CHALEUR ET ÉNERGIE

L'utilisation de la chaleur ambiante comme force motrice au moyen de la machine frigorifique

Rapport pour le V^{me} Congrès International du Froid, à Rome, du 19 Septembre au 1^{er} Octobre 1927

par M. Emile GUARINI, Ancien Professeur de Physique et d'Electrotechnique de l'Ecole des Arts et Métiers de Lima (Pérou)

GASPILLAGE D'ÉNERGIE

Si nous examinons, de près, tous les progrès de la technique moderne, nous nous apercevons que toutes les sources d'énergie et de chaleur que le génie de l'homme utilise : le charbon, le bois, le pétrole, les chutes d'eau, etc., ont leur origine indirecte dans la chaleur du soleil.

Seulement, nous gaspillons l'énergie calorifique du soleil, nous la gaspillons par des transformations nombreuses et, quelques fois, irrationnelles.

Ainsi, la machine à vapeur rend un travail mécanique à peine de 10 à 15 % de la chaleur absorbée par la chaudière.

Si, de l'industrie de la chaleur, nous passons à celle du froid, nous nous apercevons vite que la transformation n'est pas plus rationnelle que celle qui s'effectue dans la machine à vapeur. Une machine frigorifique moderne, à compression de vapeurs facilement liquéfiables, n'est qu'une pompe de chaleur. Le compresseur-pompe aspire la chaleur contenue dans les corps qu'on veut refroidir et la jette à l'eau du condenseur, en y ajoutant, en pure perte, les calories de compression. Si on réfléchit que, pour produire de la force motrice, il faut absorber de la chaleur, on se demande pourquoi on ne produit pas du froid, en utilisant la chaleur soustraite aux corps refroidis pour produire de la force motrice. Les cycles que j'ai établis tendent à résoudre ce problème.

CE QU'EST LA CHALEUR AMBIANTE

Par chaleur ambiante, il faut entendre toute la chaleur, à température plus ou moins basse, que nous avons autour de nous et que nous pouvons utiliser, plus ou moins gratuitement, par exemple : la chaleur contenue dans l'air, celle accumulée dans les eaux de mers, fleuves et lacs, celle de la terre et celle directement rayonnée par le soleil.

LA CHALEUR RAYONNÉE PAR LE SOLEIL

On peut admettre que la chaleur moyenne rayonnée par le soleil est de 1.300 calories par heure et par m² de la surface de la terre. En admettant que l'absorption moyenne de l'atmosphère soit de 50 %, il reste encore une moyenne de 650 calories par heure qui arrivent sur chaque m² de la surface de la terre. Cette chaleur est supérieure à celle théoriquement nécessaire pour produire 1 HP heure (632 calories).

La surface de la terre étant d'environ 510.000.000 de kilomètres carrés, le soleil peut nous donner une puissance de 510.000.000.000.000 de HP, plus que suffisante pour les besoins présents et futurs de la terre, sans avoir à craindre, à brève échéance, l'épuisement des sources de pétrole et des mines de charbon.

SOURCE CHAUDE ET SOURCE FROIDE

S'agissant de températures relativement basses, le corps travailleur doit être la vapeur d'un liquide assez volatil : l'ammoniaque, l'acide carbonique, l'anhydride sulfureux, le chlorure de méthyle, etc. L'eau vaporisée dans le vide, plus ou moins complet, suivant les températures dont on peut disposer, remplit parfaitement de rôle.

Si la source froide (réfrigérant) est l'eau, la température inférieure du cycle (échappement) ne peut pas descendre au-dessous de 10° C. - 5° C. Encore faudra-t-il que l'eau soit abondante si le saut de température n'est pas assez élevé. Plus le saut de température est faible plus s'élève la chaleur que le condenseur doit enlever.

La machine frigorifique elle aussi peut servir à la condensation des vapeurs d'échappement d'une machine utilisant la chaleur ambiante comme force motrice.

Pour que la chose soit possible, il faut que le saut de température, entre la source chaude et la source froide, soit suffisamment élevé pour que la chaleur de condensation soit sensiblement inférieure (mettons 50% au moins) à l'effet frigorifique par HP effectif de la machine frigorifique servant de source froide et actionnée par le moteur utilisant la chaleur ambiante. Ainsi, si la chaleur de condensation, par HP effectif, est de 3.000 calories, il faut que la machine frigorifique puisse produire au moins 6.000 frigories-heure par HP effectif. En attribuant à la machine frigorifique un rendement de 70%, son effet frigorifique par HP indiqué doit être de 6.000 frigories : $0,70 = \text{frigories } 8.571$. Or, en faisant l'évaporation à + 5° C. et la liquéfaction à + 25 (ce que, avec de l'eau abondante et un condenseur de surface appropriée, on peut obtenir avec de l'eau à la température de + 23° C.) on produit 8.264 frigories par HP indiqué.

Comme on voit, il n'est pas nécessaire d'accompagner Georges Claude, aux tropiques, sur ses centrales flottantes monstres, pour aller pomper, à 1.000 mètres de profondeur, l'eau froide à + 5° C. On peut obtenir cette source froide au moyen de la machine frigorifique en utilisant, pour la condensation, l'eau à 23° C. qu'on trouve facilement et que Claude veut utiliser comme source chaude. Tant mieux si l'eau de condensation est plus froide.

Comme source chaude, nous nous servons ou de la chaleur de la terre, ou de celle des eaux de surface, ou de la chaleur de l'air ambiante, ou directement de la chaleur du soleil comme fait l'Ingénieur Romagnoli avec son héliopompe.

L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

M. P. Ginori Conti, Sénateur, utilise dans ses établissements de Lardarello (Italie), la chaleur qui dérive des phénomènes

géothermiques. Ses centrales développent une puissance de 6.000 kw.

L'UTILISATION DIRECTE DE LA CHALEUR SOLAIRE

On a proposé d'utiliser la chaleur du soleil soit par l'emploi de miroirs paraboliques, destinés à concentrer les rayons calorifiques du soleil sur des chaudières appropriées, soit en faisant usage de piles thermoélectriques.

Dans son héliopompe, M. l'ingénieur Romagnoli vaporise le liquide volatile (anhydride sulfureux) sous l'influence directe des rayons calorifiques du soleil, convenablement dirigés, et produit la condensation de la vapeur avec l'eau du puits que la pompe refoule.

L'UTILISATION INDIRECTE DE LA CHALEUR SOLAIRE ACCUMULÉE DANS DES MASSES D'EAU

MM. Dornig-Boggia ont proposé d'employer la machine frigorifique, par exemple, à ammoniacale. L'évaporation se ferait en vaporisant le liquide volatile (ammoniacale) au moyen de l'eau chauffée par le soleil et en liquéfiant les vapeurs sous l'influence de la réfrigération produite par l'eau à une température plus basse. L'eau de la surface et du fond d'un lac ou d'une mer tropicale réaliserait la différence de température voulue (23° C. — 6° C.).

MM. Dornig-Boggia ont calculé le kw. installé à liras italiennes 1.800 et le kw.-heure à liras 0,12 pour une installation d'une puissance de 29.600 kws. dont le coût d'installation serait de liras 46.500.000.

Les travaux de MM. Dornig (Professeur à l'Ecole Polytechnique de Milan), Boggia et Romagnoli ont fait l'objet d'une communication à l'Association Electrotechnique Italienne, de la part de l'Ing. Tito Romagnoli, le 26 novembre 1922 à la Section de Bologne et le 22 décembre 1922 à la Section de Milan. Cette conférence a été publiée dans la Revue l'« Electrotecnica » de Milan, le 5 janvier 1923.

Le 15 novembre 1926, M. Georges Claude, auquel j'ai envoyé le 15 juin et le 1^{er} juillet 1925 (par lettres recommandées avec avis de réception Nos 350 et 474) une documentation complète sur l'« *Etat actuel du problème de l'utilisation de la chaleur ambiante pour produire le froid et la force motrice* » et où je résumais les travaux de MM. Dornig, Boggia, Romagnoli et les miens, présentait à l'Académie des Sciences de Paris, dont il est membre, une solution du problème qui ne différait des précédentes que dans l'emploi d'une machine frigorifique à vaporisation d'eau dans le vide.

La solution préconisée par M. Claude semble moins avantageuse que celle adoptée par MM. Dornig, Boggia et Romagnoli. Si on tient compte qu'à + 5° C. un kg. de vapeur d'acide carbonique a un volume de m³ 0,0089, tandis qu'un kg. de vapeur d'eau a le volume de m³ 150, on voit tout de suite, que la machine Claude est plus volumineuse et plus coûteuse que les machines Dornig, Boggia et Romagnoli.

Enfin, l'expérience embryonnaire présentée par M. Claude à l'Académie des Sciences n'a rien à voir avec la solution pratique qu'il faudra adopter.

L'UTILISATION DE LA CHALEUR DE L'AIR AMBIANTE

L'abaissement de la température de l'air ambiant peut fournir 0,3 calorie par 1° C. d'abaissement de température et par mètre cube.

Si on se trouve aux tropiques ou si on est en été dans nos régions et que la température ambiante atteint 40 à 45° C. le problème ne présente pas de grandes difficultés. Il suffit d'adop-

ter la solution pratiquement réalisée par M. Romagnoli. Pour des installations d'une certaine importance, on peut envisager, comme condenseur, comme nous avons dit plus haut, l'emploi de la machine frigorifique avec évaporation à une température se rapprochant de + 5° C.

Mais, si la température ambiante est basse, il faut chercher, pour la condensation, une température encore plus basse. C'est là que le problème se complique et il faut chercher autre chose.

LE PROBLÈME A RÉSOUDRE

Les idées précédentes sont ingénieuses, mais il y a une grande difficulté pour en tirer parti commercialement et industriellement.

Le soleil n'est pas toujours à notre disposition. Que fera-t-on la nuit ? et comment produira-t-on de la force motrice lorsqu'il gèle, lorsque la température est de 10° C. ou 30° C. sous zéro ?

Certes, il sera toujours possible de créer des différences de températures dans des masses d'eau, convenablement disposées. Mais disposera-t-on toujours de ces grandes masses d'eau accumulant l'énergie solaire, pour de longs intervalles d'ombre ?

La solution sera-t-elle toujours économiquement et pratiquement possible ? Nous pensons que nous devons en revenir à l'idée exposée, d'une façon très embryonnaire et incomplète, par M. Léo Dex, en 1904 (Revue Technique, du 10 décembre 1904) à propos de son moteur « athermique », transformant, à froid, l'énergie calorifique en puissance dynamique.

Le moteur athermique de Léo Dex devait avoir pour but d'utiliser l'énergie contenue dans la chaleur ambiante ou dans les sources de chaleur à température peu élevée, telle que, par exemple, l'eau qui sort d'un condenseur de vapeur de machine à vapeur.

Jusque là, rien de neuf. Déjà, en 1850, Du Tremblay a employé, dans ce but, l'éther sulfurique. Mais M. Dex va plus loin et il parle de faire fonctionner son moteur pour une chute de température de + 10 degrés C. à — 80 degrés C. De ces deux températures, la première peut être rejetée comme étant trop élevée, mais la seconde est celle que nous admettons.

La température de — 80 degrés C. est la température d'ébullition de l'acide carbonique à la pression atmosphérique.

L'acide carbonique est le corps travailleur proposé par M. Léo Dex et c'est celui que nous préconisons aussi, en attendant mieux.

Nous pensons que pour qu'une machine thermique puisse fonctionner toujours et partout, elle doit pouvoir fonctionner lorsque la température ambiante est très basse. Nous pensons qu'elle doit pouvoir fonctionner avec une température de 30 degrés C. sous zéro.

Or, à 30 degrés C. sous zéro, la tension de la vapeur saturée de l'acide carbonique est encore de 15 atmosphères.

Là où M. Léo Dex est peu précis est lorsqu'il arrive à la description de sa machine, soit parce que, en 1904, l'industrie du froid n'était pas encore suffisamment développée, soit parce que cette branche ne constituait pas la spécialité de M. Dex.

Le point capital, pour résoudre le problème et le résoudre commercialement, est de pouvoir fermer le cycle en liquéfiant l'acide carbonique pour le faire resservir.

Il y avait deux idées dans l'exposé de M. Léo Dex :

1. Utiliser la chaleur ambiante pour vaporiser l'acide carbonique au lieu de le faire au moyen d'une autre source de chaleur, comme dans les moteurs à acide carbonique Brunel, Ghiliano et Christin, Marquis, etc. Cette idée n'est pas neuve. Si, en effet, on examine de près la machine frigorifique, on s'aperçoit que la

chaleur ambiante remplit le même rôle sur l'évaporateur d'une installation frigorifique ;

2. Constituer le condenseur athermique. Or, ce condenseur est à créer.

La difficulté de problème réside justement là : fermer le cycle en liquéfiant tout l'acide carbonique qui a produit le travail, pour le faire resservir.

Il s'agit de faire cette condensation à -80° . Or, il n'y a pas d'eau de réfrigération à cette basse température. Il n'y a pas de machine frigorifique fonctionnant industriellement à une si basse température. Si on la crée, pour produire le froid nécessaire à la condensation à -80° , elle doit consommer moins de force motrice que le moteur athermique en produit. Nous avons essayé de résoudre ce problème.

COMMENT DOIT-ÊTRE CONSTITUÉ UN CYCLE A BASSE TEMPÉRATURE

En principe, il s'agit de vaporiser, à la température la plus basse constatée dans l'endroit où le moteur à froid doit fonctionner, dans un serpentin chaudière, un liquide volatil, c'est-à-dire bouillant à basse température (anhydride sulfureux bouillant à -10° C., ammoniaque bouillant à -38° C., chlorure de méthyle bouillant à $-23,7^{\circ}$ C. ou acide carbonique bouillant à -79° C.), détendre la vapeur dans un moteur à piston ou dans une turbine, condenser les vapeurs détendues, pomper le liquide résultant de la condensation dans le serpentin chaudière, en fermant ainsi le cycle.

Il s'agit de recherches spéciales dans un monde peu connu. Pour suivre mon raisonnement, il faut envisager les choses un peu autrement de ce qu'on est habitué à les voir tous les jours, c'est-à-dire telles qu'elles pourraient et devraient l'être.

Il faut, entr'autre, faire abstraction des lois fondamentales de la thermodynamique que, tôt ou tard on devra modifier, parce qu'elles ne sont plus d'accord avec l'état actuel de la science et de la technique et surtout avec les travaux modernes sur la pression et le travail interne.

COMMENT FAIRE LA CONDENSATION A BASSE TEMPÉRATURE

On condense de la vapeur lorsqu'on lui enlève de la chaleur. On enlève de la chaleur lorsqu'on produit un travail, travail externe ou interne (moléculaire). Je crois pouvoir affirmer que tout cycle à basse température sera basé sur le principe suivant : *« Condenser une vapeur en absorbant de la chaleur par la production d'un travail »*.

CONDENSATION PAR VAPORISATION ADIABATIQUE (Léo Dex)

Le cycle proposé en 1904 par M. Léo Dex est la première application proposée du principe fondamental que j'ai indiqué plus haut.

M. Léo Dex *produit du travail en absorbant la chaleur de l'acide carbonique liquide, c'est-à-dire en réalisant la vaporisation adiabatique*.

J'ai essayé le dispositif proposé par M. Léo Dex.

En juillet 1926, j'ai, à l'atelier de la Compagnie des Machines Pneumatiques Rotatives à Asnières, fait fonctionner une turbine « Radiex » par injection d'acide carbonique liquide. Comme j'avais déjà remarqué dans mes essais de Milan, en 1925, — essais au cours desquels j'ai fait fonctionner une machine à vapeur (à piston) avec injection d'acide carbonique liquide, en réalisant une espèce de moteur Diesel — l'acide carbonique liquide, en se vaporisant, se transformait presque complètement en neige carbonique, à la température de 65-80 degrés C. sous

zéro. Or, la neige carbonique passe de l'état solide à l'état gazeux sans passer par l'état liquide intermédiaire. La neige carbonique, en se déposant sur les aubes de la turbine, en empêchait le fonctionnement. Pour liquéfier la neige carbonique et fermer le cycle, il faudrait injecter de l'éther sulfurique, ce qui n'est pas pratique.

MES RECHERCHES

Avec quinze années d'expérience dans l'industrie frigorifique et avec vingt années de pratique de laboratoire, depuis six ans j'étudie l'intéressant problème de l'utilisation directe, au moyen de la machine frigorifique, de la chaleur ambiante. Si le problème n'est pas encore résolu complètement, pratiquement, nous sommes sur la bonne voie. Si la machine définitive n'est pas encore construite, le cycle est établi et il est basé sur des principes et des expériences indiscutables. Il s'agit de question de temps, de capitaux, d'opportunité, de moyens techniques, de patience, de persévérance, d'appuis officiels.

Ayant expérimenté et breveté, en premier lieu, une solution acceptable mais difficile à réaliser, en pratique, de l'avis d'un certain nombre de constructeurs de machines frigorifiques, d'ailleurs pas tous très compétents en machines à vapeur, que j'ai consulté dans différents pays, j'en publie les résultats dans l'espoir que quelque constructeur courageux voudra entreprendre la continuation des études et la réalisation définitive du cycle. Dans ce cas, toute ma collaboration enthousiaste lui sera acquise et le problème pourra entrer bientôt dans la voie de la réalisation pratique.

La publication de ces travaux démontrera que la résolution du problème est possible dans toute son ampleur. Peut-être trouverais-je ainsi les concours techniques et financiers nécessaires pour porter à bien, pour le progrès de la science et le bien de l'humanité, l'œuvre ardue que j'ai entreprise depuis six ans.

CONDENSATION PAR DÉTENTE ADIABATIQUE

J'ai essayé la détente adiabatique avec condensation partielle de la vapeur. A la fin de la course du piston, je chasse la vapeur condensée qui est pompée dans la chaudière pendant que la vapeur restant dans le cylindre ($0,760$ dans le cycle -10° C. — 79° C.) est recomprimée pour resservir dans le cycle suivant, dans lequel on injecte la quantité de vapeur correspondante à celle condensée.

Théoriquement, le travail de compression est de $0,760$ de celui d'expansion, mais en pratique, il faut tenir compte du rendement organique du moteur qui peut être de beaucoup supérieur au pour cent de la vapeur à recomprimer.

Cette solution est scientifiquement et techniquement possible, mais il faut construire des machines très parfaites. La puissance disponible est donnée par la différence entre le travail d'expansion et la somme du travail de compression de la vapeur non condensée et des pertes organiques de la machine.

Si, par exemple, le rendement total du moteur-compresseur d'un HP est de 80 %, le moteur produira 4 % ($0,80 - 0,76$) de force motrice, soit $0,04$ HP, mais l'évaporateur-chaudière absorbera au milieu ambiant toute la chaleur transformée en travail externe et interne. On produira le froid sans force motrice et peut-être on produira assez de force motrice pour actionner les accessoires d'une installation frigorifique et à glace.

QUELQUES DÉTAILS SUR MON PREMIER CYCLE

Si on détend adiabatiquement la vapeur, nous aurons une condensation partielle, mais suffisante en pratique. Si nous reportons, en la comprimant dans l'espace nuisible ou dans l'évaporateur la vapeur non condensée, au cycle suivant, au cours duquel elle

restituera une bonne partie du travail nécessité par sa compression, nous aurons le premier cycle qui a fait l'objet de mon brevet belge du 6 mars 1925. Ce cycle a été essayé, mais il reste à déterminer les limites de la détente, pratiquement possible, ainsi que la quantité de vapeur pratiquement condensée.

Ce premier cycle est amplement suffisant, à mon modeste avis, pour mettre au point une machine frigorifique n'ayant pas besoin de force motrice et pouvant peut-être en produire pour actionner les accessoires, notamment la pompe nécessaire pour la circulation de l'acide carbonique liquide, pompe qui n'absorbe qu'une force minime.

Il suffira d'étudier une pompe appropriée pour la circulation de l'acide carbonique liquide et d'essayer l'ensemble des appareils pour constituer le cycle fermé et pouvoir lancer une machine industrielle utilisable.

Pour plus de clarté, je résume ci-après mon premier cycle :
Première période : introduction de la vapeur saturée à -10° C. dans le cylindre.

Deuxième période : détente adiabatique de cette vapeur jusqu'aux extrêmes limites possibles (je compte arriver à 0,1 kg. par cm^2). A la fin de la détente adiabatique, ouverture de la soupape de décharge et sortie du liquide condensé.

Troisième période : compression dans le cylindre ou dans l'évaporateur par le retour du piston, de la vapeur résiduelle. Envoi de la vapeur condensée dans le réchauffeur-évaporateur au moyen d'une pompe. Ce liquide se réchauffera jusqu'à -10° C. et s'évaporerà à -10° C., moins une petite partie qui restera liquide et, mélangée à la vapeur, sera introduite dans le cylindre pour saturer la vapeur résiduelle de la détente précédente qui s'est surchauffée avec la compression.

Ce cycle est possible même si on admet comme chaleur totale de vaporisation à -78° C. 95 calories et si on limite la détente entre -10° C. et 78° C. (24% de condensation).

Ce cycle peut être reproduit avec une machine à vapeur d'eau. Il suffit de pourvoir la machine à vapeur d'une soupape de décharge s'ouvrant à la fin de la détente pendant le temps nécessaire pour expulser le liquide condensé. Avec une détente entre 20 kgs par cm^2 et 0,1 kg. par cm^2 la vapeur d'eau condensée est de 30%.

En limitant la détente de l'acide carbonique aux extrêmes indiqués plus haut et en admettant les chiffres les plus défavorables, la condensation serait de 22%. Il resterait 22% de différence entre le travail moteur indiqué et le travail indiqué de compression, soit par kg. de vapeur d'acide carbonique détendue, kilogrammètres 1.514. Comme, dans notre cas, c'est le même piston qui est l'organe moteur et compresseur, il rentre dans les possibilités de la technique moderne constructive de réaliser une machine dans laquelle les pertes mécaniques ne seraient que de 22%. Peut-être les 1.514 kilogrammètres, théoriquement disponibles par kg. de vapeur d'acide carbonique détendue, seront-ils suffisants pour actionner la pompe pour la circulation de l'acide carbonique liquide qui, par kg. d'acide carbonique (0,22 kgs. condensé) absorbe un travail indiqué de 56 kilogrammètres et un travail effectif d'environ 100 kilogrammètres.

Pour ce qui concerne le froid produit par la détente, sans vouloir, pour le moment, entrer dans de plus longs détails, je rappelle que d'après Aimé Wirtz (« Les Machines thermiques ». — Bibliothèque de l'Ingénieur. — Gauthier Villars, éditeur, page 156), la détente isothermique complète d'un kg. d'acide carbonique exigeait un réchauffement de 141 calories à fournir.

Dans le genre de recherches dont il s'agit, seulement la reprise, avec ma collaboration, des essais que j'ai fait, leur continuation et amplification, avec des moyens techniques et financiers suffi-

sants, en y employant tout le temps qu'il faut, pour permettre d'arriver, assez rapidement, à des conclusions concrètes et définitives.

En effet, les tables expérimentales se rapportant à l'acide carbonique s'arrêtent à -55° C. Les données concernant l'acide carbonique aux très basses températures sont un peu confuses et indéterminées, tandis que les formules pour calculer les caractéristiques de l'acide carbonique, aux très basses températures, ne me semblent pas rigoureusement exactes.

DIFFICULTÉS DE RÉALISATION PRATIQUE DE MON CYCLE

Il n'est pas difficile de réaliser une machine à vapeur dont le rendement organique soit supérieur à 76%. Aujourd'hui on construit des machines à vapeur de 10 HP ayant un rendement organique de 84%. Avec des machines de 100 HP on arrive à des rendements organiques de 88% tandis que le rendement organique arrive à 92% avec des machines de 500 HP.

La condensation augmente si on isole, par de la fibre par exemple, le fond du piston et le fond du cylindre, qui, au commencement de la détente, constituent la plus grande partie de la surface d'échange entre la vapeur et la masse métallique du moteur.

La grande difficulté est d'expulser du cylindre le liquide condensé. On facilite cette expulsion en donnant une légère inclinaison au cylindre.

Il convient de supprimer le graissage et se contenter de la lubrification faite avec l'acide carbonique condensé. Si on graisse le cylindre et le piston, l'acide carbonique condensé se dépose, sous forme de gouttelettes, sur les parois lubrifiées.

CONDENSATION PAR MACHINE FRIGORIFIQUE FONCTIONNANT A BASSE TEMPÉRATURE ET A BASSE CONSOMMATION DE FORCE ET ACTIONNÉE PAR LE MOTEUR A FROID

Aujourd'hui, je me suis arrêté à une solution plus simple si j'arrive à la réaliser complètement. Sauf les températures inférieures à zéro, le cycle est celui d'une machine à vapeur ordinaire à condensation. Pour produire la condensation de la vapeur d'échappement, j'ai vaporisé à la pression atmosphérique, dans le condenseur, de l'acide carbonique liquide (-79° C.).

En pratique, il s'agissait de trouver un nouveau cycle frigorifique à basse consommation d'énergie même aux basses températures. J'en ai breveté et essayé un. Les premières expériences faites sont encourageantes.

Si les expériences qui restent à faire confirment ma théorie et les premiers résultats obtenus, non seulement est trouvé le cycle frigorifique qui remplace l'absurde cycle actuel, mais est aussi trouvé le moteur à froid définitif. La question des brevets et les pourparlers en cours m'empêchent d'en dire davantage.

LE MOTEUR A FROID POUR L'AUTOMOBILISME ET POUR L'AVIATION

J'ai la conviction absolue qu'un jour arrivera où le « moteur à froid » pourra être appliqué à l'automobilisme et à l'aviation.

Au lieu de se limiter à « immerger » la chaudière à liquides volatiles, bouillant à une température inférieure à celle de la température ambiante dans l'atmosphère, nous provoquerons, mécaniquement, une circulation active de l'air ambiant pour donner à la chaudière, de dimensions minuscules, la chaleur nécessaire pour la production des dizaines ou centaines de HP nécessaires aux moteurs de l'automobilisme et de l'aviation. Le temps n'est pas loin où un « Ford » américain ou européen pourra lancer la voiturette, je ne dis pas sans moteur, mais la voiturette avec « moteur sans combustible ».

LES FORCES HYDRAULIQUES ET LES COMBUSTIBLES INTERMÉDIAIRES INUTILES

Si mes vœux se réalisent, quel sera le sort des forces hydrauliques et des combustibles ?

Je pense que très prochainement les forces hydrauliques, le pétrole, le charbon, et tous les autres combustibles deviendront des intermédiaires inutiles et coûteux pour l'utilisation de la chaleur solaire.

LES MINES DE CHARBON ET LE MOTEUR À FROID

Ce sera la fin des mines de charbon et ce ne sera pas un mal. Le charbon est cher et rare. Son extraction se paye avec la sueur et la souffrance des mineurs extracteurs. La chaleur ambiante, même à basse température, est à la portée de tout le monde. Jusqu'à maintenant, du moins, elle est gratuite et elle n'est pas soumise à des impôts ni à des concessions.

Au lieu d'extraire, à grands frais, sous terre, la chaleur solaire accumulée dans le charbon des mines, nous devons nous consacrer à extraire, par le moteur frigorifique, la chaleur directe du soleil, qui peut être captée, à la surface de la terre, avec beaucoup de facilité.

LE MOTEUR À FROID POUR LES CHEMINS DE FER

A première vue, il pourrait sembler difficile que le moteur à froid s'applique aux trains de chemins de fer, à l'automobilisme et à l'aviation à cause de l'énorme surface de chauffe que devrait avoir la chaudière (serpentin-évaporateur).

Cette difficulté s'évite en augmentant l'échange de chaleur entre la chaudière et le foyer (milieu ambiant) soit par l'abaissement de la température d'évaporation, soit par une active circulation de l'air ambiant qui remplace le combustible (tirage forcé). Supposons que le milieu ambiant se trouve à -10°C . et que l'évaporation se fasse à -30°C . (cycle -30°C . — 80°C .). Dans l'air, pour chaque degré de différence de température entre la température de vaporisation et celle du milieu ambiant, un mètre carré de surface de serpentin transmet par heure :

- 20 à 25 calories sans ventilation ;
- 25 à 30 calories avec ventilation médiocre ;
- 30 à 35 calories et même plus avec une forte ventilation.

Avec une forte ventilation, on peut atteindre et surpasser une transmission de 20°C . (-10°C . — 30°C .) $\times 35 = 700$ calories.

La production d'un HP heure dans les moteurs de moyenne et grande puissance a besoin de 2.800 calories environ.

Il faudra donc une surface de chaudière de $\frac{2.800 \text{ calories}}{700 \text{ calories}} = 4 \text{ m}^2$ par HP au lieu de 0,25 par HP dans la chaudière d'une locomotive actuelle.

La surface de la chaudière d'un moteur à froid sera environ 16 fois plus grande que celle d'une chaudière d'une locomotive actuelle à vapeur d'eau. Seulement, le poids total sera beaucoup moindre.

Une locomotive actuelle de 1.000 HP avec la charge d'eau, pèse environ 85 tonnes sans compter le tender avec la charge d'eau et de charbon, en tout au moins 100 tonnes, soit 100 kg. par HP.

La locomotive pourvue du moteur à froid pèsera moins puisqu'elle n'aura pas à traîner le poids mort de l'eau et du combustible et aspirera l'air nécessaire au fur et à mesure des besoins

en le restituant à une température plus basse au milieu ambiant, qui en résultera refroidi, ce qui sera un bien pour les pays chauds et pour nos pays pendant l'été.

Pour l'automobilisme et l'aviation, en faisant usage des hautes pressions (acide carbonique), d'échangeurs de températures en cuivre et de grandes vitesses de circulation de l'air, on pourra constituer des moteurs *plus légers* que les moteurs actuels puisqu'on n'aura plus à transporter ni essence, ni eau et très peu d'huile de lubrification, la lubrification à l'intérieur du cylindre de la machine à piston se faisant par la vapeur saturée elle-même des liquides volatils.

Il est facile de calculer le volume d'air nécessaire par HP. La chaleur spécifique de l'air par m^3 est de calories 0,3. Pour un abaissement de température de -10°C . à -30°C ., un mètre cube rendra $0,30 \text{ calories} \times 20^{\circ}\text{C} = \text{calories } 6$. Un HP nécessitera $\frac{2.800 \text{ calories}}{6 \text{ calories}} = 466 \text{ m}^3$ par heure et une locomotive de 1.000 HP aura besoin de $1.000 \text{ HP} \times 466 \text{ m}^3 = \text{m}^3 466.000$ par heure.

CONCLUSIONS

Je propose au Congrès de voter les conclusions ci-après :

1. — L'utilisation de la chaleur ambiante est immédiatement possible au moyen de la machine frigorifique lorsque la source chaude a une température suffisamment élevée pour que la condensation puisse être effectuée avec de l'eau froide ou de la machine frigorifique actuellement connue.

2. — Qu'il convient d'étendre la réalisation de ces applications pour s'émanciper de l'emploi des combustibles et des chutes d'eau.

3. — Le moteur frigorifique convenant le plus pour ce genre d'application est celui employant les vapeurs à faible volume spécifique des liquides volatils.

4. — Les cycles basés sur l'utilisation de la chaleur directe du soleil ou de celle par le soleil accumulée dans des masses d'eau naturelles ou artificielles ne sont pas toujours applicables et ils ne résolvent pas complètement ni toujours économiquement le problème de l'utilisation de la chaleur ambiante provenant du soleil au moyen de la machine frigorifique.

5. — Les cycles à basse température basés sur la vaporisation adiabatique des liquides volatils ou la détente adiabatique des vapeurs de ces liquides sont thermodynamiquement et techniquement possibles, mais leur réalisation pratique semble difficile.

6. — La solution la plus complète et la plus économique du problème de l'utilisation de la chaleur ambiante comme force motrice et de la production du froid sans force motrice semble résider dans la création de cycles frigorifiques à basse température et à basse consommation de force, appliqués à la condensation des vapeurs d'échappement des moteurs à froid employant les liquides volatils comme corps de travail.

7. — Il convient que les gouvernements et les entreprises industrielles encouragent, par tous les moyens, ce genre de recherches.

8. — La mise au point industrielle du problème de l'utilisation, comme force motrice, de la chaleur ambiante, à toutes les températures, pourra être pour l'humanité la source de bienfaits sans nombre et de progrès incalculables.