

JOURNAL
DE
MATHÉMATIQUES
PURES ET APPLIQUÉES

FONDÉ EN 1836 ET PUBLIÉ JUSQU'EN 1874

PAR JOSEPH LIOUVILLE

ANATOLE DE CALIGNY

**Principes d'un nouveau système de moteurs atmosphériques à forces
vives, avec ou sans oscillations, avec ou sans soupape**

Journal de mathématiques pures et appliquées 1^{re} série, tome 12 (1847), p. 73-91.

http://www.numdam.org/item?id=JMPA_1847_1_12_73_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>

Principes d'un nouveau système de moteurs atmosphériques à forces vives, avec ou sans oscillations, avec ou sans soupape;

PAR M. ANATOLE DE CALIGNY.

Étant donnée une colonne liquide en mouvement dans un tuyau de conduite débouchant, par une extrémité, dans un bief supérieur qui reçoit les eaux motrices, et, par l'autre, dans le bief inférieur ou d'aval, si l'on ferme l'extrémité d'amont, il s'exercera une succion en vertu de la force vive de cette colonne, et l'on pourra utiliser la pression de l'atmosphère sur un piston d'une manière analogue à ce qui se présente dans une machine à vapeur à simple effet.

Ce problème ne peut être convenablement résolu par le béliet aspirateur, et je me propose de montrer dans quelles circonstances principales il peut l'être, *sans choc brusque*, au moyen des idées que fournit la nouvelle branche de l'hydraulique, objet de mes recherches, dont j'ai fait déjà beaucoup d'applications. On verra plus loin quels sont les avantages particuliers de ce nouveau système de moteurs.

Les combinaisons que je vais indiquer sont assez simples pour être expliquées sans figures, d'autant plus qu'il ne s'agit ici que d'exposer des principes dont les détails d'application seront développés dans un ouvrage que je prépare sur ces matières.

I.

Moteur à piston sans soupape.

L'origine du tuyau peut être tout simplement bouchée alternativement par le piston, ce qui dispensera de toute espèce de soupape, puisqu'il en tiendra lieu lui-même à l'époque voulue. Quand l'effet de la

succion sera produit, un contre-poids relèvera le piston, en refoulant l'eau du bief supérieur qui s'est introduite au-dessus de ce piston pendant la descente. Pour s'en rendre compte, il suffit de remarquer que l'on n'a plus à s'occuper de la succion, dont la force, à l'époque où elle commence à agir, devra être, en général, bien plus grande que la pression du bief supérieur sur le même piston.

Lorsque le piston sera sorti du tuyau, la colonne liquide en mouvement dans l'intérieur de celui-ci sera graduellement réduite au repos en vertu de la pression de l'eau du bief supérieur, qui fera bientôt naître un mouvement en sens contraire. Alors la force vive s'emmagasinerà graduellement dans l'intérieur du tuyau, par suite de l'écoulement de l'eau motrice au bief inférieur. Il n'y aura plus qu'à faire rentrer le piston dans le tuyau pour faire *travailler* l'atmosphère.

Nous avons dit que le piston avait été relevé au moyen d'un contre-poids. Il faut ajouter que ce contre-poids n'ayant plus besoin d'agir, à beaucoup près, avec la même puissance, à partir du moment où le piston, dégagé du tuyau, n'a plus à surmonter que les résistances passives, la résistance du milieu, etc., on laisse plonger ce contre-poids dans un bassin disposé à une hauteur suffisante pour qu'il ne puisse être atteint par les crues de la rivière; on donnera d'ailleurs à cette pièce mobile une densité calculée de manière à lui faire convenablement achever sa course, en venant s'enfoncer au besoin dans un vase particulier, disposé dans son bassin, d'où l'eau, brusquement chassée à la fin de cette course, amortira la percussion comme le ferait un corps mou.

Au moyen de ces précautions, il n'y aura qu'un effort minime à faire pour la rentrée du piston dans le corps de pompe, au-dessus duquel il a été soulevé, seulement de la quantité suffisante pour que l'eau du bief supérieur entre librement par l'extrémité supérieure du tuyau, convenablement évasée. La partie inférieure est évasée en vertu des expériences de Venturi et de M. Eytelwein sur l'écoulement du liquide à la sortie des tuyaux qui ne sont pas très-longs.

La méthode la plus élégante pour faire rentrer le piston consiste à disposer, le long d'une queue inférieure, un boulet ou obstacle quelconque, sur lequel la percussion de l'eau affluente augmentera de plus en plus avec la vitesse de cette eau jusqu'à ce qu'elle entraîne le piston

à l'époque voulue. Il en résulte que, du moins dans le cas où le niveau du bief supérieur serait constant, on pourrait n'avoir qu'une seule pièce mobile dans le système; car, au lieu d'un contre-poids, on pourrait disposer sur la même tige que le boulet, mais au-dessus du piston, qui devrait alors flotter par lui-même, un flotteur particulier qui sortirait de l'eau à l'époque où nous avons dit que le contre-poids devait, au contraire, s'y plonger. Si d'ailleurs je fais mention de ces circonstances, c'est parce qu'il est intéressant de conserver la trace des idées de ce genre à cause de leur simplicité, abstraction faite de leur application. Mais il y a lieu de penser que, dans les applications, le contre-poids sera préférable, et qu'il sera plus économique de faire rentrer le piston dans le tuyau au moyen d'une petite bascule hydraulique dont le travail sera insignifiant.

L'emploi de l'une des dispositions connues sous le nom de *cataracte* sera d'ailleurs d'autant plus commode, que nous n'avons, à cette époque, à nous embarrasser d'aucune oscillation, c'est-à-dire d'aucun mouvement de retour de la colonne, et que peu importe, en général, que l'on ait à chaque période un peu plus ou un peu moins de force vive emmagasinée dans le tuyau, puisqu'elle sera plus ou moins bien utilisée dans tous les cas. Au reste, j'ai donné ailleurs des moyens de régulariser les *cataractes* comme de véritables clepsydras; mais il ne s'agit, dans ce Journal, que d'exposer des principes.

II.

Moteur à piston-soupape.

Le moteur atmosphérique à forces vives, sous la forme que je viens de décrire, a l'avantage d'être d'une simplicité d'exécution qui permet de rendre compte de ses effets à priori avec plus de facilité que sous la forme suivante.

Le piston dans celle-ci est composé d'une soupape d'Amstrong ou d'un piston portant une soupape, et qui ne sort jamais du tuyau. Quand la vitesse voulue est acquise par le liquide dans ce tuyau, cette soupape se ferme en vertu de la percussion de l'eau affluente sur une de ses faces, convenablement disposée: à partir de ce moment la soupape devient piston, et la pression atmosphérique agit sur la résistance

à vaincre. Quand la force vive du système est éteinte, la soupape s'ouvre par des moyens connus, et un contre-poids ou un flotteur la relève avant que la colonne liquide ait acquis de haut en bas une vitesse suffisante pour faire éprouver une résistance passive trop forte pendant le retour de cette soupape.

Il est facile de voir que cette disposition du piston, qui peut d'ailleurs être présentée sous diverses formes, a sur la précédente l'avantage de supprimer la plus grande partie du contre-poids et son bassin particulier, mais surtout de supprimer la queue inférieure du piston, et, par suite, de diminuer la profondeur des fondations pour le cas où l'on veut supprimer la cataracte. Le piston saisit la résistance, au moyen de la pression atmosphérique, à l'instant où la soupape se ferme. Nous reviendrons d'ailleurs plus loin sur les avantages et les inconvénients de ce point particulier.

III.

Moteur à piston et à soupape cylindrique.

Au lieu de considérer le piston comme faisant alternativement fonction de soupape, je suppose qu'étant d'ailleurs plein, c'est-à-dire sans soupape, il fonctionne dans un corps de pompe particulier, sans en sortir, ce corps de pompe étant alternativement réuni au tuyau d'aspiration par une soupape cylindrique à double siège, dite *de cornwall*, qui fait alternativement de ces deux pièces fixes un seul et même tube.

Le piston sera *aspiré* comme ci-dessus à l'époque où la soupape cylindrique sera fermée. Or, pour voir comment cette soupape peut s'ouvrir d'elle-même, il suffit précisément de voir en vertu de quelle force elle sera maintenue fermée. La colonne liquide, dont le mouvement permet à la pression atmosphérique de faire *travailler* le piston, agit aussi d'une manière analogue sur la soupape cylindrique, parce que l'anneau supérieur de celle-ci dépasse d'une quantité quelconque l'anneau inférieur vers l'intérieur de cette soupape. L'aspiration est donc une cause qui tient la soupape fermée, et qui, vers l'époque de la cessation de son influence, lui permet de s'ouvrir au moyen d'un flotteur ou d'un contre-poids. Nous avons indiqué plus haut comment un piston faisant fonction de soupape pouvait être baissé au moyen de

la percussion de l'eau affluente sur des rebords convenablement disposés : ici cela est encore plus évident parce qu'il n'y a point d'attirail à mouvoir, mais seulement un contre-poids. Il y a des dispositions communes à tout cet ensemble et sur lesquelles il est inutile d'insister.

Ce système de moteur a sur le précédent l'avantage de ne pas avoir de soupape tournante. C'est à l'expérience à décider si cet avantage est essentiel.

Quant à la manière de relever le piston, elle peut être considérée sous deux points de vue. Si le niveau du bief supérieur est constant, le corps de pompe peut être prolongé au-dessus du niveau de ce bief. Alors, au moment où la soupape cylindrique s'ouvre, la pression du bief supérieur agit en même temps *sur* la colonne contenue dans le tuyau et qui résiste par son inertie, ainsi que *sous* le piston qu'elle tend à relever, et qu'elle peut, à la rigueur, relever sans contre-poids. Mais cette considération ayant peu d'importance, nous considérerons principalement le cas le plus général, celui des niveaux variables, et nous plongerons en entier le corps de pompe dans l'eau, ce qui nous permettra de *fonctionner sous la glace*, le piston étant facilement relevé au moyen d'un contre-poids, si la colonne liquide inférieure est assez longue pour résister par son inertie pendant un temps qui peut d'ailleurs être fort court.

Il est clair que l'axe du corps de pompe, et, par suite, celui du piston, au lieu d'être verticaux peuvent être horizontaux ou sous une inclinaison quelconque. Mon but n'étant ici que d'exposer des principes, je n'entrerai pas dans tous les détails. J'indiquerai seulement encore la disposition suivante en supposant l'axe du corps de pompe horizontal. La soupape cylindrique, horizontale aussi, fonctionnant toujours d'une manière analogue, on sait déjà comment le piston sera aspiré. Or il peut revenir sur ses pas sans contre-poids, si sa face opposée est en communication avec une capacité où le niveau du liquide soit inférieur à celui du bief d'aval ; car, lorsque la force vive de la colonne liquide aspirante est éteinte, la pression du bief d'aval suffit pour refouler le piston vers son point de départ, et même pour ouvrir la soupape. Dès que la soupape est entr'ouverte, la pression du bief supérieur achève de l'ouvrir en s'appuyant sur l'inertie de la colonne liquide en aval du piston. On conçoit que cette soupape peut être liée

au piston par un système de déclic analogue à ceux dont j'ai moi-même donné autre part des exemples, de telle sorte qu'étant ramenée à sa place, elle soit abandonnée à elle-même par le piston; elle reviendra ensuite, au moment voulu, se fermer par les moyens susdits. Quant au piston, il est facile de l'arrêter à la fin de sa course rétrograde, sans choc brusque, au moyen du refoulement d'une colonne liquide dans un tuyau recourbé de section convenable, formant la capacité supplémentaire que nous avons supposée derrière le piston.

J'ai pensé qu'une indication succincte de ce système de régulation ne serait pas sans intérêt. Mais, dans les applications en grand, il sera toujours facile de tenir compte des petites difficultés de régulation, au moyen de *cataractes*. Le principe de la disposition précédente est aussi applicable au corps de pompe vertical; mais celle que j'ai indiquée d'abord a l'avantage d'exiger des fondations moins profondes, le piston n'étant pas obligé de descendre au-dessous du niveau du bief inférieur quand il est relevé au moyen d'un contrepoids.

IV.

Moteur à flèche oscillante sans soupape

Je suppose maintenant que le piston soit formé d'un cylindre dont les parois s'élèvent toujours au-dessus du niveau du bief supérieur. Il suffit, comme on va voir, de faire osciller verticalement ce cylindre terminé inférieurement par un cône, de manière qu'il vienne alternativement s'engager dans le tuyau fixe.

S'il n'y avait pas de résistances passives, le cylindre, enfoncé à une certaine profondeur au-dessous du niveau d'un réservoir large et profond, remonterait au-dessus, plus haut que ne l'exigerait son poids spécifique si l'état de repos était stable, puis il redescendrait à la même profondeur, et ainsi de suite indéfiniment.

Or, s'il a été engagé une première fois dans le tuyau, et qu'à cette époque il ait, en vertu de sa légèreté spécifique, été lancé de bas en haut par la pression de l'eau du bief inférieur, il sortira avec sa vitesse acquise comme une flèche ou une sorte de bombe chassée par un mortier. Cette vitesse acquise, si elle est suffisante pour compenser la perte

de travail due aux résistances passives qu'il éprouvera dans son double trajet de va-et-vient vertical, lui permettra de venir s'engager à son retour dans la bouche du tuyau d'où nous venons de le voir sortir.

On peut se rendre compte à priori de la possibilité de ces effets au moyen de la disposition suivante : si la masse solide à mouvoir, en un mot l'inertie du système, est suffisamment augmentée au moyen, par exemple, d'un contre-poids, les forces motrices restant les mêmes, on conçoit que le mouvement d'oscillation verticale du cylindre sera beaucoup plus lent, et qu'il en résultera une diminution considérable dans la résistance du milieu liquide. Or le frottement du balancier n'augmentera pas d'une manière assez notable pour détruire cette considération, dont il résulte d'ailleurs un plus grand débit d'eau motrice à chaque période, puisque l'écoulement durera plus longtemps, et, par suite, une plus grande quantité de force vive emmagasinée à chaque période dans le tuyau de conduite. Il est donc évident que cet appareil fonctionnera si les proportions sont bien déterminées par le tâtonnement, et qu'on aura véritablement un moteur à *flèche oscillante*. Il est à peine nécessaire d'ajouter que l'on peut d'ailleurs suspendre le cylindre au haut de sa course pendant un certain temps, et le décrocher au moyen d'une *cataracte*, ou même sans cataracte, par la percussion de l'eau affluente sur une surface disposée dans ce but.

Un des inconvénients de cette forme du moteur, si elle restait dans cet état, serait de ne pouvoir faire commencer l'action de la pression atmosphérique qu'au moment où le piston cylindrique entre dans la bouche du tuyau. Or il y a beaucoup de résistances industrielles qui offrent une inertie considérable à vaincre, ce qui serait ici une cause de percussion. Mais il est juste de remarquer qu'il y a aussi des résistances industrielles; telles sont, par exemple, certains frottements *utiles*, qui ne sont pas dans le même cas. Le système n° 1 du piston toujours plongé sans soupape offrait aussi un inconvénient analogue, mais bien moindre, parce qu'on peut craindre, malgré les considérations suivantes, qu'ici la masse du cylindre et de son attirail ne donne lieu à une percussion d'une espèce qui sera expliquée plus loin, tandis que nous n'avions que la masse d'un piston et de sa tige, le contre-

pois lui-même et son balancier pouvant être disposés de manière à ne pas agir *en bloc* au moment où la résistance est saisie.

Pour achever de concevoir l'action de l'eau dans ce système de flotteur, il faut voir que l'eau du bief supérieur commence à agir pour relever ce flotteur dès le moment où le cône, disposé au bas de cette pièce, cesse de boucher entièrement le tuyau. Cette eau trouve, en effet, un point d'appui sur le mouvement de bas en haut de la colonne liquide, et sur l'inertie de cette même colonne à l'origine du mouvement en sens contraire. Lorsque ensuite le flotteur redescend après avoir achevé sa course ascensionnelle, dès l'instant où il commence à boucher le tuyau, il se produit autour de son cône inférieur une augmentation de vitesse; cela ne peut avoir lieu sans une véritable succion qui l'aide à achever son entrée en augmentant sa vitesse sans action brusque. Ainsi il résulte de ces nouvelles considérations que le flotteur a, pour entrer et pour sortir du corps de pompe, en un mot pour accomplir son espèce de *révolution* verticale, une quantité quelconque de force plus grande que nous ne l'avions dit plus haut. Je n'insisterai cependant pas davantage sur cette forme du moteur, et je passerai à des considérations générales qui, seules, pourront faire sentir les avantages et les inconvénients de ces systèmes principaux, considérés comme expressions diverses du nouveau *moteur atmosphérique*.

Propriétés fondamentales du nouveau système de moteurs.

Les combinaisons de l'*hydrostatique* sont nombreuses et variées, mais elles sont loin d'être aussi nouvelles que celles de l'*hydrodynamique*. Je ne crois donc pas nécessaire de m'étendre sur les divers moyens connus de faire plonger ou émerger un cylindre par des jeux de siphons, etc., dans les cas où l'on néglige la *vitesse acquise*. Il serait facile de varier ainsi en apparence la forme du nouveau moteur dont il s'agit; mais ici, comme pour mes précédentes inventions, je me borne à rassembler en peu de mots les idées fondamentales et à indiquer le reste au lecteur, me réservant à donner les détails d'application dans des recueils spéciaux et dans l'ouvrage que je prépare.

La propriété la plus caractéristique du *moteur hydraulique atmosphérique à forces vives* consiste dans la grande quantité d'eau qu'il peut débiter sous un petit volume, relativement aux machines dans

lesquelles on considère principalement l'action du poids de l'eau, abstraction faite de la vitesse acquise; tels sont les moteurs à colonne d'eau, les flotteurs de Fontana, Bossut, Solages, Thiville, etc. En effet, dans ce nouveau système l'eau coule à plein tuyau avant d'exercer une action immédiatement utile, avec des vitesses dont la moyenne est plus ou moins grande, et que l'on peut même augmenter ou diminuer considérablement si le travail à faire n'est pas toujours le même. Cette observation fait voir immédiatement l'avantage des dispositions pour lesquelles la colonne liquide n'est pas obligée de revenir sur ses pas, ne s'arrête que pendant des instants très-courts, et peut même ne jamais s'arrêter complètement.

Dans les machines où le poids de l'eau agit directement, ou même par succion, comme dans l'ancien moteur de Westgarth par exemple, mais où la très-petite vitesse acquise n'est pas considérée, si la hauteur de la chute varie de quantités notables, la machine s'arrête, comme on sait, à moins qu'on ne change le point d'attache du balancier. Ici l'on peut avoir égard à cette circonstance sans toucher au balancier, puisqu'on est maître d'augmenter la force vive acquise à chaque période. Je dirai plus : comme, en général, la pression atmosphérique sera assez considérable par rapport aux variations de la chute motrice d'une rivière, la machine marchera toujours, même sans l'assistance d'un surveillant; seulement il y aura nécessairement à chaque période une certaine variation dans le travail : par exemple, si c'est une pompe foulante que l'on fait marcher au moyen du moteur, le piston parcourra un chemin plus ou moins grand à chaque période.

Pour bien comprendre comment les choses se passent, il faut se rappeler que c'est la vitesse de l'eau *affluente* dans le tuyau ou aux environs qui détermine la fin de chaque période. Il faudra donc qu'à chaque période il y ait une quantité donnée de force vive emmagasinée dans la colonne liquide. La variation de l'effort à exercer sur la résistance à vaincre ne portera donc que sur la variation de la pression directe provenant de la chute motrice, et non sur la pression atmosphérique dont le travail sera mis en jeu par une même colonne, aspirante en vertu de sa force vive. Si donc la résistance donnée peut encore être surmontée par cette partie de l'effort total, la machine mar-

chera, moins vite il est vrai, mais enfin elle ne s'arrêtera point. Quant au moyen proposé plus haut pour fermer à l'instant voulu le tuyau en vertu de la percussion de l'eau affluente, il est à peine nécessaire d'ajouter que, s'il ne le fait pas fermer assez vite, il est facile de lui donner plus de puissance en faisant agir cette percussion, non plus seulement d'une manière directe, mais au moyen d'un encliquetage. Si, par exemple, on dispose un ressort qui ne cède que sous une pression donnée, l'attirail quelconque à entraîner sera mis en mouvement par une force beaucoup plus considérable que si le ressort n'avait pas résisté un certain temps. Si maintenant on craint que la soupape, quand c'est un système à soupape que l'on emploie, ne vienne frapper trop fortement son siège, il sera toujours facile d'obvier à ce genre d'inconvénient par un modérateur, comme je l'ai déjà indiqué pour d'autres pièces.

Au reste, la régulation se fera toujours, si l'on veut, d'une manière très-économique au moyen d'un petit balancier hydraulique à *cataracte*, du moins lorsqu'un surveillant sera présent pour tenir compte des trop grandes variations dans les hauteurs des niveaux d'amont et d'aval. Or on sait que toutes les machines puissantes ont nécessairement un surveillant, même quand elles peuvent être rigoureusement censées marcher entièrement seules. On peut donc admettre que la même machine fera toujours, à chaque période, la même quantité de travail, tant que la chute motrice restera suffisante pour engendrer la force vive nécessaire; seulement le nombre de périodes diminuera avec la chute motrice dans un même temps donné.

Une autre propriété caractéristique du système consiste en ce que, pour de petites chutes, on se trouve, quant au genre de frottement du piston, dans des circonstances parfaitement analogues à celles des grandes chutes pour les *machines à colonnes d'eau*, qui ne sont employées, comme on sait, que pour des chutes assez considérables. En effet, l'*aspiration*, provenant de la force vive de la colonne liquide en mouvement dans le tuyau, crée en quelque sorte une grande chute, emmagasinée, pour ainsi dire, en vertu de la descente de l'eau motrice. Dans l'ancienne machine à colonne d'eau, le piston parcourt deux fois le chemin de l'eau dépensée, en supposant son diamètre égal à celui du tuyau. Or, si en définitive le frottement est proportionnel

à la pression motrice totale, de quelques parties qu'elle se compose, cependant il y a lieu de penser que les considérations précédentes, sur la modification du frottement et de son chemin, ne seront pas sans utilité, en caractérisant d'ailleurs le système d'une façon toute particulière.

Soit que le piston sorte alternativement du corps de pompe, soit qu'il n'en sorte pas, je propose de lui donner une garniture de cuir, assez ample à la circonférence pour pouvoir au besoin se soulever de bas en haut, comme pour le piston des anciennes pompes décrites par Agricola, et qui, depuis 1823, ont été reproduites sous diverses formes. On sait que, dans ces anciens systèmes, les bords du cuir se repliaient au besoin à l'intérieur du cône, soit pour donner passage à l'eau, soit pour donner passage aux immondices. Mon but, en employant ici quelque chose d'analogue dans les circonstances qui le permettront, est principalement d'avoir à ma disposition une sorte de *corps mou*, afin de diriger sur lui la percussion, ou, si l'on peut s'exprimer ainsi, la *chance de percussion* de la colonne liquide dont je vais parler, et qui n'a d'ailleurs qu'une importance très-secondaire, bien que le phénomène soit encore au nombre de ceux qui caractérisent le système.

Je suppose que la bouche d'amont du tuyau soit fermée très-rapidement, ce qui peut se présenter dans le moteur à piston-soupape n° 2. La colonne liquide en mouvement dans le tuyau tendra à faire un vide sous le piston, surtout si la masse de celui-ci, jointe à celle de son attirail et de la quantité d'eau quelconque dont il lui faut modifier le mouvement, n'est pas très-petite par rapport à la masse de la colonne aspirante. Ceci exige quelques explications. Quant à l'eau dont nous venons de parler, elle n'est pas sans action dans tous les cas. En effet, au moment où la communication entre le tuyau et le bief d'amont est interrompue par le piston des systèmes n°s 1 et 2, l'eau en mouvement dans ce bief exerce, en vertu même de ce mouvement sur le piston, une action qui n'est pas totalement perdue. Enfin si le piston est déjà doté d'une certaine vitesse de haut en bas, celle du liquide dont il s'agit est nécessairement en partie conservée.

Mais je fais abstraction de ces circonstances pour supposer au piston et à son attirail une masse telle, que leur ensemble, partant

du repos sous la pression atmosphérique et la pression directe du bief supérieur, suive avec un mouvement accéléré la colonne liquide aspirante qui fuit, par hypothèse, avec un mouvement retardé.

Comme il ne s'agit ici que d'une estimation approximative ayant pour but de rassurer sur l'effet d'une percussion, nous pouvons supposer que la masse de cette colonne liquide est toujours assez grande par rapport à celle du piston et de son attirail, afin d'admettre que la vitesse du piston est à peu près uniformément accélérée dans le vide, tandis que celle de la colonne aspirante n'a pas eu le temps de se retarder beaucoup avant d'être rencontrée par le piston. Dans cette hypothèse, il est facile de voir que le piston aura, en vertu des lois du mouvement accéléré dont il s'agit, une vitesse à peu près double de celle de la colonne au moment de leur rencontre, c'est-à-dire que la percussion se fera avec une vitesse *relative* à peu près égale à celle de cette colonne. Or la percussion se reportera sur l'espèce de *corps mou* formé par le piston de cuir dont nous avons parlé, et qui, en se repliant au besoin d'une manière analogue à celle du piston décrit dans Agricola, fera dépenser l'effet de cette percussion en changements de forme du corps flexible et en tourbillons du liquide. On voit d'ailleurs que, pour les formes du moteur qui permettront, soit un piston conique, soit un piston d'un diamètre moindre que le tuyau et d'une certaine forme, ce piston, pénétrant dans le liquide, le fera jaillir autour de lui, en dépensant l'effet de la percussion d'une manière inverse, mais analogue à ce qui se passe quand un corps en mouvement éteint sa vitesse sans choc brusque en pénétrant dans un vase conique, dont il chasse l'eau rapidement autour de lui, et que nous pourrions conserver d'ailleurs ici en partie l'avantage de la propriété particulière à la forme conique du cuir dont nous avons parlé.

Au reste, il est difficile d'admettre à priori qu'on ait à s'occuper, dans l'exécution, d'un vide proprement dit sous le piston, car la bouche du tuyau, en vertu de son évasement, dans le cas même de la suppression de toute soupape, ne sera jamais instantanément fermée; de sorte que la succion, qui s'exercera pendant que cette opération sera en train de se faire, viendra du moins en déduction des effets dont je viens de parler, et qu'il était cependant indispensable d'indiquer dans une simple exposition de principes.

Quant à la forme du moteur n° 4, il se présentera probablement un effet de ce genre, même assez important, parce qu'on a supposé qu'il pourrait être nécessaire de donner une masse considérable au flotteur. Aussi c'est une raison de plus pour indiquer simplement cette forme, comme une de celles dont il est intéressant de conserver la trace dans une exposition purement scientifique. Au reste on pourra, en général, obvier à ce genre d'inconvénients en faisant soulever au piston un flotteur qui, plongé pendant une certaine partie de sa course, sortira de l'eau assez à temps pour réduire sensiblement au repos le système solide mobile, si l'on veut qu'il accomplisse sa descente sous l'action de toute la pression atmosphérique, et vienne éteindre sa vitesse sur la surface de la colonne liquide, à l'instant où elle se réduit elle-même au repos.

Mais revenons au cas général véritablement applicable, celui où nous savons d'avance que les effets dont il s'agit ne sont pas bien importants, surtout si une partie assez considérable de la pression atmosphérique agit sur le piston, c'est-à-dire si la résistance à vaincre n'est pas trop grande relativement à l'action de la pression atmosphérique. Or, ici, il se présente un genre d'idées tout nouveau. Comment agira la pression atmosphérique sans qu'il y ait aucun vide proprement dit sous le piston?

Il est commode, pour mieux se représenter comment les choses se passent, de supposer qu'au lieu de l'atmosphère, on ait à considérer deux réservoirs de niveaux plus élevés que ne le sont, aux deux extrémités du tuyau, les niveaux des biefs supérieur et inférieur. En considérant les choses ainsi, on rentre tout naturellement dans le cas ordinaire des colonnes liquides éteignant leur mouvement en vertu de l'action des réservoirs communicants.

En effet, sur la bouche d'aval, la pression de l'atmosphère agit en entier comme résistance à vaincre, tandis que, sur la bouche d'amont, elle est en partie contre-balancée par la résistance industrielle du travail à faire. Or nous considérons les vitesses à partir du moment où le piston a un mouvement commun avec la colonne liquide. Les choses se passent donc comme si le réservoir, qui, par hypothèse, tient lieu de la pression atmosphérique du côté d'amont, était diminué de hauteur pour tenir compte de la résistance industrielle. En définitive, il nous reste à considérer tout simplement, en général, le mouve-

ment retardé d'une colonne liquide entre deux réservoirs en communication. Or, comme cela rentre tout à fait dans mes recherches approuvées par M. Coriolis et dont il a même retrouvé les résultats par des moyens analytiques, il n'est pas nécessaire d'entrer ici dans plus de détails, puisque nous n'avons plus à considérer qu'un cas particulier de mes études précédentes sur cette matière. Il suffit de bien voir comment la force vive est directement employée sans percussion, sans solution de continuité, en repoussant la pression atmosphérique qui agit sur le bief d'aval, et en s'éteignant graduellement comme le mouvement d'un pendule, mais avec cette particularité caractéristique, qu'il n'est pas nécessaire que le liquide revienne sur ses pas, comme dans le moteur hydraulique à flotteur oscillant, de mon invention, décrit dans le tome IV de ce Journal, page 243, et que j'ai depuis essayé en grand avec succès.

L'avantage particulier du moteur que je rappelle est de n'avoir pas de piston, de remplacer le frottement d'un piston par le frottement d'une colonne liquide. Or cette propriété paraît être essentielle pour les chutes petites et peu abondantes en liquide moteur, parce qu'il semble difficile, en général, dans ce cas, d'établir un piston moteur sans qu'il y ait un peu de jeu, à moins de donner lieu à un frottement relativement considérable. Mon premier moteur hydraulique conservera donc son avantage dans beaucoup de circonstances. Mais, en vertu des principes développés ci-dessus, mon nouveau système aura souvent sur le premier des avantages essentiels, auxquels il faut ajouter celui de ne pas exiger, en général, des fondations aussi profondes. Par cette raison, les considérations relatives à la profondeur des fondations m'ont fait seulement présenter, comme développement scientifique, le second moyen de régulation du moteur aspirant n° 3, pour lequel il fallait que le piston descendît au-dessous du niveau du bief inférieur, tandis que, en général, il ne sera pas nécessaire de le faire descendre aussi bas par l'autre moyen de régulation. On conçoit même que la bouche d'amont du tuyau d'aspiration peut, en général, être disposée aussi près du niveau du bief supérieur que cela sera compatible avec la libre introduction du liquide.

J'ai publié dans ce Journal diverses expériences sur les frottements des colonnes liquides en oscillation dans les tuyaux de conduite, et je

reviendrai encore sur ce sujet. Il me suffit en ce moment de remarquer que, pour les systèmes de mouvements variables où l'eau ne revient point sur ses pas, le travail résistant en frottement est nécessairement, toutes choses égales d'ailleurs, moindre que dans les systèmes en oscillation proprement dite. Si donc nous avons ici un frottement de piston, il résulte de cette circonstance une certaine compensation qu'il était nécessaire d'indiquer, tout en reconnaissant que l'expérience seule pourra déterminer le degré d'utilité relative que chacun de mes systèmes aura dans des circonstances données.

Les roues motrices à piston et les chapelets moteurs ou élévatoires, essayés avec succès en Angleterre et en France depuis un siècle, offrent des exemples variés des formes à donner aux pistons qui entrent alternativement dans des corps de pompe courbes ou rectilignes, et qui, à certaines époques, doivent se modifier pour traverser le liquide en éprouvant le moins de résistance possible. Il suffit, dans cette Note, de remarquer la presque identité d'effet à produire. Ces systèmes sont d'ailleurs trop variés peut-être pour être discutés ici.

Quant aux dimensions à donner au tuyau de conduite, les bases du calcul exigeraient sans doute un plus grand nombre de données expérimentales, si l'on voulait embrasser l'ensemble des systèmes précédents; mais il est un cas général intéressant à considérer, parce qu'il se présente non-seulement dans une partie de ces appareils, mais aussi dans d'autres systèmes que je présenterai séparément. Je veux parler des circonstances pour lesquelles le nombre de *périodes* de la machine est à peu près en raison inverse de la longueur du tuyau de conduite dans certaines limites, et où l'on supposera que la régulation dépense une même quantité de travail à chaque période dans un temps d'ailleurs très-court. Ceci exige quelques développements.

Faisons pour un moment abstraction des résistances passives ou pertes de force vive occasionnées par l'écoulement, sous une chute motrice constante, le débit nécessaire pour engendrer une vitesse donnée dans un tuyau de conduite plongé dans le bief inférieur, sera à peu près proportionnel à la longueur développée de ce tuyau, toutes choses égales d'ailleurs. Il en sera de même, en général, à peu près ici du temps pendant lequel cette vitesse sera engendrée. Mais cela ne sera pas clair si l'on considère le frottement du tuyau de conduite. On ne

sait pas bien comment le frottement varie avec la longueur du tuyau, quand cette longueur est petite. Cependant, surtout si les résistances passives ne sont pas trop grandes, dans certaines limites on pourra négliger la considération précédente, pour un genre d'appréciation où il ne peut être évidemment question que de rassurer sur la longueur du tuyau de conduite. Si les frottements augmentent la durée relative de l'écoulement à chaque période, ils diminuent le nombre des périodes dans un temps donné. En définitive, on va voir que l'effet utile ne varie pas très-sensiblement pour des différences notables dans les dimensions cherchées, et cela suffira pour rassurer, dans le genre de recherche dont il s'agit, les personnes qui ont l'habitude de ces déterminations approximatives.

Je dis que, dans l'hypothèse ci-dessus, il faut déterminer la longueur du tuyau de conduite de manière que le travail en frottement qui en résulte soit à peu près égal, à chaque période, au travail perdu par la régulation, et, en définitive, par ce qui arrive de tout spécial à chaque changement de période[*].

On sait à priori que le tuyau doit avoir une longueur égale à un certain nombre de fois son diamètre, parce qu'il résulte de mes précédentes recherches que cela est indispensable pour tous les systèmes de machine où l'on emploie la vitesse acquise de l'eau dans un tube. Il est facile de voir ici que, si le tuyau était trop court, l'effet de l'appareil se dépenserait principalement, soit en régulation proprement dite, soit en ce qui s'y rapporte à chaque période; nous savons d'ailleurs, d'après les conditions supposées ci-dessus, que la masse du piston et de son attirail doit être petite par rapport à celle du liquide en mouvement dans le tuyau de conduite, sur la longueur duquel il s'agit seulement de rassurer à priori. Quant aux pertes de force vive provenant des phénomènes dus aux vitesses du liquide aux extrémités et au coude, nous ne nous en occuperons point dans la comparaison dont il s'agit, parce que nous supposerons, dans tous

[*] Il est facile de voir que cela se démontre immédiatement par le calcul différentiel; mais dans toutes les questions de mécanique appliquée, il est intéressant d'obtenir les résultats par les moyens les plus élémentaires, quand les démonstrations ne perdent rien de leur simplicité. Je reviendrai d'ailleurs ultérieurement sur ces matières.

les cas, la moyenne de ces vitesses à peu près la même pour toutes les longueurs de tuyau que nous aurons à considérer.

Cela posé, soit c la perte de travail due au frottement de l'eau dans le tuyau de conduite; en supposant que la perte de travail provenant du changement de période soit la même pour chaque période, la perte totale sera $2c$, plus la perte due à la vitesse aux extrémités, au coude, et, en un mot, aux causes purement *locales*, dont nous avons dit que, dans cette comparaison, nous n'avions point à nous occuper.

Si l'une de ces quantités c est multipliée par $1 + k$, nous admettons que l'autre est divisée par $1 + k$. Voyons ce qui en résulte.

Nous avons, au lieu de $2c$,

$$\frac{c}{1+k} + c(1+k) = \frac{c + c(1+k)^2}{1+k};$$

or on a

$$2c = \frac{2c(1+k)}{1+k};$$

la perte est donc changée, quant au frottement et à la régulation, dans le rapport

$$\frac{c + c(1+k)^2}{2c(1+k)} = \frac{2c + 2kc + k^2c}{2c + 2kc}.$$

Les deux premiers termes du numérateur de la dernière fraction étant identiques à ceux du dénominateur, la perte de travail due au frottement et à la régulation augmente, en définitive, de

$$\frac{k^2}{2k+2}.$$

On voit que cette augmentation n'est pas très-rapide relativement aux variations que l'on peut faire éprouver à l'une ou à l'autre des deux parties de la perte de travail considéré. Si l'une, par exemple, est doublée, l'autre restant à peu près la même, cette augmentation n'est que d'un quart en sus; il faudrait qu'elle fût à peu près quadruple, pour que cette augmentation totale fût égale à $2c$. Mais nous avons vu que cette dernière quantité n'était elle-même qu'une partie du travail résistant total, dans laquelle n'entre point la perte aux extré-

mités, et sur les causes purement *locales* de pertes de force vive telle que le coude. On voit donc que, en définitive, les augmentations de travail résistant total ne sont pas même aussi rapides que je viens de le dire, quand on s'écarte des conditions nécessaires au maximum d'effet, d'autant plus qu'il y a encore d'autres résistances que l'on peut mettre de côté dans la détermination dont il s'agit. Ainsi le travail en frottement du piston peut, au moins dans beaucoup de cas, être considéré comme proportionnel à l'effet produit.

Les considérations précédentes peuvent bien suffire pour rassurer sur la longueur du tuyau de conduite, et montrer sur quelles bases doivent être établis les calculs dont ce nouveau système de moteurs sera ultérieurement l'objet; mais l'expérience seule peut donner les valeurs numériques de ses effets, qui doivent être analogues à ceux des machines à colonne d'eau sous de grandes chutes, tout en permettant d'utiliser les chutes petites, variables et jouissant d'une grande abondance d'eau.

Conclusions.

On a depuis longtemps proposé des appareils nombreux et variés pour obtenir, au moyen d'une chute d'eau, un mouvement alternatif par des combinaisons ingénieuses appartenant, à proprement parler, à l'hydrostatique. J'en ai moi-même présenté quelques-uns à la Société Philomathique, en prévenant que je n'y attachais pas beaucoup d'importance, et que la partie véritablement nouvelle de l'hydraulique reposait sur l'étude des effets peu connus de la vitesse acquise des liquides.

Le 26 janvier 1839, j'ai présenté un moteur hydraulique à flotteur oscillant, décrit dans le tome IV de ce Journal, ayant l'avantage d'offrir au liquide les issues les plus larges à son entrée et à sa sortie, en supprimant d'ailleurs toute espèce de frottement de piston, et qui peut débiter des masses d'eau assez grandes sous un volume médiocre. Ce système, sur lequel j'ai fait beaucoup d'expériences et qui a été approuvé par l'Institut, conservera ses avantages pour les chutes assez faibles et qui ne sont pas très-puissantes.

Mais pour les chutes qui, sans être fort élevées, seront très-variables

et disposeront de quantités d'eau considérables, le *moteur atmosphérique à forces vives* sera, en général, préférable sous la forme spécialement étudiée dans cette Note, surtout quand on voudra fonctionner sous la glace.

Il est à remarquer que ce nouveau système n'est pas nécessairement à oscillations; il permet d'utiliser le mouvement varié et, même à la rigueur, non interrompu d'une colonne liquide alimentée par les eaux motrices. Cette propriété a, entre autres avantages, celui de ne pas exiger des ingénieurs aussi habiles pour une exécution en grand; mais il n'est pas aussi facile à priori de déterminer les effets des petits modèles, à cause de l'emploi des pistons.

J'ai fait, sur ce nouvel ensemble de machines, diverses communications à la Société Philomathique, depuis le commencement de 1844. Elles sont, jusqu'à un certain point, aux anciens moteurs hydrauliques à pression directe du poids de l'eau, ce que les turbines sont aux roues mues par le poids de l'eau, en ce sens qu'elles utilisent la vitesse acquise du liquide et jouissent, comme les turbines, de la propriété de fonctionner sous la glace.

