

JOURNAL
DE PHYSIQUE

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE,

FONDÉ

PAR J.-CH. D'ALMEIDA

CONTINUÉ PAR ED. BOUTY

PUBLIÉ PAR

LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Directeur de la publication : AMÉDÉE GUILLET

CINQUIÈME SÉRIE.

TOME III. — ANNÉE 1913.

PARIS,
AU BUREAU DU JOURNAL DE PHYSIQUE,
5, RUE DE LA SANTÉ (13^e)

1913

**CONSIDÉRATIONS SUR LES RÉSULTATS D'UN ALLÈGEMENT INDÉFINI
DES MOTEURS;**

Par M. ESNAULT-PELTERIE (1).

Les idées qui vont être développées ci-après ont été suggérées à l'auteur par les résultats qu'ont permis d'atteindre à l'heure actuelle les moteurs légers. Il a été graduellement conduit à se demander ce qui pourrait résulter d'un allègement poussé encore beaucoup plus loin. Si même l'on suppose un instant que le poids par cheval puisse être diminué quasi indéfiniment, quelles possibilités s'offriraient ainsi à l'homme? le progrès se bornerait-il à de très grands perfectionnements apportés à l'aviation ou irait-il jusqu'à ouvrir des horizons nouveaux? Quels seraient ces horizons?

De nombreux auteurs ont fait du voyage de l'homme d'un astre à l'autre un sujet de roman. Tout le monde se rendant compte sans longue réflexion ni grande peine de l'impossibilité qu'il comporte, il ne semble pas que l'on ait jamais songé à rechercher quelles exigences physiques il présenterait et de quel ordre de grandeur seraient les phénomènes à mettre en jeu pour le réaliser.

C'est là, uniquement, le but du présent travail, qui n'est, répétons-le, qu'une suite de réflexions appuyées sur des calculs.

I

La première difficulté qui s'offre à notre esprit est qu'entre les astres il n'y a point d'atmosphère et que, par conséquent, l'aéroplane lui-même n'y saurait trouver le point d'appui, pourtant si fuyant, qui lui est nécessaire.

Les difficultés d'ordre physiologique seront examinées plus loin. Bornons-nous pour l'instant à voir si nos connaissances mécaniques nous indiquent la possibilité d'un moteur qui, sans le secours d'aucun point d'appui, soit capable de propulser un véhicule. Si étrange que cela semble à celui qui n'y a jamais songé, elles nous l'indiquent, et ce moteur existe même depuis fort longtemps : c'est la

(1) Communication faite à la Société française de Physique : Séance du 15 novembre 1912.

fusée. (Le canon de Jules Verne qui écraserait ses voyageurs au départ n'est guère qualifiable de « moteur propulsant un véhicule ».)

L'on dit fréquemment que la fusée se propulse par réaction « sur l'air ». La première partie de cette locution est exacte, mais la seconde partie « sur l'air » est fautive; une fusée se mouvrait exactement aussi bien *et même mieux* dans le vide que dans l'air.

Pour prendre un exemple qui parle davantage aux yeux, supposons qu'une mitrailleuse soit fixée sur un chariot, lequel puisse glisser sans frottement sur des rails parallèles à son canon. A chaque coup tiré, la mitrailleuse va prendre un mouvement de recul dont la loi mécanique est bien connue :

Les quantités de mouvement acquises par la mitrailleuse et son chariot d'une part et par le projectile d'autre part, sont égales et de signe contraire et la résistance de l'air n'intervient dans le phénomène que pour diminuer les vitesses acquises.

Dans la fusée, le projectile est constitué par les gaz de la combustion qui sont émis d'une façon continue.

Soient : M_0 la masse totale du mobile au départ, M sa masse au temps t , et dm l'élément de la masse du fluide qui s'écoule pendant l'élément de temps dt considéré.

Supposons tout d'abord que l'émission du fluide se fasse par rapport au mobile à une vitesse constante v et avec un débit masse également constant μ . Nous appellerons V la vitesse acquise par le véhicule, F la force de propulsion et γ l'accélération au temps t .

Le calcul montre que le phénomène est représenté par les équations :

$$1) \quad -MdV = \mu v dt = v dm.$$

Nous observerons que si le mobile tout entier était constitué d'explosif consommable (conception purement théorique, qui présente un certain intérêt) il serait entièrement consommé au bout d'un temps :

$$2) \quad T = \frac{M_0}{\mu}.$$

L'introduction de ce temps limite dans la formule qui définit V en fonction de t donne :

$$(T - t) dV = v dt;$$

d'où :

$$3) \quad V = v \log \frac{(T - t)}{T}.$$

Ce qui donne pour :

$$t = T \\ v = -\infty \text{ (nous avons supposé } v \text{ positif).}$$

Cela n'a pas lieu de nous surprendre, puisque la propulsion est demeurée constante pendant que la masse diminuait, au fur et à mesure de l'émission de gaz propulseur, jusqu'à devenir nulle. L'accélération elle-même devait donc croître en tendant vers l'infini.

L'expression du déplacement x en fonction de t est :

$$x = -v \left\{ T \left[\left(\frac{T-t}{T} \right) \log \frac{T-t}{T} \right] + t \right\}$$

et le chemin ainsi parcouru, après consommation totale :

$$X_T = -v \cdot T.$$

Hors de toute autre considération, nous venons ainsi de voir que la propulsion dans le vide n'est point une impossibilité. Néanmoins ne suffit-il pas de mouvoir un véhicule, il faut le diriger.

Dans le cas présent, il n'y a là, non plus, aucune difficulté *de principe* :

Pour faire dévier le mobile de la trajectoire, il suffirait d'incliner le propulseur de telle sorte que la direction de la force qu'il développe soit inclinée sur cette trajectoire.

Si les déplacements possibles du propulseur ne permettaient pas d'obtenir la rotation en tous sens, un ou deux petits propulseurs auxiliaires pourraient rendre la maniabilité complète.

II

Si l'on veut éloigner un corps pesant du centre d'un astre, il faut dépenser de l'énergie.

Considérons une masse M à la distance x du centre d'un astre dont le rayon est R , soit γ l'accélération de la pesanteur à la surface de cet astre. Pour écarter le mobile de dx , il va falloir produire un élément de travail :

$$d\tau = M\gamma \frac{R^2}{x^2} dx.$$

Ce qui nous donne :

$$\tau = M\gamma R \left(1 - \frac{R}{x}\right).$$

Nous voyons de suite que, pour éloigner une masse déterminée jusqu'à l'infini, le travail à fournir est fini et exprimé par :

$$\mathcal{E} = M\gamma R.$$

Ou bien encore, en appelant P le poids du corps considéré à la surface de l'astre :

$$\mathcal{E} = PR.$$

Nous voyons aussi que si nous considérons le poids du corps comme le résultat du principe de l'attraction universelle appliquée à l'astre et au corps, nous pouvons écrire en appelant U la masse de l'astre :

$$P = k \frac{MU}{R^2}$$

Ce qui nous donne pour l'expression du travail à fournir pour écarter le corps jusqu'à l'infini :

$$\mathcal{E} = k \frac{MU}{R}.$$

Si donc, à partir de la surface d'un astre, on imprimait à un corps une vitesse suffisamment grande l'écartant de l'astre, ce corps s'en éloignerait indéfiniment.

Pour la terre cette vitesse minimum serait de 11.280 mètres à la seconde. C'est-à-dire qu'un projectile lancé de la surface de la terre à une vitesse supérieure à celle-là (abstraction faite de la résistance de l'air) ne retomberait jamais.

Cette vitesse critique est du reste précisément celle que prendrait un mobile tombant sur la terre depuis l'infini et sans vitesse initiale par rapport à la planète.

La loi du mouvement de ce mobile serait représentée par l'équation :

$$V^2 = 2g \frac{R^2}{x}.$$

Nous voyons donc que pour $x = R$:

$$1^{\circ} V_r = -\sqrt{2gR};$$

$$2^{\circ} \frac{1}{2} mV^2 = PR.$$

Pour la terre, cette vitesse limite V_r est bien de :

$$11.280 \text{ mètres à la seconde.}$$

Il a été dit plus haut que, pour éloigner un corps à l'infini d'un astre et si nous appelons P son poids à la surface de l'astre et R le rayon de l'astre, il faut dépenser un travail :

$$\mathcal{E} = PR.$$

Pour un corps pesant 1 kilogramme sur la terre, ce travail serait :

$$\mathcal{E} = 6.371.103 \text{ kilogrammètres eq}^t \text{ à } 14.970 \text{ calories.}$$

Rappelons-nous que 1 kilogramme de mélange d'hydrogène et d'oxygène en proportion convenable renferme 3.860 calories par kilogramme; 1 kilogramme de poudre composée de fulmicoton et de chlorate de potasse renferme 1.420 calories par kilogramme. Nous voyons donc que le mélange oxygène-hydrogène renferme à peine plus du quart de ce qui lui serait nécessaire pour pouvoir se libérer de l'attraction terrestre. Par contre 1 kilogramme de radium, dégageant pendant sa vie entière $2,9 \cdot 10^9$ calories, contiendrait 194.000 fois plus d'énergie qu'il n'en faudrait. Nous ne parlerons pas, pour l'instant, du rendement du moteur à réaction.

Si nous considérons un mobile qui s'éloigne d'un astre selon un mouvement accéléré de loi quelconque, nous voyons qu'à partir du moment où sa vitesse sera plus grande que celle qu'il aurait au même point en sens inverse, tombant de l'infini sans vitesse initiale, il deviendrait inutile de lui communiquer davantage d'énergie pour l'éloigner. Son énergie cinétique assurerait le mouvement indéfiniment.

La loi du mouvement d'un mobile soumis à une force constante F supérieure à son poids, dirigée verticalement et centrifuge par rapport à l'astre serait représentée par l'équation :

$$v = \sqrt{2Ax + \frac{2gR^2}{x} - 2R(A + g)}.$$

Le mobile atteindrait une vitesse permettant la cessation de la propulsion à une distance du centre de l'astre :

$$x = R \left(1 + \frac{g}{A} \right) \quad \text{où} \quad A = \frac{F}{M}$$

Nous voyons que si le mobile pouvait se détacher de la terre sous un effort propulsif ascensionnel juste égal à son poids, c'est-à-dire si :

$$A = g.$$

il atteindrait cette vitesse critique à une distance au centre de la terre égale à deux rayons terrestres, soit à une altitude égale au rayon terrestre.

Cette remarque attire notre attention sur ce qu'un mobile pourrait parfaitement se détacher d'un astre à l'aide d'un effort de propulsion inférieur à son poids. Si l'astre possède une atmosphère, le mobile pourra en effet fonctionner d'abord en aéroplane, s'élevant graduellement et augmentant sa vitesse au fur et à mesure de la raréfaction de ladite atmosphère, jusqu'au moment où la vitesse critique correspondant à l'altitude atteinte serait obtenue.

III

Voyons maintenant l'ordre de grandeur des énergies à mettre en jeu si nous voulions, par ce procédé, transporter un mobile de la terre à la lune et le ramener à la terre.

Nous considérerons que l'opération s'effectue en trois phases :

- 1° Le mobile est accéléré jusqu'à la vitesse critique de libération;
- 2° Le propulseur est arrêté, le mobile continue par la vitesse acquise;
- 3° Au point voulu, il est retourné bout pour bout et le moteur remis en marche ralentit la vitesse de façon à la rendre nulle au contact de la surface lunaire.

Première phase. — Nous appliquons au mobile une force :

$$F = \frac{11}{10} \cdot P, \quad \text{donc} \quad A = \frac{11}{10} g$$

qui paraît devoir être acceptable dans l'hypothèse où le véhicule contiendrait des êtres vivants.

La distance critique est alors :

$$X = \frac{21}{11} \cdot R$$

correspondant à une altitude de 5.780.000 mètres au-dessus du sol.

La vitesse à cet instant, sera :

$$V = 8.180 \text{ mètres à la seconde.}$$

Le temps nécessaire pour atteindre ce point serait approximativement :

$$t = 24^m 9^s.$$

Deuxième phase. — Le mobile continue sa route par inertie ; il est sollicité à chaque instant par les attractions inverses de la planète et de son satellite.

Soient : P, le poids du mobile à la surface de la terre, P_l son poids à la surface de la lune et ρ le rayon lunaire, D = x + y la distance des deux astres, le calcul donne :

$$v = \sqrt{2 \left(g \frac{R^2}{x} + 0,165 \cdot g \frac{\rho^2}{y} + 0,820 \cdot 10^6 \right)}$$

Au point où l'attraction de la terre et de la lune s'annulent, cette vitesse sera :

$$v = 2.030 \text{ mètres à la seconde.}$$

C'est la vitesse la plus faible.

A l'arrivée à la surface lunaire, elle deviendrait environ :

$$v = 3.060 \text{ mètres à la seconde.}$$

La vitesse en chute libre de l'infini sur la lune serait :

$$v_{\infty} = 2.370 \text{ mètres à la seconde.}$$

Le temps employé à parcourir la seconde phase peut être approximativement calculé en faisant abstraction de l'action de la lune qui est absolument insensible sur le trajet total.

Il serait le même que le temps employé par le mobile en chute libre pour revenir de la distance de la lune au point où nous avons

arrêté le moteur :

$$t = 48^h 30^m.$$

Troisième phase. — Il faut maintenant enrayer la vitesse en retournant le mobile bout pour bout comme nous l'avons dit, et en remettant le moteur en marche.

Quelle va être la loi de ce ralentissement ?

Nous pourrions l'établir comme pour la terre, mais l'attraction de la lune étant beaucoup plus faible, et comme il n'y a aucune utilité pour l'instant à avoir une bien grande précision, nous retrancherons de l'accélération due au propulseur la demi-accélération à la surface lunaire, et nous supposerons le mouvement uniformément ralenti sous l'action de cette accélération fictive. Nous trouvons ainsi qu'il faut retourner le véhicule à une distance de la surface lunaire :

$$d = 250.000 \text{ mètres.}$$

Ce point est si près de la lune qu'en raison du caractère non rigoureux des présents calculs, le temps nécessaire pour y parvenir peut être confondu avec celui nécessaire pour parvenir à la lune elle-même.

Le temps de la période de freinage sera :

$$t = 226^s = 3^m 46^s.$$

De telle sorte que le temps total est approximativement :

Première phase.....	0 ^h 24 ^m 9 ^s
Deuxième phase.....	48 ^h 30 ^m
Troisième phase.....	0 ^h 3 ^m 46 ^s
	<hr/>
	48 ^h 58 ^m environ.

Le retour pourrait s'effectuer à peu près en suivant l'ordre inverse et dans le même temps.

Il faut remarquer que, par ce moyen, le propulseur ne fonctionne que pendant 28 minutes à l'aller et autant au retour à moins que l'on n'utilise au retour l'atmosphère terrestre pour s'y freiner graduellement, cas dans lequel les 28 minutes de fonctionnement au départ, plus ce qui serait utile pour donner la direction, pourrait suffire.

Nous allons voir maintenant la puissance réellement nécessaire pour réaliser ces conditions minima et le rendement de moteur qui en résulte par rapport au travail théorique fourni.

Si nous considérons un véhicule de 1.000 kilogrammes sur lesquels 300 kilogrammes sont consommables.

Et si le moteur doit, comme nous l'avons vu, pouvoir marcher $27^m + 3^m,5$, soit, pour avoir une certaine marge :

$$35^m = 2.100 \text{ secondes.}$$

le débit poids devra être :

$$\eta = \frac{300}{2.100} = 0^{kg},143,$$

d'où la vitesse d'expulsion du fluide :

$$v = 65.300 \text{ mètres à la seconde.}$$

Soit à fournir par kilogramme de combustible :

$$T = 217,2 \cdot 10^6 \text{ kgm ou } 512 \cdot 10^3 \text{ calories,}$$

on voit que le mélange $H^2 + O$ contiendrait 133 fois trop peu d'énergie et les explosifs les plus violents 360 fois trop peu.

Par contre 1 kilogramme de radium en contient 5.670 fois trop.

La puissance du moteur nécessaire à notre véhicule de 1.000 kilogrammes serait ainsi de :

$$\frac{300 \times 217,2 \cdot 10^6}{2.100 \times 75} = 414.000 \text{ HP.}$$

Nous pouvons également constater que le rendement du moteur à réaction est dans le cas particulier bien mauvais. En effet, pour éloigner une masse de 1 kilogramme de la terre à l' ∞ , il faut lui communiquer 6.371.103 kilogrammètres, et nous en avons dépensé $217,2 \cdot 10^6$, de telle sorte que le rendement en question est :

$$r = 0,0293.$$

Par ailleurs, il faudrait, pour communiquer à un gaz une vitesse d'expulsion de 65.300 mètres-sec. dans le vide, obtenir une température invraisemblable de $2,525 \cdot 10^6$ degrés.

Dans l'air, ce serait pis encore, puisqu'en plus de cette température il faudrait une pression d'un ordre de grandeur analogue.

IV

A titre d'indication, nous pourrions supposer le mobile s'éloignant vers l'infini, et si nous supposions également que nous avons continué à faire fonctionner le moteur après l'instant de la vitesse critique, de telle sorte qu'il finisse par atteindre et conserver une vitesse voisine de 10 kilomètres à la seconde, les temps nécessaires pour atteindre les planètes les plus rapprochées au moment de leur conjonction avec la terre, seraient respectivement :

Pour Vénus	47 ^j 20 ^h
Pour Mars.....	90 ^j 15 ^h

Ces chiffres sont simplement indiqués à titre de curiosité et il faut remarquer également en passant que la quantité de travail à fournir pour effectuer ce trajet ne serait pas extrêmement plus considérable que le minimum nécessaire pour détacher le mobile de la terre. En effet, une fois le véhicule parvenu à une assez grande distance, il continuerait sa route par inertie sans que l'attraction terrestre devenue très faible ralentisse sensiblement la vitesse.

Ceci revient à dire, en somme, que la difficulté serait de vaincre l'attraction terrestre ; mais si cette difficulté était un jour vaincue, il ne serait guère plus difficile d'atteindre une planète très éloignée qu'une planète très proche. Sous réserve bien entendu que l'on parvienne à rendre habitable pendant un temps suffisant un véhicule exigu et hermétiquement clos et sous réserve d'une autre difficulté que nous examinerons plus loin.

V

Dans tous les paragraphes précédents nous avons uniquement envisagé la possibilité théorique pour un mobile doué de propriétés spéciales de se déplacer entre la terre et la lune. C'est là un problème de mécanique pure qui ne touche pas à proprement parler la question de savoir si l'homme pourrait éventuellement un jour ou ne

pourra certainement jamais quitter son monde pour en explorer d'autres.

L'examen intégral de la question entraîne celui de l'examen des conditions physiologiques qu'il faudrait remplir pour que la vie soit possible dans de semblables conditions.

Les progrès réalisés dans les sous-marins peuvent dès maintenant faire considérer comme très possible dans l'avenir la régénération d'une atmosphère confinée pendant une certaine d'heures.

La question de la température mérite quelques considérations particulières. L'on dit couramment que les espaces interplanétaires sont à la température du 0 absolu; l'auteur pense que c'est là un non-sens.

Car la température n'existe que pour les corps matériels et le vide n'en saurait avoir aucune (les vases de Dewar le prouvent).

Si la quantité de chaleur reçue et absorbée dans l'unité de temps par notre véhicule est inférieure à la quantité de chaleur qu'il rayonne, sa température s'abaissera. Si la quantité de chaleur reçue et absorbée est supérieure à la quantité rayonnée, la température s'élèvera.

Il serait donc possible de constituer le mobile de telle sorte qu'une moitié de sa surface soit en métal poli et isolé calorifiquement de l'intérieur. L'autre moitié serait, par exemple, couverte de cuivre oxydé formant surface noire.

Si la face polie était tournée du côté du soleil, la température s'abaisserait; dans la position inverse, la température s'élèverait.

Toutes les difficultés qui viennent d'être envisagées ne semblent donc pas devoir constituer des impossibilités *de principe*; mais il va s'en présenter une nouvelle qui, bien qu'offrant encore une solution mécanique, n'en va pas moins compliquer encore le problème.

En effet dans le calcul que nous avons fait du voyage de notre véhicule de la terre à la lune, nous avons considéré que nous lui appliquions une accélération :

$$A = \frac{11}{10} g.$$

Et ceci jusqu'à une distance de 5.780 kilomètres de la surface terrestre. Pendant toute cette partie du trajet les voyageurs auront

donc la sensation de peser les onze dixièmes de leur poids. On peut espérer que, pour gênante que soit cette sensation, elle ne causera pas de trouble à l'organisme humain, mais le plus inquiétant est ce qui adviendra à partir de l'instant précité où la propulsion va être supprimée. A ce moment, brusquement le voyageur cesserait de peser et il aurait la sensation de tomber dans le vide, lui et tout l'appareil qui le contient.

Si l'organisme ne peut subir de telles vicissitudes, il faudra suppléer à l'absence de champ gravitant par la création d'une accélération artificielle constante, produite par le moteur. Si cette accélération est réglée de façon à être égale à celle de la pesanteur, le voyageur aura constamment la sensation de peser son poids normal, qu'il soit ou ne soit pas dans la zone d'attraction d'un astre.

Il est évident que ce procédé comporterait une énorme difficulté sous le rapport de la quantité d'énergie nécessaire et reporterait encore bien plus loin de nous les conditions de réalisation étudiées tout à l'heure et qui pourtant l'étaient déjà terriblement.

Si nous reprenons la formule qui représente la loi du déplacement d'un mobile soumis à une force constante à partir de la terre, et si nous supposons que jusqu'à l'obtention de la vitesse maximum entre la terre et la lune, nous utilisons une accélération égale aux $\frac{11}{10}$

de celle de la pesanteur, en suite de quoi toutes les autres manœuvres seront effectuées avec une accélération égale à celle de la pesanteur; l'action de la lune, pouvant être négligée en raison de sa petitesse, le calcul montre que le véhicule doit être retourné à une distance du centre de la terre égale à 29,5 rayons terrestres.

La vitesse à cet instant atteindrait 61.700 mètres-sec., puis le véhicule retourné serait freiné avec une force égale à son poids terrestre.

Le temps employé pour atteindre la lune serait :

$$t = 3^h 5^m.$$

Mais, dans ce nouveau cas, le travail à fournir en reprenant l'hypothèse d'un véhicule de 1.000 kilogrammes dont 300 consommables atteindrait $67,2 \cdot 10^6$ calories par kilogramme de combustible. C'est-à-dire 131 fois plus que dans le premier cas.

La dynamite serait 47.300 fois trop peu puissante, mais le radium le serait encore 433 fois trop.

Quant à la puissance nécessaire, elle serait de :

$$\frac{857 \cdot 10^{10}}{24.000 \times 75} = 4.760.000 \text{ HP.}$$

Si nous voulions maintenant supposer ce système à propulsion constante appliqué aux trajets aux planètes les plus proches et nous rendre compte des durées des voyages et des vitesses atteintes, nous trouverons que les vitesses maxima seront respectivement :

Pour Vénus	643 kilomètres à la seconde
Pour Mars.....	883 — —

et les temps employés pour y parvenir :

Pour Vénus.....	35 ^h 4 ^m
Pour Mars.....	49 ^h 20 ^m

VII

Les vitesses maximum que nous venons de considérer sont évidemment invraisemblables ; toutefois faut-il remarquer qu'il existe au moins un corps céleste atteignant des vitesses comparables : c'est la comète de Halley.

Seules les forces et les énergies que nous semblent contenir les molécules pourraient nous fournir des condensations de puissance et de travail comme celles que nous venons de voir.

Si nous supposions maintenant un instant que nous avons à notre disposition 400 kilogrammes de radium dans notre véhicule de 1.000 kilogrammes et que nous sachions en extraire l'énergie dans le temps qui nous convient, nous verrions que ces 400 kilogrammes de radium, largement suffisants pour le trajet Vénus et retour, le seraient à peine pour le trajet Mars et retour (toujours à accélération constante), de telle sorte qu'un réservoir d'énergie aussi formidable permettrait tout au plus à l'homme de visiter ses voisines immédiates.

