais. Or il est probable qu'il n'en aurait pas été ainsi dans le cas où les bulles d'air, introduites d'une manière nécessairement peu uniforme, auraient eu une influence essentielle sur les effets. Quoi qu'il en soit, voici le résultat d'après lequel j'ai fait un essai de calculs numériques.

L'eau remontait à 0^m,22 du sommet du *tuyau-soupape*. Pour apprécier ce déchet, il faut se souvenir que le diamètre intérieur de ce tuyau n'était que de 0^m,36, tandis que le diamètre était de 0^m,40 au-dessous du siège de la soupape. Afin de tenir compte des plus petites circonstances, on peut ajouter que le diamètre 0^m,36 ne commençait même qu'à 0^m,03 au-dessus du siège de la soupape. L'eau redescendait à 2^m,70 au-dessous de son premier point de départ supérieur, avant de

remonter ainsi, ce qui fait $1^{\text{m}},26$ de baisse au-dessous du niveau du bassin inférieur, dans le tuyau de $0^{\text{m}},4$ de diamètre.

Il eût été à désirer que l'on pût mesurer exactement la profondeur à laquelle la surface de l'eau descendait quand le flotteur était en jeu dans le tuyau vertical, et qu'en un mot la machine fonctionnait comme à l'ordinaire. Mais le mouvement du flotteur, qui n'était pas guidé dans cet appareil d'essai, empêchait d'enfoncer une perche pour prendre cette mesure, comme on l'avait fait, à environ 1 centimètre près, quand on avait enlevé le flotteur pour étudier le libre balancement de la colonne liquide. D'ailleurs, la surface de la colonne était *brisée*, parce qu'elle descendait alors dans le coude jusqu'à la profondeur à laquelle on commençait à la perdre de vue. J'ai tâché de reconnaître cette profondeur en remarquant que la surface brisée se trouvait sur le joint du premier et du second tuyau courbe, qui formaient le coude en quart de cercle disposé entre le tuyau horizontal et le tuyau vertical. La longueur développée de l'axe du tuyau abandonné au-dessous du niveau d'aval par la colonne oscillante n'était pas de plus de $1^{\text{m}},80$ environ, et encore il faut tenir compte de ce que le bas du tuyau arrondi, formant plus de la moitié de cette longueur, se trouvait à une profondeur un peu moindre que s'il avait été rectiligne.

Nous connaissons par des expériences directes le déchet de la colonne remontante, partie d'une profondeur de $1^{\text{m}},26$ au-dessous du niveau d'aval. Nous savons, d'après ce qui a été dit sur l'influence du flotteur, que, pendant l'ascension de la colonne, le travail en frottement doit différer peu de ce que nous avons trouvé en supprimant le flotteur. Il suffit de se rappeler que, si le flotteur était maintenu en repos, la colonne partant d'une profondeur calculée d'après la présence de cette pièce, une quantité déterminée du tuyau devrait être remplie au-dessus du niveau d'aval par la colonne liquide.

Pour se former une idée approchée du déchet provenant de l'oscillation descendante suivie par le flotteur, il suffirait, d'après ce qui a été dit, d'observer directement le déchet à une époque où le niveau d'aval serait assez bas pour que l'oscillation eût une amplitude analogue au double de la demi-oscillation observée au-dessous du niveau d'aval, à l'époque où la machine était en train. C'était ce que j'avais fait à une époque antérieure; mais le tuyau n'était pas dans les mêmes

conditions que lorsque je mesurai l'effet utile de la machine, ainsi que je l'expliquerai plus loin. D'ailleurs, comme j'ai seulement pour but d'indiquer une vérification sur l'état définitif de la machine, je me contenterai de rappeler qu'en général, lorsque les amplitudes des oscillations ne sont ni trop différentes entre elles, ni trop grandes par rapport au diamètre du tuyau, le rapport du déchet en hauteur de la colonne remontante dans un tuyau vertical d'égal diamètre partout suffisamment prolongé, à la profondeur du point de départ au-dessous du niveau d'aval, est à peu près en raison inverse de cette profondeur, toutes choses égales d'ailleurs, d'après les expériences que j'ai rapportées dans mes précédents Mémoires. Ici l'ascension aurait eu assez de puissance pour rejeter une certaine masse d'eau dans le bief supérieur, si le flotteur avait été supprimé, puisque la rentrée de cette eau aurait tenu lieu du travail résistant du poids du flotteur pendant qu'on le relevait. Ainsi, dans un tuyau vertical suffisamment prolongé, la colonne serait, malgré le déchet, montée à une certaine hauteur au-dessus du niveau du bief d'amont. Cependant il est facile de voir que la portion du tuyau que n'aurait pas, à cause du déchet, remplie la colonne remontante à son sommet, ne serait pas, en définitive, ici à une hauteur beaucoup plus grande que le niveau du bief d'amont, dans le cas où le tuyau vertical serait de même diamètre partout, au lieu d'être rétréci sur une longueur de 0^m,47 par la soupape annulaire. Or cela est très-commode pour se former une idée du déchet total provenant des deux oscillations, ou du simple mouvement de la colonne liquide, à cause des compensations qui résultent d'ailleurs de ce qu'une partie du tuyau vertical, par hypothèse, était inclinée à l'origine du coude.

Je ne m'étendrai pas cependant ici sur la vérification du travail résistant provenant de ce balancement, en ne faisant reposer mes calculs que sur la mesure directe de la profondeur à laquelle le niveau *brisé* de la colonne oscillante était descendu, parce que cette mesure directe laisse, comme je l'ai dit, un peu d'incertitude. Mais j'ai pensé qu'il ne serait pas sans quelque intérêt d'indiquer les considérations précédentes qui permettent d'étudier la question sous divers points de vue. En définitive, on peut, si ce genre de vérification paraît utile, appliquer ici de diverses manières les formules sur les oscillations des

liquides que j'ai établies dans le tome III de ce Journal, en déterminant les coefficients au moyen des observations directes faites sur le tuyau de la machine, à l'époque où j'ai mesuré l'effet utile d'une manière plus complète. On trouvera que les résistances passives dues au simple balancement de la colonne doivent avoir absorbé $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ environ du travail de la chute, selon que l'on considérera les diverses limites de cette chute sous lesquelles la machine a fonctionné. Je reviendrai d'ailleurs sur ce sujet dans le chapitre suivant, en rapportant des expériences plus spéciales, dans le simple but de faire encore mieux concevoir l'état de la question, et en prévenant toujours qu'il ne faut attacher à ces divers systèmes de vérification qu'une importance secondaire. Peut-être n'en aurais-je dit que quelques mots si la machine avait été mieux construite; mais l'imperfection même de l'exécution m'oblige de l'étudier sous divers points de vue.

Il y a plusieurs autres causes de perte de travail, abstraction faite du mode d'application du moteur :

1°. A la fin de l'ascension de la colonne remontante, il s'exerce de bas en haut une percussion, insignifiante il est vrai, sur le rebord intérieur du *tuyau-soupape*. Dès l'instant où cette soupape commence à se soulever, l'eau du bief supérieur entre sur la colonne remontante, et l'aide à se remettre de niveau avec le bief supérieur. Cette quantité d'eau était d'ailleurs très-petite, ainsi que la hauteur moyenne dont son centre de gravité descendait au-dessus du seuil de la soupape. Il est facile de s'en rendre compte, surtout si l'on a égard à ce que, le flotteur cylindrique occupant à cette époque le centre de la soupape annulaire dont la section intérieure est déjà moindre que celle du tuyau, le volume annulaire de liquide dont il s'agit ne donne lieu qu'à un déchet sans importance, en contribuant à rétablir le niveau, comme on vient de le dire.

2°. La soupape étant convenablement équilibrée, le travail nécessaire pour la faire fonctionner est de peu d'importance; comme elle se baisse très-vite, la perte de force vive de la tranche annulaire qu'elle coupe est très-petite. Quant à la colonne en mouvement dans le tuyau en L, ses sections *transversales ne peuvent jamais être bouchées*. Il n'y a d'intercepté que le mouvement de l'eau affluente dans l'intérieur du réservoir supérieur en zinc, ce qui ne

donne évidemment lieu qu'à une quantité de perte de force vive très-petite par rapport à l'ensemble du système en mouvement. Cette eau, dont la direction est changée par la soupape annulaire, a d'ailleurs toute la liberté possible pour produire des ondes dans le bassin supérieur, sans donner lieu à aucune chance de *coup de bélier*.

3°. La *contraction* de la veine liquide, à son entrée du bief supérieur dans le tuyau, ne pouvait être que partielle; en effet, la soupape étant suffisamment levée, il n'y avait aucune cause de contraction sur le pourtour central formé par le flotteur cylindrique suspendu au haut de sa course. Il n'y en avait, à proprement parler, que sur le pourtour extérieur du siège de la soupape; et encore elle était diminuée par un entonnoir en zinc qui n'avait, d'ailleurs, qu'une forme provisoire, son côté ayant une inclinaison sur l'horizontale d'environ la moitié d'un angle droit, et sa hauteur étant de 0^m,18 à 0^m,20. Au reste, je ne me suis pas aperçu que cet entonnoir eût une influence bien sensible sur le résultat définitif; car, dans des expériences sur une machine d'une exécution si imparfaite, je ne sais trop si l'on doit tenir bien sérieusement compte d'une période de plus ou de moins, quand on en compte une soixantaine à partir du moment où elles sont bien régulières. Je dois dire aussi qu'au delà de certaines limites, la grandeur de l'ouverture de la soupape était sans importance: ainsi, je ne me suis pas aperçu qu'une levée de 0^m,11 donnât un effet utile sensiblement moindre qu'une levée de 0^m,22, ou que les levées intermédiaires, la largeur de l'orifice annulaire étant de 0^m,06. Enfin, quand le flotteur n'était pas dans le centre du tuyau, et en touchait presque la circonférence, il n'en résultait pas de différence sensible.

4°. Pendant toute la durée de l'introduction du liquide par la soupape, il y a un petit surcroît de frottement dans le tuyau annulaire d'une très-petite longueur, formé par les deux tiers environ des parois verticales du flotteur, suspendu à cette époque d'une manière fixe, et par les parois du tuyau de la machine. Ce surcroît est encore insignifiant. A la sortie de ce tuyau annulaire, la veine se dilate dans le tuyau vertical de 0^m,40 de diamètre. Les lois de la perte de force vive, dans ce genre de dilatation, ou *évasement*, ne sont pas généralement connues. On ne sait pas bien suivant quelles courbes se dirigent les filets, dans les circonstances surtout

où il y a lieu de penser, à cause du cône inférieur, que la dilatation n'est pas brusque. J'ai eu occasion, en 1837, de faire à l'École des Mines des expériences sur ce sujet, et j'ai trouvé que, dans les circonstances où j'ai opéré, et dont je rendrai compte ultérieurement, la perte était assez bien exprimée au moyen des principes de Borda, c'est-à-dire au moyen du carré de la différence des vitesses, au lieu de la différence des carrés, comme le supposait d'Aubuisson. Il résulte de cette observation, d'accord avec les théories aujourd'hui généralement admises, que la perte de force vive provenant de la dilatation dont il s'agit est très-petite. Pour s'en former une idée, à l'époque où elle est à son maximum, il faut se rappeler que la limite de la *hauteur due* à la vitesse d'introduction étant la hauteur définitive du niveau du bief supérieur au-dessus du seuil de la soupape, on doit encore tenir compte de la diminution provenant de la *contraction* quelconque dont nous avons parlé, et dont on peut remarquer que les effets viennent même en déduction de cette cause de perte de force vive.

5°. J'ai déjà parlé des pertes de force vive occasionnées, pendant quelques instants, par la rencontre du flotteur dans sa descente, et de la colonne liquide dans son ascension, en faisant remarquer qu'il y avait des causes de compensation assez intéressantes, par suite desquelles je n'en ai pas tenu compte dans cette approximation. Pour bien étudier la nature des effets qui se présentent à cette époque, il faut voir que la colonne est d'abord obligée de prendre un surcroît de vitesse de bas en haut dans l'espace annulaire compris autour du flotteur, qui, dans les premiers instants de la rencontre, a une même vitesse en sens contraire. Or les parois cylindriques de ce flotteur forment un véritable tuyau annulaire dont la longueur frottante est variable jusqu'à ce que cet espace soit rempli d'eau; et pendant que cet espace se remplit, il y a une *contraction* de la veine liquide de bas en haut, diminuée, il est vrai, par la présence du cône disposé à l'extrémité du flotteur. Enfin, quand le flotteur est assez plongé, il tend à prendre une vitesse accélérée de bas en haut, et sa vitesse le fait, à une certaine époque, monter à peu près, en général, comme s'il faisait partie du liquide. Cependant sa vitesse définitive le fait nécessairement émerger à la fin de sa course. Dans plusieurs expériences, je l'ai même vu

atteindre la fin de cette course, et sortir de l'eau en vertu de sa vitesse acquise, bien avant que la colonne liquide eût achevé son ascension. Cette circonstance, dépendante de la manière dont le flotteur est lesté par lui-même ou par son contre-poids, ne paraissait pas avoir d'influence notable sur le résultat définitif. On peut remarquer que son frottement, à cette époque, et l'effet de *poupe* qui en résultait, donnaient lieu à une perte quelconque de travail. Mais tout cela est sans beaucoup d'importance, ces effets ne paraissant influencer sérieusement que pendant des fractions assez petites de la durée totale. J'ai déjà fait remarquer que l'ascension du flotteur au-dessus de la limite de la colonne liquide n'était point, en général, une cause de déchet *absolu*, dans toutes les circonstances où il ne pouvait pas retomber avant d'être suffisamment découvert par le mouvement de haut en bas de cette colonne. C'est ce qui aura lieu, en général, dans l'application du moteur aux *outils* quelconques à mouvement alternatif, mais qu'il ne faudra pas *accrocher alternativement*. Je ne m'occupe pas encore, dans cette Note, du cas où l'on veut obtenir un mouvement circulaire, et dont je n'ai dit que quelques mots.

En définitive, si l'on réunit toutes les causes secondaires de perte de force vive ou de travail, distinctes de celle qui est occasionnée par le simple balancement ou le mouvement général de la grande colonne liquide, on ne trouve que quelques centièmes du travail de la chute d'eau. Cela confirme les résultats obtenus au moyen des mesures diverses dont j'ai rendu compte dans le paragraphe précédent, autant du moins qu'on peut le faire pour une expérience satisfaisante, il est vrai, mais provisoire.

Il faudrait maintenant pouvoir démêler les diverses espèces de causes de déchet qui se présentent dans le mouvement général de la colonne liquide, puisque c'est là que se trouve la plus grande partie du travail en résistances passives. Je vais donner une idée des tentatives que j'ai faites à ce sujet, dans le but d'en conclure les modifications qui doivent augmenter l'effet utile.

Etude plus spéciale des résistances passives relativement à la détermination du diamètre du tuyau.

Le tuyau horizontal était couché dans l'angle du bassin de Chaillot, parallèlement à l'arête de cet angle, de sorte que l'eau qui sortait par son extrémité d'aval ne pouvait pas s'étendre librement de deux côtés. Ce tuyau était porté sur des tasseaux d'une petite hauteur, et il était d'ailleurs très-près du mur vertical, auquel il était parallèle. En un mot, un ajutage divergent de $4^m,4$ de côté, qui s'enfonçait, par son extrémité la plus étroite, dans le tuyau de $0^m,40$ de diamètre intérieur à peu près le même, et dont l'autre extrémité avait un diamètre double, ou de $0^m,8$, s'appuyait, par cette dernière, contre le fond et la paroi verticale du bassin. Il était un peu déformé par son poids. Il semblait résulter des expériences de Venturi et de M. Eytelwein, que cet ajutage devait augmenter l'effet. Mais quand je l'ai ôté, je n'ai remarqué aucune différence sur les $0^m,22$ de déchet dans la colonne remontante, au sommet de la soupape annulaire, dont il faut se souvenir que le diamètre intérieur n'était que de $0^m,36$, soit que cet ajutage ne produisît pas d'effet bien sensible, soit que la veine liquide, à cause de la proximité des parois, prît tout naturellement une forme assez analogue à celle qui devait résulter de cette pièce. Il y avait, il est vrai, une cause de *contraction* à l'époque du *retour* de la colonne; mais la proximité des parois détruisait une partie de son effet, d'autant plus que le dernier tuyau étant à *emboîtement* et à cordon extérieur, et son embouchure étant convenablement disposée, cela augmentait encore la proximité des parois. D'ailleurs l'augmentation de diamètre intérieur provenant de cette embouchure étant d'environ $\frac{1}{7}$ en sus, et les carrés des vitesses étant en raison inverse des quatrièmes puissances des diamètres, cela modifiait sensiblement le résultat, qu'il devenait difficile de ne pas confondre avec celui du frottement, du coude du tuyau en L, et des imperfections de ce tuyau, telles que les pertes d'eau et les rétrécissements quelconques aux jointures.

Ainsi que je l'ai établi par la géométrie, dans le premier Mémoire que j'ai publié dans ce Journal, tome III, et dont M. Coriolis a retrouvé les résultats par l'analyse, la longueur du tuyau horizontal serait indifférente au déchet, si l'on n'avait à considérer qu'un frottement de

parois proportionnel aux carrés des vitesses de la colonne liquide, parce que la différence de longueur des surfaces frottantes serait compensée par la différence des carrés des vitesses. Mais l'influence des causes *locales*, telles que le coude, etc., augmente avec les vitesses.

En démontant l'appareil, j'ai d'abord fait enlever les 10 derniers mètres du tuyau horizontal; j'ai trouvé que le déchet, dans la hauteur de la colonne remontante, était à peu près le même, et qu'il était plutôt diminué, étant réduit à une hauteur de 0^m,21 au plus. Ce résultat est important pour l'avenir de la machine; car, pour de grands diamètres, de grandes longueurs de tuyaux seraient dispendieuses. J'ai encore trouvé que l'ajutage divergent n'avait aucune influence sensible pour cette longueur de tuyau, les dispositions à la sortie étant les mêmes que précédemment.

Ici il se présente une difficulté provenant de ce que, si la longueur des surfaces frottantes d'un tuyau de diamètre donné est sans influence sensible, en supposant ce frottement principalement proportionnel aux carrés des vitesses, les causes *locales*, telles que les contractions, le coude, les évasements, etc., ont d'autant plus d'influence sur la perte de force vive totale que les vitesses sont plus grandes. Or la durée des oscillations trouvée par expérience était à peu près égale à celle des oscillations d'un pendule ayant la longueur développée du tuyau plongé, dont le plus grand était de 23^m,4 environ. Il en résulte que les vitesses n'étaient pas assez petites pour que l'un des coefficients de la résistance passive des parois, supposée, par Prony, proportionnelle aux simples vitesses, eût ici une influence très-notable par rapport aux autres causes de déchet. De sorte que les différences dans l'influence de ce coefficient, provenant des différences de longueurs du tuyau ne pourraient servir à expliquer seules comment il se fait que le déchet soit plutôt diminué qu'augmenté par la diminution de la longueur du tuyau, si la perte de force vive, à la sortie du tuyau, et, en un mot, à l'extrémité d'aval, était considérable.

Pour continuer ces comparaisons, j'ai fait encore enlever 7^m,50 du tuyau horizontal, c'est-à-dire une fraction beaucoup plus considérable relativement, de ce qui restait de la partie plongée. Malheureusement l'ajutage fut tellement endommagé à cette époque de mes expériences, qu'il ne me fut pas possible de m'en servir sous sa première

forme. Je le fis réparer, mais en réduisant le plus grand diamètre, à environ $0^m,55$, et en conservant la forme de son autre extrémité sur une longueur d'environ $0^m,23$; de sorte qu'il était composé de deux portions de tuyaux coniques formant un ensemble moins régulier. A cause de la petite longueur développée du système plongé, il était difficile d'*amorcer* l'oscillation sans qu'il y eût beaucoup plus d'air enveloppé que dans les expériences précédentes, surtout depuis un accident qui s'était présenté à la fin de ces expériences. Il y a eu une augmentation de déchet dans la puissance de la colonne remontante, sensible du moins par rapport à celui qui s'était présenté quand il y avait $7^m,50$ de tuyaux de plus.

Avant de faire cette expérience, j'avais observé les oscillations dans le tuyau vertical en supprimant tout à fait l'ajutage, mais en disposant latéralement, et parallèlement au mur vertical du bassin, un des tuyaux en fonte de $0^m,40$ de diamètre et de $2^m,50$ de long. N'ayant pu amorcer assez complètement l'oscillation, à cause des mouvements de l'air, je n'avais observé que les ascensions qui se présentaient au-dessous de la soupape annulaire, à $0^m,90$ environ au maximum au-dessus du niveau du bief inférieur. Le déchet était très-sensiblement augmenté, relativement au premier système. Je regrette de ne pouvoir donner des détails plus circonstanciés sur ces expériences secondaires, dont, au reste, je n'indique le résultat général que pour valoir ce que de raison. Le Mémoire que j'ai présenté à l'Académie des Sciences le 8 juillet 1844, et auquel est joint le plan à l'échelle que M. Corot a bien voulu dessiner sur les lieux avant que le modèle fût démonté, n'a pu m'être communiqué pour la rédaction de cette Note. Il n'a même jamais été remis entre les mains de MM. les Commissaires, dont le Rapport n'a été fait que sur les notes qu'ils avaient eux-mêmes prises sur les lieux, les 10 et 14 octobre 1843. Je craindrais donc d'être trompé par mes souvenirs avant d'avoir pu retrouver plus de détails, n'ayant ici, d'ailleurs, pour but qu'un résumé succinct.

L'expérience précédente n'est pas tout à fait concluante, à cause des défauts ou des omissions dont je viens de parler. L'augmentation quelconque d'effet dû à l'ajutage peut, au reste, provenir en partie de ce que la longueur de cet ajutage n'étant pas très-petite par rapport à ce qui restait du tuyau plongé, il en résultait qu'une partie de l'ensemble

avait un diamètre plus grand que le reste. Son influence sur la longueur totale est, d'ailleurs, indiquée par la différence des durées des oscillations. Ainsi, avec l'ajutage il y avait onze ascensions en 62 secondes, et sans l'ajutage, vingt-cinq en 2 minutes; et encore la différence aurait été sans doute plus considérable si le tuyau de fonte, disposé latéralement pour augmenter momentanément la solidité de l'appareil, à cette époque de mes expériences, n'avait pas formé, avec le fond et la paroi verticale du bassin, une sorte de canal rectangulaire qui devait augmenter d'une quantité quelconque la masse en oscillation lorsqu'on supprimait l'ajutage. Quant à la *contraction* proprement dite de la veine, dans le mouvement de retour, son influence était diminuée par la forme de l'embouchure, par la proximité du fond et du mur vertical du bassin, et même par la présence du tuyau de fonte latéral, dont j'ai parlé pour le cas où l'on supprimait l'ajutage.

J'ai comparé les expériences sur le déchet pour toute la longueur du tuyau horizontal, à celles que j'avais faites, l'année précédente, sur le même tuyau, avant d'avoir étudié la machine aussi complètement que je le désirais. Je me suis aperçu qu'il y avait des différences difficiles à expliquer sans quelque détérioration de ce tuyau, provenant principalement sans doute de ce que, pour cet appareil provisoire, les joints n'avaient pas été faits avec assez de soin, comme on s'en est d'ailleurs aperçu pour plusieurs en les démontant. J'ai craint que ces différences ne vinssent en partie de ce qu'à cette époque, je n'avais peut-être pas encore bien saisi le mouvement nécessaire pour mettre la colonne en oscillation, sans y introduire trop de bulles d'air. J'ai donc considéré le résultat d'un certain nombre de périodes successives, résultat qui s'est trouvé assez sensiblement constant pour rassurer, au moyen d'ailleurs de causes évidentes de compensation, sur les chances d'irrégularité provenant de ces *bulles*. Ainsi, en 1843, il fallait que la colonne remontât trois fois, après être descendue du sommet bien rempli du tuyau, pour que la surface de la colonne remontante laissât entièrement vide le *tuyau-soupape*, alors fixe, de 0^m,47 de long et de 0^m,36 de diamètre intérieur, sans parvenir sensiblement au-dessous ni remonter sensiblement au-dessus de l'origine de ce tuyau-soupape, à la troisième ascension. En 1842, il fallait près de quatre périodes pour obtenir le même résultat. En 1843, la baisse, au bout de deux

périodes, était de $0^m,33$, et, en 1842, de $0^m,27$ à $0^m,30$, ou de $0^m,40$ au plus pour trois périodes. Enfin, pour une baisse ultérieure de $0^m,30$, il fallait encore trois périodes, en 1843, tandis que, en 1842, trois périodes ultérieures ne donnaient lieu qu'à une baisse ultérieure d'environ $0^m,16$; et, pour retrouver la baisse de $0^m,30$, il en fallait environ six. A partir à peu près de l'arête inférieure du tuyau de $0^m,36$ de diamètre, sept périodes augmentaient le déchet d'environ $0^m,53$ en 1843, tandis qu'il en fallait à peu près le double en 1842.

Les imperfections quelconques du tuyau, mises en évidence par la comparaison de ces deux séries d'observations, empêchent d'attacher beaucoup d'importance, quant aux limites, au détail des périodes intermédiaires et même aux chiffres définitifs. S'il est permis d'affirmer que la somme des coefficients des résistances passives est moindre, dans certaines circonstances, pour le mouvement oscillatoire que pour le mouvement uniforme, il faut attendre que l'on connaisse un plus grand nombre de faits pour en tirer des conséquences générales sur la valeur rigoureuse de ces coefficients. On ne saurait être trop circonspect dans l'étude des faits qui se rattachent aux phénomènes encore si peu connus des mouvements moléculaires. Aussi, je me contente de considérer, dans la plupart de mes recherches, comme offrant d'ailleurs un minimum, les chiffres adoptés par Prony pour ces coefficients dans le mouvement uniforme, quoique j'aie déjà réuni des expériences assez concluantes.

Quant à ce qui concerne plus spécialement l'étude de cette machine, je ferai remarquer qu'en 1842, les tuyaux qui même n'étaient probablement pas à beaucoup près en bon état, les joints ayant été faits, pour ces essais, d'une manière tout à fait provisoire, ont donné, au moins pour les premières périodes, celles qui ont été étudiées avec le plus de soin, un déchet moindre d'environ $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ que celles qui ont été observées à l'époque où la machine a fonctionné en présence de la Commission de l'Institut. Donc, plus, dans les calculs du chapitre précédent, on estimera haut le déchet provenant du simple balancement de la colonne liquide, plus nous saurons qu'il faudrait augmenter l'effet utile dans les calculs sur une bonne construction. Il y a, comme on voit, des compensations dans les estimations si elles laissent quelque doute.

En 1842, je profitai de ce que le niveau du bassin d'aval était descendu, par suite des besoins du service, pour observer des oscillations d'une course beaucoup plus grande. Je n'en donnerai pas ici le détail, ayant eu alors principalement pour but d'établir qu'on pouvait très-facilement mettre la colonne liquide en oscillation pour des amplitudes bien plus considérables. Mais, parmi ces expériences, il y en a une assez intéressante pour l'étude de la machine, en ce que le niveau était baissé, dans le bief d'aval, à une profondeur d'environ 0^m,60, de sorte que l'on se trouvait dans des circonstances qui n'étaient pas trop différentes de ce qui se présentait quant à l'amplitude de la plus grande des deux oscillations, lorsque la machine était en jeu avec le flotteur. On ne doit pas oublier, d'ailleurs, qu'il ne s'agit ici que de comparaisons de résultats analogues. car la descente du niveau de la colonne dans le coude, brisant la surface de ce niveau, change les conditions du phénomène, ainsi que quelques autres circonstances dont j'ai parlé. Il faut surtout tenir compte de ce qu'en *amorçant* l'oscillation par une introduction alternative de liquide, on introduisait de l'air dans le coude pour ces grandes amplitudes. Aussi le déchet paraît relativement plus grand qu'il ne devrait l'être d'après des observations précédentes. Tout cela était, au reste, difficile à prévoir, à cause de ce qu'il y a de nouveau et de vraiment singulier dans les phénomènes des résistances passives pour les mouvements variés des liquides.

Il fallait deux ascensions, à partir du moment où le tuyau était plein jusqu'au sommet, pour que la colonne remontante parvînt précisément à l'entrée du bout du tuyau supérieur de 0^m,36 de diamètre et de 0^m,47 de haut, la première étant remontée à environ 0^m,27 du sommet d'abord rempli, d'où elle était descendue. Il fallait ensuite quatre ascensions pour que l'augmentation du déchet, considérée alors dans le tuyau plus large de 0^m,40 de diamètre, fût de 0^m,54 environ. Voici, maintenant, comment on peut partir de ces données pour estimer la partie du déchet de la machine qui serait due aux simples mouvements de la colonne liquide, si les choses avaient été dans le même état qu'en 1842, en partant de ce qu'alors le déchet de la première ascension, quand le bassin d'aval était plein, était seulement à peu près de 0^m,14 à 0^m,16 tout au plus.

La période comprenant deux oscillations, l'une descendante, l'autre

remontante, la moitié environ du déchet précédent doit être considérée pour chacune; c'est-à-dire que nous aurons, pour une oscillation analogue à celle qui relève le flotteur, un déchet qui, pour être compensé, exigerait qu'on tirât du bief supérieur un cylindre d'eau d'environ $0^m,08$ de haut et de $0^m,36$ de diamètre. Quant à l'oscillation d'une puissance analogue à l'oscillation descendante de la machine, son déchet exigerait, pour être comblé, un cylindre d'eau de même diamètre, $0^m,36$ et de $0^m,135$ de haut, mais tiré d'une hauteur notablement plus considérable que celle de la chute motrice, à peu près dans le rapport de 190 à 126. De sorte que, pour rapporter tout à la même unité, ce sera comme si l'on tirait du bief supérieur un cylindre liquide d'environ $0^m,20$ de haut au lieu de $0^m,135$, ce qui fera en tout $0^m,28$ pour l'ensemble des deux oscillations. En définitive, sans attacher à ce genre de vérification plus d'importance qu'il n'en mérite, puisque les circonstances et les amplitudes ne sont pas tout à fait les mêmes, on voit comment il faut s'y prendre pour s'en servir, et c'était tout ce que je voulais indiquer sur cette matière pour compléter ce que j'ai dit dans le chapitre précédent. On trouve en nombres ronds, comme je l'ai avancé, que la partie du déchet provenant du simple mouvement de la colonne ne doit pas, dans diverses hypothèses, dépasser $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{6}$ du travail de la chute, et que la partie provenant du frottement, quoiqu'on ne puisse en assigner rigoureusement la valeur, est assez grande, par rapport au reste, pour qu'on soit sûr d'augmenter l'effet utile en élargissant convenablement le flotteur et la machine. C'est, pour le moment, la seule conséquence que je me permets de tirer de ces expériences, ou plutôt de ces observations d'ingénieur, faites simplement dans le but d'étudier un modèle d'une construction si imparfaite. Plusieurs personnes remarquèrent, dans les expériences publiques, une des pertes d'eau qui se faisait par le tuyau vertical à son joint avec le coude.

Résumé des recherches théoriques sur le débit d'eau motrice correspondant à l'effet utile maximum.

Les dimensions du tonneau de jauge ne me permettant de débiter qu'une petite quantité d'eau, j'avais disposé l'appareil de manière

qu'il pût marcher pendant un temps convenable. Aussi, dans ces expériences, il ne débitait pas assez d'eau pour le maximum d'effet utile à beaucoup près.

Les phénomènes de l'introduction du liquide dans l'appareil n'avaient pas beaucoup d'importance, à cause du peu de hauteur du niveau d'amont au-dessus du seuil de la soupape. Mais, comme il ne serait plus permis de négliger leur influence pour des dépenses d'eau considérables, surtout si l'on introduisait le liquide en plein tuyau sous le flotteur, je préviens que les calculs suivants sont tout à fait provisoires, jusqu'à ce que ce genre de phénomènes soit mieux connu : j'en dis quelques mots seulement pour donner une idée plus exacte de la machine.

Si l'on fait, pour un moment, abstraction de ces phénomènes particuliers, on est conduit à une formule très-simple pour la dépense d'eau correspondante à *l'effet utile* maximum.

Je suppose que le flotteur soit cylindrique et d'un diamètre à peu près égal à celui du tuyau, en ne m'occupant pas du renflement intérieur de la soupape annulaire et de la résistance de l'air qui passe au-dessous du flotteur. J'admets que le sommet du flotteur ne monte pas bien sensiblement au-dessus du niveau du bief supérieur, et que la résistance industrielle à vaincre est disposée de manière qu'il atteigne, dans sa descente, la colonne liquide sans percussion. On voit d'abord immédiatement s'il a une densité assez peu différente de celle de l'eau, que, dans l'ascension de la colonne, les choses se passeront à peu près de la même manière que si l'espace occupé par le flotteur l'était par un égal volume d'eau, abstraction faite de sa longueur. C'est-à-dire que, connaissant par expérience la profondeur d'où le niveau de la colonne remontante doit partir pour atteindre celui du bief supérieur, les choses se passeront à peu près comme s'il n'y avait pas de flotteur et que l'eau partit de cette profondeur déterminée; en un mot, comme si le flotteur était liquéfié.

Pour l'oscillation descendante, la limite de la profondeur obtenue sera sensiblement celle dont je viens de parler, plus la longueur du flotteur.

J'ai démontré, dans un Mémoire inséré dans le tome III de ce Journal, que, s'il n'y avait pas de causes de pertes de forces vives,

pour une colonne oscillante dans un tuyau vertical, la force vive varierait comme les sections circulaires d'un ellipsoïde de révolution, et que le travail que l'on aurait à surmonter pour vaincre les résistances passives serait, en général, à peu près comme le cube de l'amplitude pour les vitesses qui ne seraient pas trop petites. Mais le cas n'est pas tout à fait le même ici dans la première moitié de l'oscillation descendante. Je suppose, par exemple, que le flotteur ait une longueur égale à la hauteur de la chute motrice, et qu'étant remonté, il occupe tout l'espace cylindrique compris entre les niveaux d'amont et d'aval. Faisons, pour un moment, abstraction des résistances passives, et considérons de quelle manière la vitesse s'engendre. On voit d'abord que l'eau descendant du niveau d'amont au niveau d'aval par un orifice convenablement disposé, descend de la hauteur du centre de gravité d'une colonne qui serait de même diamètre que le tuyau vertical suffisamment prolongé, et dont la hauteur serait double de celle de la chute. Or cette colonne, en descendant au niveau d'aval, aurait engendré précisément la même vitesse qu'une égale quantité d'eau sortie du bief d'amont dans l'hypothèse du flotteur. Dans l'hypothèse du tuyau prolongé et de la suppression du flotteur, la force vive croîtrait comme les sections circulaires d'un demi-ellipsoïde de révolution, tandis que, dans l'autre, elle croît comme les ordonnées d'un triangle de même hauteur, puisqu'à chaque instant elle est proportionnelle à la quantité d'eau dépensée. Mais, en définitive, les deux quantités de force vive acquise sont égales; le travail nécessaire pour vaincre les résistances passives, à peu près proportionnelles aux forces vives dans un même tuyau, est donc dans l'hypothèse du flotteur comme $\frac{1}{2}$, tandis que, dans l'hypothèse de sa suppression, elle est comme $\frac{2}{3}$, précisément comme pour la demi-oscillation qui se présente dans les deux hypothèses au-dessous du niveau d'aval.

Si maintenant le flotteur n'est pas aussi long qu'à la limite que je viens de supposer, mais que son sommet affleure encore le niveau du bief supérieur, on voit immédiatement que, moins il est long, plus on se rapproche de la limite pour laquelle le travail en résistances passives ne serait pas moindre dans la première demi-oscillation que dans la seconde. Il en résulte que si, pour la seconde demi-oscillation descendante, le travail en résistances passives est comme le cube de la

somme de la longueur du flotteur cylindrique et de la profondeur atteinte par son sommet au-dessous du niveau d'aval, pour ce que l'on peut appeler la première demi-oscillation descendante, le travail en résistances passives n'augmente pas aussi rapidement avec la longueur du flotteur. En définitive, si l'on nomme x cette longueur et h la limite de la profondeur obtenue par son sommet au-dessous du niveau du bief d'aval, le travail en résistances passives n'augmentera pas en somme avec x aussi rapidement que la quantité

$$(h + x)^3.$$

Elle croîtra, par suite même des résistances passives, encore moins rapidement, à certains égards, parce que, plus l'amplitude augmente, plus les résistances passives augmentent relativement, le travail moteur étant comme le carré de l'amplitude, tandis que le travail en résistances passives tend à croître comme le cube; ce qui, diminuant relativement de plus en plus les vitesses *frottantes*, influe sur le travail en résistances passives qui en résulte.

Les considérations précédentes ont seulement pour but de faire voir que si l'on calcule le débit correspondant au maximum d'effet, en supposant le travail en résistances passives proportionnel aux cubes des demi-oscillations, il y a lieu de penser qu'on sera plutôt au-dessous qu'au-dessus de la vérité, puisqu'il ne paraît pas que ce travail en résistances passives augmente aussi rapidement, à moins qu'on n'ait égard à des phénomènes particuliers au mouvement varié, mais encore trop peu connus pour qu'on en puisse faire la base d'un calcul.

Soit H la course du flotteur. Son travail sera représenté par xH . S'il n'y avait aucune cause de perte de force vive, le travail dépensé par la chute d'eau serait égal au travail du flotteur. Mais, pour tenir compte des résistances passives, soit K un coefficient constant relatif à ces résistances : il faudra ajouter au travail de l'eau motrice, d'après l'hypothèse précédente, les deux termes Kh^3 et $K(h + x)^3$, de sorte que *l'effet utile* sera

$$\frac{xH}{xH + Kh^3 + K(h + x)^3}.$$

ou, en prenant h pour unité dans une machine donnée,

$$\frac{xH}{xH + K + K(1+x)^3}.$$

En différentiant et égalant la différentielle à zéro, on trouve

$$2x^3 + 3x^2 = 2.$$

Cette équation a une racine positive comprise entre $\frac{2}{3}$ et $\frac{7}{10}$. Il en résulte que, pour le maximum d'effet, ou plutôt, d'après ce qui précède, pour une limite inférieure du débit correspondant au maximum, il aurait fallu débiter beaucoup plus d'eau que ne le faisait le modèle du diamètre dont il s'agit pour la chute donnée. On aurait donc pu en débiter encore beaucoup plus en retrouvant *l'effet utile* donné par l'expérience, *l'effet utile* désignant, comme on sait, le rapport du travail recueilli au travail dépensé.

Je pourrais développer les considérations précédentes en tenant d'ailleurs compte, autant que cela est possible dans l'état actuel de nos connaissances, des phénomènes de l'introduction de l'eau, qui ne sont relatifs qu'à ce que j'appelle la première moitié de l'oscillation descendante. Mais il ne paraît pas que ces phénomènes modifient autant le résultat définitif qu'on serait porté à le croire pour des dépenses d'eau assez considérables, quand on pourra disposer convenablement l'orifice d'introduction. J'ai cru qu'il suffisait d'indiquer la marche des calculs, le résultat que je viens de donner n'étant d'ailleurs appuyé que sur des phénomènes qui ne sont pas eux-mêmes connus d'une manière assez complète, et n'ayant ici d'autre but que celui de rassurer sur la puissance de la machine, relativement à son volume.

Quant à la longueur du tuyau, il est bon d'indiquer comment on pourra y avoir égard; mais il y aurait encore un phénomène à étudier pour le cas où ce tuyau serait assez court. Je veux parler de la résistance du flotteur plongeant dans la colonne remontante, résistance qui ne peut être évitée que par des conditions particulières dont je donnerai le détail dans l'ouvrage que je prépare. Abstraction faite de ce phénomène particulier, je suppose les résistances industrielles disposées de manière que le flotteur, s'il est d'un diamètre analogue à celui du tuyau, rencontre cette colonne sans percussion, à l'époque

où elle se réduit elle-même au repos. Alors, en ne tenant pas compte des résistances accessoires, telles que celle de l'air passant au-dessous du flotteur jusqu'au moment de cette rencontre, il serait facile de voir d'après quels principes on déterminerait la longueur de tuyau nécessaire pour obtenir l'effet utile maximum, en admettant le résultat du calcul précédent ou celui d'un calcul plus complet qui aurait égard aux phénomènes négligés. Il suffirait de connaître, par expérience, le maximum de hauteur du niveau d'amont au-dessus du seuil de la soupape et le maximum d'ouverture pour lesquels la machine peut fonctionner, sans que les phénomènes de *contraction* et ceux des croisements de filets, etc., absorbent assez de travail pour changer trop complètement les conditions du calcul. Cette condition étant remplie, il faudra que le tuyau ait la longueur nécessaire pour que l'eau qu'il peut contenir, ayant acquis son maximum de vitesse, ait, au moment où la soupape se ferme, la quantité de force vive suffisante pour produire la quantité de travail indiquée, relativement à chaque période, au moyen de ce calcul du maximum d'effet. S'il est plus court, les conditions du maximum d'*effet utile* ne seront pas remplies; s'il est plus long, elles pourront l'être dans des limites très-étendues, mais la machine débitera moins d'eau dans un temps donné. Il y aura d'ailleurs une limite de longueur au delà de laquelle on ne pourra plus admettre que l'augmentation de longueur des surfaces frottantes sera compensée par la diminution de la fonction de la vitesse moyenne à laquelle le frottement est censé proportionnel. Dans les très-petites vitesses, le terme proportionnel aux simples vitesses finira par faire plus qu'une compensation à l'avantage provenant de ce que les résistances *locales*, telles que celle du coude, etc., diminuent avec les vitesses pour une amplitude d'oscillation d'une grandeur déterminée. Aussi, on a vu, par les expériences précédentes, que déjà mon tuyau horizontal était un peu trop long sous ce rapport. Mais, dans un premier essai, je l'avais pris trop long, afin de me débarrasser de la considération des phénomènes dont j'ai parlé, et qui auraient compliqué le problème au lieu de n'avoir qu'une importance secondaire pour ces dimensions.

Le dispositif que j'avais adopté est d'ailleurs loin d'être le seul qui puisse être employé avec avantage.

Principes des variétés du nouveau système.

1. Au lieu d'augmenter la profondeur des fondations, pour donner au flotteur la place nécessaire à sa course, dans l'hypothèse d'une quantité donnée de travail à chaque période, on peut augmenter la section du flotteur et celle du tuyau vertical selon certaines lois. Mais il est facile de voir que cette disposition sera désavantageuse à certains égards, parce que, en général, le chemin parcouru par les résistances passives est d'autant plus grand, que la pression motrice ou résistante provenant de la différence des niveaux est moindre. Il se présente d'ailleurs quelques difficultés de plus dans l'ascension. Nous avons vu que le frottement était à peu près le même, en général, que si le flotteur était tenu en repos au bas de sa course. Si le flotteur est beaucoup plus gros, il y a, dans l'hypothèse que je viens de rappeler, une plus grosse colonne liquide à élever au-dessus du niveau du bief d'aval, et, par suite, une plus grande quantité de travail en frottement, à laquelle il faut ajouter diverses causes secondaires de perte de travail, et notamment les mouvements quelconques occasionnés par la forme, les dimensions du flotteur et du tuyau. D'un autre côté, il y a une cause de diminution de perte de travail, parce que le tuyau étant plus gros à la hauteur de l'ouverture de la vanne cylindrique, il n'est pas nécessaire que le seuil de celle-ci soit aussi bas au-dessous du niveau du bief supérieur pour le débit voulu de la machine. Cette disposition paraît être au nombre de celles qui offrent des chances raisonnables de succès.

2. On pourrait encore diminuer la profondeur des fondations en ajoutant une soupape à l'extrémité d'aval de ce tuyau, cette extrémité étant relevée verticalement, afin que la force vive acquise pendant que cette dernière soupape sera ouverte soit éteinte en vertu du refoulement de la colonne liquide dans un tuyau élevé au-dessus du niveau du bief d'aval, au lieu de s'éteindre en vertu de la baisse du niveau de l'extrémité d'amont au-dessous de ce bief d'aval. Cette ascension alternative servira, dans le mouvement de retour, à relever le flotteur. Cette soupape sera annulaire comme la première; mais si la partie du tube relevée verticalement est trop longue, elle ne pourra plus être

ce tube vertical lui-même. Ce sera une soupape de *cornwall*, ou une sorte de vanne cylindrique, facile d'ailleurs à faire fonctionner au moyen de celle d'amont, dont les expériences précédentes font connaître le jeu. Elles seront ouvertes et fermées ensemble au moyen d'une chaîne solide ou *liquide*, celle d'aval s'élèvera pendant que celle d'amont descendra. S'il résulte de cette disposition une perte quelconque de force vive provenant de ce qu'il pourra rester encore un peu d'eau dans le tube de la seconde soupape à l'époque où celle-ci s'ouvrira, il est facile de voir que cette perte sera insignifiante.

3. On peut, au reste, proposer une disposition inverse de celle que j'ai décrite dans cette Note. Il n'y aura qu'une seule soupape ; mais au lieu d'être en amont, elle sera en aval, l'autre extrémité du tuyau horizontal, toujours plein d'eau, débouchant dans le bief supérieur. Cette soupape sera au pied d'un tuyau vertical, et disposée, en un mot, comme la seconde soupape dont je viens de parler. Il est probable qu'elle pourra fonctionner au moyen du mouvement de la colonne liquide, et l'on sait d'ailleurs combien il est facile d'avoir égard aux petites difficultés de régulation, au moyen de l'un des moyens connus sous le nom de *cataracte*. L'élévation alternative de la colonne liquide dans le tuyau vertical de la soupape, en vertu de la fermeture alternative de celle-ci, permettra d'utiliser le mouvement d'un flotteur d'une manière analogue à ce que j'ai exécuté. Dans cette disposition, le jeu de la soupape est moins intéressant. Voici, au reste, comment on peut concevoir son jeu, même abstraction faite d'une *cataracte*. Si elle est convenablement équilibrée, la vitesse graduellement croissante de l'eau suffira pour la fermer en la soulevant, parce qu'elle aura un diamètre un peu moindre que celui du tuyau, et que la percussion de l'eau pourra, par conséquent, agir par-dessous contre un anneau disposé à sa partie inférieure. L'eau, en montant dans le tuyau vertical, la maintiendra fermée, et dans son mouvement de retour, la colonne, l'abandonnant à son propre poids, qui ne sera contre-balancé que d'une manière convenable, lui permettra de s'ouvrir d'elle-même. J'ai exécuté une machine fonctionnant par des principes analogues, et dont le modèle est au Cabinet de l'École Polytechnique. Il n'y a aussi qu'une seule soupape, d'une espèce différente, il est vrai, de celle dont je viens de

parler ; mais les phénomènes qui la font marcher étant les mêmes, je renvoie au dessin que j'en avais donné, avant de l'exécuter, dans le tome XIV des *Annales des Mines*.

Je reviens aux dispositions plus analogues à celle que j'ai décrite principalement dans cette Note, et qui paraissent au moins applicables dans beaucoup de circonstances, si l'on donne suite aux projets de distribution d'eau à domicile dans les grandes villes.

4. Pour ces applications particulières, il n'y aurait pas, en général, beaucoup d'importance à diminuer la course du flotteur, puisque les niveaux des réservoirs ou des cuvettes seront, dans un grand nombre de circonstances, bien au-dessus du sol. On aurait donc toutes les facilités nécessaires pour varier ces courses de façon à profiter des propriétés du système. Par exemple, au lieu de diminuer la course du flotteur en augmentant le travail en résistances passives, on peut l'augmenter en diminuant ce travail au moyen d'un rétrécissement convenable de tout le tuyau vertical. Dans les circonstances ordinaires, où le tuyau horizontal doit être assez court, cet avantage n'aurait pas beaucoup d'importance, parce que le frottement provenant du rétrécissement du tuyau vertical, étant en raison inverse des cinquièmes puissances des diamètres, le compenserait presque toujours. Mais, dans les villes où l'on aura ordinairement des tuyaux horizontaux d'une certaine longueur, il n'en sera plus ainsi.

Cette longueur ne sera plus, à la rigueur, un inconvénient de la même espèce, parce que l'eau motrice affluente pouvant suffire, dans certains cas, pour refouler le flotteur de bas en haut, la machine peut être disposée de manière que la colonne liquide du tuyau horizontal revienne peu ou point sur ses pas si le flotteur est assez gros. Il en résulte qu'il ne faudra presque point mettre sur le compte de la machine le frottement de ce tuyau horizontal, puisque, du moins, une partie considérable de ce frottement se serait nécessairement présentée dans la conduite de l'eau par un mouvement uniforme, s'il n'y avait pas eu de machine. Il faudra, il est vrai, tenir compte d'une autre cause de travail résistant, parce que l'air doit pouvoir circuler librement à travers le flotteur pendant sa descente ; ce qui exige, dans ce flotteur, une disposition accessoire facile à exécuter au moyen d'un tube à soupape.

Il faut aussi tenir compte de ce que, dans tous les cas où il y aura une colonne liquide d'une certaine hauteur au-dessus de l'orifice annulaire de la soupape d'introduction, par suite des dispositions qui exigent que le flotteur ne gêne pas cet orifice, cette colonne devra, comme une sorte de *piston aspiré*, prendre la vitesse de la colonne liquide inférieure à la soupape : ce qui rentre dans les principes exposés dans mon dernier Mémoire.

Il est à remarquer que, abstraction faite des circonstances dont je viens de parler, le rétrécissement du tuyau vertical change les bases du calcul du débit correspondant au maximum d'effet utile, et donne encore plus de latitude dans les hypothèses sur les tuyaux d'une ville, pour l'établissement des courses du flotteur. Aussi, il y a lieu de penser que les conduites d'eau pourront réunir, à l'avantage de distribuer une denrée de première nécessité, celui de distribuer, dans beaucoup de cas, des moteurs pour de petits ateliers.

5. Dans ce qui précède, j'ai principalement étudié l'hypothèse où le flotteur est disposé dans une branche qui descend de la source. Il est intéressant de voir comment les choses se passeraient s'il était disposé dans une seconde branche beaucoup plus grosse, relevée verticalement en aval du tuyau, et s'élevant seulement au-dessus du niveau du bief inférieur de la quantité suffisante pour que l'eau de ce bief ne puisse pas y entrer après la sortie de l'eau motrice par cette extrémité. On jouirait ici de propriétés qui pourraient peut-être avoir aussi des avantages dans quelques circonstances particulières. La course du flotteur serait assez petite, étant seulement déterminée par les oscillations du niveau dans la grosse branche. La colonne liquide aurait alternativement un mouvement rétrograde en s'allongeant pour aller à la rencontre de la force motrice et soulever la soupape d'amont, comme je l'ai expliqué pour le système objet des expériences ci-dessus. Mais, en général, cette disposition, qui conduit d'ailleurs à des calculs intéressants, ne sera point avantageuse. On voit qu'elle repose essentiellement sur un mouvement de retour. Le niveau moyen autour duquel se fait l'oscillation étant plus bas, les courses de la colonne sont plus grandes; elles se font sous des pressions combinées de manière à augmenter le travail en résistances passives de quantités très-

notables, qui se déterminent facilement par le calcul infinitésimal. Dans ces recherches, on retrouve aux limites, comme cela devait être, les valeurs obtenues pour les cas étudiés précédemment.

6. Parmi les variétés du système, on doit encore signaler ici le cas où l'on voudrait faire remonter le flotteur beaucoup au-dessus du niveau du bief d'amont. Il faudrait, dans ce but, avoir une oscillation remontante, en un mot faire revenir la colonne liquide sur ses pas. On disposerait le renflement intérieur de la soupape annulaire de façon à ne la faire ouvrir qu'à l'époque où l'ascension serait finie. Dans cette disposition, il monterait une certaine quantité d'eau au-dessus du niveau du bief supérieur. Il pourrait ne pas en monter bien sensiblement, dans le cas où le flotteur ne devrait s'élever qu'à une hauteur médiocre au-dessus du niveau d'amont, puisqu'il s'élèvera d'une quantité quelconque, en vertu du mouvement acquis. Quant au système n° 3, pour lequel le flotteur serait disposé dans un tuyau vertical en aval de la source, et où la soupape serait elle-même au pied de ce tuyau, il n'y aurait pas à l'élévation de l'eau au-dessus du niveau de la source un inconvénient de la même espèce. Le flotteur pourrait être d'un diamètre beaucoup moindre que le tuyau, la colonne liquide retombant alors d'une manière utile au mouvement de retour. Mais on voit, en définitive, que, dans cette disposition de la soupape, il faut un mouvement de retour de la colonne horizontale, à moins qu'on ne perde, à chaque période, la colonne contenue dans le tuyau vertical. Il y aurait encore diverses attentions à avoir. Ainsi, dans le cas où le flotteur aurait un diamètre analogue à celui du tuyau, il faudrait que la soupape de celui-ci fût à une certaine profondeur au-dessous du niveau du bief inférieur, afin que l'orifice ne fût pas bouché par la descente du flotteur; et cette profondeur est principalement ce qu'on veut éviter par cette disposition particulière. Si le diamètre du flotteur était moindre, et que la soupape ne fût pas à une profondeur aussi grande, il en résulterait encore un inconvénient. L'eau motrice ne sortirait en aval que par un orifice annulaire compris entre les parois du flotteur et celles du tuyau.

Je n'avais pour but, dans cette Note, qu'une simple exposition de principes qui seront développés dans mon ouvrage sur le mouvement

varié des liquides. Je n'entrerai pas ici dans les détails, les réservant pour cet ouvrage ou pour des Recueils plus spéciaux.

J'étudierai dans une autre Note les moyens de transformer le mouvement alternatif en mouvement circulaire.

Conclusions.

Mes expériences sur le moteur hydraulique à flotteur et à forces vives, que j'ai présenté en 1839, et dont j'avais déjà parlé en 1838, confirment les principes généraux que j'avais présentés le premier sur l'emploi de la *vitesse acquise des colonnes liquides* sans variation brusque, et sans autre perte de force vive bien sensible que celle qui est indispensable dans un siphon où oscille librement une colonne liquide. Il n'est pas possible d'y produire de coup de bélier quand même on le voudrait, les sections *transversales* n'étant jamais bouchées.

Les formes de ce système peuvent d'ailleurs varier de beaucoup de manières, et l'on peut, comme je le ferai voir en détail dans une autre Note, transformer le mouvement alternatif en mouvement circulaire au moyen d'une partie de ces dispositifs.

Ces divers appareils jouissent d'un avantage essentiel sur les moteurs à pistons, par la raison même qu'il n'y a point de piston, ni, par suite, de garnitures qui se détériorent; et surtout parce qu'il résulte de l'absence du frottement entre corps solides, que l'on n'a point à s'embarasser de ce que, dans les moteurs plus ou moins analogues aux *roues de côté*, il y a, à la longue, du jeu dans les pièces, ce qui change les conditions des pistons ou des palettes. De sorte qu'on n'aura pas à craindre, dans un long usage, les mécomptes auxquels il faut s'attendre quand on se forme à priori une idée de l'effet utile de ces roues, au moyen d'expériences faites dans les premiers instants de la construction ou de la réparation, quoique le chiffre considérable trouvé dans ces premiers instants soit très-utile pour vérifier les théories de l'hydraulique.

On peut disposer l'appareil de manière que la colonne liquide ne revienne point sur ses pas dans le tuyau horizontal; de sorte que, dans le cas, du moins, où l'on emploierait une cataracte pour assurer les mouvements de la soupape, en ajoutant quelques dispositions acces-

soires relatives à la régulation, on pourrait, à la rigueur, débiter autant d'eau qu'au moyen de mon système à *piston aspiré*, objet du dernier Mémoire que j'ai publié dans ce Journal. Le flotteur ayant à la limite un diamètre sensiblement égal à celui du tuyau, et faisant l'effet d'une espèce de piston, peut être refoulé de bas en haut par l'eau motrice affluente sans que la colonne horizontale revienne sur ses pas, d'une manière analogue à ce qui se présente dans un des cas du *piston aspiré*, sauf quelques dispositions accessoires. Mais, en général, il faudra rarement compter sur un débit aussi grand dans les applications aux rivières puissantes, parce que la course du flotteur sera nécessairement beaucoup plus grande que celle du *piston aspiré*, de sorte qu'il faudrait des fondations plus profondes pour faire place à cette course. Le *piston aspiré* sera, en général, plus commode pour les grands diamètres, d'autant plus que le tuyau peut être en entier horizontal, et qu'il peut n'y avoir, par conséquent, aucune espèce de coude.

J'ai d'ailleurs indiqué des dispositifs qu'il faudra étudier par expérience avant de pouvoir décider d'une manière définitive le degré d'avantage de mes divers systèmes dans des circonstances données [*]. Celui qui est l'objet principal de cette Note était précisément étudié de manière à dépenser peu d'eau, à cause des dimensions de mon tonneau de jauge, et j'avais simplement pour but de fixer les idées sur les effets de ce genre de moteur, relativement à la quantité d'eau motrice dépensée.

Quant à ses avantages sur les anciens systèmes à flotteur, il suffit de remarquer que ces systèmes reposaient essentiellement sur les lois de l'hydrostatique. On ne tenait pas compte de la vitesse acquise, on la considérait comme une cause de perte de travail, ou même d'inconvé-

[*] Depuis que cette Note est écrite, j'ai construit un modèle fonctionnant de mon appareil à *piston aspiré sans soupape et sans boulet inférieur ni cataracte*. Ce modèle est suffisant pour établir la régularité de son jeu et vérifier la puissance de l'espèce particulière de *moteur* qu'il utilise. Mais il paraît que le flotteur *alternativement plongé*, dont je me suis servi dans mon dernier Mémoire pour exposer le *principe*, n'est pas toujours aussi avantageux qu'un système de levier coudé convenablement disposé pour remplir les mêmes fonctions que ce flotteur. Il n'y a point, au reste, de flotteur dans la forme du *piston aspiré* que j'ai étudiée de la manière la plus spéciale.

nients plus ou moins graves. Il fallait nécessairement des dimensions beaucoup plus considérables pour débiter une quantité donnée de liquide, et l'on ne pouvait d'ailleurs avoir égard aux variations de hauteur des niveaux sans changer le point d'attache du balancier.

Les machines, objet de ce Mémoire, seront au moins particulièrement applicables aux projets de distribution de l'eau à domicile dans les grandes villes [*].

[*] Voici une des lettres de M. Coriolis, citées dans le Rapport de M. Lamé sur sa principale expérience. Elle avait été écrite, le 25 juillet 1839, à M. Poirée, inspecteur divisionnaire des Ponts et Chaussées, qui a bien voulu me la communiquer. Je la publie, parce que c'est une pièce officielle adressée à l'un des membres de la Commission de Versailles par le rédacteur du premier Rapport favorable fait à l'Institut sur cette machine, le 13 janvier 1840. On y verra dans quels termes ce savant académicien s'exprimait quand il parlait de mes travaux en son propre nom. J'ai tâché de répondre à sa confiance en donnant à mes idées des développements qui font aujourd'hui de mes recherches une nouvelle branche de l'hydraulique, abstraction faite des applications dont elles seront ultérieurement susceptibles :

« Monsieur,

« M. de Caligny m'apprend que vous désirez avoir mon opinion sur une machine
 « de son invention ayant pour objet d'utiliser une chute d'eau par les oscillations dans
 « un siphon. Il m'a dit que vous pourriez faire l'essai de cette machine à Marly, si
 « vous pensiez qu'une telle expérience offrît quelques chances de succès. Je répondrai
 « au désir de M. de Caligny en vous disant que j'ai examiné son projet, et que j'ai
 « reconnu qu'il était bien conçu, suivant les règles de la dynamique et avec une adresse
 « d'invention dont son auteur a déjà fait preuve dans une autre machine analogue. Je
 « crois que l'essai de la nouvelle machine de M. de Caligny sera une chose utile à la
 « science et à l'industrie, et que l'administration ferait bien, n'importe sur quels fonds,
 « de se charger des frais de cette expérience. Cette machine, si elle est bien construite,
 « peut donner un très-bon produit, et son auteur ne pouvant faire lui-même l'expé-
 « rience, il est plus que convenable que l'administration l'aide autant qu'elle le pourra.

« G. CORIOLIS. »