

OBSERVATIONS

THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES

Sur l'effet des Moulins à vent, & sur la figure
de leurs ailes.

Par M. COULOMB.

I. L'ACTION du vent est le moyen dont l'industrie humaine paroît avoir fait l'usage le plus ingénieux pour le mouvement des machines : rien ne peut suppléer à cet agent dans les pays de plaine, parce que les ruisseaux & les rivières y ont très-peu de pente; or, comme pour les machines mises en action par des eaux courantes, c'est le produit des chutes par les masses dont on peut disposer, qui mesure l'effet possible; l'on ne peut compter, dans les pays où la chute est peu considérable, que sur un effet qui ne fera presque jamais proportionné aux besoins des habitans. Il faut donc pour-lors avoir recours à l'action des vents, qui, n'étant pas arrêtés par les montagnes, y soufflent plus uniformément & plus régulièrement qu'ailleurs; c'est ce que l'on remarque en Flandre, en Hollande, & dans tous les pays de plaine, où les campagnes sont couvertes de moulins à vent, & où les moulins à eau ne peuvent être établis qu'à des intervalles très-considérables, & sont souvent nuisibles à la navigation & au décheffement des campagnes.

M. Parent paroît être le premier qui ait cherché à déterminer, par le calcul, quel devroit être la direction du vent sur l'aile des moulins, pour que cette machine produisît un effet qui fût un *maximum*. Il supposa que l'impulsion du vent étoit comme le carré du sinus d'incidence, multiplié par le carré de la vitesse; il supposa encore que la vitesse du vent étoit infinie, relativement à la vitesse de tous les points de l'aile: ces suppositions simplifient le calcul, mais sont bien éloignées d'être exactes.

Mém. 1781.

Lij
le 22 Déc.
1781.

M. D. Bernoulli remarqua dans son Hydrodynamique, que la vitesse de l'aile du moulin, n'étoit point infiniment petite, relativement à la vitesse du vent, & que dans le calcul, il falloit avoir égard à la vitesse respective.

En 1744, M. d'Alembert donna son Traité de l'équilibre & du mouvement des Fluides. L'on trouve à l'article 367 de cet Ouvrage, & dans le cinquième volume des Opuscules du même Auteur, des recherches sur cet objet, dignes de sa sagacité.

Enfin, M. Euler a donné en 1752, dans le quatrième volume des nouveaux Commentaires de Pétersbourg, un Mémoire qui a pour titre, *De constructione molarum alatarum*, où toute la partie géométrique de cette question est développée avec autant de clarté que de profondeur.

Dans les Ouvrages que je viens de citer, & dans ceux de plusieurs autres savans Géomètres, qui ont voulu déterminer, par le calcul, la figure des ailes de moulin, l'on a eu égard à la vitesse respective du vent & de la partie de l'aile correspondante; mais l'on a toujours supposé que l'impulsion du vent étoit comme le carré de la vitesse, multiplié par le carré du sinus d'incidence. La première partie de cette supposition est vraie, & M. d'Alembert l'a démontré le premier, d'une manière aussi élégante qu'ingénieuse, dans son Essai sur la résistance des Fluides: mais l'expérience a absolument contredit, même pour les surfaces planes, la supposition du carré du sinus d'incidence; c'est ce qui résulte des expériences présentées à l'Académie en 1763, par M. le Chevalier de Borda; en 1776, par M.^{rs} d'Alembert, le marquis de Condorcet & l'abbé Bossut; & qui vient d'être confirmé dans un Memoire donné à l'Académie en 1778, par M. l'abbé Bossut, où il rend compte d'une nouvelle suite d'expériences sur l'impulsion oblique des fluides, qui paroissent exécutées avec autant d'intelligence que de précision.

Mais ces expériences précieuses, ne sont pas encore suffisantes pour déterminer la figure des ailes des moulins à vent; le but que l'on s'y est proposé, étoit, en faisant mouvoir un

solide, suivant son axe, de déterminer la résistance totale dans ce sens; or, cette résistance peut dépendre de plusieurs élémens, dont les principaux, sont l'action perpendiculaire du fluide sur les faces du prisme, & le frottement du fluide le long des faces de ce même prisme. Dans les expériences, ces deux élémens sont confondus; mais pour déterminer le mouvement des ailes d'un moulin à vent, il faut les distinguer avec soin, parce que l'un produit le mouvement, & l'autre le retarde. L'on verra dans la seconde Section de ce Mémoire, qu'en négligeant le frottement du fluide sur les ailes, & en attribuant toute la résistance donnée par l'expérience à l'action perpendiculaire, il en résulte des conséquences inadmissibles, lorsque la direction du vent est très-oblique.

II. Ce Mémoire sera divisé en deux Sections; la première que je présente aujourd'hui à l'Académie, contiendra quelques observations faites à Lille en Flandre, pour déterminer, par l'expérience, la somme des effets que les moulins à vent produisent, année moyenne. La construction de ces moulins est la même que ceux dont on fait usage en Hollande; il paroît qu'à force de tâtonnement, l'on est parvenu, dans ces machines, à un très-grand degré de perfection. La seconde Section contiendra un essai de Théorie calculée uniquement d'après l'expérience, & sans admettre aucune hypothèse; les méthodes d'approximation, dont nous nous sommes servis, seront utiles dans beaucoup de circonstances, pour déterminer, dans la pratique, uniquement d'après l'expérience, les conditions *de maximis & minimis*.

PREMIÈRE SECTION.

Quantité d'Effet produit par les Moulins à vent, d'après l'expérience.

III. DANS les moulins destinés à scier le bois, à moudre le grain, ou à produire des effets dont la mesure ne peut être réduite en poids que par des expériences composées, il seroit peut-être assez difficile de mesurer la quantité d'effet

pour un vent donné ; mais dans les moulins, où des pilons sont élevés, & retombent d'une hauteur donnée, comme l'on peut mesurer le poids de chaque pilon, le nombre de pilons élevés dans une minute, ainsi que la vitesse du vent, l'on aura facilement par l'expérience, la quantité d'effet que ces machines produisent dans un temps donné, puisque la quantité d'effet d'une machine a pour mesure le produit de la hauteur par le poids élevé.

IV. Dans toute la Flandre, & principalement auprès de la ville de Lille, il y a une très-grande quantité de moulins à vent, qui élèvent des pilons pour broyer la graine de Colza, & en extraire l'huile ; ces moulins, quant aux dimensions & à la longueur des ailes, sont semblables à ceux qui servent, dans cette même province, à la mouture du blé : Voici le détail des mesures moyennes des principales parties de ces machines.

V. Les volans ont, d'une extrémité d'une aile à l'extrémité de l'aile opposée, une longueur de soixante-seize pieds ; la largeur de l'aile est d'un peu plus de six pieds, dont cinq sont formés par une toile attachée sur un châssis, & le pied restant, par une planche très-légère : la ligne de jonction de la planche & de la toile, forme, du côté frappé par le vent, un angle sensiblement concave au commencement de l'aile, & qui allant toujours en diminuant, s'évanouit à l'extrémité de l'aile. La pièce de bois qui forme le bras, & soutient le châssis, est placée derrière cet angle concave. La surface de la toile forme une surface courbe, mais les constructeurs de moulins n'ont aucune règle fixe dans le tracé de cette courbure, quoiqu'ils la regardent comme le secret de l'art : il m'a paru que le plus généralement l'on s'éloignoit peu de la vérité, en supposant la surface de l'aile, composée de lignes droites, perpendiculaires au bras de l'aile, & répondant par leurs extrémités à l'angle concave formé par la jonction de la toile & de la planche ; & l'autre extrémité placée de manière qu'au commencement de l'aile, à six pieds de l'arbre, les lignes droites formeroient avec l'axe de l'arbre,

un angle de 60 degrés, & qu'à l'extrémité de l'aile, cet angle seroit de 78 à 84 degrés; en sorte qu'il augmente de 78 à 84, à mesure que l'axe de rotation est plus incliné à l'horizon: cependant le pan gauche qui formeroit l'aile, d'après cette description, n'est pas encore exact, & au lieu d'être terminé par une ligne droite, il l'est ordinairement dans le côté sous le vent, par une ligne courbe, dont la plus grande concavité est de deux ou trois pouces.

L'arbre tournant, & auquel les ailes sont fixées, s'incline à l'horizon entre 8 & 15 degrés; il est garni de sept solives de quarante-deux pouces de longueur, qui le perçant transversalement d'outre en outre, forment quatorze taquets ou levées, ce qui lui donne la forme & le nom de *hérifon*; ces levées répondent aux mentonnets de sept pilons, qui peuvent être élevés chacun deux fois dans le temps que l'arbre fait un tour entier.

De ces sept pilons, cinq sont des pièces de bois de chêne, ordinairement de vingt à vingt-deux pieds de longueur sur neuf & onze pouces d'équarrissage, armés d'un sabot de fer de cinquante à soixante livres: ils servent à broyer la graine; ces pilons pèsent à peu-près mille vingt livres chacun. Les deux autres pilons ont la même longueur, mais ils n'ont que six à sept pouces d'équarrissage; ils sont destinés à ferrer & desserrer des coins pour extraire l'huile par une forte compression; ils peuvent peser cinq cents livres. De ces deux derniers pilons, il n'y en a jamais qu'un seul en action. Les cinq premiers agissent ensemble lorsque le vent est suffisant.

VI. En examinant l'effet de nos moulins, la première observation intéressante qui s'est présentée; c'est qu'avec un vent moyen, que l'on peut estimer de dix-huit à vingt pieds par seconde; plus de cinquante moulins placés à un quart de lieue de Lille, dans la même exposition, produisoient à peu-près la même quantité d'effet, quoiqu'il y eût plusieurs petites différences dans la construction de ces moulins, soit relativement à l'inclinaison de l'axe de rotation, soit relativement à la disposition des ailes: de cette observation, l'on peut, ce

*vent moyen
pouvant à dix pas, 18*

me semble, tirer une conclusion bien intéressante, c'est qu'il est probable, qu'à force de tâtonnement, la pratique s'est très-rapprochée du degré de perfection; car si je cherchois par les règles de *maximis & minimis*, quelle que soit la formule qui exprimeroit l'effet de notre moulin, quel devrait être le rapport de toutes les quantités variables qui la composent, pour que cet effet fût un *maximum*; je trouverois d'après les principes fondamentaux de ce calcul, qu'en faisant varier dans cette formule une ou plusieurs des indéterminées, la variation de l'effet devrait toujours être supposée égale à zéro, ou, ce qui revient au même, que quoique l'on fit un peu varier les différentes parties de notre machine, l'effet resteroit toujours constant. Or nous trouvons ici, que quoique les constructeurs de moulins varient entr'eux dans la disposition des ailes, l'effet avec un vent moyen est toujours constant. Ainsi, il est probable que les parties en sont disposées de manière qu'elles produisent à peu-près le *maximum* d'effet que nous désirons.

VII. Voici actuellement les expériences d'après lesquelles nous avons cru pouvoir évaluer l'effet de nos moulins pour une année moyenne.

L'on observoit & l'on mesuroit la vitesse du vent avec des plumes très-légères que ce vent entraînoit; deux hommes placés sur une petite élévation dans la direction du vent, & à cent cinquante pieds l'un de l'autre, observoient le temps que cette plume employoit à parcourir les cent cinquante pieds.

VIII. Le vent parcourt sept pieds par seconde: lorsque le moulin est libre, & lorsqu'aucun des pilons n'est élevé, les ailes du moulin font cinq tours & demi par minute; mais en mettant un seul pilon pesant mille vingt livres, en action, & frappant deux coups de dix-huit pouces de hauteur à chaque tour d'aile, le moulin fait à peine trois tours par minute.

IX. Le vent parcourant douze à treize pieds par seconde, les ailes font sept à huit tours par minute, & il n'y a que deux pilons de mille vingt livres, & un pilon de cinq cents livres qui soient en action: avec ce degré de mouvement, le moulin

Vitesse du vent

forte

1. *Voile par.*

Première
Expérience.

2. *Id.*

Deuxième
Expérience.

moulin commença à tourner

ne peut fabriquer qu'une tonne, ou deux cents livres d'huile en vingt-quatre heures.

X. Le vent parcourant vingt pieds par seconde, les ailes font treize tours dans une minute; cinq pilons de mille vingt livres chacun sont mis en action, ainsi qu'un pilon de cinq cents livres; les quatre ailes du moulin portent toute leur voilure, & l'on fabrique trois tonnes & demie d'huile en vingt-quatre heures: ce degré de vitesse dans le vent, est celui qui paroît convenir le mieux à cette machine, c'est au moins celui que le conducteur préfère; il n'est pas forcé de travail, ce vent souffle ordinairement avec une vitesse assez uniforme, le moulin porte toute sa voilure sans crainte d'accident, & sans que les liaisons de sa charpente soient trop fatiguées.

Troisième
Expérience.

3 Pyl. moulin

moulin fait 12 tours par
minut 1300 livres par heure
sans bluter

XI. Le vent souffle avec force, il parcourt vingt-huit pieds par seconde; les conducteurs des moulins sont obligés de ferrer six pieds de voile à l'extrémité de chaque aile; l'aile fait dix-sept à dix-huit tours dans une minute, & le moulin fabrique près de cinq tonnes en vingt-quatre heures; les cinq pilons de mille vingt livres, ainsi qu'un pilon de cinq cents livres, sont en action.

Quatrième
Expérience.

4 à 5 Pyl. font
20 à 22 tours par

moulin 1300 livres par heure
portant toute sa voilure
mais souvent on est obligé

XII. Les moulins à blé, dont l'engrénage est disposé de manière que la meule fait cinq tours dans le temps que l'aile n'en fait qu'un, ne commencent à tourner que lorsque la vitesse du vent est de dix à douze pieds par seconde; lorsque la vitesse du vent est de dix-huit pieds par seconde, les ailes du moulin font onze à douze tours par minute, & ces moulins peuvent moudre, sans bluter, de huit à neuf cents livres de blé par heure: l'on doit remarquer qu'avec ce degré de vent, les moulins à huile font également de onze à douze tours par minute; en sorte que dès que l'on aura calculé pour un vent de dix-huit pieds par seconde, la quantité d'effet que produit notre moulin à huile, l'on évaluera très-facilement le *momentum* de la résistance de la meule qui broie le grain.

Cinquième
Expérience.

Lorsque le vent a vingt-huit pieds de vitesse par seconde, les ailes des moulins à blé, portant toute leur voilure, font

souvent jusqu'à vingt-deux tours par minute, & peuvent moudre jusqu'à dix-huit cents livres de farine par heure. J'ai vu quelquefois les Meuniers faire travailler leur moulin avec ce degré de vitesse, malgré le degré énorme de chaleur que la farine contracte en sortant de dessous la meule; ils sont cependant obligés pour lors de changer de temps en temps l'espèce de grain qu'ils soumettent à la mouture, pour rafraîchir, disent-ils, leur meule.

XIII. Tous les faits que je viens de présenter, ne sont que le résultat de beaucoup d'observations pour déterminer, d'après la pratique, quel est le degré de mouvement que les conducteurs font dans l'usage de donner à leur moulin; dans ces observations, je ne faisois que suivre en silence le travail de l'Artiste, & je n'influois en rien sur ses opérations. J'ai voulu ensuite disposer du moulin, & en varier les mouvemens; par-là je me serois procuré une suite d'expériences pour établir la théorie de ces machines, sur un grand nombre de données; mais lorsque les propriétaires de ces moulins ont su l'usage que j'en voulois faire, il ne m'a jamais été possible de les déterminer à m'en louer un pendant quelques mois: dans tous les Arts, où l'Artiste est peu instruit, ou pour mieux dire, où il n'est, comme ici, qu'un simple manœuvre, il s' imagine que la publicité de ses manipulations seroit contraire à ses intérêts; & il voit avec chagrin le Curieux qui interroge, qui observe, & qui après quelques instans d'examen, peut calculer les produits de la machine, & les profits du propriétaire.

XIV. Nous allons actuellement déterminer, d'après les expériences qui précèdent, quel est l'effet annuel que les moulins produisent. Par un relevé fait du travail de ces moulins, pendant plusieurs années; j'ai trouvé qu'ils fabriquoient, année moyenne, 400 tonnes d'huile: or, comme la fabrique d'une tonne d'huile exige à peu-près la même quantité de coups de pilons, pour réduire la graine en pâte; nous tirerons facilement de nos expériences, la quantité de coups de pilons nécessaires pour la fabrique de 400 tonnes,

ou

ou, ce qui revient au même, le nombre des coups de pilons donnés dans une année moyenne.

XV. Nous avons trouvé dans notre troisième Expérience, qu'avec la vitesse moyenne du vent, qui est de 20 pieds par seconde, les ailes du moulin à vent faisoient treize tours dans une minute, & qu'il y avoit pour-lors cinq pilons, pesant chacun 1020 livres, & un pilon de 500 livres, élevés deux fois à 18 pouces de hauteur, dans un tour d'aile : ainsi puisque l'effet d'une machine se mesure pour un temps donné, par le poids élevé, & la hauteur à laquelle il est élevé ; l'on aura pour l'effet produit dans une minute $(1020.10.13 + 500.13.2)$ livres élevé à 1 pied $\frac{1}{2}$, ce qui équivaut à un poids de 1000 livres élevé à 218 pieds dans une minute ; ce qui donneroit pour vingt-quatre heures un poids de 1000 livres élevé à 313,920 pieds de hauteur. Nous trouvons actuellement dans cette même Expérience, que lorsque ce moulin a ce degré d'action, il fabrique 3 tonnes $\frac{1}{2}$ d'huile par jour ; ainsi, puisqu'il fabrique année moyenne 400 tonnes, & que pour fabriquer une tonne, il faut le même nombre de coups de pilons, notre moulin travaille avec l'action due à un vent, dont la vitesse moyenne est de 20 pieds par seconde, pendant cent quatorze jours de chaque année ; & comme les moulins sont arrêtés les Dimanches & Fêtes, l'on peut évaluer leur travail continu sur le pied que nous venons de trouver au tiers de l'année, ou ce qui revient au même, l'on peut supposer que ces moulins travaillent toute l'année huit heures par jour, en élevant un poids de 1000 livres à 218 pieds par minute.

XVI. Si l'on vouloit comparer la quantité d'effet de notre moulin avec celle que pourroient produire des hommes ; l'on trouveroit, d'après M. D. Bernoulli, *tome VIII du Recueil des Prix, sur les moyens de suppléer à la mer à l'action du vent*, qu'un homme, employant les forces, de la manière la plus commode, ne peut élever, en travaillant huit heures par jour, qu'un poids de 60 livres à 1 pied par seconde ; ce qui donne 1,728,000, élevé à 1 pied pour l'effet

Mém. 1781.

K

pour l'homme.

journalier, ce qui revient pour huit heures de travail par jour, à un poids de 1000 livres élevé à 3 pieds $\frac{6}{10}$ par minute ; & comme nous venons de trouver, que notre moulin, en travaillant huit heures par jour, élève un poids de 1000 livres à 218 pieds dans une minute, son effet équivaut au travail journalier de soixante-un hommes.

XVII. Nous avons suivi dans l'évaluation qui précède, pour le travail journalier des hommes, le résultat donné par M. D. Bernoulli ; nous croyons cependant que ce résultat seroit trop fort pour des hommes qui travailleroient plusieurs jours de suite. Voici une expérience que l'on fera souvent à même de répéter, & qui peut, ce me semble, fixer d'une manière assez précise, le travail journalier des hommes, au moins lorsqu'ils agissent en sonnant comme dans la plupart des pompes.

Lorsque l'on bat les pilots, à force de bras, avec les machines nommées *sonnettes*, l'on se sert le plus généralement d'une corde qui passe sur une grande roue, & qui soutient d'un côté un poids que l'on nomme *mouton*. De l'autre côté sont attachés plusieurs cordons, que des hommes tirent pour élever le mouton : les frottemens sont ici presque nuls, & toute l'action des hommes est employée à élever le mouton. Le mouton pèse de 6 jusqu'à 800 livres : l'on y emploie un nombre d'hommes, à raison de 40 livres par homme. A chaque percussion, le mouton s'élève de 4 pieds ; il bat 20 coups par minute, & 100 coups de suite ; après quoi les hommes se reposent cinq minutes, c'est-à-dire autant de temps qu'ils ont travaillé : ce travail dure ordinairement douze heures, sur lesquelles il y auroit six heures de travail effectif ; mais le temps qu'il faut pour déplacer la sonnette, redresser & présenter le pilot, réduisent le plus souvent ce temps à cinq heures de travail effectif ; ce qui donne pour chaque seconde de travail un poids de 53 livres $\frac{1}{3}$ élevé à 1 pied, & seulement cinq heures de travail par jour ; ainsi, l'effet journalier est 960,000 livres, élevé à 1 pied, ce qui n'est guère que la moitié de 1,728,000 livres élevé à 1 pied.

résumé de M. D. Bernoulli. Cependant les hommes les plus vigoureux & du meilleur tempérament, peuvent à peine soutenir un pareil travail, cinq mois de suite, sans que leur santé n'en paroisse très-altérée.

Il paroît cependant que des hommes très-vigoureux qui ne seroient destinés qu'à travailler un ou deux jours, pourroient, sans danger, produire l'effet prescrit par M. Bernoulli, & peut-être même un effet plus grand; mais nous croyons son estimation trop forte pour un travail de plusieurs mois. D'ailleurs, il reste à constater, si, comme le veulent M.^{rs} Desaguilliers & Bernoulli, les hommes produisent le même effet journalier dans tous les genres d'action. J'ai de fortes raisons pour croire qu'un homme qui élève son centre de gravité, en montant un escalier, peut fournir, à fatigue égale, une plus grande quantité d'action que dans tous les autres genres de mouvement; au moins est-il certain que nous montons naturellement les escaliers de nos maisons, à raison de quarante-deux pieds à peu-près de hauteur par minute; ainsi, un homme pesant 150 livres, produit dans ce genre de mouvement, un effet équivalent à 105 livres, élevé à un pied par seconde; s'il pouvoit soutenir ce degré d'action cinq heures par jour, son effet journalier seroit un poids de 1,890,000 livres, élevé à un pied, effet double de celui des hommes qui battent les pilotes en sonnant: mais quoique des femmes assez foibles, montent ordinairement les escaliers de leur maison, à raison de quarante-deux pieds par minute, peut-être que l'homme le plus vigoureux auroit de la peine à soutenir un pareil travail tous les jours pendant cinq heures; j'avoue que lorsque j'ai voulu monter l'escalier d'un clocher, à raison de quarante-deux pieds de hauteur par minute; au bout de quatre ou cinq minutes il falloit m'arrêter, & j'étois hors d'haleine: mais aussi si l'on ne veut continuer ce genre d'action que pendant quelques momens, l'on pourra produire un effet, sans nulle comparaison, plus considérable que dans toutes les autres manières d'appliquer ses forces. Nous avons plusieurs fois éprouvé avec M. le chevalier de Borda, Membre de

l'Académie, qu'un homme pesant cent cinquante livres, pou-
voit, en montant un escalier, s'élever pendant 15 ou 20
secondes, à raison de trois pieds par seconde, ce qui équivaut
à quatre cents cinquante livres, élevé à un pied par seconde;
effet huit fois & demi plus considérable que celui de l'homme
qui bat les pilots en sonnant.

Il résulte de ces observations, que ce ne sera qu'en faisant
travailler les hommes pendant plusieurs mois, que l'on pourra
espérer d'avoir une estimation approchée de leur travail jour-
nalier, & que tous les résultats fondés sur des expériences
particulières qui ont duré quelques heures, ne peuvent abso-
lument rien nous apprendre.

Dans les essais ordinaires pour apprécier le degré de per-
fection d'une machine, & où les forces des hommes sont
appliquées en sonnant ou en faisant tourner une manivelle;
essais où l'on fait rarement travailler les hommes plus d'une
demi-heure; l'effet ordinaire que produit chaque homme, est
souvent d'un poids de plus de cent livres, élevé à un pied
par seconde. Mais cet effet qui varie, suivant le degré de
vigueur & de volonté des hommes, que l'on emploie à ces
expériences, ne peut certainement pas suffire pour comparer
d'une manière précise une machine avec une autre.

XVIII. D'après toutes les expériences détaillées dans le
commencement de ce Mémoire, il seroit facile de déterminer
la quantité d'eau que notre moulin pourroit fournir à une
hauteur donnée: en voici un exemple; le poids du pied cube
d'eau est de soixante-dix livres, le ponce d'eau est de quatorze
pintes ou vingt-sept livres, qui s'écoulent pendant une minute;
si l'on supposoit qu'il fallût élever l'eau à cent pieds, comme
notre moulin élève (suivant la troisième expérience, articles
IX & XIV), un poids de mille livres à deux cents dix-huit
pieds par minute, ce qui équivaut à un poids de deux mille
cent quatre-vingts livres, élevé à cent pieds, nous trouverons
que notre moulin pourroit élever quatre-vingt-un ponces d'eau
à cent pieds de hauteur; & comme il ne peut travailler qu'un
tiers de l'année avec ce degré d'action, il ne fourniroit, d'un

mouvement continu, que vingt-sept pouces d'eau.

XIX. Il ne nous reste pour déterminer cette Section, que de chercher, d'après les expériences qui précèdent, quelle est la partie de l'effet perdu, soit par le choc des mentonnets & des levées, soit par le frottement.

LEMME I.

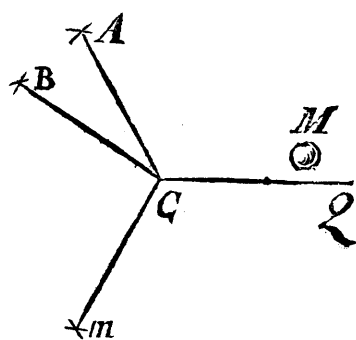
XX. L'effet d'une machine dans laquelle il n'y a ni choc ni frottement, est toujours proportionnel à la quantité de force vive dépensée par l'agent qui a produit cet effet. Cette proposition a déjà été démontrée par M. D. Bernoulli, 9.^e *Question de son Hydrodynamique, & tome VIII des Pièces couronnées par l'Académie, dans les recherches du même Auteur, sur les moyens de suppléer à la mer à l'action du vent.*

En effet, une machine quelconque qui se meut d'un mouvement continu, ou prend un mouvement uniforme, ou prend un mouvement tel, que la vitesse augmentant pendant un certain temps, elle diminue ensuite; en sorte qu'au bout d'une ou de plusieurs révolutions, elle revient au même degré de mouvement; ainsi, si ϕ est la force qui agit sur chaque point d'un système, dx l'espace parcouru par ce point; P un poids élevé de la hauteur dz pendant le temps dt ; l'on aura par les principes de Mécanique, lorsque la vitesse sera revenue au même degré qu'au point choisi pour le point de départ; $\int \phi dx = Pz$, cette quantité intégrée de manière que x & z représentent les espaces parcourus dans le temps d'une révolution entière: or $\int \phi dx$ est pour lors la quantité de force vive dépensée, Pz est la quantité d'effet produit par la machine, puisque c'est le produit du poids élevé par la hauteur auquel il est élevé. Ce qui démontre le lemme proposé.

LEMME II.

XXI. Si un système de corps ABm est en mouvement autour d'un axe C , & qu'un levier CQ , lié à ce système, rencontre au point de contact Q une masse M ; en vertu de ce choc, il y aura une perte de force vive, qu'il faut déterminer.

Soit $CQ \dots a$, soit u la vitesse qui répond au point Q avant le choc, soit u' la vitesse qui répond à ce même point après le choc; l , la distance d'un point quelconque m au centre C . $\frac{ul}{a}$ fera la vitesse de rotation du point m autour de C avant le choc, $\frac{u'l}{a}$ fera la vitesse du même



point après le choc. Mais comme en vertu du principe de réaction, la quantité de *momentum* est la même avant & après le choc. L'on aura

$$u \int \frac{ml^2}{a} = (Ma + \int \frac{ml^2}{a}) u',$$

d'où résulte $u' = u \int \frac{ml^2}{a^2} : (M + \int \frac{ml^2}{a^2})$; actuellement la force vive avant le choc est $\int \frac{mu^2 \cdot l^2}{a^2 \cdot 2g}$; la force vive après

$$\text{le choc est } \dots \frac{Mu'^2}{2g} + \int \frac{mu'^2 l^2}{2g \cdot a^2} = \frac{u^2 (\int \frac{ml^2}{a^2})^2}{2g (M + \int \frac{ml^2}{a^2})}.$$

Ainsi, la quantité de force vive, perdue par le choc, sera

$$\frac{\frac{u^2}{2g} M \int \frac{ml^2}{a^2}}{M + \int \frac{ml^2}{a^2}}, \text{ \& dans le cas où } \int \frac{ml^2}{a^2} \text{ est beaucoup}$$

plus grand que M , la perte de la force vive dépendante du choc, sera $\frac{u^2}{2g} M$.

Remarque. Si les points de contact étoient doués d'une élasticité parfaite, il n'y auroit aucune perte de force vive, & cette perte est d'autant moindre que l'élasticité augmente. Mais dans la plupart des cas de pratique, il paroît que l'élasticité est peu considérable; l'expérience apprend en effet qu'un mouton de bois pesant 6 ou 7 cents livres, tombant de 4 pieds de hauteur, n'a que 2 ou 3 pouces de resaut.

XXII. Appliquons le lemme qui précède, à la quantité d'effet perdue par le choc des mentonnets & des levées de nos moulins à vent. Nous verrons d'abord, que a exprime ici la distance de l'axe de rotation au point de contact du hériffon & du mentonnet des pilons, distance qui n'est que de 21 pouces; que l représente la distance des différens points des ailes & de l'arbre de rotation à l'axe de rotation; & que $S \frac{m l^2}{a^2}$ doit être beaucoup plus grand que M , parce que le

poids des ailes & de l'arbre de rotation passe 8000 livres, tandis que M poids d'un pilon n'est que de 1020 livres. Ainsi l'on pourra se servir dans la pratique pour déterminer la quantité de force vive perdue par le choc de l'expression $M \frac{u^2}{2g}$.

Or, nous avons vu dans la troisième expérience, que lorsque le vent avoit une vitesse moyenne de 20 pieds dans une seconde, les ailes du moulin faisoient 13 tours dans une minute, ainsi le point de contact du hériffon & du mentonnet qui est à 21 pouces de distance de l'axe de rotation, aura 28 pouces 7 lignes de vitesse par seconde, vitesse due à une chute de 1 pied 1 ligne $\frac{1}{2}$; ainsi la quantité de force vive perdue par le système à chaque choc, sera telle que si elle avoit été employée utilement, chaque pilon auroit été élevé de 1 pouce 1 ligne $\frac{1}{2}$ de plus, ce qui donneroit pour 1 minute, un poids de 1000 livres, élevé à 16 pieds $\frac{1}{2}$.

XXIII. Il ne reste qu'à déterminer la quantité de force vive que le frottement fait perdre. Voici ce que l'expérience m'a appris : un jour très-calme, ayant fait relever tous les pilons, en sorte que l'arbre pouvoit se mouvoir librement, & que les appuis n'étoient chargés que du poids de l'arbre & des ailes, l'on a disposé le moulin de manière que les deux ailes opposées étoient horizontales, & attachant différens poids à l'extrémité des ailes, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, l'on a trouvé qu'en imprimant un mouvement insensible, il falloit pour que le mouvement fût continu, un poids de 5 livres à 38 pieds de distance de l'axe de rotation.

Comme le poids des ailes & de l'arbre est à peu-près de 8000 livres, & que par la distribution des levées & des mentonnets, dans le mouvement de la machine, l'arbre est toujours chargé, en soulevant les pilons moyennement de 1500 livres, l'on peut estimer, par approximation, le *momentum* total du frottement, lorsque la machine soulève tous les pilons sur le pied de 6 livres, multiplié par 38 pieds. La vitesse de ce poids seroit, lorsque le vent parcourt 20 pieds dans une seconde, de 52 pieds par seconde, vitesse dûe à une chute de 45 pieds. Ainsi la force vive consommée pendant une minute, seroit équivalente à un poids de 1000 livres élevé à 18 pouces $\frac{1}{2}$.

R É S U L T A T.

XXIV. Nous avons trouvé, par l'expérience, que notre moulin avec un vent de 20 pieds par seconde, produit un effet équivalent à un poids de 1000 livres élevé par minute, à 218 pieds..... 1000×218 ^{pieds.}

Nous trouvons que les différens chocs des mentonnets & des levées, produisent, pour un poids de 1000 liv.

une perte d'action égale à $1000 \times 16 \frac{1}{2}$

Et que le frottement produit une perte d'action pour un même poids

de 1000 livres, égal $1000 \times 18 \frac{1}{2}$

Ainsi la quantité totale d'action employée par le vent pour mouvoir

la machine, fera de 1000 ^{livres.} $253,0$ ^{pieds.}

C'est-à-dire que la quantité d'action consommée par le vent, équivaut à un poids de 1000 livres, élevé à 253 pieds par minute; d'où il résulte, que la quantité d'effet perdu, soit par le choc des mentonnets & des levées, soit par le frottement, est le sixième à peu-près de l'effet effectif.

XXV. Les deuxième, troisième & quatrième Expériences indiquent la quantité d'effets que les Conducteurs d'huiles font dans l'usage de faire produire suivant les

les différens degrés du vent ; il peut être intéressant de connoître, d'après la pratique, quel est le rapport entre la vitesse de l'aile & celle du vent.

Dans la deuxième Expérience, nous trouvons que lorsque le vent parcourt 13 pieds par seconde, les moulins font 8 tours par minute, ce qui donne le rapport $\frac{13}{8} \dots 1,62$.

Dans la troisième Expérience, le vent a 20 pieds de vitesse par seconde, les moulins font 13 tours par minute, ce qui donne le rapport $\frac{20}{13} \dots \dots \dots 1,54$.

Dans la quatrième Expérience, le vent parcourt 28 pieds par seconde, les moulins font 17 tours par minute, ce qui donne le rapport $\frac{28}{17} \dots \dots \dots 1,64$.

Ce qui donne ce résultat curieux, c'est que dans la pratique, quelle que soit la vitesse du vent, les Conducteurs de ces moulins font dans l'usage de disposer la machine, de manière que le rapport entre la vitesse du vent & celle de l'aile, soit une quantité constante.

XXVII. Terminons cette première section de mon Mémoire, par une réflexion qui paroît mériter quelque attention ; c'est que nous croyons qu'il seroit à désirer, pour la perfection de la Mécanique & des Arts, que l'on réunît dans un corps d'Ouvrage, une description, avec figures, des meilleures machines exécutées en Europe. L'on joindroit à cette description des expériences faites sur les lieux, dans le genre de celles que nous venons de rapporter pour les moulins à vent, mais plus nombreuses & plus circonstanciées ; l'on compareroit, au moyen de ces expériences, la quantité d'effet que chaque machine produit, avec la quantité d'action qu'elle consomme, ce qui est la seule balance pour en déterminer le degré de perfection. L'on auroit par ce moyen une mesure exacte, pour apprécier par les faits toutes ces prétendues inventions, dont les Auteurs, sans la moindre connoissance des principes de Mécanique, fatiguent les Académies & l'Administration, pour obtenir le privilège de ruiner quelques Particuliers.

