

# ANNALES

DES

## TRAVAUX PUBLICS.

---

CHEMINS DE FER.

---

### RAPPORT

ADRESSÉ À M. LE MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS, SUR LE CHEMIN DE FER ATMOSPHÉRIQUE DE KINGSTOWN A DALKEY ; PAR MM. H. MAUS , INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES, ET ALF. BELPAIRE, SOUS-INGÉNIEUR MÉCANICIEN.

MONSIEUR LE MINISTRE,

Nous avons eu l'honneur, à notre retour de Dublin, de vous rendre un compte verbal de la mission que, sur la proposition de M. l'inspecteur général des ponts et chaussées, vous avez bien voulu nous donner, en nous chargeant d'aller étudier le chemin de fer atmosphérique établi entre Kingstown et Dalkey. Nous satisfaisons aujourd'hui au vœu de votre arrêté, en vous adressant le rapport sur les résultats de notre examen de l'appareil de MM. Clegg et Samuda.

Un système de traction annoncé comme devant réduire considérablement les frais d'établissement et les dépenses d'exploitation des chemins de fer, ne pouvait être indifférent à la Belgique.

Pénétrés de l'importance d'une étude destinée à perfectionner un système de communication regardé, avec raison,

comme l'un des plus grands progrès de ces derniers temps, nous nous sommes appliqués à recueillir des données positives, destinées à devenir la base d'une opinion éclairée sur cette invention.

Dès notre arrivée en Angleterre, nous nous sommes procuré les divers ouvrages publiés sur le chemin atmosphérique, à la lecture desquels nous avons consacré nos soirées, en réservant les journées aux observations, dans l'espoir de terminer notre rapport assez tôt pour vous le remettre à notre retour; mais nous n'avons pas tardé à reconnaître que la théorie de la nouvelle invention n'était point encore complète, malgré les savants mémoires que nous avons consultés, et parmi lesquels nous devons citer les mémoires de MM. Barlow et Bergin. Les études que nous avons entreprises depuis pour résoudre le problème qui nous occupait, retardées par nos occupations de service et interrompues par le changement de résidence et de fonctions de l'un de nous, ont occasionné le retard qu'a subi l'envoi de notre travail.

Le nom de chemin atmosphérique a fait croire à beaucoup de personnes que, dans ce nouveau système de traction, l'atmosphère était le principe moteur et allait pousser les wagons, sur le chemin de fer, avec aussi peu de frais que les navires sur les mers.

Cette opinion, en quelque sorte justifiée par l'annonce d'une économie prodigieuse, n'est malheureusement pas exacte; car l'air ne joue, dans le nouveau système de traction, qu'un rôle secondaire, celui de transmettre aux voitures le mouvement des machines à vapeur, qu'il faut employer comme dans le système stationnaire en usage.

Au lieu d'enrouler un câble, il faut aspirer une colonne d'air: telle est, en résumé, la différence entre le système des machines fixes ordinaires et celui que proposent MM. Clegg et Samuda.

Les questions auxquelles donne lieu l'examen du nouveau système, peuvent se résumer de la manière suivante :

1° Les machines fixes munies de l'appareil de MM. Clegg et Samuda, sont-elles d'un emploi plus avantageux que les machines fixes à câbles?

2° Les avantages obtenus promettent-ils d'étendre plus qu'on ne l'a fait jusqu'aujourd'hui, l'usage des machines fixes, généralement réservées pour les chemins de fer très-inclinés ou de peu d'étendue et destinés à un mouvement commercial important?

Le travail que nous avons entrepris pour résoudre ces questions comprend :

1° La description du chemin de Kingstown à Dalkey ;

2° La relation des expériences (a) sur la force de la machine ; (b) la marche ascendante et décroissante du mercure dans le manomètre ; (c) la charge et la vitesse des convois remorqués ;

3° L'examen théorique du système atmosphérique, la recherche de l'influence qu'exerce l'espace intermédiaire entre la pompe pneumatique et le tube pneumatique ;

4° L'analyse des résultats observés, entreprise dans le but d'obtenir les données nécessaires pour calculer les résultats que l'on pouvait espérer, dans des circonstances autres que celles du système existant ;

5° Le tableau de l'effet utile de la machine de Dalkey, appliquée à des longueurs de 4 à 5<sup>k</sup> ; le *maximum* de charge et la vitesse correspondante à ces diverses longueurs ;

6° Expériences sur l'une des machines de Liège ; analyse des résultats, et calcul de ce qu'ils deviendraient avec des vitesses et des longueurs différentes ;

7° Parallèle entre les résultats fournis par les deux systèmes ;

8° Examen comparatif des frais d'établissement et d'exploitation par le système atmosphérique et par câbles ;

9° Examen des chances d'accident ;

10° Récapitulation des résultats, et conclusions en faveur des câbles, pour les applications que réclame la circulation actuelle sur les chemins de fer.

## I. — DESCRIPTION DU CHEMIN DE KINGSTOWN A DALKEY.

Le chemin de Kingstown à Dalkey, construit, comme essai du système de MM. Clegg et Samuda, par la compagnie du chemin de Kingstown à Dublin, avec subside du gouvernement anglais, est établi le long de l'ancien Tram-road, qui servait et sert encore à conduire les blocs de granit exploités à Dalkey et employés à former les grandes jetées du port de Kingstown.

Ce chemin, qui forme le prolongement du chemin de Dublin à Kingstown, part de la station de cette dernière ville, située près du port, traverse en déblai le terre-plein des quais, se maintient en tranchée jusqu'au village de Dalkey, où il atteint le terrain naturel.

*Péage non autorisé.* — Les communications existantes sont conservées au moyen de onze ponts, dont le premier a une longueur de 90 mètres, mais doit être porté à 250 mètres pour satisfaire l'amirauté, qui veut maintenir l'accès du port dans le même état qu'avant l'établissement du chemin de fer. Le recouvrement du chemin sur une telle longueur, formé de fermes et de plateaux en fonte, exige une dépense que la compagnie espérait éviter, et la difficulté qui s'est élevée à ce sujet, a retardé l'autorisation nécessaire pour percevoir le péage fixé par l'acte de concession ; de sorte que la compagnie faisait, pendant notre séjour, circuler les voitures à titre d'essai, sans pouvoir opérer de rétribution de la part des personnes qui profitaient de ce service, déjà organisé d'une manière régulière.

*Profil.* — Ce chemin présente, à partir de Kingstown, le profil suivant : une pente d'environ 0<sup>m</sup>004, qui produit le double résultat de favoriser au départ et de ralentir à l'arrivée le mouvement des convois ; à cette pente succède d'abord une rampe continue, d'une inclinaison variable entre 0<sup>m</sup>004 et

0<sup>m</sup>040, et environ 0<sup>m</sup>007 en moyenne, puis une rampe finale, d'une inclinaison de 0<sup>m</sup>017.

La première pente de 0<sup>m</sup>004, depuis l'extrémité de la plateforme qui borde le chemin dans la station, présente un développement de . . . . . 265<sup>m</sup>00

La première rampe de 0<sup>m</sup>004 à 0<sup>m</sup>040, a . . . . . 2195 00

La deuxième, jusqu'à l'extrémité du hangar sous lequel s'arrêtent les voitures, a une longueur de. . . . . 330 00

de sorte que le chemin présente un développement total de . . . . . 2,790<sup>m</sup>00

*Tracé.* — Le tracé du chemin, excepté quelques alignements dont le plus long a environ 600 mètres, se compose d'une suite de courbes dont les rayons varient et descendent jusqu'à 243<sup>m</sup>, 177<sup>m</sup> et même 174<sup>m</sup>.

*Ouvrages d'art.* — Établis comme spécimen de chemin de fer économique, les ouvrages sont construits sur les moindres dimensions. C'est ainsi que la distance entre les pieds-droits des viaducs est de 3<sup>m</sup>57, bien que les voitures aient une largeur de 2<sup>m</sup>30. La voie n'étant point placée au milieu, il ne reste, d'un côté, que 0<sup>m</sup>40 et, de l'autre, que 0<sup>m</sup>67 de vide entre les voitures et les murs, ce qui nous paraît insuffisant, tant pour la sécurité des voyageurs, qui pourraient payer de leur tête un moment de curiosité, que pour le passage d'une quantité d'objets volumineux, dont le transport serait exclu des chemins de fer.

La hauteur sous les ponts, depuis la surface supérieure des rails jusque sous les fermes en bois ou en fonte, est de 2<sup>m</sup>60.

*Voie.* — La voie a la largeur ordinaire de 1<sup>m</sup>50, d'axe en axe des rails.

Les rails sont les mêmes que ceux du chemin de Dublin et pèsent 23<sup>k</sup>30 par mètre courant; ils sont maintenus par des coussinets fixés, à l'aide de vis, sur des longrines longitudina-

les. Comme sur le chemin de Dublin, on introduit, entre les rails et la longrine, une pièce de bois comprimée qui procure au rail un support continu.

Dans les courbes, le rail extérieur est, comme d'ordinaire, plus élevé que le rail intérieur; cette surélévation va jusqu'à 0<sup>m</sup>127 pour la courbe de 173 de rayon, et, dans le but de prévenir des déraillements, qui sont à craindre dans les courbes raides parcourues avec une grande vitesse, on a eu soin de garnir le rail intérieur d'un entre-rail, formé d'un rail ordinaire, établi à côté du premier, dont il est éloigné de 0<sup>m</sup>054 et plus élevé de 0<sup>m</sup>025.

*Tube pneumatique.* — Placé au milieu de la voie, le tuyau ou *tube pneumatique*, dans lequel le piston voyage sous l'action d'une différence de tension entre l'atmosphère et l'air qu'il contient, a une longueur de 2,182<sup>m</sup>, part d'un point situé à 95<sup>m</sup> de l'origine du chemin indiqué ci-dessus, et se termine à 183<sup>m</sup>, avant d'atteindre la rampe de 0<sup>m</sup>017, que les voitures doivent franchir par la vitesse acquise; à 41<sup>m</sup> en deçà de son extrémité, le tube reçoit l'embranchement d'un tuyau de même diamètre, et d'environ 428<sup>m</sup> de long, qui le met en communication avec la pompe pneumatique.

Le tube pneumatique se compose de portions cylindriques ayant un diamètre de 0<sup>m</sup>38, une épaisseur uniforme de 0<sup>m</sup>015, et une longueur de 2<sup>m</sup>87, y compris l'emboîtement qui se fait sur 0<sup>m</sup>12 et réduit ainsi à 2<sup>m</sup>75 la longueur utile de chaque pièce.

Coulé d'abord sans rainure, chaque tube a été ensuite placé sur la machine à raboter, pour pratiquer une entaille longitudinale de 0<sup>m</sup>06 de largeur, destinée à livrer passage au bras de la tige du *piston-remorqueur*. Pour rendre au tube la force que lui enlève la rainure, il est garni extérieurement, et perpendiculairement à son axe, de 4 nervures, que l'on peut se représenter par 4 disques circulaires de 0<sup>m</sup>016 d'épaisseur, 0<sup>m</sup>60 de diamètre, séparés de 0<sup>m</sup>875, de milieu en milieu, et pénétrés d'une manière excentrique par le tube, de façon à

présenter une saillie *minima* de 0<sup>m</sup>03, et, *maxima*, de 0<sup>m</sup>16.

Chaque portion de tube porte, en outre, 4 brides ou pattes, qui servent à la fixer sur les billes, lesquelles, comme nous l'avons dit, servent de support et de lien aux longrines sur lesquelles sont fixés les coussinets des rails; ces pattes, tangentes à la surface inférieure du tube, ont 0<sup>m</sup>51 de longueur, 0<sup>m</sup>13 de largeur et 0<sup>m</sup>025 d'épaisseur, et font corps avec chacune des nervures qui viennent d'être indiquées.

Le tube est, en outre, muni de deux petites nervures parallèles et placées de chaque côté, et à 0<sup>m</sup>03 de la rainure longitudinale; l'une sert à fixer au tube la partie du cuir du clapet qui fait charnière, l'autre forme une sorte de rigole destinée à recevoir la composition qui doit prévenir les rentrées d'air dans le tube.

Le tube n'a pas été alésé, mais enduit d'une couche de graisse appliquée à chaud.

*Clapet.* — Le clapet est formé de deux bandes de cuir superposées, ayant ensemble 0<sup>m</sup>04 d'épaisseur; le cuir recouvre la rainure, qu'il déborde de 0<sup>m</sup>04 d'un côté, et de 0<sup>m</sup>03 de l'autre, pour être replié d'équerre et s'appliquer verticalement contre l'une des nervures longitudinales indiquées ci-dessus, puis est fortement serré par une lame de fer qui est soumise à l'action de deux systèmes de boulons à écrous, dont les uns la rapprochent de la nervure, tandis que les autres, munis d'œillets traversés par les premiers boulons, compriment le cuir contre le bord horizontal de la rainure. Chaque portion de tube porte sept boulons de chacun de ces systèmes.

Afin de donner au cuir la force nécessaire pour résister à la pression atmosphérique, en lui conservant la souplesse convenable pour ne pas découvrir la rainure en avant du piston-remorqueur, il est compris entre deux systèmes de plaques en tôle de fer, d'environ 0<sup>m</sup>30 de longueur, laissant entre elles des espaces de 0<sup>m</sup>003 à 0<sup>m</sup>004, qui se correspondant au-dessus et au-dessous, permettent au clapet de pren-

dre une courbure suivant la longueur du tube. Ces plaques sont maintenues au moyen de rivets en cuivre, qui traversent les deux tôles et le cuir.

Les tôles inférieures pénètrent dans l'intérieur de la rainure, sont terminées par une surface cylindrique concentrique avec celle du tube, et remplacent exactement la portion du tube enlevée.

Les tôles superposées au cuir ont une largeur de 0<sup>m</sup>08, et débordent par conséquent la rainure de 0<sup>m</sup>04 de chaque côté. Le bord longitudinal des tôles, opposé à la charnière du clapet, est retourné en équerre, afin de compléter, avec la nervure longitudinale voisine, la rigole destinée à recevoir une composition d'huile et de cire propre à prévenir le passage de l'air.

*Soupapes d'admission et de sortie.* — Les extrémités du tube pneumatique sont garnies de soupapes, dont l'une, située au point de départ, et désignée par *soupape d'admission*, doit s'ouvrir pour introduire le piston; l'autre est la *soupape de sortie*, qui doit permettre au piston de sortir du tube.

La *soupape d'admission* devant s'ouvrir pour introduire le piston lorsque le vide est déjà fait dans le tube, il fallait trouver le moyen :

1° D'empêcher l'air de rentrer pendant que l'on introduisait le piston;

2° De contre-balancer la pression atmosphérique, afin de diminuer l'effort à exercer pour ouvrir la soupape.

MM. Clegg et Samuda ont atteint ce double but de la manière la plus heureuse : d'abord, en prolongeant le tube au delà de la soupape, de sorte que le piston ferme le tube avant d'atteindre la soupape, que l'on peut par conséquent ouvrir, sans introduire d'autre air que celui qui occupe la portion de tube comprise entre le piston et la soupape; ensuite, en employant une seconde soupape, fixée à l'arbre de la première, mais faisant avec elle un angle de 90°; cette seconde soupape se meut dans un espace fermé, que l'on peut

mettre à volonté en communication, soit avec l'atmosphère, soit avec l'air dilaté du tube; dans le premier cas, la pression atmosphérique agit sur l'une des faces de la soupape du tube, et sur les deux faces de la soupape additionnelle, fermée par la différence de tension qui existe entre l'air extérieur et l'air du tube; mais si l'espace derrière la soupape additionnelle communique avec l'air du tube, une de ses faces seulement sera pressée par l'atmosphère, l'autre le sera par l'air dilaté, de sorte qu'elle tendra à s'ouvrir avec un effort précisément égal à celui qui tend à fermer la soupape du tube : ces deux efforts se faisant équilibre permettent donc d'ouvrir la soupape sans difficulté.

La *soupape de sortie* est simplement un morceau de tôle, garni, à sa circonférence, d'une bande de cuir qui s'applique contre le bord du tube, et qui peut se mouvoir autour d'une charnière fixée à la partie inférieure de ce tube, de manière à en découvrir entièrement l'orifice, lorsqu'elle est rabattue sur le sol.

C'est pour prévenir le choc du piston-remorqueur contre cette soupape, qu'on a eu soin d'adapter le tuyau de communication à 11<sup>m</sup> de l'extrémité du tube pneumatique. En effet, l'air compris entre la soupape et le piston, lorsque celui-ci a dépassé le tuyau de communication, ne trouvant pas d'issue, se comprime et acquiert bientôt une tension égale ou supérieure à celle de l'atmosphère, de sorte que la soupape s'ouvre avant le passage du piston remorqueur.

*Tuyau de communication.* — Le *tuyau de communication* s'étend à côté de la voie, sur la rampe que les voitures parcourent par l'impulsion acquise, et aboutit, dans la station de Dalkey, à la pompe pneumatique, établie dans le même bâtiment que la machine à vapeur dont elle reçoit le mouvement.

Dans le but de conserver le vide dans le tuyau de communication après le passage du piston remorqueur, on a établi, près de sa jonction avec le tube pneumatique, une soupape qui se ferme par une pédale sur laquelle appuie la roue de la

première voiture du convoi, c'est-à-dire, un peu avant que le piston ait dépassé l'orifice du tuyau.

*Piston-remorqueur et voiture.* — Le piston-remorqueur se compose de deux disques en fonte, d'un rayon plus petit que celui du tube d'environ 0<sup>m</sup>04 ; cet intervalle est rempli par une garniture en cuir entourant chacun des deux disques, qui sont distants de 0<sup>m</sup>65 et forment, en réalité, deux pistons distincts, mais rapprochés.

Le piston devant toujours être en avant du point où le clapet commence à découvrir la rainure, est fixé à l'extrémité d'une tige horizontale de 6<sup>m</sup> de long, dont l'extrémité opposée porte un contre-poids, qui la maintient en équilibre autour d'un point placé à 2<sup>m</sup>50 du piston, et auquel vient s'articuler la pièce de fer attachée à la première voiture ; cette pièce en fer est aplatie, et pliée de manière à pénétrer facilement dans le tube, lorsque le clapet s'ouvre sous un angle de 45°. La tige du piston porte plusieurs galets qui soulèvent graduellement le clapet, de manière à lui faire prendre une inclinaison de 45° vis-à-vis de la pièce d'attache ; les galets sont disposés de manière que leur plan soit, au point de contact, perpendiculaire au clapet, qui décrit une surface gauche sur la longueur comprise entre l'attache et l'endroit où il commence à être soulevé.

La pièce d'attache portée par la première voiture du convoi, spécialement affectée au service du piston et du clapet, est adaptée à l'aide de deux fortes charnières, qui permettent de lui faire décrire un arc de cercle d'une amplitude telle que le piston puisse être maintenu, hors du tube, dans une position convenable pour ne pas toucher les nervures de ce tube, lorsque le convoi doit descendre de Dalkey à Kingstown.

Pour refermer convenablement le clapet après le passage du piston, on a monté, sur le derrière de cette voiture, un appareil composé d'une roue qui presse sur le clapet, et d'un polissoir chaud, qui amolit la composition imperméable et la fait pénétrer dans le joint longitudinal du clapet.

Ce polissoir, composé d'un cylindre en tôle, chauffé à l'aide du charbon de bois incandescent qu'il contient, est garni inférieurement d'une nervure longitudinale, semblable à un fer de patin, qui appuie sur la composition placée dans la rainure dont nous avons parlé, et située entre le bord extérieur du clapet et l'un des rebords longitudinaux du tube.

Cette voiture porte, en outre, un manomètre communiquant, d'une part, avec l'atmosphère, et, de l'autre, avec l'intérieur du tube, à l'aide d'un petit tuyau en cuivre, qui s'étend le long de la tige du piston, qu'il traverse pour déboucher dans l'espace occupé par l'air dilaté.

*Pompe pneumatique.* — La pompe pneumatique est à double effet; le cylindre a 4<sup>m</sup>70 de diamètre, et le piston une course de 4<sup>m</sup>68; il s'approche du fond et du couvercle du cylindre, au point de ne laisser que 0<sup>m</sup>003 de jeu aux extrémités de sa course. La tige du piston, guidée par un mouvement parallèle, s'articule sur une bielle, qui reçoit le mouvement d'une manivelle montée à l'extrémité d'un arbre moteur, qui, à son autre extrémité, porte une manivelle semblable et égale à la première; cette seconde manivelle reçoit le mouvement d'une bielle articulée sur la tige du piston du cylindre à vapeur. Les deux manivelles sont placées dans un même plan et symétriquement, de sorte que la bielle et le piston de la pompe pneumatique font contre-poids à la bielle et au piston de la machine à vapeur.

Les soupapes, ou clapets d'admission d'air dans la pompe pneumatique, sont équilibrées de manière à n'exiger qu'un assez petit effort pour être soulevées.

Le mouvement des soupapes ou clapets extérieurs de la pompe pneumatique, est régularisé par un petit appareil, composé d'un piston de 0<sup>m</sup>15 de diamètre, jouant dans un petit cylindre, monté sur le couvercle de la pompe pneumatique; il est ouvert par sa base inférieure, et la base supérieure est munie d'une soupape s'ouvrant de dehors en

dedans, de sorte que le clapet de la pompe, en s'ouvrant, comprime l'air contenu dans le petit cylindre, et éprouve une résistance qui croît à mesure qu'elle s'ouvre, et s'arrête sans choc. Le clapet de la pompe, en se refermant, fait descendre le petit piston, qui dilate l'air derrière lui et fait rentrer dans le petit cylindre, par la soupape qui forme sa base supérieure, une nouvelle quantité d'air destinée à amortir de nouveau le choc que produirait, sans cet appareil, l'ouverture du clapet de la pompe pneumatique.

Pendant la marche ordinaire, le piston de la pompe pneumatique, pour ramener à la tension atmosphérique l'air dilaté que contient le tube pneumatique, rencontre une résistance qui dépend de la différence entre ces deux tensions; mais si, par suite d'accident, les clapets extérieurs restaient ouverts, loin d'éprouver une résistance, le piston recevrait de la pression atmosphérique une impulsion qui, ajoutée à celle de la machine motrice, pourrait produire de fâcheux résultats. On a donc eu recours à un petit appareil que le piston met en jeu lorsqu'il atteint les extrémités de sa course. Ce mécanisme consiste en un levier du premier genre, ayant deux bras très-inégaux; le premier se termine au-dessus d'un boulon alésé, qui traverse le couvercle du cylindre qu'il déborde intérieurement, afin d'être poussé verticalement lorsque le piston atteint l'extrémité de sa course; l'autre bras est prolongé au-dessus du clapet et vient le presser, lorsque le petit bras est soulevé par le boulon, cédant à l'action du piston.

*Machine à vapeur motrice.* — La machine à vapeur est à haute pression, détente et condensation; le cylindre a 0<sup>m</sup>864 de diamètre, et le piston la même course que le piston de la pompe pneumatique; la vapeur dans la chaudière a une tension absolue qui varie de 3 à 4 atmosphères.

Dans le but de régulariser le mouvement de la machine, malgré les grandes variations de résistance qu'elle éprouve et qui proviennent des différences de dilatation de l'air con-

tenu dans le tube pneumatique, on a donné au volant des dimensions considérables et employé un appareil dépendant du régulateur à force centrifuge, qui ferme la soupape d'admission, d'autant plus tôt que la machine marche plus vite; cet effet est produit de la manière suivante :

Une soupape d'admission de vapeur est supportée par une tige verticale, qui s'articule sur un levier horizontal fixé à un petit arbre horizontal, auquel s'adapte un second levier vertical, lequel porte une petite roue qui fait l'office de mentonnet et s'appuie sur une surface cylindrique à axe vertical, adaptée au collier du modérateur à force centrifuge; cette surface n'embrasse qu'une demi-circonférence et se termine inférieurement par une hélice et un petit arc de cercle;

Lorsque la petite roue ou mentonnet s'appuie contre la surface cylindrique, faisant l'office de came, elle soulève la tige verticale et maintient ouverte la soupape d'admission; qui retombe et se ferme aussitôt que la surface cylindrique, animée d'un mouvement de rotation, ne présente plus d'appui à la roue-mentonnet, ce qui arrive d'autant plus tôt que la force centrifuge, en écartant les sphères du modérateur, relève davantage la surface cylindrique, qui présente au mentonnet un parcours d'autant plus court, que le point de tangence est plus rapproché de sa limite inférieure.

*Manœuvre.* — Le tube pneumatique étant fermé, tant par le clapet que par les deux soupapes d'entrée et de sortie, et communiquant avec la pompe pneumatique, on met la machine en mouvement; l'air se dilate, et lorsque le manomètre placé à la station de départ indique une différence de tension convenable pour remorquer le convoi préparé, on fait avancer les voitures et pénétrer le piston dans le tube, on serre les freins, et l'on ouvre la soupape; au signal convenu, on lève les freins, et le convoi part. Favorisé par une pente initiale, il ne tarde pas à acquérir une vitesse qui est d'autant plus *grande* que la charge est plus *petite*; arrivé près de l'extrémité du tube, le piston-remorqueur ouvre, comme il a

été dit, la soupape de sortie, et le convoi parcourt, en ralentissant son mouvement, la rampe de 0<sup>m</sup>17 qui se termine à la station de Dalkey.

Pendant le trajet, la vitesse est modérée par l'action des freins ordinaires, que l'on fait agir principalement à l'entrée des courbes, mais seulement lorsque le convoi est animé d'une grande vitesse.

Immédiatement après l'arrivée du convoi, on déplace le piston, en le faisant tourner autour du point d'attache qui le fixe à la voiture, et on le maintient dans une position telle qu'il ne rentre pas dans le tube pneumatique.

Pour le retour à Kingstown, on lève les freins, et le convoi, abandonné à la gravité, acquiert, sur le plan-incliné de 0<sup>m</sup>017, une vitesse que l'inclinaison générale suffit pour lui conserver; il franchit sans peine la contre-pente qu'il rencontre avant d'atteindre la station de Kingstown, où il est arrêté par l'action des freins.

*Évaluation de l'effet dynamique dépensé par la machine.*—

Le système de transmission de mouvement dû à MM. Clegg et Samuda, présente cette circonstance particulière, que les effets dynamiques dépensés et réalisés ne se produisent pas en même temps; car la machine dilate d'abord l'air contenu dans le tube pneumatique avant le départ du convoi, qui ne se met en marche qu'au moment où le manomètre indique une pression, sur le piston-remorqueur, capable de l'entraîner.

Le travail de la machine motrice comprend donc deux périodes distinctes : pendant la première, elle dilate l'air du tube; pendant la seconde, elle épuise l'air dilaté, qui conserve une tension déterminée par la résistance du convoi.

Pour apprécier l'effet dynamique dépensé par la machine à vapeur, nous avons employé un indicateur de Watt, perfectionné par J. Macnaught de Glasgow; cet instrument fournit un tracé graphique de la tension de la vapeur dans le cylindre pendant la course du piston. Nous avons, à l'aide

d'une balance à ressort, vérifié l'exactitude de cet instrument, et nous n'avons trouvé que des différences assez petites pour être négligées.

Nous nous étions d'abord proposé de faire marcher la machine à des vitesses différentes, afin d'en déterminer le travail, soit pour entretenir des degrés de dilatation différents, soit pour passer d'un degré de dilatation à l'autre; mais nous avons bientôt dû renoncer à ce projet, parce que la machine ne pouvait marcher assez lentement sans s'arrêter. Le volant, en effet, n'étant animé que d'une vitesse très-faible, ne pouvait plus régulariser la résistance très-variable de la pompe à air.

Nous avons donc observé les diverses circonstances de la marche habituelle, puis recherché dans nos observations les données que nous désirions.

Les résultats de nos observations sur la marche de la machine de Dalkey, sont consignés dans le tableau suivant.

TABLEAU (N° 1). — Du travail de la machine de Dalkey.

Dates des expériences.	Durée ou époques des observations.	HAUTEURS DU MANOMÈTRE À MERCURE DE LA MACHINE				Pression moyenne par centimètre carré.	Effet dynamique par révolution.	Nombre de révolutions par minute.	Effet dynamique par minute.	Tension absolue de la vapeur au moment de son admission dans le cylindre.	OBSERVATIONS	
		observées en pouces.	rectifiées en pouces.	rectifiées en centimètres.	Moyenne.							
11 JANVIER 1844.	Durée 1 minute.	18,00	17,539	0,441		Kil. 2,10	Kil. 44,719,00	14	Kil. 570,066	Kil. 2,09	<p>La quantité de mercure tenue dans la cuvette du nomètre de la pompe pneumatique, n'étant plus suite d'un accident, celle convenait à l'échelle graduée et fixée à côté du tube métrique, les indications cet instrument ont été prises d'après les deux des suivantes :</p> <p>1° à 0p, la distance en surface du mercure et la sion 2p était 0m028, au de 0m031;</p> <p>2° Lorsque le mercure quait 26p, la distance à la surface du mercure et vision 2p était 0m057, au de 0m031.</p> <p>Les indications de ce mètre doivent donc être nées de 0m025 à 0m014, qu'elles se rapprochent ou de 26.</p> <p>Appelant A les indications observées, les indications tifiées auront pour expressions :</p> $A - 0,025 + \left( \frac{0,025 - 0,014}{26} \right) \times \dots$ <p>A - 0,025 + 0,00054</p> <p>ou, en mesure anglaise, A - 0p,906 + 0p,0136.</p> <p>Les indications du mètre de Kingstown sur dû, à la rigueur, être rectifiées puisque ce manomètre, pas à syphon; mais ces indications étant alternativement positives et négatives et assez petites, ont pu être négligées. Lorsque le manomètre teint promptement 0m06 peut en conclure que le voi est près de l'extrémité du tube, vu que la soupape l'entrée du tuyau de communication est fermée.</p>	
	Id.	22,09	22,303	0,366	0,569							
	Id.	25,01	22,508	0,372		2,53	45,178,70	13	677,680	3,10		
	Id.	25,05	22,915	0,582								
	Id.	9,00	8,216	0,209	0,289	2,11	40,912,90	22	900,084	3,69		
	Id.	15,20	14,501	0,368								
	Id.	19,60	18,960	0,482								
	Id.	22,00	21,593	0,344	0,315							
	Id.	25,00	22,407	0,569	0,373							
	Id.	25,50	22,913	0,582								
	Id.	24,10	25,521	0,398		3,28	44,209,20	15	665,158	3,80		
	Id.	24,20	25,622	0,600	0,399							
	Id.	21,00	20,580	0,318								
	Id.	22,00	21,593	0,344								
	Id.	17,50	16,852	0,428	0,439	2,59	46,542,10	20	926,842	4,04		
	Id.	25,10	24,533	0,624								
	Id.	8,00	7,205	0,185								
	Heures de départ.	2,53	7,73	6,930	0,177							
		2,56	7,50	6,495	0,163				22			
		2,57	9,50	8,725	0,222				25			
		2,58	15,73	13,039	0,585				25			
		2,59	18,73	18,099	0,460				19			
		5,00	20,30	19,873	0,303				17			
	5,01	20,00	19,566	0,492				17				
	5,02	18,70	18,048	0,439				16				
	5,03	20,00	19,566	0,492		44,209,20	19	859,975	4,01			
	5,05 1/2	26,00	23,448	0,647	0,435	44,209,20	20	884,184				
	5,04	9,50	8,725	0,222								
	5,05	15,25	14,532	0,370				22				
	5,06	18,80	18,149	0,461				20				
	5,07	20,60	19,990	0,508				18				

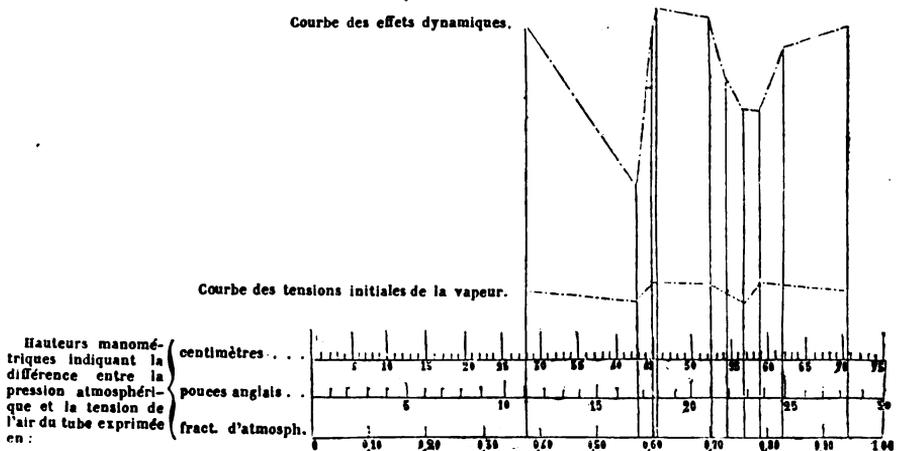
TABLEAU N° 1. — (Suite).

des observations.	HAUTEURS DE BAROMÈTRES À MERCURE DE LA MACHINE				Prestion moyenne par centimètre carré.	Effet dynamique par révolution.	Nombre de révolutions par minute.	Effet dynamique par minute.	Tension absolue de la va- peur au moment de son émission dans le cylin- dre.	OBSERVATIONS.					
	observées en pouces.	rectifiées en pouces.	rectifiées en centimètres.	Moyenne.											
3,08	22,00	21,393	0,544	0,572	2,28	44,209,20	17	751,556							
3,09	23,00	22,407	0,569												
3,10	23,90	23,319	0,592												
3,11	24,40	23,827	0,605												
3,12	24,80	24,232	0,616												
3,13	25,15	24,546	0,625												
3,14	25,40	24,840	0,629												
3,15	25,50	24,941	0,634												
3,16	25,50	24,941	0,634												
3,17	25,35	24,942	0,635												
3,18	25,60	25,042	0,637												
3,19	25,65	25,093	0,638												
3,20	25,70	25,144	0,639							0,620	2,23	43,239,70	19	821,354	3,80
3,21	25,70	25,144	0,639												
3,22	25,75	25,193	0,641												
3,23	25,00	24,434	0,621												
3,24	24,90	24,333	0,618												
3,25	23,75	23,166	0,588												
3,26	20,75	20,126	0,511												
3,27	17,75	17,085	0,454												
3,28	23,00	22,407	0,569												
3,29	24,75	24,180	0,614												
3,30	8,50	7,710	0,196												
3,31	11,00	10,244	0,260												
3,32	21,50	20,886	0,571	0,536	2,28	44,209,20	17	751,556	3,73						
3,33	23,50	22,913	0,582												
3,34	23,00	22,407	0,569												
3,35	20,25	19,619	0,498							0,534	2,23	43,239,70	21	908,033	4,08
3,36	28,50	27,981	0,711												
3,37	28,50	27,981	0,711												
3,38	2,02	39,167,80	2,02												
3,39	1,97	38,198,30	1,97												
3,40															
3,41															
3,42															
3,43															
3,44															
3,45															
3,46															
3,47															
3,48															
3,49															
3,50															
3,51															
3,52															
3,53															
3,54															
3,55															
3,56															
3,57															
3,58															
3,59															
3,60															
3,61															
3,62															
3,63															
3,64															
3,65															
3,66															
3,67															
3,68															
3,69															
3,70															
3,71															
3,72															
3,73															
3,74															
3,75															
3,76															
3,77															
3,78															
3,79															
3,80															
3,81															
3,82															
3,83															
3,84															
3,85															
3,86															
3,87															
3,88															
3,89															
3,90															
3,91															
3,92															
3,93															
3,94															
3,95															
3,96															
3,97															
3,98															
3,99															
4,00															
4,01															
4,02															
4,03															
4,04															
4,05															
4,06															
4,07															
4,08															
4,09															
4,10															
4,11															
4,12															
4,13															
4,14															
4,15															
4,16															
4,17															
4,18															
4,19															
4,20															
4,21															
4,22															
4,23															
4,24															
4,25															
4,26															
4,27															
4,28															
4,29															
4,30															
4,31															
4,32															
4,33															
4,34															
4,35															
4,36															
4,37															
4,38															
4,39															
4,40															
4,41															
4,42															
4,43															
4,44															
4,45															
4,46															
4,47															
4,48															
4,49															
4,50															
4,51															
4,52															
4,53															
4,54															
4,55															
4,56															
4,57															
4,58															
4,59															
4,60															
4,61															
4,62															
4,63															
4,64															
4,65															
4,66															
4,67															
4,68															
4,69															
4,70															
4,71															
4,72															
4,73															
4,74															
4,75															
4,76															
4,77															
4,78															
4,79															
4,80															
4,81															
4,82															
4,83															
4,84															
4,85															
4,86															
4,87															
4,88															
4,89															
4,90															
4,91															
4,92															
4,93															
4,94															
4,95															
4,96															
4,97															
4,98															
4,99															
5,00															

Il résulte de l'examen de ce tableau, que le travail de la machine équivaut, en moyenne, à environ 821,400 kilogrammes, élevés à 1<sup>m</sup> par minute : le *maximum* a été de 926,000<sup>k</sup>, et le *minimum* de 570,000<sup>k</sup>, ou 0<sup>m</sup>13 au-dessus et 0<sup>m</sup>30 au-dessous de ce travail ; que ce travail est indépendant du degré de dilatation de l'air, parce qu'en effet le piston prend une vitesse d'autant plus grande que la résistance est plus petite, de sorte que le produit de l'effort par la vitesse reste le même, aussi long-temps que la production de vapeur ne varie pas, mais qu'il augmente à mesure que la vapeur pénètre dans le cylindre sous une tension plus élevée, c'est-à-dire, qu'il est proportionnel à la quantité de vapeur produite.

Ces conséquences ressortent clairement du tracé graphique ci-après.

TABLEAU N° 2.— *Rapports entre le travail de la machine motrice, la tension de la vapeur au moment de son admission dans le cylindre, et les hauteurs du manomètre indiquant la pression exercée par l'atmosphère sur le piston-remorqueur.*



Des longueurs proportionnelles aux hauteurs manométriques ont été portées sur l'axe des abscisses, et, sur les ordonnées correspondantes, on a pris des longueurs proportionnelles, d'abord, aux tensions de la vapeur au moment de son admission dans le cylindre, puis aux effets dynamiques dépensés par minute, et l'on a relié par une ligne les extrémités de ces deux systèmes d'ordonnées. On reconnaît, au premier coup d'œil, qu'il n'existe aucune relation entre le degré de dilatation de l'air dans le tube pneumatique et les effets dynamiques obtenus, qui atteignent indifféremment le *maximum* avec des dilatactions de  $0^{\text{m}}34$ ,  $0^{\text{m}}60$  et  $0^{\text{m}}80$ , tandis que la courbe des effets dynamiques suit les inflexions de la courbe des tensions initiales d'une manière trop régulière pour ne pas reconnaître que la première de ces courbes est subordonnée à la seconde.

Le travail moteur est donc, comme dans toutes les machines à vapeur, proportionnel à la quantité de vapeur produite, et nous pouvons, comme on le fait généralement, considérer cette production comme uniforme. Il suffira par conséquent, pour obtenir l'effet dynamique dépensé par la machine dans un temps déterminé, de multiplier la quantité 821,400 kilogrammètres, par le nombre de minutes observé, et, si l'on tient note du temps qu'emploie la machine pour faire monter le mercure aux diverses hauteurs manométriques, on pourra en déduire immédiatement l'effet dynamique dépensé correspondant. Ces données sont fournies par le tableau suivant, n° 3, d'après le relevé de nos observations.

**TABLEAU N° 3. — Temps que met la machine pour faire monter le mercure aux divers degrés de l'échelle manométrique, et effets dynamiques correspondants, d'après la moyenne des observations sur les manomètres de Kingstown à Dalkey.**

HAUTEUR DU MANOMÈTRE		TEMPS écoulé depuis l'origine du mouvement.	EFFET DYNAMIQUE		OBSERVATIONS.
Indiquant la différence entre la tension atmosphérique et la tension de l'air intérieur du tube :			dépendé par la machine en 1".	correspon- dant aux hauteurs manométri- ques de la 1 <sup>re</sup> colonne.	
en mesure anglaise.	en mesure métrique.				
	Mètres.	Secondes.	Kilogrammèt.	Kilogrammèt.	
1	0,025	7	13,690	95,666	Chaque série d'observations relatives à une montée, a fourni une courbe dont le temps correspondait à la longueur de l'abscisse, et la hauteur manométrique était l'ordonnée; puis, prenant une courbe moyenne, on a obtenu les temps indiqués dans la 3 <sup>e</sup> colonne.
2	0,051	14	id.	191,333	
3	0,076	22	id.	300,666	
4	0,102	29	id.	396,333	
5	0,127	37	id.	505,666	
6	0,152	45	id.	587,666	
7	0,178	50	id.	683,333	
8	0,203	57	id.	779,000	
9	0,229	66	id.	902,000	
10	0,254	78	id.	1,066,000	
11	0,279	90	id.	1,230,000	
12	0,305	103	id.	1,407,666	
13	0,330	115	id.	1,571,666	
14	0,356	152	id.	1,804,000	
15	0,381	150	id.	2,050,000	
16	0,406	168	id.	2,296,000	
17	0,432	193	id.	2,637,666	
18	0,457	220	id.	3,006,666	
19	0,483	235	id.	3,483,000	
20	0,508	296	id.	4,043,333	
21	0,533	333	id.	4,824,333	
22	0,559	420	id.	5,740,000	
23	0,584	533	id.	7,284,333	
24	0,610	"	"	"	
25	0,635	"	"	"	
26	0,660	"	"	"	

Il nous est maintenant facile d'apprécier le travail mécanique dépensé pour faire un voyage de Kingstown à Dalkey, puisqu'il suffit d'ajouter, à l'effet dynamique correspondant à la hauteur du manomètre au moment du départ, le produit de 43,690 kilogrammètres par le nombre de secondes écoulées pendant le trajet.

*Effet dynamique réalisé ou effet utile.* — L'effet dynamique utile est égal au produit de l'effort exercé sur le piston remorqueur par le chemin parcouru sous l'action de cet effort, ou la longueur du tube pneumatique.

Le manomètre placé sur la voiture indiquant à chaque instant la différence entre la tension atmosphérique et celle de l'air contenu dans le tube, et, par suite, l'effort exercé sur le piston-remorqueur, remplit l'office d'un dynamomètre très-sensible; on connaît d'ailleurs la longueur du tube, de sorte que le produit des deux facteurs connu, l'effort moyen et la longueur du tube, représentera l'effet utile obtenu.

Nous avons consigné dans le tableau suivant, n° 4, les résultats fournis par les voyages d'expérience auxquels nous avons assisté.

**TABEAU N° 4. — Observations faites pendant la marche des convois, sur le chemin de fer de Kingstown à Dalkey.**

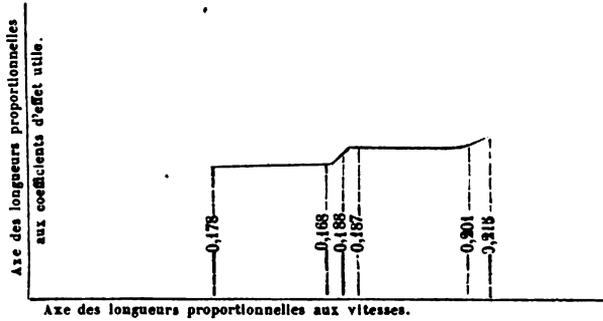
	HAUTEURS DU MANOMÈTRE observées de 13'' en 13''.								HAUTEURS DU MANOMÈTRE observées de 1/4 en 1/4 de mille.				OBSERVATIONS.
	EXPÉRIENCES DU 8 JANVIER 1844.								EXPÉRIENCES DU 16 JANVIER 1844.				
	N° 1.		N° 2.		N° 3.		N° 4.		N° 5.		N° 6.		
	MESURE				MESURE								
anglaise.	métrique.	anglaise.	métrique.	anglaise.	métrique.	anglaise.	métrique.	anglaise.	métrique.	anglaise.	métrique.		
22,9	0,382	22,8	0,379	22,5	0,367	22,5	0,371	19,4	0,495	22,2	0,364		
22,9	0,382	22,8	0,379	22,5	0,367	22,5	0,371	18,0	0,460	22,2	0,364		
22,9	0,382	22,8	0,379	22,5	0,367	22,25	0,363	16,0	0,406	22,5	0,371		
22,8	0,379	22,8	0,379	22,1	0,361	22,25	0,363	14,0	0,356	25,1	0,387		
22,7	0,376	22,7	0,376	21,9	0,355	22,25	0,363	12,0	0,505	24,2	0,615		
22,6	0,374	22,6	0,374	21,8	0,353	22,00	0,359	10,0	0,254	25,4	0,645		
22,4	0,369	22,5	0,371	21,5	0,343	21,75	0,352	9,0	0,229	25,7	0,632		
22,2	0,364	22,4	0,369	21,5	0,341	21,75	0,352	"	"	"	"		
22,1	0,361	22,5	0,367	21,2	0,358	21,25	0,358	"	"	"	"		
22,0	0,359	22,2	0,364	20,8	0,328	21,00	0,355	"	"	"	"		
21,9	0,356	22,2	0,364	20,7	0,325	20,75	0,327	"	"	"	"		
21,8	0,379	22,5	0,367	20,5	0,320	20,75	0,327	"	"	"	"		
22,0	0,359	22,2	0,364	20,4	0,318	20,25	0,315	"	"	"	"		
21,9	0,356	22,2	0,364	20,5	0,316	19,75	0,302	"	"	"	"		
22,0	0,359	22,2	0,364	20,5	0,316	19,50	0,495	"	"	"	"		
22,1	0,361	22,2	0,364	"	"	19,00	0,485	"	"	"	"		
22,5	0,366	22,5	0,364	"	"	19,00	0,485	"	"	"	"		
22,6	0,374	22,5	0,367	"	"	"	"	"	"	"	"		
25,0	0,584	22,5	0,367	"	"	"	"	"	"	"	"		
25,5	0,566	22,6	0,371	"	"	"	"	"	"	"	"		
"	"	22,8	0,379	"	"	"	"	"	"	"	"		
Hauteur moyenne.	22,42	0,369	22,46	0,371	21,51	0,341	21,09	0,353	14,06	0,358	25,61	0,599	
	kil.		kil.		kil.		kil.		kil.		kil.		
Effort correspondant exercé sur le piston-remorqueur.	886,50		889,62		842,88		835,53		557,76		935,24		
Longueur du tube pneumatique.	2,182		2,182		2,182		2,182		2,182		2,182		
Effet dynamique utile transmis au piston-remorqueur.	1,954,547		1,941,146		1,859,160		1,818,762		1,217,041		2,036,534		
Poids brut du convoi.	69,000		69,000		48,700		48,700		57,578		74,514		
Effet dynamique par tonneau transporté.	28,054		28,054		57,765		57,546		52,411		27,418		
Temps employé tout le trajet.	4'45"		5'00"		5'50"		5'45"		4'37"		7'3"		
pr. par-courir la longueur du tube.	5'55"		4'5"		2'52"		5,4'		4'19"		6'53"		
Vitesse moyenne par seconde, pendant le parcours du tube.	9,56		8,90		12,69		11,85		8,42		5,52		

Pour les quatre premières expériences, on avait le temps écoulé pendant le trajet total, et l'on a déduit le temps relatif au parcours du tube en supposant une vitesse uniforme.  
 Pendant les deux expériences du 16 janvier, le temps a été observé par M. Berghy à l'aide d'un chronomètre particulier, au moment du passage du convoi vis-à-vis de chaque poteau placé le long du chemin à 40000 de distance.  
 Les deux convois du 16 janvier se sont arrêtés avant d'atteindre la station de Dalkey : le 1er à 123 chaînes 1/4 pieds, et le 2e à 100 chaînes 1/4 pieds.

Les données fournies par les tableaux n° 3 et n° 4 nous permettent de calculer quelle partie du travail moteur pris pour unité, le travail réalisé représente en effet.

	DANS LES EXPÉRIENCES											
	DU 11 JANVIER 1844.								DU 16 JANVIER 1844.			
	1.		2.		3.		4.		5.		6.	
	PIEDS	MÈT.	PIEDS	MÈT.	PIEDS	MÈT.	PIEDS	MÈT.	PIEDS	MÈT.	PIEDS	MÈT.
Le manomètre marquant au départ. . . . .	22,9	0,582	22,8	0,579	22,3	0,567	22,5	0,571	19,4	0,493	22,2	0,564
Le temps pour parcourir la longueur du tube pneumatique a été de . . . . .	3,53''		4,3''		2,32''		3,4''		4,19''		6,33''	
L'effet dynamique dépensé par la machine . . . . .	Pour obtenir la hauteur manométrique initiale est, d'après le tableau n° 3. . . . .											
	7,129,900		6,975,466		6,203,300		6,312,166		3,709,133		6,048,866	
	Pendant le parcours du tube. . . . .											
	3,189,770		3,334,060		2,334,680		2,818,960		3,348,710		3,407,330	
Total de l'effet dynamique dépensé. . . . .	10,319,670		10,309,516		8,537,980		9,031,126		7,254,843		11,456,116	
Id. réalisé porté au tableau n° 4. . . . .	1,934,347		1,941,146		1,539,160		1,818,762		1,217,041		2,036,334	
Effet utile exprimé par une fraction du travail moteur pris pour unité. . . . .	0,187		0,188		0,213		0,301		0,168		0,178	
Vitesse pendant le parcours du tube. . . . .	9,36		8,90		12,09		11,85		8,42		8,32	

L'effet utile varie donc de 0<sup>m</sup>18, qui correspond à la vitesse de 5<sup>m</sup>30 par seconde, à 0<sup>m</sup>213, relatif à la vitesse de 12<sup>m</sup>70 : il semble donc croître avec la vitesse ; mais nos expériences sont trop peu nombreuses pour en déduire la loi de cet accroissement. On peut en juger par le tracé suivant.



Un rapport aussi désavantageux engageait à se demander si l'air dilaté restituait bien tout l'effet dynamique employé à le raréfier.

Cette question, traitée dans un mémoire couronné en 1835 par l'Académie de Bruxelles, à l'occasion du projet d'élever les eaux des mines à l'aide de l'air dilaté, ayant reçu une solution négative que nos calculs ne permettaient pas d'admettre, il était intéressant de rechercher la cause de cette différence.

Considérons donc le problème d'une manière théorique et sans tenir compte des pertes de force résultant de l'emploi des machines et appareils, pertes dont nous chercherons ensuite l'évaluation.

Nous calculerons le travail de la pompe pneumatique, d'abord, pendant qu'elle dilate l'air du tube, et ensuite lorsqu'elle épuise l'air dilaté sous une tension que nous supposerons uniforme.

M. Bergin a donné, dans des notes à la suite de ses observations sur le rapport de MM. Smith et Barlow, la formule du travail dynamique pendant la seconde période; nous allons établir l'équation du travail relatif à la première.

Appelons :

$V$  le volume du tube pneumatique;

$v$  le volume engendré par le piston de la pompe pneumati-

que, pendant une course simple ou une demi-révolution du volant;

$a$  l'effet dynamique équivalent à la production de  $1^m$  d'air sous la tension atmosphérique, ou 40,330 kilogrammes élevés à  $1^m$  ;

$n$  le nombre de coups de piston donnés par la machine pendant la  $1^re$  période ;

$L$  = logarithme hyperbolique.

Nous supposons que la pompe pneumatique communique sans intermédiaire avec le tube pneumatique et ne présente pas d'espace nuisible.

A l'origine du mouvement, l'air du tube est à la tension atmosphérique, que nous représentons par l'unité; après le premier coup de piston, la tension de cet air deviendra  $1 \times \frac{v}{v+v}$ ; après le second, elle sera  $1 \times \left(\frac{v}{v+v}\right)^2$ , et, d'une manière générale,  $\left(\frac{v}{v+v}\right)^n$  après le  $n^o$  coup de piston.

L'effet dynamique correspondant à une course du piston sera :

pour la première,

$$av - avL\left(\frac{1}{\frac{v}{v+v}}\right) \text{ ou } av - avL\frac{v+v}{v};$$

pour la seconde,

$$av\frac{v}{v+v}\left(1 + L\frac{1}{\frac{v}{v+v}}\right) - av\left(\frac{v}{v+v}\right)L\left(\frac{v+v}{v}\right)^2;$$

$$\text{ou } av\frac{v}{v+v} - av\frac{v}{v+v}L\frac{v+v}{v} + av\frac{v}{v+v}L\frac{v+v}{v};$$

pour la troisième,

$$av \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 \left( 1 + L \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 \right) - av \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 L \left( \frac{v}{v+v} \right)^2,$$

ou  $av \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 - av \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 L \frac{v+v}{v} + av \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 L \left( \frac{v+v}{v} \right)^2;$

pour la  $n^{\circ}$ ,

$$\left( av - avL \frac{v+v}{v} \right) \left( \frac{v}{v+v} \right)^{n-1} + av \left( \frac{v}{v+v} \right)^{n-1} (n-1) L \frac{v+v}{v}.$$

Faisant l'addition, nous aurons :

$$\left( av - avL \frac{v+v}{v} \right) \left( \left( 1 + \frac{v}{v+v} \right) + \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 + \dots + \left( \frac{v}{v+v} \right)^{n-1} \right) + avL \frac{v+v}{v} \left( \frac{v}{v+v} + 2 \left( \frac{v}{v+v} \right)^2 + 3 \left( \frac{v}{v+v} \right)^3 + \dots + (n-1) \left( \frac{v}{v+v} \right)^{n-1} \right).$$

Sommant ces séries, il viendra, après toute réduction, pour l'effet dynamique de  $n$  coups de piston :

$$a(v+v) \left\{ 1 - \left( \frac{v}{v+v} \right)^n \right\} - n \left( \frac{v}{v+v} \right)^n L \frac{v+v}{v} \left\} \dots (A),$$

formule qui donne l'expression cherchée du travail dynamique pour amener à la tension  $\left( \frac{v}{v+v} \right)^n$ , l'air contenu dans le tube.

Quand la tension de l'air dans le tube est constante, ce qui a lieu lorsque le piston-remorqueur engendre, par son mouvement progressif, un volume égal à celui que produit le piston de la pompe pneumatique, la quantité  $-av \left( \frac{v}{v+v} \right)^{n-1} L \frac{v+v}{v}$ , dans l'expression du travail du  $n^{\circ}$  coup de piston, doit être remplacée par  $-av \left( \frac{v}{v+v} \right)^{n-1}$ , qui fait dis-

paraître la quantité égale et de signe contraire, de sorte qu'il reste  $av(n-1)\left(\frac{v}{v+v}\right)^{n-1} L \frac{v+v}{v}$ , pour l'expression de la  $n^{\text{e}}$  course du piston, et  $avn\left(\frac{v}{v+v}\right)^n L \frac{v+v}{v}$ , pour l'expression de la course suivante, qui est la première donnée sous la tension uniforme obtenue par les  $n$  premières courses. L'expression  $avn\left(\frac{v}{v+v}\right)^n L \frac{v+v}{v}$  est équivalente à celle que donne M. Bergin, lorsque l'on n'a égard ni à l'espace nuisible ni à l'effort qu'exige la manœuvre des clapets.

Le nombre de coups de piston à donner par la machine pendant la seconde période, ou pour épuiser le volume  $v$ , est exprimé par  $\frac{v}{v}$ , et il est par conséquent le même, quel que soit le degré de dilatation de l'air, puisque la tension reste constante dans le tube et dans la pompe pneumatique, pendant toute la durée de l'épuisement.

Multipliant donc l'expression  $avn \times \left(\frac{v}{v+v}\right)^n L \frac{v+v}{v}$  du travail d'un coup de piston, sous la tension uniforme  $\left(\frac{v}{v+v}\right)^n$ , par le nombre  $\frac{v}{v}$ , on obtient l'expression

$$avn\left(\frac{v}{v+v}\right)^n L \frac{v+v}{v} \dots \dots (B),$$

qui représente le travail mécanique nécessaire pour épuiser tout l'air du tube, amené à la tension  $\left(\frac{v}{v+v}\right)^n$ .

Cherchons maintenant la valeur du travail réalisé : il équivaut, comme nous l'avons vu, au produit de l'effort exercé sur le piston par la longueur du tube, c'est-à-dire à  $\left(1 - \left(\frac{v}{v+v}\right)^n\right) \times$  la section du tube  $\times$  la longueur de ce tube,

ou 
$$av\left(1 - \frac{v}{v+v}\right)^n \dots \dots (C).$$

Le travail dépensé, tant pour dilater que pour épuiser l'air du tube, sera donc exprimé par la somme des expressions  $A+B$ , et le travail réalisé, par  $C$ ; l'effet utile, ou la partie de

l'effet moteur réalisé, aura pour expression  $\frac{C}{A+B}$ , ou

$$\frac{av \left( 1 - \left( \frac{v}{v+v} \right)^n \right)}{a(v+v) \left\{ \left( 1 - \left( \frac{v}{v+v} \right)^n \right) - \left( \frac{v}{v+v} \right)^n n L \frac{v+v}{v} \right\} + avn \left( \frac{v}{v+v} \right)^n L \frac{v+v}{v}}$$

ou

$$\frac{v \left( 1 - \left( \frac{v}{v+v} \right)^n \right)}{(v+v) \left( 1 - \left( \frac{v}{v+v} \right)^n \right) - vn \left( \frac{v}{v+v} \right)^n L \frac{v+v}{v}} \dots (D).$$

Si, pour avoir la limite du rapport cherché, nous supposons que l'on obtienne un vide absolu, ce qui suppose  $n$  infini et  $\left( \frac{v}{v+v} \right)^n = 0$ , l'expression  $D$ , se réduisant à  $\frac{v}{v+v}$ , fait

voir que l'effet dépensé ne dépasse l'effet réalisé que de la quantité  $v$ , qui représente l'effet dû au volume d'air dilaté que contient la pompe pneumatique; et, en effet, le piston remorqueur ne pourrait l'utiliser qu'en pénétrant dans la pompe: cette perte doit donc diminuer à mesure que l'on opère sur de l'air moins dilaté. Effectivement ce rapport qui, pour l'appareil de Dalkey, est

$$0,985, \text{ lorsque } \left( \frac{v}{v+v} \right)^n = 0,$$

devient 0,992 lorsque  $\left( \frac{v}{v+v} \right)^n = 0,25$ , qui correspond à une

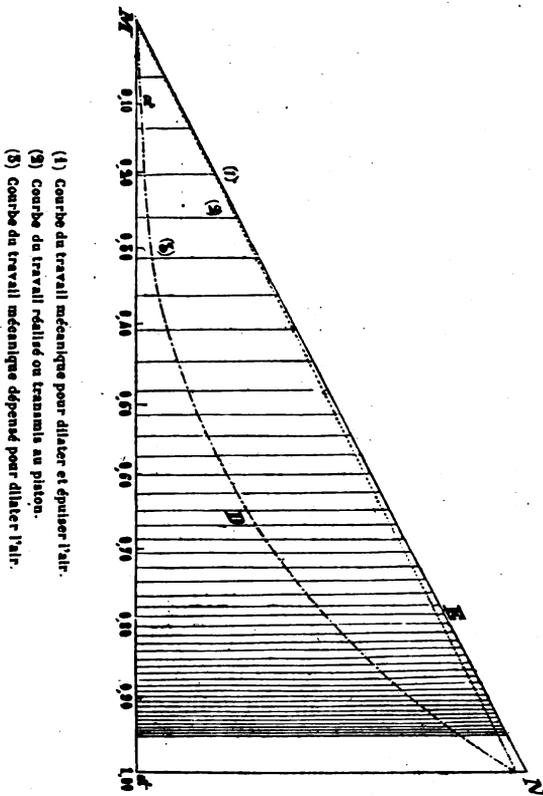
colonne manométrique de 0,57 de mercure, ou 22 pouces  $\frac{1}{2}$ , qui a généralement été employée dans les expériences.

Le rapport de 0,992 diffère si peu de l'unité, que l'on peut considérer comme égaux les effets dépensés et restitués par

l'air dilaté, lorsque l'on fait abstraction de toute perte de force absorbée par les frottements et résistances diverses.

Dans le but de rendre sensibles les rapports qui existent entre les quantités A, B et C, nous avons eu recours à un tracé graphique qui forme le tableau n° 5. Sur l'axe des abscisses, nous avons porté, à partir du point M, des longueurs proportionnelles aux hauteurs manométriques exprimant la différence de tension entre l'air extérieur et l'air

TABLEAU N° 5.



intérieur du tube pneumatique ; sur chacune des ordonnées, nous avons porté, à la suite l'une de l'autre, deux longueurs proportionnelles, l'une au travail pour dilater l'air au degré déterminé que représente la longueur de l'abscisse, l'autre au travail qu'exige l'épuisement de l'air dilaté contenu dans le tube.

Unissant par une ligne continue les extrémités supérieures de ces deux séries d'ordonnées, nous obtenons deux courbes *MDN* et *MEN*, qui donnent la relation entre les divers degrés de dilatation de l'air du tube et les effets dynamiques dépensés pendant les périodes de dilatation et d'épuisement.

Enfin l'effet utile étant proportionnel à l'effort exercé sur le piston, ou aux différences de tension portées sur l'axe des abscisses, sera une droite, passant par l'origine au point *M* et par l'extrémité de l'ordonnée, correspondant au vide absolu qui représentera l'effort exercé sur le piston par la pression atmosphérique.

L'examen de cette épure fait voir :

1° Que le travail nécessaire pour dilater l'air contenu dans le tube, croît dans une proportion d'autant plus rapide que l'on s'approche davantage d'un vide absolu ;

2° Que le travail pour épuiser l'air contenu dans le tube, croît d'abord jusqu'à ce que le manomètre marque 0<sup>m</sup>46, puis décroît jusqu'à devenir nul lorsque le vide est parfait ;

3° Qu'enfin la courbe exprimant les sommes des effets dynamiques dépensés pour dilater et pour épuiser, diffère peu d'une droite qui, partant d'une origine commune avec la droite des effets utiles, n'en diffère au *maximum*, c'est-à-dire lorsque le vide est absolu, que d'une faible quantité.

Ces conséquences sont faciles à expliquer, lorsqu'on se reporte aux données fondamentales du problème.

La tension de l'air contenu dans un vase est, en vertu de la loi de Mariotte, exactement proportionnelle à la *quantité absolue* ou au *poids* d'air qu'il contient, de sorte que le manomètre, en

faisant connaître la tension de l'air contenu dans un vase d'un volume déterminé, en indique le poids aussi exactement que pourrait le faire une balance à ressort ou une romaine ; et les poids d'air introduits ou retranchés du vase, seront exactement mesurés par l'augmentation ou la diminution de la colonne manométrique, quel que soit le degré de dilatation de l'air au moment où cette addition ou soustraction a lieu.

Les manomètres de Kingstown et de Dalkey n'indiquent que la différence entre la tension atmosphérique et celle de l'air du tube; mais il est facile d'en déduire la hauteur manométrique qui correspond à la tension absolue de l'air intérieur, par la différence entre la colonne barométrique et la hauteur manométrique observée. Une augmentation dans la colonne des manomètres de Kingstown et de Dalkey, équivaut donc à une égale diminution dans la colonne du manomètre qui représenterait la densité absolue de l'air du tube.

La courbe *M D N* montre que le travail nécessaire pour faire monter le mercure d'une division de l'échelle manométrique, croît rapidement, à mesure que l'air du tube est plus dilaté.

Pour se rendre compte de ce fait, il suffit de comparer la valeur de *B*, représentant le travail d'un certain nombre de coups de piston, à la quantité ou poids de l'air extrait qui est, comme nous l'avons dit, proportionnel à l'ascension du mercure.

*n* coups de piston représentent un effet dynamique égal à

$$a(p+v) \left\{ 1 - \left( \frac{v}{p+v} \right)^n - n \left( \frac{v}{p+v} \right)^n L \frac{p+v}{v} \right\}.$$

La quantité d'air extraite à l'aide de ces coups de piston, a pour expression :

$$v \left( 1 + \frac{v}{p+v} + \left( \frac{v}{p+v} \right)^2 + \dots + \left( \frac{v}{p+v} \right)^{n-1} \right) = v \frac{\left( \frac{v}{p+v} \right)^n - 1}{\frac{v}{p+v} - 1}.$$

Divisant la première quantité par la seconde, nous obtenons la valeur du travail relatif à la quantité ou poids d'air extrait, valeur qui prend la forme suivante :

$$a \left( 1 - \frac{\left( \frac{v}{v+v} \right)^n}{1 - \left( \frac{v}{v-v} \right)^n} \times n L \frac{v+v}{v} \right).$$

Cette expression fait voir que le travail mécanique pour extraire du tube un poids déterminé d'air, croît à mesure que le nombre  $n$  de coups de piston est plus grand, ou que l'air est porté à un plus haut degré de dilatation.

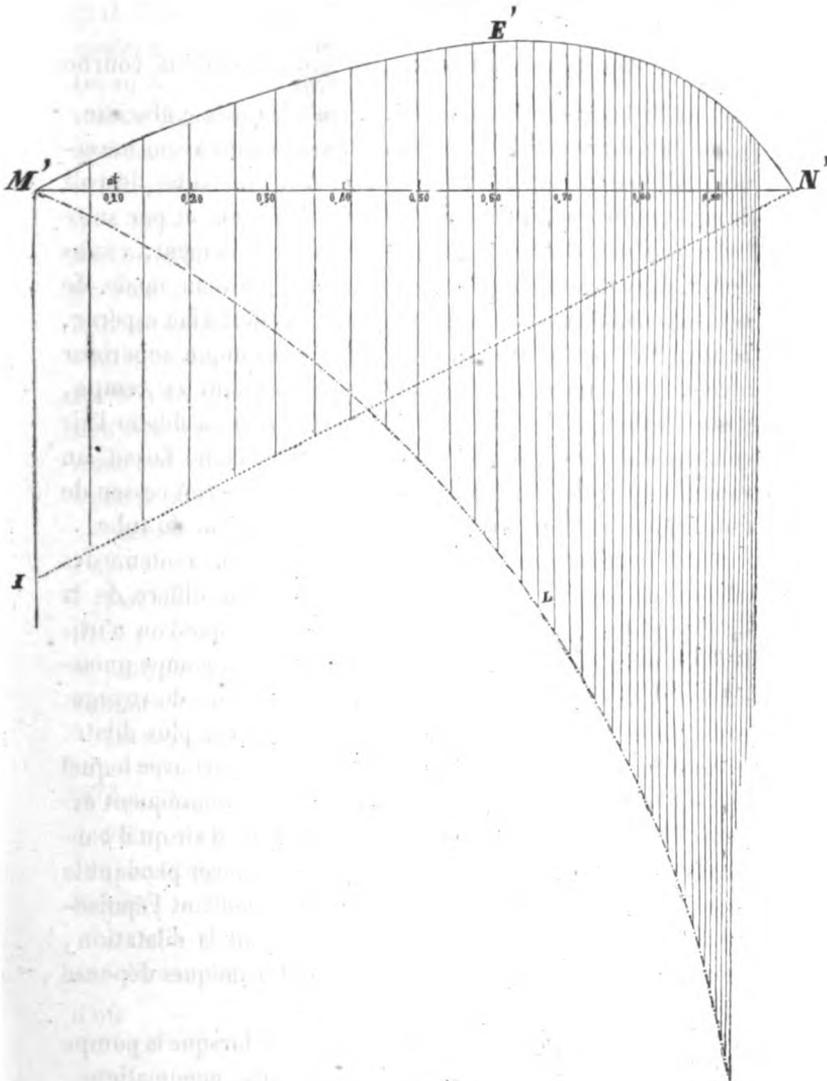
Quant au travail dépensé pendant la période de l'épuisement, il peut paraître fort extraordinaire, au premier aperçu, que cet effet dynamique, après s'être accru avec la dilatation de l'air intérieur, devienne stationnaire, puis diminue, quoique le degré de dilatation continue à s'approcher du vide absolu.

Cette loi s'explique cependant fort bien, lorsqu'on fait attention que l'expression  $B, av \left( \frac{v}{v+v} \right)^n \times n L \frac{v+v}{v}$ , se compose de deux facteurs variables, dont l'un,  $\left( \frac{v}{v+v} \right)^n$ , représentant la densité, est à son *maximum* à l'origine de la courbe *MDN*, et décroît proportionnellement à l'ascension de la colonne manométrique, tandis que le second facteur,  $nL \left( \frac{v+v}{v} \right)$ , qui exprime le travail de la détente de l'air, est à son *minimum* à l'origine de la même courbe, et augmente à mesure que le degré de dilatation dans le tube est plus voisin d'un vide absolu.

Le produit de ces deux facteurs, qui croissent en sens inverse, aura donc un *maximum*.

Afin de faire mieux ressortir la loi que suit le travail de la pompe pneumatique sous diverses tensions, nous avons, sur

TABLEAU N° 6.



l'axe des abscisses et aux distances convenables (voir n° 6),  
portées les valeurs de l'expression B, et elles ont fourni la courbe

$M'E'N'$ ; les valeurs correspondantes de  $\left(\frac{v}{v+v}\right)^n$  et celles de  $nL\frac{v+v}{v}$ , sont représentées par les ordonnées de la courbe  $M'L$  et de la droite  $N'I$  correspondant à la même abscisse.

Au delà du degré de dilatation correspondant à son *maximum*, l'effet mécanique pour épuiser l'air du tube décroît donc, tandis que l'effort exercé sur le piston, et par suite l'effet produit, s'accroît. Ce fait, considéré isolément, a sans doute gagné beaucoup de partisans au nouveau mode de transmission de mouvement, parce que, en effet, il fait espérer, pendant la marche du convoi, un effet dynamique supérieur à celui que la machine peut développer pendant ce temps, par suite de la reproduction du travail employé à dilater l'air contenu dans le tube; et, en effet, si la machine faisait un vide absolu avant le départ du convoi, elle pourrait cesser de fonctionner pendant qu'il parcourrait la longueur du tube.

Enfin la courbe dont les ordonnées expriment la somme des effets dynamiques pour dilater et épuiser, ne diffère de la droite indiquant les effets réalisés, que parce que l'on n'utilise pas le volume d'air dilaté contenu dans la pompe pneumatique, au moment où le convoi arrive au terme du voyage: cette perte est d'autant plus grande que l'air est plus dilaté.

Nous ferons remarquer que, pour créer l'effort avec lequel on veut agir sur le convoi, il faut dilater, et par conséquent extraire du tube une partie de la quantité totale d'air qu'il contient, ce qui réduit d'autant la quantité à enlever pendant la seconde période. L'on retrouve donc ainsi, pendant l'épuisement, une partie du travail dépensé pendant la dilatation, ce qui explique l'égalité entre les effets dynamiques dépensé et réalisé.

Nous pouvons donc dire que, en théorie, et lorsque la pompe communique sans intermédiaire avec le tube pneumatique, l'air dilaté restitue tout le travail dépensé à le raréfier, sans autre perte que celle de la dernière cylindrée d'air de la pompe.

Mais s'il existe un espace intermédiaire entre la pompe et le tube pneumatique, il faudra dilater, non seulement l'air contenu dans ce tube, mais encore celui que contient le tuyau de communication : il en résultera un surcroît de travail de dilatation, qui n'augmentera pas l'effet utile, lequel reste égal au produit  $av$  par la différence entre les tensions extérieure et intérieure, que nous supposons la même dans les deux cas; et lors même que l'on mettrait l'espace intermédiaire contenant de l'air dilaté, en communication avec l'air du tube contenant de l'air à la tension atmosphérique, la dilatation obtenue dans le tube pneumatique, à l'aide de ce mélange, ne restituerait pas le travail dépensé pour dilater l'air de l'espace intermédiaire, parce que le travail de dilatation n'ayant pas eu lieu sous la même différence de tension, est, d'après ce que nous avons vu, plus grand que n'aurait été le travail nécessaire pour amener l'air atmosphérique à la tension moyenne.

Cherchons l'expression analytique de l'effet utile, lorsqu'il existe un espace intermédiaire.

L'expression  $A$  s'appliquant à un volume quelconque, il suffira, pour avoir la valeur du travail mécanique dans cette hypothèse, de remplacer  $v$  par  $w$ , qui désignera la somme des volumes du tube pneumatique et du tuyau de communication.

La tension de l'air, après un nombre  $x$  de coups de piston, sera  $\left(\frac{w}{w+v}\right)^x$ .

Pour atteindre le même degré de dilatation obtenu par  $n$  coups, lorsqu'il n'existe pas d'espace intermédiaire, on aura l'égalité

$$\left(\frac{w}{w+v}\right)^x = \left(\frac{v}{v+v}\right)^n;$$

d'où

$$x = n \times \frac{L \frac{v}{v+v}}{L \frac{w}{w+v}}, \text{ et } n = x \times \frac{L \frac{w}{w+v}}{L \frac{v}{v+v}}.$$

L'expression A deviendra donc :

$$a(w+v) \left\{ 1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^x \right\} - x \left( \frac{w}{w+v} \right)^x L \frac{w+v}{w} \dots (A')$$

L'expression B du travail qu'exige l'épuisement du volume  $v$ , ne changera pas, puisque l'on n'aspire pas l'air de l'espace intermédiaire; nous aurons donc, en substituant à  $n$  et  $\left( \frac{v}{v+v} \right)^n$ , leur valeur en  $x$ ,

$$av \left( \frac{w}{w+v} \right)^x x \frac{L \frac{w}{w+v}}{\frac{L}{v+v}} + L \frac{v+v}{v} = avx \left( \frac{w}{w+v} \right)^x L \frac{w+v}{w} \dots (B')$$

Le travail utile, qui ne changera pas, sera exprimé par

$$av \left( 1 - \left( \frac{v}{v+v} \right)^n \right), \text{ ou } av \left( 1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^x \right) \dots (C')$$

L'effet utile, ou le rapport  $\frac{A'}{B'+C'}$ , est donc exprimé par

$$\frac{av \left( 1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^x \right)}{a(w+v) \left( 1 - \left\{ \left( \frac{w}{w+v} \right)^x \right\} - x \left( \frac{w}{w+v} \right)^x L \frac{w+v}{w} \right) \left\{ + av \left( \frac{w}{w+v} \right)^x x L \frac{w+v}{w} \right\}} \dots (D')$$

ou

$$\frac{v \left( 1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^x \right)}{(w+v) \left( 1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^x \right) - x \left( \frac{w}{w+v} \right)^x L \frac{w+v}{w} (w+v-v)}$$

La limite de ce rapport ne sera plus la même que dans le cas précédent; mais il deviendra

$$\frac{v}{w+v}$$

Pour l'appareil de Dalkey, la valeur de cette expression de-

$$\text{viendrait } \frac{250^{\text{m}^3} 077}{299^{\text{m}^3} 130 + 3^{\text{m}^3} 822} = 0,8255;$$

$$\text{lorsque } \left(\frac{w}{w+v}\right)^x = 0, \text{ et } \dots \dots \dots 0,8979.$$

$$\text{id. — id. } = 0,25.$$

On peut donc déjà apprécier l'influence nuisible qu'exerce l'emploi d'un intermédiaire entre la pompe et le tube pneumatique, lors même qu'il ne produirait aucune rentrée d'air.

Il nous reste à tenir compte de la restitution d'effet que l'on obtient, lorsque, deux convois se suivant immédiatement, on opère le mélange de l'air dilaté contenu dans l'espace intermédiaire, avec l'air à la tension atmosphérique qui remplit le tube et que l'on doit dilater.

Supposons donc que le tuyau de communication, dont le volume  $= w - v$ , contienne de l'air dilaté à la tension  $t$ , et qu'il soit mis en communication avec le tube pneumatique  $v$  contenant de l'air à la tension  $1$ , ou de l'atmosphère; la tension uniforme, lorsque les deux vases seront mis en communication, aura pour expression

$$\frac{(w-v)t + v}{w},$$

ou

$$t \left(1 - \frac{v}{w}\right) + \frac{v}{w},$$

tension que nous désignons par  $t'$ .

Pour savoir si la restitution d'effet dynamique est complète, il suffit de comparer le travail dépensé pour amener l'air contenu dans l'espace intermédiaire à la tension  $t$ , avec celui qu'exige un nombre  $x$  de coups de piston de la pompe pour obtenir la tension  $t'$ , dans le tube et le tuyau réunis. Le premier de ces effets a pour expression :

$$a(w-v+v) \left\{ 1 - \left(\frac{w-v}{w-v+v}\right)^x - x \left(\frac{w-v}{w-v+v}\right)^x L \left(\frac{w-v+v}{w-v}\right) \right\} =$$

$$= a(w-v+v) \left\{ 1 - t - tL \frac{1}{t} \right\};$$

le second,

$$\begin{aligned} a(w+v) \left\{ 1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^z - z \left( \frac{w}{w+v} \right)^z L \frac{w+v}{w} \right\} \\ = a(w+v) \left\{ 1 - t' - t'L \frac{1}{t'} \right\}. \end{aligned}$$

Divisant la seconde expression, ou le travail restitué, par la première, représentant le travail dépensé, le rapport, ou l'effet utile du travail dépensé pris pour unité, sera exprimé par

$$\begin{aligned} \left( \frac{w+v}{w-v+v} \right) \times \left( \frac{1-t' \left( 1+L \frac{1}{t'} \right)}{1-t \left( 1+L \frac{1}{t} \right)} \right) = \\ \left( \frac{w+v}{w-v+v} \right) \times \left( \frac{1 - \left( \frac{w-v}{w} \right)^t \left( 1+L \frac{w}{(w-v)t+v} \right)}{1-t \times \left( 1+L \frac{1}{t} \right)} \right). \end{aligned}$$

Introduisant les données de l'appareil de Dalkey, nous aurons les rapports :

$$\begin{aligned} 0,15 \text{ lorsque } t=0^{\text{A}}50 \\ 0,11 \text{ lorsque } t=0 \quad 25 \\ 0,09 \text{ lorsque } t=0 \quad 00. \end{aligned}$$

L'effet utile est donc très petit, et diminue à mesure que l'on porte la dilatation de l'air intérieur à un plus haut degré.

Cette conséquence est conforme à celle que M. Devaux a déduite du travail qu'il a présenté à l'académie, parce que, en effet, le cas que nous venons de discuter est le même que celui qui a été examiné dans le mémoire sur l'épuisement des eaux des mines ; car, dans ce système, la pompe pneumatique dilatait l'air dans une grande conduite principale, des-

tinée à recevoir l'air à la tension atmosphérique que l'eau devait remplacer.

La perte d'effet que nous avons trouvée n'étant pas inhérente à l'emploi de l'air dilaté, mais à une circonstance particulière, doit être rangée parmi les pertes dues à l'emploi des appareils et agents mécaniques.

On peut encore se demander si l'on pourrait retirer du volume d'air dilaté contenu dans le tube, l'effet dynamique dépensé à le dilater, lors même que l'on supprimerait l'épuisement. L'effet utile obtenu se composerait, dans ce cas, d'un espace parcouru sous l'action d'un effort variable, et résultant de la différence de pression exercée sur les deux faces du piston remorqueur, d'une part, par l'atmosphère, de l'autre, par l'air contenu dans le tube dont la tension est en raison inverse du volume qu'il occupe. L'équilibre entre les deux pressions exercées sur le piston, s'établit, et l'effort devient zéro, lorsque la tension de l'air intérieur est ramenée à la tension atmosphérique, ce qui a eu lieu lorsque le piston remorqueur est arrivé à un point tel qu'il ne lui reste plus à parcourir qu'une partie de la longueur du tube exprimée par la fraction  $\left(\frac{v}{v+v}\right)^n$ , et, s'il existait un espace intermédiaire, cette portion du tube à parcourir devrait être diminuée d'une longueur correspondante au volume de cet espace intermédiaire.

L'effet utile est donc exprimé par

$$a v \left\{ 1 - \left(\frac{v}{v+v}\right)^n - \left(\frac{v}{v+v}\right)^n n L \frac{v+v}{v} \right\}.$$

L'équation  $\mathcal{A}$  donne l'effet dynamique dépensé; le rapport cherché a donc pour expression

$$\frac{a v \left\{ 1 - \left(\frac{v}{v+v}\right)^n - \left(\frac{v}{v+v}\right)^n n L \frac{v+v}{v} \right\}}{a(v+v) \left\{ 1 - \left(\frac{r}{v+v}\right)^n - \left(\frac{v}{v+v}\right)^n n L \frac{v+v}{v} \right\}},$$

qui se réduit à  $\frac{v}{v+v}$ , comme lorsqu'il y a épuisement.

Après avoir discuté la théorie du système de MM. Clegg et Samuda en supposant les vases imperméables, cherchons à apprécier l'influence que peut exercer l'air qui pénètre dans le tube par les joints, les soupapes et le clapet, et déterminons d'abord quelle quantité d'air rentre aux divers degrés de dilatation.

A l'aide d'un grand nombre d'expériences, il a été reconnu que le mercure, lorsqu'on arrête la machine après avoir dilaté l'air du tube, descend avec une vitesse uniforme sur toute l'étendue de l'échelle manométrique, c'est-à-dire qu'en  $l'$  il rentre dans le tube une quantité ou poids d'air constant.

Les résultats de nos expériences sur l'abaissement du manomètre produit par la rentrée de l'air, sont consignés dans le tableau suivant.

TABLEAU N° 7. — Descente du mercure dans les manomètres de Kingstown et Dalkey, lorsque l'on arrête la machine motrice après avoir dilaté l'air du tube pneumatique.

EXPÉRIENCES									
DU 11 JANVIER 1844.		15 JANVIER 1844.		15 JANVIER 1844.		7 FÉVRIER 1844.		8 FÉVRIER 1844.	
Hauteur du manomètre.		Hauteur du manomètre observée de 18 en 18''.		Hauteur du manomètre.		Hauteur du manomètre.		Hauteur du manomètre.	
Temps écoulé pendant le passage d'une division à l'autre.		Temps total employé par le mercure pour descendre de 24 pouces.		Moment du passage du mercure vis-à-vis de chaque division.		Temps écoulé pendant le passage d'une division à l'autre.		Moment du passage vis-à-vis de chaque division.	
Pouces angl.				Heures.					
25		24,00		24,40	12,41'00''	25		20,00	1' 15''
22	29''	23,50		23,80	42 00	22	54''	19,50	1 52
21	29	22,60		22,80	42 50	21	52	19,00	1 51
20	30	22,10		22,00	45 00	20	55	18,50	2 15
19	30	21,70		21,20	45 15	19	55	18,00	2 51
18	51	21,10		20,80	50 18	18	22	17,50	2 50
17	50	20,70		20,50	45 45	17	17	17,00	3 10
16	55	20,15		19,80	44 00	16	17	16,50	5 50
15	29	19,60		19,40	15	15	20	16,00	5 50
14	52	19,10		18,70	50 14	14	18	15,50	4 12
15	51	18,55		18,20	4 15	15	22	15,00	4 50
12	51	18,10		17,50	45 00	12	20	14,50	4 51
11	50	17,50		17,00	15 11	11	25	14,00	5 11
10	51	17,30		16,70	50 10	10	26	13,50	5 54
9	50			16,20	45 9	9	25	13,00	5 52
8	29			15,70	46 00	8	24	12,50	6 15
7	51			15,00	15 7	7	22	12,00	6 51
6	50			14,60	50 6	6		11,50	6 51
"	"			14,10	45 "	"	"	11,00	7 08
"	"			13,50	47 00	"	"	10,50	7 28
"	"		10',50''	13,00	15 "	"	"	10,00	7 45
"	"			12,50	50 "	"	"	9,50	8 03
"	"			12,00	45 "	"	"	9,00	8 50
"	"			11,50	48 00	"	"	8,50	8 49
"	"			10,80	15 "	"	"	8,00	9 07
"	"			10,50	50 "	"	"	7,50	9 25
"	"			9,80	45 "	"	"	7,00	9 40
"	"			9,50	49 00	"	"	6,50	9 55
"	"			8,80	15 "	"	"	6,00	10 07
"	"			8,50	50 "	"	"	5,50	10 21
"	"			8,00	45 "	"	"	5,00	10 55
"	"			7,20	50 00	"	"	4,50	10 47
"	"			6,50	15 "	"	"	4,00	10 50
"	"			6,00	50 "	"	"	3,50	11 12
"	"			5,60	45 "	"	"	3,00	11 20
"	"			5,00	51 00	"	"	"	"
"	"			4,50	15 "	"	"	"	"
"	"			5,60	50 "	"	"	"	"
"	"			5,00	45 "	"	"	"	"
"	"			2,00	52 00	"	"	"	"
"	"			1,00	15 "	"	"	"	"
"	"			0,00	55 00	"	"	"	"
TEMPS TOTAL.	516''		10',50''		12' 00		410''		16'05
DESC. TOTALS.	17 p.		24 p.		24 p. 4		17 p		17 p.
DESC. EN L.	1 p. 98		2 p. 35		2 p. 05		2 p. 49		1 p. 69
									1 p. 56

Moyenne générale 2,00 pouces.

Le mercure descend donc en moyenne de 2 pouces , soit 0<sup>m</sup>051 par minute, c'est-à-dire qu'il rentre dans le tube un poids égal, ou  $\frac{51}{700}$  du poids total qu'il contenait à la tension atmosphérique, c'est-à-dire 26<sup>m</sup>09. Cette rentrée uniforme provient de ce que le clapet et les soupapes étant pressés en vertu de la différence de tension de l'air à l'extérieur et à l'intérieur du tube, ferment d'autant mieux que cette différence est plus grande, ce qui a lieu lorsque la dilatation est plus parfaite; le clapet oppose donc à la rentrée de l'air un obstacle croissant avec la force qui le fait pénétrer dans le tube.

Le remède nat, pour ainsi dire, du mal, et c'est, comme nous le verrons, un très-grand avantage que possède le clapet de MM. Clegg et Samuda.

Lorsque le convoi circule sur le chemin, la longueur du clapet comprise entre le piston-remorqueur et l'extrémité du tube, diminue à mesure que le convoi avance; la rentrée d'air pendant la marche ne reste donc pas la même: au départ, elle est égale à la quantité indiquée ci-dessus, et devient, à l'arrivée, plus petite de toute la rentrée due au clapet.

Il convient donc de rechercher séparément la rentrée d'air fournie par le clapet et celle qui est produite par les joints des portions du tube, les soupapes et le piston-remorqueur.

Pour apprécier la quantité d'air fournie par le clapet, il suffit d'arrêter le piston à divers points de la longueur du tube, de dilater l'air, puis d'observer la descente du mercure.

Connaissant, pour chaque station, le volume occupé par l'air dilaté, et l'abaissement du manomètre en  $l'$ , on en déduira immédiatement le poids d'air rentré.

Chacun des poids ainsi trouvés renferme la quantité constante et la quantité variable pour la longueur du clapet correspondante.

Appelons donc :

$Q, Q', Q''$ , les poids totaux d'air rentrés à chaque station;  
 $c$  le poids constant;

$q$  le poids d'air qui rentre en  $l'$ , sur un mètre de longueur du tube pneumatique;

$l, l', l''$ , les longueurs du tube occupées par l'air dilaté aux diverses stations :

Nous aurons pour chaque point d'observation :

$$c + q l = Q,$$

$$c + q l' = Q',$$

équations qui permettent de déterminer les deux inconnues  $c$  et  $q$ .

Une série d'expériences faites, le 15 janvier 1844, sous la direction de M. Bergin, a fourni les résultats consignés dans le tableau suivant.

TABLEAU N° 8.

NUMÉRO des STATIONS.	DESCENTE du mercure pen- dant $l'$ , valeur de $y, y''$ .	Longueur de la par- tie du tube pneu- matique comprise entre le lieu d'ob- servation et l'ex- trémité vers la machine.	Volume d'air dilaté comprenant le vo- lume du tuyau de communication et celui corres- pondant aux lon- gueurs $l, l'$ du tube pneumati- que.	POIDS d'air rentré en $l'$ à cha- que point de stationne- ment.	LIEUX de STATIONNEMENT.
1	Mètres. Moyenne. 0,058 0,058	2,182	299 <sup>ms</sup> ,13	29,676	à l'origine du tube.
2	$\left. \begin{array}{l} 0,057 \\ 0,053 \end{array} \right\} 0,056$	1,577	206, 87	19,816	à $\frac{1}{2}$ mille de l'ori- gine du tube.
3	$\left. \begin{array}{l} 0,081 \\ 0,082 \end{array} \right\} 0,081$	573	114, 72	15,896	à 1 mille.
4	0,106 0,106	"	49, 05	8,895	à l'extrémité.

Introduisant ces données dans les équations précédentes, on en déduit :

$$q = 0^k 01224.$$

$$q = 0,00487.$$

$$q = 0,01222.$$

ou, en moyenne,  $0^k,00977.$

Ces résultats présentant de grandes différences, nous avons cherché une donnée qui fût hors de discussion.

Il est de fait que, en général, le mercure descend de  $0^m051$  par 1', ou qu'il rentre un poids de  $26^k09$  d'air par minute dans le tube pneumatique et le tuyau de communication réunis.

Si, de cette quantité, nous retranchons le poids d'air rentré dans le tube lorsque le piston est placé près de l'ouverture du tuyau de communication, poids qui représente toutes les rentrées constantes, le reste donnera la rentrée due au clapet.

Adoptant donc  $8^k89$ , trouvés ci-dessus, pour la rentrée constante, il viendra pour la rentrée variable  $26^k09 - 8^k89 = 17^k20$ , qui, divisés par la longueur du tube,  $2^m182$ , donne, pour la rentrée par mètre courant,  $0^k00788$ , quantité inférieure à  $0^k00977$ , mais assez peu différente.

Cherchons maintenant l'expression analytique du travail de la machine, avec une rentrée d'air déterminée, cette rentrée étant proportionnelle au temps, tandis que le nombre de coups de piston dépend de la production de vapeur et de la résistance variable que produit la pompe à air : on ne peut établir l'expression cherchée que d'une manière approchée, en attribuant au piston une vitesse moyenne uniforme.

La machine faisant environ 24 révolutions, lorsque le mercure est aux extrémités de l'échelle manométrique, et ordinairement 20 à 22, nous admettons, comme une moyenne assez approximative, 22 doubles courses, ou 44 courses simples du piston, par minute, ce qui répond au travail de la machine dans de bonnes conditions.

Désignons par  $p$  un volume d'air à la tension atmosphérique, représentant le poids d'air rentré pendant l'intervalle qui sépare deux courses successives du piston pendant la première période;

$w$  exprimera, comme précédemment, la somme des volumes du tube pneumatique et du tuyau de communication ;  
 $v$  le volume de la pompe à air.

La tension à l'origine du mouvement étant égale à la tension atmosphérique, prise pour unité, deviendra :

$$\text{après la 1}^{\text{re}} \text{ course, } \frac{w+p}{w+v} = \left( \frac{w}{w+v} \right) + p \left( \frac{1}{w+v} \right);$$

$$\begin{aligned} \text{après la 2}^{\text{e}} \text{ course, } & (w+p) \left( \frac{w}{w+v} \right)^2 + p \frac{1}{w+v} \\ & = \left( \frac{w}{w+v} \right)^2 + p \left( \frac{w}{(w+v)^2} + \frac{1}{w+v} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{après la 3}^{\text{e}} \text{ course, } & (w+p) \frac{w^3}{(w+v)^3} + p \frac{w}{(w+v)^2} + p \frac{1}{w+v} \\ & = \left( \frac{w}{w+v} \right)^3 + p \left( \frac{w^3}{(w+v)^3} + \frac{w}{(w+v)^2} + \frac{1}{w+v} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{après la 4}^{\text{e}} \text{ course, } & (w+p) \frac{w^4}{(w+v)^4} + \frac{w^3}{(w+v)^3} + \frac{w}{(w+v)^2} + p \frac{1}{w+v} \\ & = \left( \frac{w}{w+v} \right)^4 + p \left( \frac{w^4}{(w+v)^4} + \frac{w^3}{(w+v)^3} + \frac{w}{(w+v)^2} + \frac{1}{w+v} \right); \end{aligned}$$

après la  $n^{\text{e}}$  course,

$$\left( \frac{w}{w+v} \right)^n + p \left( \frac{w^{n-1}}{(w+v)^n} + \frac{w^{n-2}}{(w+v)^{n-1}} + \dots + \frac{1}{w+v} \right).$$

expression qui, en sommant la série, donne :

$$\left( \frac{w}{w+v} \right)^n + p \left( 1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^n \right),$$

ou

$$\left( \frac{w}{w+v} \right)^n \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v}.$$

A chaque valeur de  $p$  correspond donc une limite de dilatation que l'on ne peut dépasser, quelle que soit la durée du travail de la pompe ; car, en portant même à l'infini le nombre de coups de piston, on réduirait à zéro l'expression

$$\left( \frac{w}{w+v} \right)^n, \text{ et la limite cherchée deviendrait } \frac{p}{v}.$$

Le travail mécanique qu'il faut dépenser pour faire parcourir au piston la longueur d'une course, en prenant une

moyenne entre les tensions initiale et finale, est représenté :

$$\text{Pour la 1}^\circ \text{ course, par } av \left( t - \frac{t+t'}{2} \right);$$

$$» \quad 2^{\text{mo}} \quad » \quad av \left( t' (1 + L \frac{t}{t'}) - \left( \frac{t'+t''}{2} \right) \right);$$

$$» \quad 3^{\text{mo}} \quad » \quad av \left( t'' (1 + L \frac{t}{t''}) - \left( \frac{t''+t'''}{2} \right) \right);$$

$$» \quad n^\circ \quad » \quad av \left( t^n \left( 1 + L \frac{t}{t^n-1} \right) - \left( \frac{t^{n-1}+t^n}{t} \right) \right).$$

La somme représentant le travail dépensé pendant  $n$  courses, devient, après les réductions :

$$av \left\{ \frac{t}{2} - \frac{t^n}{2} + L \frac{t}{t'} + L' \frac{t}{t''} + \dots + t^{n-1} - 1 L \frac{t}{t^n-1} \right\};$$

et, après avoir substitué :

$$\text{à } t \text{ sa valeur} = 1,$$

$$\text{à } v \text{ sa valeur} = \frac{w}{w+v} \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{w};$$

$$\text{à } t' \quad - \quad = \left( \frac{w}{w+v} \right)^2 \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v};$$

$$\text{à } t'' \quad - \quad = \left( \frac{w}{w+v} \right)^3 \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v};$$

$$\text{à } t^n \quad - \quad = \left( \frac{w}{w+v} \right)^n \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v};$$

nous obtenons :

$$av \left( \frac{1 - \left( \frac{w}{w+v} \right)^n \left( 1 - \frac{p}{v} \right) - \frac{p}{v}}{2} + \left( \frac{w}{w+v} \right) \left( 1 - \frac{p}{v} \right) \right. \\ \left. + \frac{p}{v} \left( L \frac{1}{\left( \frac{w}{w+v} \right) \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v}} \right) + \left( \left( \frac{w}{w+v} \right)^2 \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v} \right) \left( L \frac{1}{\left( \frac{w}{w+v} \right)^2 \left( 1 - \frac{p}{v} \right) - \frac{p}{v}} \right) \dots \right. \\ \left. + \left( \left( \frac{w}{w+v} \right)^{n-1} \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v} \right) \left( L \frac{1}{\left( \frac{w}{w+v} \right)^{n-1} \left( 1 - \frac{p}{v} \right) + \frac{p}{v}} \right) \right).$$

Les calculs à l'aide de la formule précédente, qui forme une série que nous n'avons pu sommer, sont très-long. Desirant d'ailleurs obtenir un moyen d'évaluation expéditif et dégagé de toute hypothèse, nous avons cherché à reconnaître si, entre certaines limites de dilatation, on pouvait considérer les effets dynamiques dépensés comme proportionnels aux quantités absolues, ou poids d'air extraits du tube; cette proposition étant évidente pour la seconde période, il restait à s'assurer si elle était admissible pendant la période de dilatation; nous avons donc calculé, à l'aide de la première de ces deux formules, l'effet dynamique nécessaire pour obtenir le degré de dilatation auquel la machine élève l'air après chaque minute successive de sa marche, puis nous avons divisé la quantité trouvée par le poids d'air extrait.

Comparant, dans les mêmes limites de dilatation, le travail dépensé et le poids d'air extrait, lorsqu'il n'y a pas de rentrée d'air, nous avons trouvé que chaque kilogramme d'air exigerait :

	AVEC RENTRÉE D'AIR.		SANS RENTRÉE D'AIR.	
	Kilogrammes.		Kilogrammes.	
Lorsque le mercure monte de 0 à 0 <sup>m</sup> 216		1,310		1,260
id. " 0,216 0, 340		3,738		3,646
id. " 0,340 0, 422		5,638		5,534
id. " 0,422 0, 473		7,196		7,120
id. " 0,473 0, 511		8,400		8,320
id. " 0,511 0, 536		9,360		9,309
id. " 0,536 0, 559		10,222		10,164

Les faibles différences entre ces nombres nous ont donc permis d'admettre, comme une évaluation très-approximative, que l'on pourrait, dans les limites de dilatation les plus éloignées que peut produire le travail de la machine pen-

tant 1', regarder l'effet dynamique dépensé comme proportionnel au poids d'air extrait.

Cette proposition permet de résoudre presque toutes les questions d'application par de simples opérations d'arithmétique. En effet, lorsque l'on connaît la hauteur manométrique obtenue, par le travail de la machine, pendant 1, 2, 3 minutes, on peut calculer le poids d'air extrait du tube à chacun de ces moments, et, par différence, le poids d'air épuisé par la machine pendant la 1<sup>re</sup>, la 2<sup>e</sup> et la 3<sup>e</sup> minute; ajoutant à chacun des poids trouvés, celui de l'air qui rentre en 1', on obtient le poids total d'air extrait pendant 1', sous les tensions comprises entre les limites observées.

Ces résultats sont consignés dans le tableau suivant :

TABLEAU N° 9.

TEMPS écoulé depuis l'origine du mouvement de la machine.	HAUTEURS MANOMÉTRIQUES EXPRIMÉES EN MESURES		POIDS D'AIR EXTRAIT DU TUBE PNEUMATIQUE ET DU TUYAU RÉUNIS		POIDS D'AIR rentré pendant chaque mi- nute.	POIDS TOTAL d'air extrait par la machine pendant chaque minute successive.
	anglaises. Pouces.	Métriques.	Depuis l'origine du mouve- ment.	Pendant chaque minute.		
1	8,50	0,216	110,32	110,32	26,09	136,61
2	13,40	0,340	173,96	63,44	26,09	89,53
3	16,60	0,422	215,92	41,96	26,09	68,05
4	18,70	0,475	243,04	27,12	26,09	53,21
5	20,10	0,511	261,46	18,42	26,09	44,51
6	21,10	0,536	274,25	12,79	26,09	38,88
7	22,00	0,559	286,02	11,77	26,09	37,86
8	22,60	0,574	293,69	7,67	26,09	37,76

On a ensuite cherché quel serait le poids extrait si, au lieu de continuer à monter, le manomètre restait stationnaire.

Il est clair que, pendant la seconde minute, la machine aurait épuisé une quantité d'air comprise entre 136<sup>b</sup>61 et 89<sup>b</sup>53, mais plus rapprochée de 89<sup>b</sup>53 que de 136<sup>b</sup>61, dans le rapport donné par les hauteurs manométriques 0<sup>m</sup>216 et 0<sup>m</sup>124 obtenus pendant la 1<sup>re</sup> et la 2<sup>e</sup> minute; appelant donc  $x$ ,  $x'$ ,  $x''$ , les quantités cherchées, nous aurons :

$$136,61 - x : x - 89,53 :: 216 : 124$$

$$89,53 - x' : x' - 68,05 :: 124 : 82$$

$$68,05 - x'' : x'' - 53,21 :: 82 : 53.$$

Nous obtiendrons de cette manière, et avec un degré d'approximation suffisant, les poids d'air extrait par la machine pendant 1 minute, aux divers degrés de dilatation indiqués.

Ces quantités sont portées au tableau suivant.

TABLEAU N° 10.

TEMPS écoulé depuis l'origine du mouvement de la ma- chine.	HAUTEURS MANOMÉTRIQUES EXPRIMÉES EN MESURES		POIDS DE L'AIR extrait par la ma- chine pendant cha- que minute succes- sive.	POIDS TOTAL d'air que la machine extrairet si le ma- nomètre restait sta- tionnaire aux hau- teurs indiquées à la 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> colonne.
	Anglaises. Pouces.	Métriques.		
1	8,50	0,216	136,61	106,70
2	13,40	0,340	89,53	76,60
3	16,60	0,422	68,05	59,04
4	18,70	0,475	53,21	48,03
5	20,10	0,511	44,51	41,19
6	21,10	0,536	38,88	38,35
7	22,00	0,559	37,86	35,38
8	22,60	0,574	33,76	

La vitesse du piston-remorqueur étant modifiée par la rentrée d'air, qui varie en raison de la longueur du clapet,

il faut , pour connaître la durée du trajet, déterminer la loi de cette variation de vitesse.

L'espace parcouru par le piston-remorqueur dans l'unité de temps , peut être considéré comme composé de deux quantités : l'une, constante, serait la longueur que parcourrait le piston si la rentrée d'air , qui a lieu au moment du départ , restait constante ; la seconde quantité, ou longueur additionnelle, sera proportionnelle à une diminution de rentrée d'air égale à la rentrée que produisait la longueur parcourue.

Nommons donc :

$c$  le poids d'air extrait par la machine, sous la tension que l'on considère , diminuée du poids d'air représentant toutes les rentrées, y compris celle du clapet;

$q$  le poids d'air qui rentre par l'unité linéaire du clapet;

$s$  le poids d'air contenu dans le tube par unité de longueur ;

$x, x', x'', x''', \dots$  les longueurs successives parcourues pendant l'unité de temps :

Nous aurons les expressions suivantes pour les valeurs de  $x, x', x'', x''', \dots$

$$\begin{aligned} \frac{c + \frac{1}{2}qx}{s} = x \text{ d'où. } \dots \dots \dots x &= \frac{c}{s - \frac{1}{2}q} \\ \frac{c + (x + \frac{1}{2}x')q}{s} = x' \dots \dots \dots x' &= \frac{c}{s - \frac{1}{2}q} \times \left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right) \\ \frac{c + (x + x' + \frac{1}{2}x'')q}{s} = x'' \dots \dots \dots x'' &= \frac{c}{s - \frac{1}{2}q} \times \left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right)^2 \\ \frac{c + (x + x' + x'' + \frac{1}{2}x''')q}{s} = x''' \dots \dots \dots x''' &= \frac{c}{s - \frac{1}{2}q} \times \left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right)^3 \end{aligned}$$

La longueur totale du parcours , ou la longueur  $L$  du tube

pneumatique, sera égale à la somme des espaces  $x, x', x'', x'''$ ,  $x''''$ , . . . . . et l'on aura :

$$L = \frac{c}{s^{-1}/q} \left( 1 + \left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right) + \left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right)^2 + \left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right)^3 + \dots \right)$$

$$= \frac{c}{s^{-1}/q} \left( \frac{\left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right)^n - 1}{\left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right) - 1} \right);$$

$$n = \frac{\text{Log.} \left( \frac{qL}{c} + 1 \right)}{\text{Log.} \left( \frac{s + \frac{1}{2}q}{s - \frac{1}{2}q} \right)}$$

$n$  représente le nombre de termes ou d'unités de temps employées à parcourir la longueur du tube.

Cette valeur de  $n$  est trop faible, parce que l'on n'a pas tenu compte du temps pendant lequel devrait agir l'effort exercé par le piston, pour transmettre à la masse du convoi une augmentation de vitesse égale à la différence entre les vitesses finale et initiale; mais nous avons cru pouvoir négliger cette quantité, eu égard au degré d'approximation que possèdent les données fournies par les observations, et afin d'employer des éléments de calcul plutôt favorables que défavorables au nouveau système.

A l'aide des données qui précèdent, il devient très-facile de résoudre tous les problèmes relatifs à la machine de Dalkey.

Admettant, comme précédemment, que l'épuisement se fasse sous une tension uniforme, on peut se demander :

- 1° Quel est l'effet utile lorsque l'on emploie diverses tensions?
- 2° Quel serait l'effet utile s'il n'y avait pas de rentrée d'air?

3° Si la pompe pneumatique communiquait sans intermédiaire avec le tube pneumatique, que deviendraient les effets utiles trouvés ci-dessus ?

4° Quel serait l'effet utile de la machine de Dalkey, si on l'appliquait sans intermédiaire à des tubes ayant des longueurs variables de 1 à 5 kilomètres, avec des degrés différents de dilatation ?

5° Quels sont, dans l'état actuel des choses, les efforts et les vitesses que la machine de Dalkey peut produire, sous divers degrés de dilatation ?

6° Enfin quels seraient les efforts et vitesses correspondants à des longueurs de 1 à 5 kilomètres, sous diverses tensions ?

Pour résoudre la première question, nous connaissons déjà le temps et, par suite, l'effort dynamique employé par la machine pour dilater l'air ; il reste à calculer le temps qu'elle mettrait à épuiser le poids d'air contenu dans le tube pneumatique à ces diverses tensions, résultat que l'on obtient à l'aide de la formule

$$n = \frac{\text{Log.} \left( \frac{qL}{c} + 1 \right)}{\text{Log.} \left( \frac{s+1/sq}{s-1/sq} \right)}, \text{ trouvée ci-dessus.}$$

Additionnant les temps employés pour dilater et épuiser, puis multipliant le nombre de minutes trouvées par le facteur constant 821,400 kilogr., le produit représentera en kilogrammètres le travail dépensé par le moteur.

L'effet utile s'obtiendra, comme précédemment, en multipliant l'effet relatif à la tension par la longueur du tube.

Le rapport entre la première et la seconde quantité prise pour unité, sera le coefficient d'effet utile cherché.

On résoudra la seconde, la troisième et la quatrième question, en suivant la même marche.

Quant à la durée du travail moteur pour obtenir, dans un tube différent de celui qui a servi aux expériences, un degré

de dilatation déterminé , elle s'obtiendra en calculant successivement le temps nécessaire pour passer d'un degré de dilatation à l'autre, donnée que fournit la division du poids d'air à extraire par celui que la machine motrice extrait utilement dans l'unité de temps.

Les résultats sont consignés aux tableaux suivants, n° 11 et 12, et satisfont aux quatre premières questions posées ci-dessus.

TABLEAU N° 11. — *Effet utile de l'appareil*

DANS L'ÉTAT ACTUEL.														
AVEC RENTRÉE D'AIR.										SANS RENTRÉE				
Hauteur du manomètre indiquant la différence entre la tension de l'air du tube et celle de l'atmosphère, exprimée en			Tension de l'air dans le tube pneumatique.	TEMPS EMPLOYÉ par la MACHINE pour			Effet dynamique représentant le travail moteur.	Effet dynamique réalisé.	Coefficient d'effet utile.	TEMPS EMPLOYÉ par LA MACHINE pour			Effet dynamique représentant le travail moteur.	
Fouces anglais de mercure.	Mètre de mercure.	Atmosphère.		dilater l'air.	épuiser l'air.	TOTAL.				DILATER.	Épuiser.	TOTAL.		
8,5	0,216	0,2842	0,7158	1	2,58	3,58	2,940,612	754,100	0,250	0,81	0,81	2,18	2,99	2,455
13,4	0,340	0,4474	0,5526	2	5,07	5,07	4,164,498	4,153,800	0,278	0,71	1,52	2,35	5,87	5,178
16,6	0,422	0,5555	0,4447	3	5,35	6,55	5,565,540	4,454,500	0,267	0,62	2,14	2,45	4,59	3,770
18,7	0,475	0,6250	0,3750	4	4,10	8,10	6,655,540	4,614,500	0,245	0,51	2,65	2,54	5,19	4,265
20,1	0,511	0,6724	0,5276	5	4,68	9,68	7,951,152	4,737,000	0,218	0,41	5,06	2,59	5,65	4,640
21,1	0,536	0,7055	0,2947	6	4,87	10,87	8,928,618	4,822,000	0,204	0,55	5,59	2,50	5,89	4,858
22,0	0,559	0,7555	0,2645	7	5,22	12,22	10,057,508	4,900,000	0,189	0,51	5,70	2,45	6,15	5,053
22,6	0,574													

*MOTEUR DU CHEMIN DE KINGSTOWN A DALKEY.*

AVEC SUPPRESSION DE TUYAU DE COMMUNICATION.															
D'AIR.		AVEC RENTREE D'AIR.						SANS RENTREE D'AIR.							
Effet dynamique realise.	Coefficient d'effet utile.	TEMPS EMPLOYE			EFFET DYNAMIQUE			Coefficient d'effet utile.	TEMPS EMPLOYE			EFFET DYNAMIQUE			
		par LA MACHINE			REPRESENTANT				par LA MACHINE			REPRESENTANT			
		pour			le travail				pour			le travail			
		DILATER.	Epuiser.	TOTAL.	le travail	le travail		DILATER.	Epuiser.	TOTAL.	le travail	le travail			
					le travail	realise.					le travail	realise.			
754,100	0,29	0,81	0,81	2,49	5,50	2,710,620	754,100	0,271	0,68	0,68	2,18	2,86	2,349,204	754,100	0,512
1,135,800	0,331	0,79	1,60	2,90	4,51	3,704,314	1,135,800	0,312	0,39	1,27	2,33	3,62	2,973,468	1,135,800	0,589
1,454,500	0,380	0,77	2,37	3,26	3,63	4,624,482	1,454,500	0,310	0,32	1,79	2,43	4,24	3,482,736	1,454,500	0,412
1,614,500	0,379	0,74	3,11	3,67	6,78	3,569,092	1,614,500	0,290	0,45	2,22	2,34	4,76	3,909,864	1,614,500	0,413
1,737,000	0,374	0,71	3,82	4,05	7,87	6,464,418	1,737,000	0,269	0,53	2,37	2,39	3,16	4,258,424	1,737,000	0,410
1,822,000	0,377	0,66	4,48	4,15	8,61	7,072,234	1,822,000	0,258	0,27	2,84	2,30	3,54	4,586,276	1,822,000	0,411
1,900,000	0,377	0,63	5,13	4,28	9,41	7,729,374	1,900,000	0,246	0,26	3,10	2,43	3,33	4,542,342	1,900,000	0,418

NOTA. On a suppose que la suppression du tuyau de communication reduirait la rentree constante de 8189 a 5152.

TABLEAU N° 12. — Résultats que produirait l'appareil

Hauteur du manomètre indiquant la différence entre la tension de l'air contenu dans le tube pneumatique et celle de l'atmosphère exprimée en			TENSION de l'air dans le tube pneumatique.	UN KILOMÈTRE.						
pouces anglais de mercure.	mètre de mercure.	atmos- phère.		TEMPS NÉCESSAIRE POUR			EFFET DYNAMIQUE			
				DILATER.	ÉPUISER.	TOTAL.	DÉPENSÉ.	RÉALISÉ.	RAPPORT.	
8,5	0,216	0,2842	0,7158	0,344	0,344	1,084	1,428	1,172,959	336,500	0,28
13,4	0,340	0,4474	0,5526	0,319	0,663	1,253	1,896	1,587,574	529,700	0,34
16,6	0,422	0,5533	0,4447	0,296	0,959	1,339	2,238	1,887,517	657,400	0,34
18,7	0,475	0,6250	0,3750	0,261	1,220	1,451	2,671	2,193,959	740,000	0,33
20,1	0,511	0,6724	0,3276	0,227	1,447	1,550	2,983	2,451,879	796,100	0,32
21,1	0,536	0,7053	0,2947	0,192	1,639	1,526	3,165	2,599,731	833,000	0,32
22,0	0,559	0,7333	0,2645	0,184	1,823	1,527	3,330	2,751,691	870,900	0,31
					8,095					
				QUATRE KILOMÈTRES.						
8,5	0,216	0,2842	0,7158	1,702	1,702	4,988	6,690	5,493,166	1,346,000	0,243
13,4	0,340	0,4474	0,5526	1,853	3,533	6,149	9,704	7,970,866	2,118,900	0,266
16,6	0,422	0,5533	0,4447	2,075	5,630	7,471	13,101	10,761,161	2,629,600	0,244
18,7	0,475	0,6250	0,3750	2,369	8,199	9,378	17,777	14,602,028	2,560,000	0,203
20,1	0,511	0,6724	0,3276	3,791	11,990	13,233	23,245	20,736,243	3,184,000	0,154
21,1	0,536	0,7053	0,2947	10,632	22,642	17,906	40,548	33,306,127	3,340,000	0,100
22,0	0,559	0,7333	0,2645	"	"	"	"	"	"	"

leur de Dalkey, s'il était appliqué à des tubes de :

DEUX KILOMÈTRES.							TROIS KILOMÈTRES.						
TEMPS NÉCESSAIRE POUR			EFFET DYNAMIQUE		RAPPORT	TEMPS NÉCESSAIRE POUR			EFFET DYNAMIQUE		RAPPORT		
DILATER.	ÉPOUISER.	TOTAL.	DÉPENSÉ.	RÉALISÉ.		DILATER.	ÉPOUISER.	TOTAL.	DÉPENSÉ.	RÉALISÉ.			
0,73	0,733	2,262	2,997	2,461,736	673,000	0,273	1,183	1,183	3,356	4,739	3,892,615	1,009,500	0,259
0,74	1,449	2,630	4,079	3,350,491	1,059,400	0,316	1,280	2,391	4,242	6,633	5,448,546	1,589,100	0,292
0,68	2,137	2,931	5,068	4,162,835	1,314,800	0,316	1,240	3,631	4,896	8,327	7,004,078	1,972,200	0,282
0,50	2,787	3,280	6,067	4,983,434	1,480,000	0,297	1,295	4,926	5,750	10,676	8,769,266	2,220,000	0,253
0,69	3,396	3,593	6,989	5,740,765	1,592,200	0,277	1,382	6,308	6,697	13,005	10,682,307	2,388,300	0,224
0,57	3,953	3,636	7,589	6,233,605	1,670,000	0,268	1,512	7,820	7,077	14,897	12,236,396	2,505,000	0,205
0,45	4,486	3,744	8,240	6,768,336	1,741,600	0,257	1,533	9,378	7,818	17,196	14,124,794	2,612,400	0,185
	18,263							35,632					
CINQ KILOMÈTRES.													
2,310	2,310	6,592	8,902	7,312,103	1,682,500	0,230	"	"	"	"	"	"	"
2,728	5,036	8,480	13,316	11,102,042	2,648,500	0,239	"	"	"	"	"	"	"
3,082	8,498	11,197	19,695	16,177,473	3,287,000	0,203	"	"	"	"	"	"	"
4,288	14,766	18,513	33,281	27,337,013	3,700,000	0,135	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

Enfin en divisant la longueur du tube par le temps de l'épuisement, on obtient la vitesse moyenne correspondante aux tensions que l'on considère et qui déterminent les efforts. Ces données composent les tableaux suivants, n° 13 et 14, et donnent la solution des 5° et 6° problèmes.

TABLEAU N° 13. — *Effort et vitesse que peut produire l'appareil de Dalkey, appliqué au chemin de Kingstown.*

Hauteur du manomètre indiquant la différence entre la tension de l'air du tube et l'atmosphère exprimée par			EFFORT. — (Kilog.)	DANS L'ÉTAT ACTUEL.		AVEC SUPPRESSION DU TUYAU DE COMMUNICATION.		OBSERVATIONS.
pouces anglais.	mètre.	atmosphère.		AVEC RENTRÉE D'AIR.	SANS RENTRÉE D'AIR.	AVEC RENTRÉE D'AIR.	SANS RENTRÉE D'AIR.	
				Vitesse.	Vitesse.	Vitesse.	Vitesse.	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
			kil.	m. par".				
8,5	0,216	0,2842	336,50	14,08	16,66	14,64	16,66	<p>Les vitesses portées dans ce tableau et le suivant, ont été obtenues en divisant la longueur du tube par le temps de l'épuisement. Le profil du chemin de Kingstown à Dalkey, en présentant une pente favorable au départ et une rampe assez prononcée à l'arrivée, tend à équilibrer la vitesse que la rentrée d'air variable diminue d'autant plus que le convoi est plus près de l'origine du tube.</p> <p>Les vitesses portées dans la 7<sup>e</sup> colonne ne diffèrent des vitesses portées dans la 5<sup>e</sup> que parce que la suppression du tuyau intermédiaire a réduit la rentrée d'air constant de 8,80 à 5,32.</p>
13,4	0,540	0,4474	529,70	11,86	15,48	12,47	15,48	
16,6	0,422	0,5553	637,40	10,29	14,84	11,13	14,84	
18,7	0,475	0,6250	740,00	8,87	14,35	9,91	14,35	
20,1	0,511	0,6724	796,10	7,77	14,08	8,98	14,08	
21,4	0,556	0,7053	835,00	7,47	14,55	8,80	14,55	
22,0	0,539	0,7355	870,80	6,97	14,94	8,49	14,94	

TABLEAU N° 14. — *Effort et vitesse que peut produire l'appareil de Dalkey, appliqué à des tubes de 1 à 5 kilomètres.*

Hauteur du manomètre indiquant la différence entre la tension de l'air du tube et l'atmosphère exprimée en			EFFORT.	VITESSE CORRESPONDANTE A DES TUBES DE				
poises anglais.	mètre.	atmosphère.		1 kilomètre.	2 kilomètres.	3 kilomètres.	4 kilomètres.	5 kilomètres.
			kil.					
8,5	0,216	0,2842	336,50	13,37	14,74	14,06	13,37	12,64
13,4	0,340	0,4474	529,70	13,32	12,67	11,79	10,84	9,83
16,6	0,422	0,5353	657,40	12,45	11,57	10,21	8,92	7,44
18,7	0,475	0,6250	740,00	11,49	10,16	8,70	6,96	4,50
20,1	0,511	0,6724	796,10	10,90	9,28	7,47	5,03	»
21,1	0,536	0,7053	833,00	10,92	9,17	7,06	3,72	»
22,0	0,559	0,7353	870,80	10,91	8,90	6,40	»	»

Les données des tableaux précédents font voir :

1° Que l'effet utile varie avec le degré de dilatation ; qu'il croît d'abord à mesure, que la dilatation augmente ; devient stationnaire, puis décroît : résultat facile à prévoir d'après les considérations théoriques que nous avons exposées. En effet, les frottements pendant une course du piston restent uniformes, tandis que la résistance de l'air varie avec les divers degrés de tension, l'effet utile produit doit donc être relativement plus grand, lorsque la résistance est à son *maximum*.

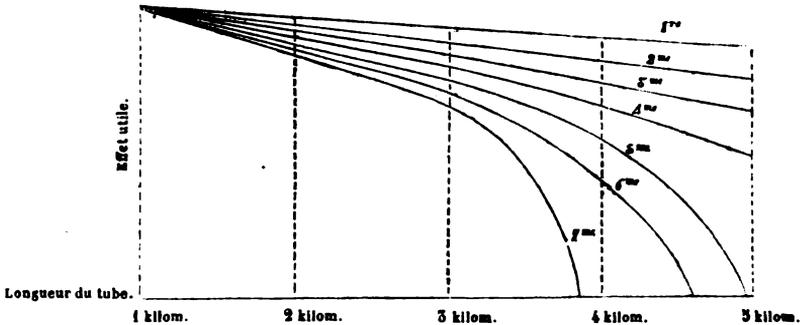
Les frottements et résistances de toute espèce, ainsi que les rentrées d'air, modifient le degré de dilatation qui correspond au *maximum* d'effet utile ; ce degré devrait être celui qui donne la plus grande résistance, pendant une course

de piston, et pour lequel nous avons trouvé  $0^{\text{at}} 395$ , répondant à la hauteur  $0^{\text{m}} 46$  du manomètre de Dalkey, tandis qu'en pratique ce *maximum* correspond à environ  $0^{\text{at}} 50$  ou  $0^{\text{m}} 38$  du manomètre.

L'échauffement de l'air dans la pompe, et surtout la rentrée de l'air, occasionnant des pertes de force d'autant plus grandes que la dilatation est plus considérable, doivent, en effet, faire descendre le degré correspondant au *maximum* d'effet utile ;

2° L'effet utile décroît en raison de la longueur du tube, dans une proportion d'autant plus rapide que le degré de dilatation est plus élevé.

Le tracé graphique suivant indique la loi de cette décroissance, d'après les résultats du tableau précédent.



La 1<sup>re</sup> courbe correspond à une pression de  $0^{\text{at}} 284$  exercée par l'atmosphère sur le piston-remorqueur.

La 2 <sup>e</sup>	id.	id.	0 447	id.	id.	id.
La 3 <sup>e</sup>	id.	id.	0 555	id.	id.	id.
La 4 <sup>e</sup>	id.	id.	0 625	id.	id.	id.
La 5 <sup>e</sup>	id.	id.	0 672	id.	id.	id.
La 6 <sup>e</sup>	id.	id.	0 706	id.	id.	id.
La 7 <sup>e</sup>	id.	id.	0 735	id.	id.	id.

L'effet nuisible des rentrées d'air croissant avec les longueurs et les degrés de dilatation, assignent les limites d'action d'un moteur déterminé, et les résultats consignés

ci-dessus indiquent quelles sont ces limites pour la machine motrice de Dalkey.

On ne peut, en effet, imprimer à cette machine une vitesse sensiblement plus grande que celle de 22 à 24 révolutions par minute, sans inconvénient, et notamment sans échauffer outre mesure le cylindre de la pompe à air, qui acquiert déjà une température assez élevée pour qu'on ne puisse y appliquer la main.

Jusqu'à présent, nous avons toujours supposé que, pendant la marche du convoi, le manomètre restait stationnaire, ou que l'effort exercé par le piston-remorqueur était constamment en équilibre avec la résistance du convoi. Cette combinaison est celle qui, pour une hauteur manométrique déterminée, correspond au *maximum* de charge et au *minimum* de vitesse : elle s'appliquerait par conséquent avec avantage au service des marchandises ; mais, pour les convois de voyageurs, qui exigent une grande vitesse, on modifie cette application du nouveau système de la manière suivante :

Après avoir fait monter le manomètre au point le plus élevé, on n'attache qu'un convoi léger, dont la résistance est beaucoup inférieure à l'effort du piston-remorqueur ; la différence entre ces deux forces tend à imprimer au convoi une vitesse accélérée, jusqu'au moment où cette résistance, augmentée de l'action retardatrice de l'air, devient égale à l'effort moteur, lequel décroît d'autant plus rapidement que le piston est animé d'une vitesse excédant davantage celle que produit l'aspiration de la pompe pneumatique : le piston comprime donc l'air dilaté devant lui, et fait ainsi décroître la différence entre la tension de cet air et celle de l'atmosphère.

Le convoi, en vertu de son inertie, conservera la vitesse au delà du moment de l'équilibre, et l'effort continuera à décroître, jusqu'à ce qu'enfin la marche du convoi soit assez ralentie pour que la résistance soit devenue inférieure à l'effort moteur, qui alors imprimera au convoi un nouvel élan, lequel

sera suivi d'un second ralentissement, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'enfin l'équilibre puisse s'établir après une série d'oscillations décroissant d'intensité.

Dans cette combinaison, l'air dilaté produit une action comparable à celle d'un très-long ressort en spirale, que l'on aurait préalablement tendu et auquel on n'attacherait qu'une faible résistance, qui lui permettrait de reprendre sa longueur primitive.

La force élastique d'un ressort ou de l'air pouvant agir avec une vitesse très-grande on obtiendra en un temps très-court un effet dynamique considérable, et même beaucoup supérieur à celui que pourrait développer, pendant le même temps, le moteur qui n'aurait tendu le ressort ou dilaté l'air que par un travail prolongé.

Considéré sous ce rapport, le système atmosphérique présente une manière d'agir qui lui est particulière, et qui, sauf les difficultés pratiques, permettrait d'obtenir des vitesses que réaliseraient difficilement les autres moyens connus.

Remarquons que, si l'on n'utilisait que cette action du système atmosphérique, l'air dilaté contenu dans le tube serait, après chaque voyage, ramené à la tension atmosphérique, ce qui ferait disparaître la perte de force qui résulte, comme nous l'avons vu, de l'espace intermédiaire qui, dans ce cas, loin de nuire, aurait l'avantage de prolonger le parcours pendant lequel l'action motrice serait exercée. Cet espace intermédiaire fournirait donc un véritable réservoir de force.

Mais, si l'on donnait à ce volume intermédiaire des dimensions telles que le piston remorqueur, en arrivant au terme de sa course, ne ramenât point l'air dilaté du tube à la tension atmosphérique, la perte que nous avons signalée se reproduirait de nouveau, et elle reste inévitable lorsque l'on fait agir la machine pendant la marche du convoi.

Voyons quel serait l'effet utile si, après avoir obtenu divers degrés de vide dans l'appareil de Dalkey, l'on n'utilisait que

l'effet dynamique résultant de la dilatation du volume d'air contenu dans le tube.

Le travail dépensé est connu par le temps employé pour produire la dilatation au moment du départ.

L'effet utile est facile à obtenir à l'aide de la formule  $a w \left( 1 - t^n - t^n L \frac{1}{r^n} \right)$  faisant les calculs on obtient les résultats suivants.

Hauteurs manométriques indiquant la différence entre la tension de l'air du tube et l'atmosphère, exprimées en			EFFET DYNAMIQUE		RAPPORT ou COEFFICIENT D'EFFET UTILE.
pouces anglais.	mètre.	atmosphère.	dépensé.	réalisé.	
8,5	0,216	0,284	821,400	159,050	0,169
13,4	0,340	0,447	1,642,800	369,873	0,225
16,6	0,422	0,535	2,464,200	602,550	0,244
18,7	0,475	0,625	3,285,600	795,057	0,242
20,1	0,511	0,672	4,107,000	948,012	0,231
21,1	0,536	0,705	4,928,400	1,056,668	0,214
22,0	0,559	0,735	5,749,800	1,185,653	0,206

Dans la pratique, la pompe pneumatique fonctionne toujours pendant la marche des convois, quelque rapide qu'elle soit; l'épuisement se fait donc sous des tensions qui varient, depuis la tension initiale, jusqu'à la tension réduite que possède l'air au moment où le convoi atteint l'extrémité du tube, tension qui, pour des convois très-légers, peut différer très-peu de la tension atmosphérique.

Pour déterminer le coefficient d'effet utile du travail d'épuisement opéré sous une tension déterminée, il suffit de retrancher, de tout le travail réalisé porté au tableau

n° 44 (avec rentrée d'air), le travail relatif au volume d'air dilaté contenu dans le tube tel qu'il vient d'être indiqué, puis de diviser le reste par le travail moteur dépensé pendant l'épuisement, et l'on obtient ainsi les résultats suivants pour l'appareil de Dalkey tel qu'il existe.

Hauteurs manométriques indiquant la différence entre la tension de l'air du tube et l'atmosphère exprimées en			EFFET DYNAMIQUE		RAPPORT.
pouces anglais.	mètre.	atmosphère.	dépensé.	réalisé.	
8,5	0,216	0,285	2,119,212	595,050	0,281
13,4	0,340	0,447	2,521,698	785,927	0,311
16,6	0,422	0,555	2,899,140	831,950	0,287
18,7	0,475	0,625	3,567,740	819,443	0,245
20,1	0,511	0,672	3,844,152	788,988	0,205
21,1	0,536	0,705	4,000,218	765,532	0,191
22,1	0,559	0,736	4,287,708	714,367	0,167

L'effet utile de l'appareil de Dalkey, lorsqu'il est employé à remorquer des convois légers, et par conséquent rapides, se compose donc de deux éléments, qui dépendent du degré de dilatation: 1° au moment du départ; 2° pendant la marche du convoi.

Le premier élément varie peu, parce que, pour obtenir de grandes vitesses, on a soin de préparer un grand effort pour le départ.

Le second élément devient d'autant plus avantageux que la hauteur manométrique s'approche davantage de 0<sup>447</sup>, ce qui n'a lieu que pour autant que le convoi est très-léger, et par conséquent animé d'une grande vitesse: c'est ce qui explique l'avantage trouvé pendant les expériences des 44 et 46 janvier 1844, en faveur des convois les plus rapides.

Remarquons toutefois que l'importance relative du second élément décroissant avec la durée du trajet, ne peut, même pour les plus grandes vitesses, modifier notablement les coefficients d'effet utile que nous avons trouvés. (Tableaux n° 11 et n° 12).

*La dépense croit avec la vitesse.* — Nous avons vu que l'on obtenait une grande vitesse en réduisant l'effort exercé par le piston, de sorte que la dépense faite pour préparer le vide se répartit sur une moindre charge, et devient par conséquent plus grande par unité de poids. Nous voyons, en effet, par les expériences des 11 et 16 janvier 1844, que l'effet dynamique dépensé par tonneau transporté de Kingstown à Balkey, a été en moyenne :

le 8 janvier 1844	}	de 28,083 kilogram. pour une vitesse
		de 9 <sup>m</sup> 13 par seconde ;
le 16 janvier 1844	}	de 37,556 kilogram. pour une vitesse
		de 12 <sup>m</sup> 27 par seconde ;
le 16 janvier 1844	}	de 27,418 kilogram. pour une vitesse
		de 5 <sup>m</sup> 52 par seconde ;
le 16 janvier 1844	}	de 32,411 kilogram. pour une vitesse
		de 8 <sup>m</sup> 42 par seconde.

C'est, du reste, un fait constaté, que la résistance de l'air croit avec la vitesse, et ce surcroît de résistance exige un surcroît de force qui se paye, quel que soit l'agent mécanique que l'on emploie.

On ne peut soustraire le poids transporté à cette résistance croissante de la part de l'air, qu'en le faisant voyager dans le tube, ce qui n'est applicable qu'aux dépêches, et c'est peut-être pour ce service que le système atmosphérique présente le plus d'avantages.

Faisons enfin remarquer que nous avons dû considérer comme effet utile, le produit de l'espace parcouru par l'effort exercé, quelle que soit la nature des résistances que cet effort doit vaincre, et qui peuvent être dues, soit à une forte charge

remorquée lentement, soit à un petit, convoi animé d'une grande vitesse, parce que, en effet, il peut être utile d'avoir un moindre effort et plus de vitesse, bien que cet effort coûte plus cher.

*Expériences sur une machine avec câbles.* — Pour comparer les résultats trouvés sur le chemin de fer atmosphérique avec ceux que l'on obtient par le système ordinaire des câbles, nous avons répété, sur l'une des machines stationnaires des plans-inclinés de Liège, des expériences analogues à celles que nous avons faites à Dalkey.

A l'aide d'un indicateur de Macnaught, nous avons obtenu le tracé ou diagramme de la tension de la vapeur dans le cylindre, pendant que le convoi était remorqué sur le plan-incliné supérieur.

Il était facile de calculer les effets dynamiques dépensés et réalisés, à l'aide des données suivantes :

Poids du convoi, 55,360<sup>k</sup>, constatés à l'aide d'un pont à peser;

La hauteur ou différence de niveau, entre le pied et le sommet du plan-incliné, est 55<sup>m</sup>00 ;

La longueur parcourue est de 2,020<sup>m</sup> ;

La vitesse a été de 5<sup>m</sup>28 par seconde ;

L'effort de la machine, rapporté au câble, était de 2,455<sup>k</sup> ;

L'espace parcouru sous cette tension est de 2,040<sup>m</sup> (20<sup>m</sup> de plus que le parcours du convoi dû à l'allongement du câble) ;

Le rapport entre les effets dynamiques réalisés et dépensés est donc :

$$\frac{55,360^k(55^m + 2,020^m \times 0,0034)}{2,455^k \times 2,040^m} = \frac{3,425,100}{5,008,200} = 0,686,$$

au lieu de 0,478, que nous avons trouvé pour l'effet de la machine de Dalkey, lorsqu'elle a remorqué un convoi à la même vitesse (seconde expérience du 16 janvier 1844.)

La machine de Liège ne permet pas de dépasser notablement la vitesse de 5<sup>m</sup>50, pour laquelle elle a été calculée, ce

n'est donc que par analogie que nous pourrions apprécier le coefficient de l'effet utile que l'on obtiendrait avec la même machine, modifiée pour obtenir des vitesses double et triple, c'est-à-dire de 11<sup>m</sup> et 16<sup>m</sup>30 par seconde, ou 40 et 60 kilomètres à l'heure.

Pour simplifier les calculs qu'exige cette recherche, nous diviserons les effets dynamiques réalisés et dépensés par la longueur utilement parcourue, et nous obtiendrons, d'une part, l'effort faisant équilibre à la résistance du convoi, de l'autre, l'effort moteur, plus grand que le premier de toutes les résistances dues aux transmissions du mouvement.

Appelant :  $E$  le premier de ces efforts,  
 $R$  la différence, le rapport, ou coefficient d'effet utile, sera exprimé par la formule

$$\frac{E}{E+R}.$$

La valeur de  $R$  serait indépendante de la vitesse, si elle ne comprenait que les pertes de force dues aux frottements du piston, des axes et des câbles ; mais elle comprend aussi la résistance que l'air oppose au mouvement des poulies.

A défaut d'expériences spéciales, nous admettons qu'une moitié de la valeur de  $R$ , qui représente assez approximativement la résistance due aux poulies motrices, de support et de renvoi, croisse avec la vitesse, dans la même proportion que la résistance des convois, laquelle est également composée d'une résistance constante due aux frottements, et d'une résistance variable due à la résistance de l'air.

D'après les belles expériences du docteur Lardner, la résistance des convois serait une fraction de leur poids exprimée par les nombres suivants :

0,0034	lorque	la	vitesse	est	de	5 <sup>m</sup> 50;
0,0064	»	»	»	»	»	11 <sup>m</sup> 00;
0,0107	»	»	»	»	»	16 <sup>m</sup> 30.

La résistance  $R$ , qui, pour la vitesse de 5<sup>m</sup>50, = 784<sup>k</sup>  
 deviendra pour la vitesse de 11<sup>m</sup>00. . . . . 1095<sup>k</sup>  
 »       »       16,50 . . . . . 1626<sup>k</sup>.

Substituant ces valeurs de  $R$  dans la formule précédente,

$\frac{E}{E+R}$ , en conservant la même quantité pour la somme  $E+R$ ,

qui représente l'effort moteur, le rapport

$$\frac{3,425,100}{5,008,200} = \frac{1695}{2479} = 0,686, \text{ deviendra pour}$$

la vitesse de 11<sup>m</sup>.  $\frac{1384}{2479} = 0,558$ , et pour

$$\text{»       »       } 16,50 \frac{853}{2479} = 0,344.$$

Il nous reste, pour compléter la comparaison, à déterminer l'influence de la longueur sur le coefficient d'effet utile.

Remarquons d'abord que la perte de force résultant de l'allongement du parcours, est uniquement due au plus grand nombre de petites poulies de support des câbles, et, pour rien changer à l'effort moteur ni aux autres conditions du système, il faudra diminuer l'effet utile de ce surcroît de résistance.

Il résulte des données qui ont servi de base à l'établissement des machines de Liège, que, pour vaincre les résistances des petites poulies de support des câbles, il faut un effort de 138 kilogrammes pour une longueur de 2000<sup>m</sup> à double voie, soit 69<sup>k</sup> pour 1000<sup>m</sup> à double voie, répondant à un développement de 4000<sup>m</sup> de câble.

Cet effort 69, relatif à la vitesse de 5<sup>m</sup>50 par seconde, deviendra 124<sup>k</sup> et 218<sup>k</sup>, pour des vitesses double et triple.

Le produit des quantités 69<sup>k</sup>, 124<sup>k</sup> et 218<sup>k</sup>, par le nombre de kilomètres qui doivent être ajoutés à la longueur du plan qui a servi à nos expériences, exprime donc l'excédant de résistance due à l'augmentation de longueur. Ces quantités étant soustraites des efforts utiles 1695, 1384, 853, trouvés

ci-dessus, on obtiendra les efforts utiles, qu'il suffira de diviser par l'effort constant 2479, pour avoir les coefficients d'effet utile relatifs aux longueurs que l'on considère, et qui sont consignées au tableau suivant.

					COEFFICIENT D'EFFET UTILE POUR LA LONGUEUR DE			
					2	3	4	5
					KILOMÈTRES.	KILOMÈTRES.	KILOMÈTRES.	KILOMÈTRES.
Vitesse de 5 <sup>m</sup> 50 par seconde.					0,684	0,665	0,636	0,608
Id.	11,00	id.			0,558	0,508	0,458	0,408
Id.	16,50	id.			0,344	0,256	0,169	0,080

Remarquons que, pour le système atmosphérique comme pour les câbles, les coefficients d'effet utile varient avec le rapport qui existe entre la force de la machine et l'effet à produire.

Nous voyons, en effet, d'après le tableau n° 12, que la machine de Dalkey ne pourrait pas faire monter le manomètre à mercure au delà de 0<sup>m</sup>473, si l'on portait à 5 kilomètres la longueur du tube pneumatique du chemin de Kingstown à Dalkey.

Pour mettre en mouvement, à la vitesse de 16<sup>m</sup>50, ou de 60 kilomètres à l'heure, un appareil à câble semblable à celui de Liège, mais étendu à un parcours de 5 kilomètres, l'effort de traction de 1695<sup>k</sup>, exercé sur ce câble, serait réduit à 200<sup>k</sup> environ, et l'effet utile à 0,08; mais en augmentant de 600<sup>k</sup> seulement l'effort moteur, le coefficient d'effet utile devient  $\frac{800}{3,079} = 0,26$ .

Pour obtenir du système atmosphérique appliqué à un tube de 5000<sup>m</sup>, des coefficients qui ne soient point inférieurs à ceux obtenus sur le chemin de Dalkey, il conviendra d'aug-

menter la force des machines, dans un rapport qui variera selon que l'on voudra obtenir le même degré de dilatation dans le même temps, ou bien imprimer la même vitesse au piston-remorqueur.

Dans le premier cas, la force de la machine devra être exactement proportionnelle à la longueur du tube, parce que, en effet, la quantité d'air à épuiser est proportionnelle à la longueur, ainsi que la rentrée d'air par le clapet; mais, avec cette force motrice, la durée de l'épuisement sera moindre, ce qui procurera une vitesse supérieure aux vitesses observées à Dalkey.

Pour produire la même vitesse, la force de la machine devra croître proportionnellement à la quantité d'air à épuiser, qui augmente avec la rentrée due au clapet, proportionnelle à la longueur du tube. La force motrice sera moindre que dans le cas précédent; mais les intermittences pour dilater l'air seront plus longues.

Dans le système à câble, la force doit croître proportionnellement avec la vitesse; en effet, un effort déterminé devant être exercé avec une vitesse double, triple, exige une machine capable de produire un effet dynamique double, triple.

Les deux systèmes présentent donc cette différence, que la force des machines doit être à peu près proportionnelle à la longueur du tube, dans le système atmosphérique, et à la vitesse, dans le système à câble, et que, en réduisant l'effort exercé, on peut, dans le système atmosphérique, obtenir une plus grande vitesse, tandis que la même réduction permet, lorsqu'on emploie les câbles, de porter l'action à des distances plus grandes.

Pour établir le parallèle entre les deux modes de traction, il convient donc de les supposer appliqués à une ligne assez étendue et d'une grande importance commerciale, conditions nécessaires pour justifier l'emploi des machines fixes.

Admettons donc que la ligne soit divisée en relais de 5 kilomètres, et faisons remarquer d'abord que l'effort limité,

dans le système atmosphérique, par le diamètre du tube, que les inventeurs considèrent comme ne pouvant guère dépasser 0<sup>m</sup>38, à cause de la dépense, est inférieure à l'effort que l'on peut transmettre à l'aide des câbles.

Les convois, pour satisfaire à un mouvement commercial donné, seront donc plus nombreux dans le système atmosphérique, lequel exigera par conséquent une double voie plus impérieusement que le système à câble.

Nous avons vu que l'on ne pouvait, sans perte, dilater l'air dans un espace intermédiaire; il faudra donc établir un appareil de dilatation à l'extrémité de chaque tube de 3 kilomètres, et sur chaque voie.

La machine de Dalkey peut produire, par seconde, 13,690<sup>k</sup>, la machine de Liège a produit, lors de nos expériences, 12,960<sup>k</sup>.

Pour établir le parallèle, nous prendrons pour unité de force l'effet dynamique de 13<sup>k</sup>690, par seconde.

Les données comparatives des deux systèmes, établies d'après les considérations qui précèdent, sont résumées dans le tableau suivant.

*Tableau comparatif du système atmosphérique et des câbles.*

VITESSE MOYENNE A IMPRIMER AUX CONVOIS.		Force motrice relative pour desservir un relai de 3 kilomètres de double voie, com- parée à la force de la machine de Dalkey, prise pour unité.		Effort exercé d'une manière intermit- tente dans les deux systèmes, dans l'un pour préparer le vide, dans l'autre pour permettre à la ma- chine d'agir dans le sens opposé.		EFFET UTILE.	
Mètres par l'".	Kilomètres à l'heure.	Système atmosphérique.	Câbles.	Système atmosphérique.	Câbles.	Système atmosphérique.	Câbles.
5,50	20	2,42	0,66	740	740	0,156	0,427
11,00	40	2,74	1,68	740	740	0,234	0,333
16,50	60	3,51	3,46	740	740	0,276	0,245

On a supposé une hauteur manométrique de 0<sup>m</sup>475, ou 0<sup>m</sup>62, afin d'avoir des résultats aussi favorables que possible au système atmosphérique.

La force motrice du système atmosphérique a été calculée de manière à obtenir les vitesses moyennes indiquées dans les deux premières colonnes, puis on a calculé le temps que mettrait une machine de cette force pour opérer la dilatation, et l'on a ensuite déduit l'effet dynamique dépensé, qui, comparé à l'effet réalisé 3,700,000<sup>k</sup>, a donné le coefficient d'effet utile.

Les intermittences sont : dans le système atmosphérique, 12<sup>s</sup>/<sub>10</sub>, 6<sup>s</sup>/<sub>100</sub>, 4<sup>s</sup>/<sub>10</sub>, et, dans le système à câble, de 15', 7<sup>s</sup>/<sub>50</sub>, et 5', et correspondent, dans ce dernier système, au temps pendant lequel la machine agit dans la direction opposée.

Les intermittences sont plus longues avec les câbles; mais ceux-ci permettent d'opérer la traction dans les deux sens en même temps, lorsque la charge dans l'une des directions n'est pas à son *maximum*, et c'est ce qui a généralement lieu sur les chemins de fer.

Comparés au système atmosphérique, les câbles exigent donc des machines moins fortes :

dans le rapport de 100 à 27, pour la vitesse de 20 kilomètres;

» » 100 à 61 » » 40 »

» » 100 à 99 » » 60 »

ce qui a l'avantage d'être moins coûteux d'établissement.

L'effet utile est également favorable aux câbles, dans le rapport :

de 100 à 274, pour la vitesse de 20 kilomètres;

de 100 à 143 » » 40 »

mais devient 100 à 89 » » 60 »

Pour cette dernière vitesse, le système atmosphérique devient donc plus avantageux; mais remarquons que la vitesse de 60.

kilomètres peut être considérée comme la limite des vitesses généralement employées pour des convois publics.

L'on peut donc conclure que les câbles doivent avoir la préférence sur le nouveau système pour les vitesses employées, qui, ne pouvant être généralement dépassées sans augmentation de dépense, resteront probablement longtemps encore en usage.

Les résultats fournis par l'examen de la question dynamique permettent de comparer les frais d'établissement et d'exploitation des deux systèmes.

Les frais d'établissement comprennent :

- (a) Les machines motrices ;
- (b) Les transmissions de mouvement.

*Frais d'établissement.* — Le prix des machines à vapeur étant proportionnel à leur force, on peut déduire, au tableau qui précède, le rapport entre le prix des moteurs qu'exigent le système atmosphérique et les câbles.

Les pompes pneumatiques, à égalité de force motrice, coûteront certainement autant que les poulies motrices.

Le tube pneumatique, avec clapet et ses accessoires, d'après une note remise par M. Samuda, coûte 57 fr. par mètre de simple voie, ou 114 fr. par mètre de double voie.

Le câble, avec les poulies de support, coûte, par mètre de double voie, 18 fr.

La différence est donc de 96,000 fr. par kilomètre de double voie, c'est-à-dire équivaut à la moitié du prix total moyen de l'établissement du chemin de fer en Belgique.

*Frais d'exploitation.* — Quant aux frais d'exploitation, la consommation de combustible est en raison directe de la force de la machine, ou en raison inverse de l'effet utile ; il y aura donc en faveur des câbles une économie :

De 65 %, lorsque la vitesse est de 20 kilomètres à l'heure ;  
De 30 % „ „ 40 „ „

Enfin, pour la vitesse de 60 kilomètres à l'heure, il y aura économie de 12 % en faveur du système atmosphérique.

On n'a pas encore, sur les frais du renouvellement du cuir et de la composition imperméable, des données positives; il est toutefois à remarquer que le tube atmosphérique exige une surveillance plus active que les câbles. Nous avons remarqué que, à Dalkey, quatre hommes au moins sont constamment sur la voie, occupés à lisser le joint longitudinal du clapet, et que l'on obtenait d'autant plus vite un degré déterminé de dilatation, que ces gardes sont plus nombreux et mettent plus de soin à fermer les ouvertures par lesquelles on entend l'air rentrer dans le tube, lorsque la pompe pneumatique est mise en mouvement, et cette circonstance, jointe aux autres causes de variation, peut expliquer les irrégularités qui accompagnent les expériences.

Ces frais de surveillance, augmentés de l'entretien des cuirs du piston et du clapet et des frais journaliers de composition, nous paraissent devoir former un total peu différent du graissage des petites poulies, de l'entretien et du renouvellement des câbles, et probablement supérieur, si l'on emploie des câbles en fils de fer.

*Sécurité et facilité du service.* — Les deux systèmes présentent le même degré de sécurité; tous deux sont à l'abri des chances d'incendie, et nous admettons que l'on trouve un moyen de détacher le convoi du piston-remorqueur, de même que l'on peut abandonner le câble en un moment quelconque.

Nous supposons d'ailleurs que l'on ne passerait d'un tube dans l'autre qu'avec une très-faible vitesse; s'il en était autrement, nous regarderions cette circonstance comme une cause permanente d'accidents.

Car, quelque parfait que soit le mécanisme employé, il ne sera pas plus simple que les excentriques ordinaires, auxquels sont dus, en grande partie, les accidents qui arrivent sur les chemins de fer.

Le système atmosphérique ne pouvant exercer que des efforts limités par le diamètre du tube au *maximum* de 900.

kilogrammes et avec des intermittences, ne peut pas être employé à desservir un plan-incliné de chemin à locomotives, ni à servir de prolongement à une ligne de bateaux à vapeur ou locomotives qui peuvent amener en un instant de grandes masses de voyageurs ou de marchandises.

*Résumé.* — Les résultats du travail qui précède pourront se résumer de la manière suivante :

1° Considéré sous le rapport théorique, l'air dilaté, employé par MM. Clegg et Samuda comme moyen de transmission de mouvement, peut restituer tout l'effet dynamique dépensé à le raréfier, sans autre perte de force que celle employée à dilater le volume d'air contenu dans le cylindre de la pompe pneumatique ;

2° En pratique, on n'obtient, sur le chemin de Kingstown à Dalkey, qu'un effet utile qui peut varier de 0,19 à 0,20, selon le degré de dilatation de l'air.

En supprimant la conduite établie entre la pompe et le tube pneumatique ou propulseur, l'effet utile augmenterait et varierait de 0,25 à 0,31.

Enfin, s'il n'existait ni conduite intermédiaire ni rentrée d'air, l'effet utile s'élèverait entre 0,31 et 0,40.

Les différences entre l'unité et les nombres 0,69 et 0,60, expriment donc les pertes de force dues aux frottements et résistances divers, tant de la machine motrice que de la pompe pneumatique ;

3° L'effet utile est à son *maximum* lorsque l'air intérieur a une tension 0<sup>m</sup>55, et correspondrait à la tension intérieure de 0<sup>m</sup>44, s'il n'y avait pas de rentrée d'air ;

4° Appliquant la machine de Dalkey à des tubes de diverses longueurs, l'effet utile diminue en raison de la longueur du tube, dans une proportion d'autant plus rapide que l'air est plus dilaté ; le *maximum* qui, pour la longueur de 1 kilomètre, est 0,35, devient 0,24 pour 5 kilomètres ; le degré de dilatation est, en outre, limité par la longueur du tube : ce degré, pour une longueur de 5 kilomètres, ne peut guère dépasser

0<sup>h</sup>575, qui correspond à une pression dynamique sur le piston de 0<sup>h</sup>625 ;

5° Le système de traction de MM. Clegg et Samuda, comme tous les autres systèmes, exige une dépense qui croît avec la vitesse ;

6° Le système atmosphérique, agissant d'une manière intermittente et n'exerçant que des efforts assez faibles, exige une double voie plus impérieusement que les câbles ;

7° Lorsque l'on emploie les câbles pour transmettre des efforts à de grandes distances, l'effet utile décroît à mesure que la vitesse et la longueur augmentent, mais dans une proportion différente et qui est plus rapide pour la vitesse que pour la longueur.

L'effet utile dépend d'ailleurs du rapport que l'on établit entre la résistance produite par le poids des convois et les résistances passives du mode de transmission.

L'effet utile des machines des plans-inclinés de Liège, remorquant des convois ordinaires de 50 à 60 tonneaux, à la vitesse de 20 kilomètres, est de 0,68, et pour un parcours d'environ 2,000 mètres ; cet effet utile se réduirait à 0,558 pour une vitesse double, et à 0,636 pour une longueur double ;

8° Établissant le parallèle entre les câbles et le système atmosphérique, en rendant les conditions aussi égales que le permet la nature différente de ces deux modes de traction, nous trouvons que, pour desservir une distance de 5 kilomètres appartenant à une grande ligne à double voie, la force motrice pour le système atmosphérique est à celle qu'exige les câbles, dans le rapport :

de 100 à 27	pour des vitesses de 20 kilomètres à l'heure ;
de 100 à 61	» » 40 » »
de 100 à 99	» » 60 » »

L'effet utile, dans le système atmosphérique, est à l'effet utile du système des câbles, dans le rapport :

de 100 à 274	pour des vitesses de 20 kilomètres à l'heure:			
de 100 à 143	»	»	40	»
de 100 à 89	»	»	60	»

9° Les frais d'établissement des moteurs étant sensiblement, dans les deux systèmes, proportionnels à leur puissance, les câbles ont sur le nouveau système un avantage très-grand pour une faible vitesse, qui décroît à mesure qu'elle devient plus considérable, et l'égalité s'établit à la vitesse d'environ 60 kilomètres à l'heure.

Les frais d'établissement des tubes, comparés aux câbles et leurs poulies de support, présentent une différence considérable, qui ne s'élève pas à moins d'un  $\frac{1}{2}$  million par lieue de 3 kilomètres ;

10° Les frais d'exploitation comprennent, de part et d'autre, le combustible; puis, dans le système atmosphérique, les frais de graissage et de surveillance des tubes, l'entretien et le renouvellement des cuirs des pistons et clapets, et, pour le système des câbles, le graissage des poulies de support, l'entretien et le renouvellement des câbles.

Comparés sous le rapport de la dépense en combustible, les câbles présentent sur le système atmosphérique une économie d'autant plus grande que la vitesse sera moindre; il y aura égalité lorsque la vitesse sera de 55 kilomètres à l'heure, et avantage en faveur du système atmosphérique pour des vitesses plus grandes; quant aux autres chapitres de dépense, l'expérience ne permet pas encore d'établir un chiffre exact; mais la différence en faveur de l'un ou de l'autre système, eu égard aux frais de surveillance des tubes, sera peu considérable;

11° Sous le rapport de la sécurité, les câbles nous semblent offrir les mêmes avantages que le système atmosphérique.

*Conclusion.* — Dans l'état actuel de perfection des deux systèmes mis en parallèle, les câbles permettent d'obtenir les divers degrés de vitesse en usage, et que l'on ne peut

dépasser sans accroissement de dépense , avec la même sécurité et des frais d'exploitation notablement inférieurs, lorsque la vitesse est de 20 kilomètres à l'heure ; égaux , lorsque cette vitesse est de 55 kilomètres, et supérieurs au delà de cette limite ; mais la différence favorable dans ce dernier cas, est trop faible pour justifier l'excédant considérable de dépense d'établissement qu'exige le système atmosphérique, qui ne nous paraît, en conséquence, pas susceptible d'une utile application au service ordinaire des chemins de fer.

Bruxelles, le 8 février 1845.