

JOURNAL  
DE  
MATHÉMATIQUES

PURES ET APPLIQUÉES

FONDÉ EN 1836 ET PUBLIÉ JUSQU'EN 1874

PAR JOSEPH LIOUVILLE

---

ANATOLE DE CALIGNY

**Note sur un appareil à faire des épuisements au moyen  
des vagues de la mer**

*Journal de mathématiques pures et appliquées 2<sup>e</sup> série*, tome 14 (1869), p. 339-358.

[http://www.numdam.org/item?id=JMPA\\_1869\\_2\\_14\\_339\\_0](http://www.numdam.org/item?id=JMPA_1869_2_14_339_0)

 gallica

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>

*Note sur un appareil à faire des épuisements au moyen  
des vagues de la mer;*

PAR M. ANATOLE DE CALIGNY.

J'ai présenté à la Société Philomathique de Paris, le 17 mai 1851, le principe de cet appareil. Depuis cette époque, je ne m'en étais plus occupé, parce que j'avais entendu dire que les vagues de la Méditerranée, dans les environs des marais de la Camargue, n'étaient pas assez puissantes pour être appliquées d'une manière convenable à l'épuisement de ces marais. Mais ayant appris que ces vagues étaient plus fortes qu'on ne me l'avait dit, je suis revenu sur ce sujet dans une Note présentée le 1<sup>er</sup> mars dernier à l'Académie des Sciences, et dont un Extrait est imprimé dans les *Comptes rendus* de cette Académie.

J'ai appris depuis par un article du *Journal officiel de Rome*, dont la traduction a été publiée à Paris dans le journal *l'Univers* du 3 juin 1868, et dont je n'avais pas connaissance le 1<sup>er</sup> mars dernier, que les vagues de la Méditerranée, dans les environs des marais d'Ostie, sont assez puissantes pour qu'un ingénieur italien, M. Moro, d'Arona, ait proposé dernièrement de s'en servir pour faire des épuisements dans ces marais, dont un canal souterrain qu'il a construit conduit les eaux dans la mer. M. Moro, après avoir donné la description de ce canal, fermé à ses deux extrémités par des portes pendantes, ayant pour but d'empêcher l'eau de retourner dans le marais, ajoute que de cette combinaison « il ressort une conséquence paradoxale au premier abord, mais pourtant très-certaine, naturellement parlant, à savoir que l'abaissement de l'eau dans l'émissaire se produit non-seulement au niveau moyen et le plus bas de la mer, mais dans les grandes tempêtes, notamment dans celles de *libeccio*, même au-dessous du niveau le plus bas; car on observe qu'autant la vague

s'élève au-dessus de la ligne du niveau moyen, autant elle descend au-dessous de cette ligne, et comme chaque abaissement de la mer fait sortir les eaux par l'écluse, les flaques mêmes qui se trouvent à un niveau inférieur au plus bas de la mer peuvent avoir un écoulement. »

Il n'est pas à ma connaissance que personne eût proposé avant moi de se servir d'une dénivellation provenant du mouvement des vagues pour faire des épuisements dans un marais au-dessous du niveau moyen le plus bas de la mer, en employant un clapet susceptible de s'ouvrir en vertu de cette dénivellation, et de se refermer pour empêcher l'eau de rentrer dans le marais quand elle monte au-dessus de ce niveau moyen.

On jugera si cette idée est au moins implicitement contenue dans l'extrait du procès-verbal de la séance de la Société Philomathique de Paris du 17 mai 1851, publié dans le journal *l'Institut*, et dans le *Bulletin de la Société Philomathique* de 1851, p. 27 à 29. Abstraction faite d'ailleurs de toute question de priorité, il est d'autant plus intéressant de rappeler cette Note qu'on pourra probablement, au moyen des développements qu'on trouvera plus loin, profiter du canal souterrain de M. Moro pour y adapter l'appareil que j'avais présenté, il y a dix-huit ans, de manière à faire au besoin descendre l'eau des marais d'Ostie plus bas qu'on ne le pourrait en vertu de la dénivellation des vagues abandonnées à elles-mêmes.

Il est d'ailleurs intéressant de remarquer qu'avec l'appareil de mon invention construit à l'écluse de l'Aubois, on obtient un effet utile plus grand quand il est employé comme machine pour les épuisements que lorsqu'il est employé comme machine élévatoire. Or, tous ces principes se tiennent à divers égards, et la grande expérience que je rappelle trouvera ici une de ses applications.

Voici la copie de la partie de la Note précitée qui a pour objet le système en question en forme de L.

« Séance du 17 mai 1851. Hydraulique. *Appareil à faire des épuisements au moyen des vagues de la mer.* M. de Caligny adresse une Note sur les moyens d'employer les vagues de la mer à faire des épuisements. . . . .

. . . . .

» J'ai communiqué il y a longtemps à la Société, dit-il, des expériences variées sur un appareil sans piston, ni soupape, ni aucune autre pièce quelconque mobile, ayant pour but de faire des épuisements au moyen d'une diminution de pression moyenne sur l'orifice latéral d'un tuyau vertical ouvert à ses deux extrémités, dans lequel une colonne liquide oscille, en vertu d'une force motrice quelconque, même au moyen d'une addition alternative de pression supérieure, telle qu'une insufflation très-irrégulière. Je crois cependant que, pour utiliser en grand le travail moteur fourni par les vagues, dont l'action alternative agira sur l'extrémité convenablement évasée d'un tuyau de conduite en partie plongé dans la mer, il sera utile de disposer un clapet de retenue dans le tuyau latéral, partant de l'orifice latéral du tuyau vertical pour déboucher par son autre extrémité dans le marais à épuiser. Il y a d'ailleurs des époques de calme, pendant lesquelles il ne faut pas que l'eau de la mer puisse refluer vers le marais. La force, analogue à une succion, développée dans l'appareil sans soupape que j'ai fait fonctionner en présence de beaucoup de monde, n'est au reste qu'une fraction de celle qu'on peut se procurer quand il y a un clapet de retenue. Pour s'en rendre compte, il suffit de se souvenir que si une force quelconque a soulevé dans un tuyau vertical une colonne liquide au-dessus du niveau de l'eau dans lequel ce tuyau est en partie plongé, elle redescend ensuite au-dessous de ce niveau, de sorte que le clapet de retenue dont je viens de parler peut permettre à l'eau du marais d'entrer dans le tuyau vertical, où elle se mêlera à la colonne liquide oscillante et sortira en définitive par l'extrémité inférieure du tuyau vertical. Il est à peine nécessaire d'ajouter que l'extrémité inférieure de celui-ci doit être en général recourbée horizontalement, ou d'une manière convenable pour recevoir l'action des vagues par un évasement extérieur.

» Plus le tuyau venant du marais est long, plus la masse d'eau qu'il contient est grande, de manière à pouvoir emmagasiner la force vive comme un sorte de volant, de sorte que, pour certaines dispositions, le clapet, utile à divers égards, est moins nécessaire.

» Les études à faire pour appliquer ce genre d'appareils doivent avoir principalement pour objet : 1° la hauteur, la longueur et la durée des principales vagues dans la localité où l'on aura des épuisse-

ments à faire; 2° la distance du rivage à laquelle il faut s'avancer pour rencontrer des vagues assez puissantes.

» Il est difficile *à priori* de tenir compte de la partie de l'action des vagues provenant de leur vitesse, en un mot de leur percussion sur la bouche évasée d'une manière analogue à un ajutage divergent. Mais on peut se former une idée de ce qui se présente pendant la durée du gonflement proprement dit sur cette extrémité. On est alors dans des circonstances analogues à ce qui se présente quand un tuyau de conduite débouche par une extrémité dans l'eau d'un bief supérieur, tandis que l'autre extrémité relevée verticalement s'élève assez haut, non-seulement pour que l'on n'ait pas à craindre que l'eau rentre par cette dernière, mais pour que l'eau qui s'y élève ne puisse pas sortir par ce sommet. Quand la vague est passée, l'extrémité d'amont est dans un état analogue à ce qui se présenterait si, par suite d'une manœuvre quelconque, elle se trouvait seulement en communication avec l'eau d'un bief inférieur. La question est compliquée par la hauteur variable de l'intumescence au-dessus de la bouche évasée, mais la comparaison précédente est utile pour bien faire comprendre l'état général de la question.

» Il semble cependant, au premier aperçu, qu'il se présente une grande difficulté pratique, la longueur du tuyau qui va à la rencontre des vagues paraissant devoir être fonction de la longueur de ces vagues. Mais, en définitive, les expériences en grand qui, je l'espère, seront prochainement faites sur ce sujet, seront bien facilitées par la considération suivante. Il résulte de mes expériences diverses sur la durée de l'oscillation de l'eau dans les tuyaux de conduite d'une longueur suffisante, que l'on est le maître de cette durée dans des limites très-étendues, pourvu que l'on puisse disposer sur le tuyau de conduite, soit horizontal, soit plus ou moins incliné, un tuyau vertical d'une section convenable. Si donc l'expérimentateur se trompait quant aux effets de la longueur du tuyau horizontal, il aurait un moyen très-simple d'y remédier.

» Quant au tuyau de conduite du marais, lorsqu'il a un bon clapet de retenue, il n'est pas utile qu'il soit très-long, puisque d'ailleurs *l'eau du marais peut être amenée par un système de canaux ou de tuyaux dans un puisard disposé à une distance convenable du tuyau vertical.*

» La vague qui fera assez osciller l'eau dans ce dernier permettra à une tranche d'eau du marais de venir se poser sur la surface de la colonne d'eau descendante ou se mêler à l'oscillation dans certaines limites. On voit que le jeu de cet appareil se rattache dans toutes ses parties à mes diverses recherches sur les oscillations des liquides, et que, s'il exige quelques études pratiques, on ne peut avoir de doutes, dans chaque application particulière, que sur le rapport de ses effets au capital dépensé pour son premier établissement et les frais insignifiants de son entretien. »

J'ai cru devoir copier la description précédente avec les fautes de rédaction qui peuvent s'y trouver. Quelques explications seront utiles pour mieux faire comprendre la manière dont on doit appliquer ces principes.

Je rappellerai d'abord au besoin que dans le tome VIII, 1<sup>re</sup> série, du *Journal de Mathématiques*, année 1843, p. 23 et suiv., j'ai publié un Mémoire intitulé : *Nouveau système de fontaines intermittentes sous-marines, théorie et modèle fonctionnant, par Anatole de Caligny, suivi d'une Note de M. Combes* [\*]. On trouve dans ce Mémoire l'exposé détaillé des principes et des expériences sur lesquels repose l'appareil de mon invention rappelé au commencement de la Note précitée de 1851, et dont j'avais présenté un modèle fonctionnant à la Société Philomathique de Paris dès l'année 1840.

J'ai expliqué dans ce Mémoire de 1843 pourquoi le tube latéral qui introduit alternativement l'eau dans le système peut être d'une grande longueur, parce que le mouvement, d'ailleurs variable de l'eau qu'il contient, et qui entre dans un tube vertical (en vertu de la diminution de la moyenne des pressions sur un point donné résultant de l'état d'oscillation d'une colonne liquide), s'emmagasine dans la masse de l'eau contenue dans ce tuyau latéral d'une manière analogue à celle dont le mouvement s'emmagasine dans un volant.

On comprendra mieux, d'après cela, ce que j'ai voulu dire à la Société Philomathique en 1851, sur les effets de la longueur d'un tuyau de conduite latéral qui, à la rigueur, pourrait même se passer de

---

[\*] M. Combes voulut bien à ma prière développer par l'analyse les principes qui font l'objet de ce Mémoire.

clapet de retenue. Il y a d'ailleurs en ce moment à la Sorbonne un modèle de ce système fonctionnant au moyen d'une force motrice irrégulière, sans aucune pièce quelconque mobile, et disposé de manière que la colonne liquide venant d'un réservoir latéral qu'on épuise peut, si l'on veut, ne point revenir en arrière à chaque période de l'appareil.

Mais, dans la pratique, il est évidemment impossible, comme cela a été dit dans la Note précitée de 1851, de se passer d'un clapet de retenue, puisque l'eau du marais à épuiser rentrerait dans ce marais quand la machine ne fonctionnerait plus à l'époque de la cessation des vagues.

Or, dès l'instant où l'on se sert d'un clapet, il faut d'abord tenir compte de ce que la baisse alternative de l'eau dans le tube vertical permet tout naturellement à l'eau du marais d'entrer dans le système, comme cela est expliqué ci-dessus. Les vagues sont d'ailleurs tellement variables qu'on saura mieux ce qu'on fera en comptant principalement sur ce résultat, et considérant plutôt comme un objet de curiosité le phénomène précité de diminution de pression latérale moyenne.

Dans ces conditions, il est intéressant de signaler plus spécialement une modification, déjà indiquée dans la Note précitée de 1851, qui assure le jeu de l'appareil, pour le cas où l'eau du marais serait amenée par un long tuyau de conduite, parce qu'il ne faut pas que l'inertie de l'eau qu'il contient arrête ce jeu.

Elle consiste dans la disposition d'un puits ou réservoir à ciel ouvert, de section convenable, communiquant d'un côté avec ce tuyau de conduite, et, de l'autre, avec une tubulure portant le clapet latéral de retenue indiqué ci-dessus pour le jeu de l'appareil.

Il sera prudent de disposer un autre clapet de retenue ayant en partie pour but d'empêcher l'eau de ce réservoir de retourner dans le marais, s'il se présentait des circonstances où cela fût possible, à cause de l'irrégularité des vagues. Mais je n'entrerai pas ici dans ces détails.

Dans le cas où l'on se proposerait seulement d'utiliser la dénivellation alternative des vagues abandonnées librement à elles-mêmes (sans qu'elles fussent obligées de faire osciller l'eau dans un tube recourbé en forme de L pour augmenter l'amplitude des oscillations), on pour-

rait disposer le réservoir dont il s'agit à l'extrémité du tuyau de conduite qui débouche dans la mer, et alors le clapet ou les clapets de retenue contre la mer, s'il en faut plusieurs, seraient sur la paroi de ce réservoir, dans la direction du tuyau de conduite, c'est-à-dire que les choses seraient combinées de manière que l'eau de ce dernier aurait à se détourner le moins possible pour entrer dans la mer.

On conçoit d'ailleurs que la pratique montrera quelle est la meilleure position de ce réservoir. On verra s'il vaut mieux, *surtout si l'on ne se sert du mouvement des vagues que dans les fortes tempêtes*, que ce réservoir (qui sera une cause de perte de force vive si la colonne liquide y entre en s'évasant et rencontre ensuite une cause de contraction en passant par les orifices de sortie) soit disposé comme je viens de le dire, ou soit disposé latéralement; si l'eau se dégorge ordinairement dans la mer par un long tuyau de conduite.

Mon but, dans ce que je viens de dire, est seulement de bien fixer les idées sur l'utilité générale de ce réservoir, quant à ce qu'il y a d'essentiel.

Il en résulte, soit pour le cas de l'appareil en forme de L, soit pour celui de l'emploi des vagues libres, que la moindre dénivellation alternative provenant du mouvement des vagues au-dessous du niveau du marais suffira pour faire ouvrir le clapet de retenue contre la mer, ou les clapets de cette extrémité, s'il en faut plusieurs, et que l'eau de ce réservoir pourra entrer dans la mer en quantité convenable pour chaque période, *parce qu'elle n'en sera point empêchée par l'inertie de la longue colonne liquide contenue en amont dans le tuyau de conduite*.

J'ai communiqué ces considérations à plusieurs de mes confrères de l'Académie Pontificale des Nuovi Lincei de Rome et à M. Moro. Je suis d'ailleurs le premier à reconnaître, d'après ce que dit le *Journal officiel de Rome* précité, le mérite que paraît avoir le travail de M. Moro, qui a eu l'idée de faire déboucher les eaux du marais dans la mer au delà et au-dessous de la région où se forme un banc de sable.

Je n'ai pas cru devoir attendre de nouveaux renseignements avant de bien préciser l'état de la question, quant aux principes de ce que je propose.

Il paraît que les grandes ondes se brisant à une distance considé-

rable de ce rivage, il sera convenable d'employer dans cette localité les moyens indiqués ci-dessus pour augmenter l'amplitude des oscillations, et que la plage est même en pente tellement douce, que rien ne devra être négligé pour profiter du peu de force que les vagues conserveront ordinairement en arrivant près de l'appareil.

Au reste, abstraction faite des applications de ce système à l'épuisement des marais, il pourra être employé à l'assainissement des ports dans les mers sans flux et reflux. On sait en effet qu'il serait utile d'avoir un moyen simple de déplacer l'eau, même sans l'élever au-dessus du niveau du port. Or il ne sera pas nécessaire d'avoir à sa disposition des vagues bien puissantes pour obtenir un déplacement d'eau très-convenable, si l'appareil objet de cette Note est assez bien disposé. C'est un des moyens qu'on aurait pu proposer sans doute pour l'assainissement du port de Marseille.

Donnons quelques détails relatifs à la manière dont sera posé le tuyau latéral. On pourra probablement diminuer la profondeur des fondations, en le faisant déboucher à l'intérieur du coude du tuyau en forme de L. Il y a même lieu d'espérer que, la pression latérale étant diminuée, comme on sait, à l'intérieur d'un coude arrondi, en vertu de la force centrifuge de l'eau, tandis que cette force augmente la pression contre la partie qu'on est convenu d'appeler *extérieure*, quoiqu'elle soit à l'intérieur du tuyau, cette disposition sera plus favorable à l'introduction de l'eau à épuiser dans le système que si le tuyau latéral débouchait dans la partie verticale. Il est bien entendu que ce tuyau latéral peut être recourbé de manière que son autre extrémité débouche dans l'eau à épuiser.

Quant à la position la plus convenable du clapet de retenue, j'ajouterai que, si ce clapet introduit l'eau directement par l'arrondissement intérieur du coude, c'est-à-dire par sa partie convexe relativement à la colonne liquide, il en résulte des propriétés intéressantes, surtout pour les cas où, comme on le verra plus loin, on peut supprimer le tuyau latéral.

Il sera utile d'étudier par expérience quel sera le plus petit rayon de courbure qu'on pourra donner au coude, relativement au diamètre du tuyau en forme de L. Il résulte d'observations publiées

dans ce Journal que, si l'on donne au rayon de courbure intérieure une grandeur à peu près égale à celle du diamètre du tuyau, le rayon de courbure extérieure, c'est-à-dire celui de la partie qu'on peut désigner sous le nom de *concave*, étant double, le plus essentiel est fait en général pour diminuer la résistance de l'eau dans le coude, cette courbure étant suffisante pour supprimer les phénomènes de *contraction* proprement dite.

Il se produit, en effet, un véritable phénomène de *contraction* de la veine liquide dans les coudes à angle brusque formés par les décharges latérales de certains canaux d'usine quand on pose transversalement, pour arrêter l'usine, une planche faisant partie des parois latérales du canal. En général, dans les coudes ainsi formés, l'eau s'abaisse beaucoup dans la première moitié de l'orifice latéral. Il est évident, d'après cela, que, si l'on considère un tuyau coudé d'une manière analogue, la pression latérale est bien moindre à certains points surtout de la partie convexe que le long des parties rectilignes du tuyau à partir de certaines distances.

Il se présente donc ici une question nouvelle. Si le rayon de courbure de la partie convexe, appelé *rayon de courbure intérieure*, est assez petit, par rapport au diamètre du tuyau, pour que les phénomènes précités de contraction de la veine liquide se produisent, il en résulte une résistance aux mouvements de l'eau dans le coude plus considérable que si ce rayon était plus grand; mais il en résulte aussi une diminution de pression latérale favorable à l'introduction de l'eau à épuiser, d'après ce qui a été dit ci-dessus.

On voit, d'après cela, qu'il est difficile de déterminer *à priori* la courbure correspondante à l'effet utile maximum de l'appareil, qui repose par conséquent sur des considérations plus délicates qu'on ne le croirait sans doute au premier aperçu.

Si, au lieu d'introduire directement l'eau à épuiser par la partie convexe du coude, comme je viens de le dire, on l'introduit directement pour diminuer encore un peu la profondeur des fondations dans la partie horizontale du tuyau, on peut, si l'on n'a point à craindre les engorgements, réduire à zéro le rayon de courbure de la partie convexe du coude.

Mes expériences établissent, en effet, qu'au moyen de lames con-

centriques on diminue considérablement la résistance de l'eau dans un coude à angle droit brusque, dont le rayon de courbure extérieure est égal au diamètre du tuyau, le rayon de courbure intérieure étant nul.

On peut voir ce que j'ai dit de ce phénomène dans le tome VII, 2<sup>e</sup> série, année 1862, du *Journal de Mathématiques*; dans un Mémoire intitulé : *Expériences sur une machine hydraulique à tube oscillant, etc.*; dans un chapitre intitulé : *Expériences sur un moyen nouveau de diminuer la résistance dans les coudes.*

On voit que les phénomènes sur lesquels repose le jeu de cet appareil varient selon les circonstances. Si, par exemple, on supprimait les lames concentriques dans un coude à angle droit brusque, il serait difficile à *a priori* de déterminer rigoureusement l'emplacement de la chambre du clapet latéral, dans le cas où celui-ci introduirait directement l'eau à épuiser dans la partie horizontale. En effet, la veine liquide, après s'être amincie dans le coude (quant à la partie qui fait passer le plus d'eau), se dilate ensuite en exerçant une percussion contre la colonne liquide rectiligne, ainsi que cela se voit dans des canaux d'usine coudés, découverts à leur partie supérieure. Or, on ne sait pas encore assez bien à quelle distance du coude, dans chaque circonstance donnée, se fait sentir la pression maximum provenant de cette percussion; de sorte que l'expérience seule peut décider en dernier ressort le choix rigoureux de l'emplacement du clapet.

On peut demander lequel vaut le mieux : de disposer le tube vertical dans la mer, ou dans le puisard en communication avec le marais qu'on veut épuiser?

Je crois qu'en général il vaudra mieux le mettre dans le puisard, non-seulement parce que l'appareil sera plus facile à visiter et à consolider relativement au choc des vagues, mais parce que le clapet n'aura pas besoin de tuyau latéral, étant seulement dans une chambre entourée de surfaces disposées de manière à diminuer autant que possible la *contraction* de la veine liquide à son entrée du puisard dans le système.

Si d'ailleurs le tuyau vertical était dans la mer, la chambre du clapet, quelle que fût sa position la meilleure dans chaque circonstance donnée, pourrait être mise en communication avec le puisard au moyen d'un tuyau latéral convenablement recourbé.

On conçoit que le choix de la position du tube vertical dépendra de la nature des vagues ordinaires dans chaque localité; ainsi il peut arriver qu'il y ait de l'avantage à mettre l'appareil le plus possible dans la mer, afin de mieux recevoir l'action des vagues.

La théorie de l'appareil est plus difficile dans cette hypothèse que dans l'autre, à cause de la longueur du tuyau latéral, tandis que dans l'autre cas, le clapet n'ayant qu'une simple chambre, l'inertie de l'eau du puisard ne donne lieu à aucune difficulté pratique.

Dans l'un et l'autre cas, il faut tenir compte, lorsque l'eau à épuiser entre dans le système, de ce qu'elle peut être obligée de se faire de la place dans la colonne liquide oscillante. Comme elle n'y entrera sans doute en quantité importante qu'à partir de l'époque où le niveau de cette dernière sera très-notablement baissé, ce sera surtout quant à la colonne liquide verticale qu'il sera intéressant d'étudier les effets de cette introduction qui tendront à y modifier les vitesses.

Aux divers effets signalés dans cette Note et dans celle dont elle est la suite, il faut joindre ceux de la communication latérale du mouvement des liquides. J'ai publié dans le *Journal de Mathématiques*, en 1843, un Mémoire sur les Fontaines intermittentes sous-marines, où je signalais d'ailleurs l'action de ce phénomène et de quelques autres dans une circonstance semblable.

Il est à peine nécessaire d'ajouter que, s'il est intéressant pour la science et pour l'étude, au moins théorique, de l'effet utile maximum de l'appareil, de tenir compte de diverses circonstances délicates, il suffit de supposer que l'eau à épuiser puisse suivre, dans certains cas, la colonne liquide descendante dans le système, pour comprendre l'utilité de son jeu.

L'expérience montrera d'ailleurs si ce dernier mode d'introduction de l'eau à épuiser ne sera pas en général le plus important pour cet appareil.

On conçoit que, si, pour éviter la profondeur des fondations, on dispose le clapet assez peu au-dessous du niveau de l'eau à épuiser, et si celui-ci est en général assez peu au-dessous du niveau moyen (c'est-à-dire abstraction faite des vagues qui font marcher l'appareil), le plus bas d'une mer sans flux et reflux, il y a lieu de penser que, dans bien des cas, l'eau oscillera dans le tuyau vertical de l'appareil

en forme de L, de manière à s'élever bien au-dessus de ce clapet, et par conséquent tendrait à redescendre bien au-dessous s'il n'entraît pas de l'eau à épuiser; de sorte que l'effet de l'introduction de l'eau à épuiser par ce clapet se fera dans bien des cas, peut-être principalement, comme on vient de le supposer dans cette Note, pour fixer les idées d'une manière simple sur l'utilité pratique de cet appareil.

J'ai appris que M. Moro avait accueilli mes communications avec bienveillance et se disposerait même à faire les expériences que je lui ai indiquées.

Il ne paraît pas d'ailleurs qu'il soit nécessaire dans cette localité d'établir le réservoir latéral que j'ai proposé pour le cas où le tuyau de conduite qui amène l'eau du marais dans la mer aurait une longueur dépassant certaines limites. J'apprends, en effet, que d'après des expériences mentionnées au commencement de cette Note, déjà faites par M. Moro, les clapets s'ouvrent facilement d'eux-mêmes quand les vagues s'abaissent convenablement auprès de l'appareil à chaque période d'ondulation, quoiqu'il n'y ait point de réservoir latéral.

Cette circonstance semble indiquer que la longueur du tuyau de conduite dont il s'agit, étant beaucoup moindre qu'on ne pouvait le croire d'après les indications sommaires du *Journal officiel de Rome* précité, serait en proportion convenable, relativement aux effets que doivent produire les vagues ordinaires, pour qu'on puisse essayer de se servir du tuyau existant, afin de faire un premier essai de la manière d'augmenter l'amplitude des oscillations, comme je le propose.

On pourra probablement s'en servir pour étudier le système, au moins provisoirement, sous une forme différente de celles qui sont indiquées ci-dessus et qui, quoique paraissant peut-être moins rationnelle, peut aussi avoir ses avantages.

Si, près du clapet qui est dans le marais, on dispose sur le tuyau de conduite le tube vertical, en tenant ouvert d'une manière continue l'autre clapet qui est dans la mer, cela constituera une des formes générales de l'appareil dont il s'agit, parce qu'on pourra y ajouter ensuite, du côté de la mer, l'ajutage divergent.

Il est à remarquer que l'eau du marais entrera dans le système sans que la veine liquide soit obligée de se plier dans un coude. Cet avan-

tage sera d'ailleurs peut-être plus que compensé par la résistance du coude à angle brusque formé par le mode de jonction du tube vertical avec le tuyau de conduite.

Le tuyau que je désigne ici sous le nom de *vertical*, parce que cela rend la construction plus simple, pourra plus tard être étudié sous une autre forme. L'expérience seule pourra décider s'il ne vaudra pas mieux que du moins sa partie inférieure soit inclinée au moyen d'une sorte de coude arrondi ou au moyen de lames concentriques, de manière que la colonne oscillante n'ait pas à se plier aussi brusquement. Mais, à cause de l'espèce d'*éperon* qui se présenterait alors, l'étude du phénomène est compliquée.

Quoi qu'il en soit, il résultera de cette disposition générale que la force centrifuge s'opposera pendant une partie de l'opération à l'entrée alternative de l'eau du marais dans le système, tandis que j'ai montré comment on pourrait profiter de cette force pour favoriser l'introduction de cette eau. Mais l'appareil, sous cette forme, se prêterait facilement à l'écoulement continu de l'eau du marais dans la mer aux époques où l'on ne se servirait pas des oscillations des vagues. Celles-ci, avant la pose du tuyau vertical, ne peuvent servir que par certains vents à faire des épuisements un peu au-dessous du niveau *moyen* le plus bas de la mer (c'est-à-dire considéré abstraction faite des vagues dont on se sert). On m'écrit que, dans ces conditions, l'expérience a bien réussi.

Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que, si toute la colonne verticale descendante entrait à chaque période dans le tuyau horizontal, la colonne liquide en mouvement, à partir de cette époque, agirait plus directement sur l'eau à épuiser, qui la suivrait dans un tuyau rectiligne à peu près comme si elle suivait un piston.

Il est utile que l'extrémité du tuyau de conduite qui débouche dans la mer y soit assez enfoncée pour que les vagues ne la découvrent pas de façon à y introduire de l'air. Je ne sais pas encore si, dans l'état actuel des choses, cette extrémité est assez enfoncée sous l'eau pour que cette condition puisse être remplie sans qu'on ait aucune modification à y faire. Peut-être même, si les clapets s'ouvrent facilement sans réservoir latéral, cela vient-il de ce que le tuyau ne coulerait pas toujours entièrement plein. On conçoit que, si une vague laisse un

creux devant le clapet qui est dans la mer, il peut s'introduire de l'air par une charnière supérieure, dans le cas où ce creux découvrirait un peu cette charnière. Alors ce clapet n'aurait pas besoin, pour s'ouvrir, de mettre en mouvement toute l'eau contenue dans le tuyau de conduite, et cette eau pourrait ensuite avoir le temps d'acquérir une certaine vitesse, en vertu de la baisse qui se serait produite ainsi à son extrémité du côté de la mer. Mais j'ai lieu de croire que M. Moro a déjà pensé à la possibilité de cette introduction de l'air, et que cela ne s'opposera pas aux essais dont il s'agit.

Quoi qu'il en soit, si l'on ajoute à l'extrémité d'un tuyau de conduite convenablement enfoncée dans la mer un ajutage divergent, l'entrée de l'air dans cet ajutage, qui s'élèverait en partie par son évasement au-dessus du tuyau, n'aurait pas le même inconvénient si cet air n'entrait pas dans ce tuyau.

On pourra au besoin ne faire l'évasement que dans le sens horizontal, comme à l'extrémité du tuyau de conduite de l'écluse de l'Aubois, qui débouche dans le sas. Cet ajutage n'a pas seulement pour but de mieux recevoir la percussion des vagues, mais d'utiliser la vitesse de sortie de l'eau dans la mer, de façon à faire descendre l'eau le plus bas possible dans le tube vertical. La colonne liquide, s'évasant graduellement, emploiera sa force vive d'autant mieux que l'évasement se fera d'une manière plus insensible. Il y aura même lieu d'examiner s'il ne vaudra pas mieux que la partie plongée du tuyau soit toujours *entièrement conique*, de manière à rendre l'évasement aussi insensible que cela se pourra. Cette forme permettrait d'ailleurs, quand on serait dans un espace resserré, à cause d'un banc de sable par exemple, de régler plus facilement dans certaines circonstances la durée que devrait avoir autant que possible chaque oscillation. Dans les cas où l'amplitude ordinaire de l'oscillation sera assez petite par rapport à la longueur de la partie plongée du tuyau, l'évasement aura moins d'importance, relativement à ce qui vient d'être dit quant à la baisse de la colonne oscillante, que dans le cas contraire; et il pourra arriver qu'on ait surtout à se préoccuper de cet évasement pour mieux recevoir la percussion des vagues, en diminuant d'ailleurs aussi la *contraction* de la veine liquide à son entrée de la mer dans le système.

Ainsi que je le prévoyais en écrivant le commencement de cette Note, M. Moro a été le premier à convenir que l'appareil dont il se sert pour faire descendre, au moyen de la baisse alternative des vagues, l'eau des marais d'Ostie au-dessous du *niveau moyen le plus bas de la mer*, est semblable à celui que j'ai décrit dans ma Note précitée de 1851. Il fait observer d'ailleurs que j'ai proposé d'employer le choc des vagues, tandis qu'il dispose des surfaces, ayant pour but d'éviter ce choc près de l'appareil, sans que cela empêche la dénivellation alternative des vagues en vertu de laquelle des clapets s'ouvrent alternativement pour faire entrer l'eau du marais dans la mer.

Je ferai remarquer, à cette occasion, que les effets indiqués dans ma Note de 1851 se divisent en deux parties. Les uns dépendent du choc des vagues ; les autres dépendent des effets de leur intumescence suivie de creux, et sont très-distincts des phénomènes de la percussion proprement dite.

La disposition déjà employée par M. Moro me fait espérer qu'il ne sera pas impossible d'étudier d'abord séparément les effets dont je viens de parler, si toutefois les surfaces servant de *brise-lames* ne sont pas trop près de l'appareil.

Quoique le tuyau de conduite soit beaucoup moins long que je ne le croyais, d'après quelques mots du *Journal officiel de Rome*, quand j'ai écrit le commencement de la présente Note [\*], il a encore probablement trop de longueur par rapport à celle des vagues prises de crête en crête, pour qu'on puisse essayer de faire, avec ce même tuyau, une *accumulation d'oscillations* dont il est, dans tous les cas, intéressant de signaler, *comme principe*, la possibilité, surtout dans le *Journal de Mathématiques*.

On conçoit que si le tuyau était assez court, et n'avait qu'un diamètre ne dépassant pas certaines limites, une vague, si elle était assez longue, pourrait avoir le temps, même abstraction faite de sa percussion, d'agir sur le tuyau en forme de L d'une manière analogue à celle de la pression d'un réservoir dont le niveau serait plus élevé que le *niveau*

---

[\*] Il peut être utile de remarquer que cette Note a été écrite à plusieurs reprises : j'ai reçu divers renseignements successivement, depuis l'impression des premières pages.

*moyen* de la mer à l'instant considéré. Par conséquent, si dans la partie verticale de ce tuyau le liquide se trouve à un niveau qui ne soit pas d'abord au-dessus de ce *niveau moyen*, il en résultera une oscillation au-dessus de ce dernier, et il y a même des raisons de penser que cette oscillation montera au-dessus du sommet de la vague, considérée ainsi comme une sorte de réservoir moteur alternatif.

Quoi qu'il en soit, si les choses sont disposées de manière que l'oscillation descendante qui se produira ensuite dans le tuyau vertical puisse profiter du moment où la vague sera descendue au-dessous du niveau moyen de la mer à l'époque considérée, on conçoit que cette oscillation, si le tube vertical est enfoncé assez profondément, pourra descendre au-dessous du creux de la vague : ce creux pouvant être alors considéré comme jouant alternativement le rôle d'un *bief inférieur* avec lequel le système serait mis en communication alternative.

L'intumescence suivante trouvera l'eau dans le tube vertical plus bas que la précédente ne l'y avait trouvée, et par conséquent l'oscillation ascendante pourra s'élever plus haut dans le tube vertical. On conçoit que, par suite de ce surcroît d'élévation, l'eau pourra descendre encore plus bas dans ce tube, et qu'il est même difficile d'assigner *a priori* la limite des oscillations successives qu'il sera possible d'obtenir ainsi au moyen de ce que j'appelle *une accumulation d'oscillations*.

Je conviens que l'expérience est absolument indispensable pour qu'on puisse se rendre compte, dans une localité donnée, de l'effet que peut avoir *cette accumulation*. Aussi je compte plutôt, *quant à la pratique*, sur les résultats de la percussion qui pourront d'ailleurs aussi conduire à une *accumulation d'oscillations*, par suite des combinaisons possibles des oscillations descendantes avec les creux alternatifs des vagues. Mais, si ces combinaisons conduisent à des effets curieux, l'appareil n'en serait pas moins utile, quand même ces derniers ne se réaliseraient pas d'une manière pratique.

La profondeur à laquelle on peut faire des épuisements dépendant de la hauteur à laquelle on peut faire monter l'eau par les oscillations dans le tube vertical, sera sans doute d'autant plus grande que la bouche qui recevra la percussion des vagues pourra elle-même être plus considérable par rapport à la section du tuyau. L'expérience seule pourra montrer dans quelles limites il faudra se restreindre pour des

vagues d'une force donnée, car il y aura là un véritable coup de bélier.

Il est intéressant de remarquer qu'en commençant l'évasement à partir du coude, on aura non-seulement l'avantage d'une augmentation de sections, par degrés plus insensibles, mais que la percussion des vagues s'exercera, toutes choses égales d'ailleurs, d'une façon plus convenable, à cause de la manière dont le mouvement se propagera. On conçoit que les sections augmentant alors graduellement à partir du coude, chaque tranche d'eau aura à prendre moins de vitesse pour que l'eau dans le coude ait une vitesse donnée, que si les sections étaient seulement égales à celle du tuyau vertical sur une plus grande longueur.

Mais sans entrer ici dans les détails théoriques auxquels donne lieu l'examen des effets d'un tube plongé, évasé graduellement d'une extrémité à l'autre, il est intéressant de rappeler qu'il résulte de mes anciennes expériences sur des sujets analogues, que, toutes choses égales d'ailleurs, chaque oscillation de l'eau dans un tuyau de conduite de ce genre a une durée moindre si le tuyau plongé s'évase ainsi, que s'il conservait un diamètre égal à celui de la partie verticale. En un mot, les choses se passent, quant à la durée de chaque oscillation, comme si la partie plongée avait alors une longueur moindre que dans le cas où le diamètre serait partout le même.

Il résulte de cette propriété, que la possibilité d'évaser ainsi la partie plongée du tuyau donnera d'ailleurs plus de facilité pour remplir les conditions du système dans les circonstances où l'on sera obligé d'avoir un tuyau d'une longueur déterminée, trop grande pour pouvoir être combinée d'une manière convenable, sans cela, avec les effets que les vagues devront produire en général sur l'appareil dans la localité où l'on se trouvera.

J'ai dit quelques mots des effets de la contraction de la veine liquide à son entrée de la mer dans le tuyau. Il est à peine nécessaire d'ajouter, d'après ce que j'ai exposé ci-dessus, que, pour s'en rendre compte, il faut distinguer des effets de la percussion ceux de la pression latérale de l'intumescence des vagues.

On conçoit, d'ailleurs, que si pour mieux recevoir la percussion, tout en consolidant la bouche évasée, on dispose un rebord autour de

celle-ci, la direction des filets liquides, en supposant même qu'elle fût d'une manière générale parallèle à l'axe, pourrait éprouver une assez forte déviation aux bords extérieurs.

*Nota.* — Il n'est pas nécessaire d'avoir plusieurs tubes verticaux de rechange pour déterminer par le tâtonnement la section du tube vertical, relativement aux dimensions de la partie horizontale du tuyau en forme de L, afin que les durées des oscillations soient en général convenables par rapport à celles des dénivellations alternatives des vagues. On peut y suppléer au moyen de plusieurs cylindres verticaux que l'on essayera successivement de manière à déterminer la section qui doit rester libre dans le tube vertical. Quand cette détermination sera faite, ce qu'il y aura de plus simple sera d'employer pour cela, non un cylindre circulaire, mais une portion d'un cylindre de ce genre, le reste ayant été retranché par un plan, ou plutôt en général par une surface cylindrique verticale dont la forme est à étudier par l'expérience. Il y a du reste lieu de penser que la partie du tube vertical qui est du côté du marais, et qui devra rester libre (l'autre partie étant occupée par ce demi-cylindre ou par cette portion quelconque de cylindre), devra avoir une section s'approchant beaucoup plus d'une forme rectangulaire que d'un segment de cercle, parce qu'il faut, du moins si le coude n'est pas arrondi, que la veine liquide ait le plus de liberté possible pour se jeter en se courbant dans la partie du tube vertical qui est opposée à la mer, c'est-à-dire qui est du côté du marais. Quelle que soit d'ailleurs la forme qui sera adoptée pour la pièce verticale fixe servant d'*obturateur partiel*, son extrémité inférieure devra être disposée de manière à gêner le moins possible le mouvement de l'eau qui montera alternativement dans le tube vertical. Si l'on emploie, par exemple, une forme analogue à celle d'un demi-cylindre, il est à peine nécessaire d'avertir que la partie inférieure de celui-ci devra être disposée en biseau dont les formes seront convenablement arrondies. Mais je n'entrerai pas ici dans ces détails qui ne peuvent être étudiés que par l'expérience. Il est facile de voir comment ils pourraient être appliqués au *tube d'aval* de l'écluse de l'Aubois.

*Dernières expériences faites à l'écluse de l'Aubois.*

On a exhaussé le tube mobile d'aval et sa cheminée en maçonnerie, parce que, le bief d'amont étant extrêmement court, il y avait de si grandes variations dans son niveau, que les petits corps flottants s'introduisaient quelquefois entre ce tube et cette cheminée, ce qui embarrassait le jeu de la machine. On aurait peut-être pu obvier à cet inconvénient au moyen de grillages à mailles plus fines; mais il ne paraît pas, d'après les essais faits jusqu'à présent, que cet exhaussement diminue sensiblement l'effet utile pendant la vidange de l'écluse. Il est d'ailleurs évident que cela ne peut avoir aucune influence fâcheuse sur l'opération du remplissage qui se fait par la partie inférieure des tubes mobiles.

On conçoit que si pendant la vidange l'eau relevée monte un peu plus haut, à cause de cet exhaussement d'un des tubes, la plus grande partie jaillissant d'ailleurs alors par le sommet de l'autre tube, il faut tenir compte de ce que le tube d'amont a un siège sous lequel est disposé un coude arrondi, tandis que le siège du tube d'aval a un coude à angle droit brusque dans la construction adoptée à l'Aubois.

Par suite de circonstances imprévues, il n'a pas été possible pendant le chômage de disposer l'anneau du tube d'aval à l'intérieur de ce tube comme je l'avais demandé; de sorte qu'on est obligé d'ajourner les expériences sur la marche automatique de ce tube. Heureusement la marche automatique du tube d'aval a déjà été étudiée à Saint-Lô et à Chaillot; de sorte qu'aujourd'hui la question est très-avancée, même quant à la marche automatique.

L'expérience établit d'ailleurs que le joint du tube d'amont, dont l'anneau est disposé comme il doit l'être, garde l'eau convenablement, même sans qu'on soit obligé d'essayer d'autres systèmes de joints qui auraient pu être mis en usage.

J'ai dit, quant à la manière de faire retomber, sans le secours de l'éclusier, le tube d'aval pendant l'époque du remplissage de l'écluse, qu'on pourrait employer d'autres moyens que celui qui est indiqué dans la Note à laquelle celle-ci fait suite. Voici le principe d'un de ces moyens.

Je ne rappellerai pas ici les détails des moteurs hydrauliques à *flotteur* qui peuvent être employés à cet usage, au moyen de la chute d'eau, soit en agissant de bas en haut, soit en agissant de haut en bas, selon que l'expérience montrera qu'il sera plus avantageux d'agir d'un côté ou de l'autre de l'axe du balancier. Je dirai seulement un mot d'un régulateur qui permettra de faire agir ce moteur en temps utile au moyen d'un système de déclics.

Il suffit de concevoir qu'à chaque période l'appareil de remplissage de l'écluse fait monter l'eau dans le sas, de quantités assez grandes pour qu'un *flotteur particulier* ayant seulement pour but de servir de *régulateur* puisse faire fonctionner convenablement un système de déclics, dans les détails duquel je n'entrerai pas ici.

Les portes d'écluse n'ont pu être remplacées au dernier chômage; elles le seront au prochain chômage par des portes en fer, et alors il sera facile d'achever plus rigoureusement et dans tous leurs détails les études sur les diverses parties de cet appareil.

