



Phénomènes que présente une masse liquide libre et soustraite à l'action de la pesanteur (1ère partie)

Joseph Plateau

Citer ce document / Cite this document :

Plateau Joseph. Phénomènes que présente une masse liquide libre et soustraite à l'action de la pesanteur (1ère partie).
In: Nouveaux mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres de Bruxelles. Tome 16, 1e partie, 1843. pp.
1-35;

doi : <https://doi.org/10.3406/marb.1843.3415>;

https://www.persee.fr/doc/marb_0770-8157_1843_num_16_1_3415;

Fichier pdf généré le 25/03/2024

MÉMOIRE

SUR LES PHÉNOMÈNES QUE PRÉSENTE

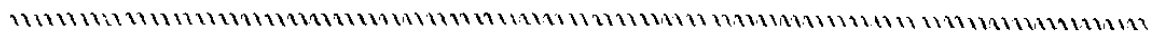
UNE MASSE LIQUIDE

LIBRE ET SOUSTRATE A L'ACTION DE LA PESANTEUR :

PAR **J. PLATEAU**,

PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L'UNIVERSITÉ DE GAND, ETC.

PREMIÈRE PARTIE.

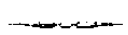


MÉMOIRE

SUR LES PHÉNOMÈNES QUE PRÉSENTE

UNE MASSE LIQUIDE

LIBRE ET SOUSTRATE A L'ACTION DE LA PESANTEUR ¹.



1. Les liquides étant doués d'une extrême mobilité moléculaire, ils obéissent avec facilité à l'action des forces qui tendent à modifier leur forme extérieure. Mais parmi ces forces, il en est une qui prédomine tellement sur toutes les autres, qu'elle en masque presque complètement l'action : cette force est la pesanteur. C'est elle qui oblige les liquides à se monler sur la forme intérieure des vases qui les renferment; c'est elle encore qui rend plane et horizontale la portion de leur surface demeurée libre. A peine peut-on reconnaître, le long du contour de cette surface libre, une légère courbure qui révèle l'action des forces combinées de l'attraction du liquide pour lui-même et de son adhérence pour la matière solide du vase. Ce n'est qu'en obser-

¹ Depuis l'époque de la lecture de ce mémoire (15 janvier 1842), l'auteur a repris son manuscrit, et lui a fait subir plusieurs modifications importantes, amenées, entre autres, par la présentation à l'académie des sciences de Paris, d'un travail de M. Liouville.

vant des masses liquides très-petites, et sur lesquelles l'action relative de la pesanteur est ainsi atténuée, qu'on peut voir se manifester d'une manière bien prononcée l'influence d'autres forces sur la figure de ces masses : ainsi les gouttelettes de liquide posées sur des surfaces qu'elles ne peuvent mouiller, s'arrondissent en sphères plus ou moins parfaites. A part ces quantités minimales, si l'on veut observer des masses liquides qui ont pris librement une figure propre, il faut quitter la terre, ou plutôt considérer le globe terrestre lui-même et les autres planètes, comme ayant été primitivement fluides, et ayant adapté leur forme extérieure à l'action combinée de l'attraction et de la force centrifuge. Alors la théorie indique que ces masses ont dû prendre la forme de sphéroïdes plus ou moins aplatis dans le sens de leur axe de rotation, et l'observation confirme ces déductions de la théorie. L'observation nous montre aussi, autour de Saturne, un corps de forme annulaire, et la théorie trouve, dans les actions combinées de l'attraction et de la force centrifuge, de quoi satisfaire à l'équilibre de cette forme singulière.

Mais si nous pouvions, par un moyen quelconque, soustraire à l'action de la pesanteur l'une des masses liquides sur lesquelles il nous est donné d'opérer, tout en la laissant libre d'obéir à l'action des autres forces qui tendraient à en modifier la forme, et si notre procédé permettait de donner à cette masse des dimensions assez considérables, ne serait-il pas bien curieux de lui voir prendre une figure déterminée, et de voir cette figure varier de mille manières avec les forces dont elle dépend? or, je suis parvenu, en effet, par un moyen extrêmement simple, à constituer dans les conditions ci-dessus une masse liquide considérable.

2. Les huiles grasses sont, comme on sait, moins denses que l'eau, et plus denses que l'alcool. D'après cela, on peut faire un mélange d'eau et d'alcool, ayant une densité précisément égale à celle d'une huile donnée, de l'huile d'olive, par exemple. Or, si l'on introduit, dans le mélange ainsi formé, une quantité quelconque d'huile d'olive,

il est évident que l'action de la pesanteur sur cette masse d'huile se trouvera complètement détruite : car, en vertu de l'égalité de densité, l'huile ne fera que tenir la place d'une masse égale du liquide ambiant. D'une autre part, les huiles grasses ne se mêlent pas avec une liqueur composée d'alcool et d'eau. La masse d'huile devra donc demeurer suspendue et isolée au milieu du liquide environnant, et elle sera parfaitement libre de prendre la forme extérieure que lui assigneront les forces qui peuvent agir sur elle.

Cela posé, si les attractions moléculaires de l'huile pour elle-même, celles du mélange alcoolique pour lui-même, et celles de ce mélange pour l'huile étaient identiques, il n'y aurait pas de raison pour que la masse d'huile abandonnée au milieu du liquide ambiant, prît spontanément une figure plutôt qu'une autre, puisqu'elle serait, relativement à toutes les forces qui agissent sur elle, exactement dans le même cas qu'une masse égale de mélange alcoolique dont elle occuperait la place. Mais il est évident que cette identité entre les diverses forces attractives n'a pas lieu, et que l'attraction de l'huile pour elle-même l'emporte de beaucoup sur les deux autres. La masse d'huile devra donc obéir à cet excès de forces attractives propres.

Nous arrivons ainsi à cette conclusion, que notre masse d'huile pourra être parfaitement assimilée à une masse liquide sans pesanteur, suspendue librement dans l'espace, et soumise à ses propres attractions moléculaires. Or, il est clair qu'une pareille masse doit prendre la forme sphérique.

Eh bien, l'expérience confirme tout ceci d'une manière complète. La masse d'huile, quel que soit son volume, reste, en effet, suspendue au milieu du liquide alcoolique, et *prend la forme d'une sphère parfaite.*

3. Pour obtenir avec facilité ce singulier résultat, il est nécessaire de prendre certaines précautions que je vais décrire.

Les premières concernent la formation du mélange alcoolique. La densité de ce mélange varie nécessairement avec l'espèce d'huile que

l'on emploie. Pour l'huile d'olive dont je me suis servi, et dont je ne garantis pas la pureté, le mélange convenable marquait 22 degrés à l'aréomètre de Baumé. Si donc on veut employer l'huile d'olive, on pourra toujours considérer la valeur ci-dessus comme une première approximation, et l'on amènera ensuite, par des tâtonnements successifs, la liqueur au point exact qu'elle doit atteindre. Pour cela, on en remplit une éprouvette, dans laquelle on verse ensuite un peu d'huile à l'aide d'un petit entonnoir à long col, qui pénètre environ jusqu'à la moitié de la hauteur de l'éprouvette. L'huile, en arrivant dans la liqueur, forme un globule auquel on doit donner environ deux centimètres de diamètre, et qu'une petite secousse détache du bec de l'entonnoir, s'il ne s'en détache pas de lui-même. Alors, selon que ce globule descend au fond de la liqueur ou vient se placer à sa surface, on en conclut que la quantité d'alcool du mélange est trop grande ou trop petite : on ajoute donc à celui-ci un peu d'eau ou d'alcool, en ayant soin de bien remuer, et l'on recommence l'essai de l'éprouvette. On répète les mêmes opérations, jusqu'à ce que le globule d'huile demeure suspendu dans la liqueur, sans paraître avoir de tendance à descendre ni à monter. Alors on peut regarder le mélange comme très-approché du point que l'on cherche ; je dis très-approché, car le globule d'huile de l'éprouvette ayant de petites dimensions, il éprouve plus de difficulté à se mouvoir dans la liqueur, que des sphères d'un grand diamètre, et il peut paraître en équilibre de densité avec le liquide environnant, tandis que cet équilibre ne subsistera pas pour un volume d'huile plus considérable.

4. Lorsque le mélange alcoolique, que je supposerai d'abord renfermé dans un grand flacon de cristal de forme ordinaire, est arrivé à ce point d'approximation, il s'agit d'y introduire la masse d'huile. A cet effet, l'on se servira encore de l'entonnoir à long col dont il a été question plus haut, et qui doit pénétrer jusqu'à une certaine profondeur dans la liqueur que renferme le flacon. Laisant l'entonnoir reposer sur le goulot de celui-ci, l'on verse l'huile avec assez de lenteur.

Alors, si le mélange alcoolique est, par hasard, exactement dans les proportions requises, l'huile forme, à l'extrémité du col de l'entonnoir, une sphère dont le volume augmente graduellement à mesure que l'on ajoute de ce dernier liquide. Lorsque la sphère a atteint le volume que l'on désire, on retire avec précaution le col de l'entonnoir; la sphère qui y adhère s'élève avec lui vers la surface de la liqueur, et l'huile qu'il contient encore s'ajoute à la précédente. Enfin, lorsque la sphère est près d'atteindre la surface du mélange alcoolique, une petite secousse la détache de l'entonnoir. Mais ordinairement le mélange n'a pas aussi exactement la densité voulue. Alors on voit, en général, se former plusieurs sphères d'huile successives, qui se détachent l'une après l'autre du bec de l'entonnoir, pour descendre lentement au fond du flacon, ou pour s'élever à la surface de la liqueur alcoolique. Dans ce cas, on commencera par réunir toutes ces sphères en une seule, ce qui se fait très-aisément par le moyen que voici. On introduit dans l'une d'elles l'extrémité d'un fil de fer : l'adhérence que l'huile contracte avec ce métal, permet alors de conduire avec facilité dans le liquide ambiant la sphère dont il s'agit, et de l'amener à se confondre avec une seconde sphère¹; en continuant ce manège, on parvient bientôt à les réunir toutes. Alors selon que la sphère totale demeurera au fond ou à la surface de la liqueur, on ajoutera avec précaution à celle-ci une certaine quantité d'eau ou d'alcool; puis, après avoir bouché le flacon, on le retournera plusieurs fois lentement et de manière à ne pas désunir la sphère d'huile, jusqu'à ce que le mélange soit bien opéré, ce qui aura lieu lorsqu'on n'apercevra plus de stries dans la liqueur en regardant une fenêtre à travers le flacon. Enfin, on renouvellera la même opération, jusqu'à ce que la sphère d'huile se tienne parfaitement en équilibre dans la liqueur environnante.

¹ Pour obliger ainsi deux sphères à se réunir, il ne suffit pas de les mettre en contact l'une avec l'autre : elles pourraient se toucher pendant longtemps sans se confondre en une seule : on dirait qu'elles sont enveloppées d'une pellicule résistante qui s'oppose à leur réunion. Il faut donc introduire aussi l'extrémité du fil métallique dans la seconde sphère, comme si on voulait briser la cloison qui sépare les deux masses : alors la réunion s'effectue immédiatement. Je reviendrai sur ces phénomènes dans une autre partie de ce travail.

5. Si l'on a opéré, comme je l'ai supposé, dans un flacon de forme ordinaire, c'est-à-dire de forme cylindrique, la masse d'huile ne paraît cependant pas exactement sphérique : elle se montre élargie dans le sens horizontal ; mais ce n'est là qu'une illusion d'optique due à la forme du flacon : celui-ci, avec la liqueur qu'il contient, agit à la manière d'une lentille cylindrique dont l'axe serait vertical, et augmente en apparence les dimensions horizontales de l'objet.

Pour éviter entièrement cette illusion, il faut se servir d'un vase à parois planes, formé de pièces de verre à glace assemblées dans un châssis métallique (§ 8). Alors on a, d'une manière complète, le curieux spectacle d'une masse considérable de liquide présentant la forme d'une sphère parfaite, et imitant, en quelque sorte, une planète suspendue dans l'espace.

On peut encore, ce qui est plus simple et moins coûteux, employer, au lieu du vase ci-dessus, un ballon de verre. Dans ce cas, à la vérité, la masse d'huile ne se montre sous sa figure réelle, que lorsqu'elle occupe le centre du ballon ; mais la déformation apparente est faible, tant que la sphère ne s'écarte pas considérablement de ce centre. Un vase de cette espèce est très-convenable pour la plupart des expériences que je décrirai dans cette partie du mémoire ; mais il ne pourrait servir pour celles que j'aurai à faire connaître ensuite.

6. Maintenant, ayant obtenu, à l'aide du procédé ci-dessus détaillé, une belle sphère d'huile bien suspendue, et présentant, je suppose, un diamètre de six à sept centimètres, on observera les particularités suivantes, qu'il importe de faire connaître avant d'aller plus loin.

En premier lieu, l'équilibre d'abord bien établi, ne tarde pas à se rompre de lui-même : au bout de quelques minutes, on voit la sphère quitter sa place, et s'élever avec une extrême lenteur vers la partie supérieure du liquide ambiant. Si l'on ajoute alors un peu d'alcool pour rétablir l'équilibre, en opérant le mélange par le procédé du § 4, cet équilibre est encore rompu de la même manière au bout d'un certain

temps. Enfin ce n'est qu'en continuant pendant quelques jours à le maintenir par l'addition successive de petites quantités d'alcool, que l'on finit par obtenir un équilibre permanent, qui n'est plus troublé alors que par une cause accidentelle dont nous parlerons dans le paragraphe suivant. Si la température ne descend pas au-dessous de 18° centigr., les phénomènes ci-dessus sont les seuls que l'on observe; mais quelquefois, si la température demeure au-dessous de cette limite, et toujours si elle est inférieure à 15°, il se manifeste un autre effet, savoir une diminution dans la transparence de l'huile.

Ces phénomènes sont dus à une action chimique graduelle qui s'exerce entre l'huile et le mélange alcoolique. Les premiers d'entre eux seraient très-incommodes dans la plupart des expériences; mais heureusement on peut y obvier: il suffit évidemment, pour cela, de n'employer les deux liquides, que lorsqu'ils ont déjà exercé l'un sur l'autre toute l'action dont ils sont capables. L'huile et le mélange alcoolique, dont je me sers, sont maintenant inertes l'un à l'égard de l'autre, parce qu'ayant été employés un grand nombre de fois, ils ont eu le temps d'exercer la totalité de leur action mutuelle. Du reste, il est aisé d'amener, en peu de temps, les deux liquides à cet état de neutralité relative, en les agitant ensemble pour diviser l'huile et accélérer ainsi l'action, puis les séparant par un procédé convenable. Cette opération exige quelques précautions dont nous renvoyons l'exposé au § 24, afin de ne pas entraver la marche du mémoire par des détails qui ne sont pas indispensables maintenant. Dans tout ce qui suivra, nous supposerons toujours que l'on se sert de deux liquides ainsi préparés.

7. Une autre cause dérange l'équilibre entre la sphère d'huile et le liquide ambiant: ce sont les variations de la température, qui altèrent l'égalité des deux densités; et l'on aurait peine à concevoir jusqu'où va, sous ce rapport, la sensibilité d'un semblable système. Par exemple, lorsqu'on transporte le vase dans une chambre quelque peu plus chaude ou plus froide que celle où il se trouvait d'abord,

la sphère ne tarde pas à descendre, dans le premier cas, et à monter, dans le second. Il suffit même d'appliquer les mains à l'extérieur du vase, pour voir, après quelques secondes, la sphère commencer à descendre.

Il faut être constamment en garde contre ces effets de la température, sans quoi ils apportent du trouble dans les expériences. En voici un nouvel exemple qui s'est présenté à moi. L'huile et la liqueur alcoolique étaient renfermées dans des flacons différents, et la dernière contenait un très-léger excès d'alcool. Ayant transporté, par hasard, ces deux flacons dans une chambre plus chaude que celle où ils se trouvaient, j'introduisis d'abord dans le mélange une certaine quantité d'huile, qui, en vertu du léger excès d'alcool, descendit lentement au fond du flacon. Peu de temps après, je versai une nouvelle quantité d'huile, et je fus surpris de voir celle-ci s'élever, au contraire, vers la partie supérieure du mélange. Voici la raison de cette singulière différence. Le mélange alcoolique renfermé dans l'un des flacons, était en quantité très-considérable relativement à l'huile que contenait l'autre. Or, au premier moment, les liquides n'ayant pas changé sensiblement de température, ils gardaient entre eux la même relation de densité; mais après un temps assez court, l'huile, en vertu de son peu de volume, s'était échauffée plus que le mélange alcoolique, et elle était devenue relativement plus légère. La chaleur de la main qui tenait le flacon d'huile pour verser, avait dû aussi contribuer à l'effet dont il s'agit.

8. Maintenant, supposons une belle sphère d'huile en équilibre permanent dans le liquide environnant, et tâchons de la soumettre à d'autres forces que ses attractions propres.

La première idée qui se présente, c'est d'essayer l'action de la force centrifuge. Pour cela, il faut imprimer à la sphère d'huile un mouvement de rotation autour d'un de ses diamètres, et l'on y parvient en introduisant dans cette sphère un petit disque métallique que l'on fait tourner sur lui-même au moyen d'un axe qui le traverse perpendicu-

lairement. Ce disque entraîne l'huile par son adhérence avec elle, et toute la masse de ce liquide prend un mouvement de rotation.

Avant d'exposer les effets qui résultent de ce mouvement, je vais décrire avec détails l'appareil dont je me suis servi, appareil à l'aide duquel toutes les expériences réussissent parfaitement et avec la plus grande facilité : il est représenté fig. 1. Le vase est à parois planes formées de plaques de verre rectangulaires assemblées dans un châssis en fer; les faces latérales ont chacune 25 centimètres de largeur et 20 de hauteur. Le petit disque et son axe sont également en fer, métal dont le contact prolongé avec l'huile ne salit pas cette dernière comme le ferait le cuivre. Le diamètre du disque est d'environ 35 millimètres, et l'axe est formé d'un fil de fer d'environ $1\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur. Cet axe s'engage, par son extrémité inférieure, dans un trou percé au milieu de la plaque de verre qui forme le fond du vase; ce trou est fermé en dessous par une petite plaque de fer mastiquée au verre. L'extrémité supérieure de l'axe est vissée à un fil de fer plus gros qui en forme le prolongement, et qui, retenu à frottement doux dans une pièce dont je parlerai plus bas, reçoit, à son autre extrémité, la manivelle au moyen de laquelle on fait tourner le disque. Lorsque tout le système est en place, le disque doit se trouver à la moitié de la hauteur du vase. La plaque de verre carrée qui ferme le vase supérieurement, est percée de deux ouvertures munies chacune d'un goulot de fer que l'on ferme avec un bouchon de même métal. L'une de ces ouvertures est au milieu de la plaque, et son diamètre est de 55 millimètres; c'est à travers le bouchon qui la ferme, que passe à frottement doux la tige qui reçoit d'une part l'axe du disque et de l'autre la manivelle (voy. fig. 2). L'autre ouverture est plus petite, et est placée près de l'un des angles de la plaque : elle sert à introduire dans le vase soit le fil métallique à l'aide duquel on réunit les masses d'huile partielles, soit de nouvelles portions d'alcool ou de mélange à un autre degré (§ 9), etc., lorsqu'on doit effectuer ces opérations sans ôter le disque de sa place. Enfin cette même plaque est mastiquée dans un cadre en fer qui se replie verticalement tout à l'entour, de sorte qu'elle s'adapte sur le vase comme un

couvercle sur une boîte. Les bords supérieurs du vase ont été usés à l'émeri tous ensemble après leur placement dans le châssis, de manière que la plaque de verre supérieure s'applique exactement sur eux; il suffit de frotter d'un peu d'huile ces bords et les bouchons métalliques, pour que, la plaque et les bouchons étant placés, on puisse considérer le vase comme parfaitement fermé et conservant le mélange sans évaporation d'alcool.

Dans mon appareil, les plaques de verre sont fixées au châssis métallique à l'aide d'un mastic résineux, et celui-ci est légèrement attaqué par le mélange alcoolique. Il vaudrait peut-être mieux se servir du mastic gras des vitriers : car le mélange alcoolique étant préparé de manière à ne plus agir sur l'huile (§§ 6 et 24), ce dernier mastic ne serait probablement pas altéré. Du reste, le mastic résineux résiste assez pour que j'aie pu laisser, sans inconvénient, la liqueur alcoolique séjourner dans le vase pendant des mois entiers.

L'appareil que je viens de décrire est le plus convenable pour obtenir dans toute leur beauté les phénomènes qui font l'objet de ce travail; mais, comme je l'ai déjà dit, on pourrait employer avec moins de frais et sans trop de désavantage, du moins pour les expériences dont il s'agit dans cette partie du mémoire, un ballon de verre de dimensions assez considérables. Celui-ci devrait être muni de deux tubulures, dont l'une servirait à introduire le système du disque, et dont l'autre remplirait le même but que la seconde ouverture dont nous avons parlé plus haut.

Quoi qu'il en soit, je supposerai toujours, dans ce qui suit, que l'on emploie le vase à parois planes ci-dessus décrit.

9. L'appareil étant convenablement disposé, il s'agit maintenant de faire en sorte qu'une sphère d'huile environne le disque, de manière que leurs deux centres se confondent sensiblement. Pour atteindre ce point, tâchons d'abord, avant d'introduire le disque dans le vase, d'amener le centre de la sphère à se maintenir à la hauteur que doit avoir celui de ce disque. Il serait extrêmement difficile d'y parvenir en

suspendant une sphère dans un mélange alcoolique homogène, comme nous l'avons supposé jusqu'ici : car alors il n'y a pas de raison pour que la sphère ne se tienne pas plus haut ou plus bas ; et quand même le hasard la placerait exactement à la hauteur voulue, les mouvements que l'on produirait en introduisant le disque, changeraient bien probablement cette hauteur. Il faut donc employer un procédé plus sûr, et le suivant réussit parfaitement. On commence par faire en sorte que le mélange alcoolique contienne un petit excès d'alcool. Alors, le vase étant muni de son couvercle, et le bouchon qui ferme l'ouverture centrale étant enlevé, on introduit le mélange par cette ouverture, en quantité telle que le vase n'en soit pas complètement rempli ; puis on ajoute avec précaution une certaine quantité d'un mélange moins chargé d'alcool, et marquant seulement 16 degrés à l'aréomètre de Beaumé. Celui-ci, en vertu de son excès de densité, descend au fond du vase, où il s'étend en couche horizontale. Alors on introduit l'huile, qui, à cause du petit excès d'alcool que renferme le mélange supérieur, descend à travers ce dernier, et vient, soit en une seule masse, soit en plusieurs masses partielles (§ 4), se poser sur la couche plus dense du mélange inférieur. Cela étant, on réunit, s'il y a lieu, les sphères isolées en une seule ; puis, à l'aide d'une baguette de verre, on agite la liqueur avec précaution, de manière à mêler imparfaitement la couche du fond avec les couches plus élevées, mais sans diviser la masse d'huile, et on laisse ensuite reposer le système. On voit qu'il doit résulter de là, dans la liqueur alcoolique, un état de densité croissante à partir des couches supérieures moins denses que l'huile, jusqu'aux couches inférieures plus denses que cette même huile, et que, par conséquent, la masse d'huile devra se tenir en équilibre stable selon la verticale, dans une certaine couche dont la densité moyenne est égale à la sienne. Or, en effectuant l'opération avec les précautions convenables, c'est-à-dire en n'agitant le liquide que très-peu, puis le laissant reposer pour observer l'effet résultant, recommençant à agiter et laissant encore reposer, et ainsi de suite, enfin ajoutant, si cela est nécessaire, un peu de mélange à 16 degrés ou d'alcool pur,

selon les circonstances, on arrive aisément à faire en sorte que la masse d'huile se tienne exactement à la hauteur voulue, et cela, comme nous l'avons vu, dans une position stable quant à la verticale¹. A la vérité, dans la rigueur géométrique, cette masse d'huile ne peut plus être alors tout à fait sphérique : elle doit être aplatie d'une petite quantité dans le sens vertical ; mais, si l'on a opéré de manière que l'accroissement des densités soit très-faible à la hauteur où se tient l'huile, et l'on obtient aisément ce résultat par des tâtonnements convenables, l'aplatissement dont il s'agit est complètement insensible à l'œil, et la masse paraît exactement sphérique.

Pour les expériences que nous avons à décrire, le diamètre le plus convenable à donner à la sphère d'huile est d'environ 6 centimètres. On y arrive aisément en formant d'abord une sphère moindre, et ajoutant successivement de nouvelles portions d'huile, que l'on réunit à la première.

Il s'agit maintenant de placer le disque. Celui-ci étant attaché par son axe à la tige qui traverse le bouchon métallique (§ 8), on commence par le mouiller d'huile ainsi que l'axe, puis on l'introduit avec lenteur dans le liquide alcoolique, et on le fait pénétrer par sa tranche dans la sphère d'huile. Comme il a été préalablement mouillé de ce dernier liquide, la sphère l'enveloppe sans difficulté, et, ce qu'il y a de remarquable, elle se place d'elle-même peu à peu de telle manière, que l'axe du disque la traverse selon un diamètre. Cet effet est dû évidemment à l'action attractive de cet axe ou plutôt de la couche d'huile dont il a été mouillé, action qui tend à s'exercer d'une manière symétrique tout autour de lui, et amène ainsi la sphère d'huile tout entière dans une position symétrique par rapport à ce même axe. Maintenant on voit que le centre de la sphère tendant, d'une part, à demeurer à la hauteur de celui du disque à cause de la superposition des couches alcoo-

¹ Les différentes couches liquides ainsi superposées tendent, il est vrai, à se mêler d'elles-mêmes; mais comme elles sont placées dans l'ordre de leurs densités, ce mélange spontané ne s'effectue qu'avec une extrême lenteur, et il faut un grand nombre de jours pour que la liqueur devienne homogène. Il ne résulte donc de là aucun inconvénient pour les expériences.

liques de densité inégale, et, d'une autre part, à se placer dans l'axe du disque à cause de la symétrie des actions attractives exercées par celui-ci sur l'huile, le centre de la sphère et celui du disque se confondront, et demeureront ainsi dans une position stable. Seulement la sphère sera alors légèrement allongée dans le sens vertical, par l'attraction de l'axe du disque; mais cet allongement est fort peu de chose si la sphère présente, comme nous l'avons supposé, un diamètre de 6 centimètres.

10. La sphère d'huile étant ainsi convenablement placée, on fera tourner lentement la manivelle. Alors on verra aussitôt la sphère *s'aplatir à ses pôles, et se renfler à son équateur*, et l'on réalisera ainsi en petit ce que l'on admet avoir eu lieu pour les planètes.

Cependant, bien que les résultats soient de la même nature dans le cas des grandes masses planétaires et dans celui de nos petites masses d'huile, je ne dois pas négliger de faire remarquer ici qu'il y a une différence essentielle entre les forces qui sont en jeu dans les deux cas. Dans le premier, la force qui tend à donner à la grande masse planétaire une figure sphérique, et contre laquelle lutte la force centrifuge, c'est l'attraction universelle; dans le second, la force qui joue le même rôle à l'égard de la petite masse d'huile, c'est l'attraction moléculaire, qui suit des lois différentes. Mais comme, des deux parts, l'ensemble des actions se réduit à une lutte entre la force centrifuge et une autre force tendant à maintenir la forme sphérique de la masse liquide, on conçoit que les résultats doivent être analogues sinon identiques, quant à la figure que prend cette masse.

Pour observer dans toute sa beauté le phénomène dont nous nous occupons, il faut d'abord donner à la manivelle une vitesse très-petite, comme d'un tour en cinq ou six secondes; les effets sont déjà alors très-prononcés. Si l'on emploie ensuite une vitesse un peu plus grande, par exemple d'un tour en quatre secondes, l'aplatissement selon l'axe et le renflement à l'équateur se montrent plus considérables, et ils augmentent encore en portant la vitesse de la manivelle à un tour en

trois secondes. Avant d'aller plus loin, remarquons que, dans ces expériences, il ne faut pas faire tourner trop longtemps la manivelle : car la masse d'huile qui, dans les premiers moments, présente exactement une figure de révolution, finit par perdre cette forme. Il faut donc, à chaque nouvel essai, laisser reposer le système ; l'huile reprend alors sa forme sphérique, et se replace d'elle-même lentement dans la position convenable. La déformation qui survient lorsqu'on fait faire au disque un trop grand nombre de tours, donne lieu à des résultats d'un genre particulier, et qui ne sont pas sans intérêt : j'en parlerai plus loin (§ 22).

11. Maintenant, si au lieu de mouvoir lentement la manivelle on lui donne une vitesse assez considérable, comme de deux ou trois tours par seconde, on voit se manifester des phénomènes nouveaux et bien curieux. La sphère liquide prend d'abord rapidement son maximum d'aplatissement, puis se creuse en dessus et en dessous autour de l'axe de rotation, en s'étendant toujours dans le sens horizontal, et enfin, abandonnant le disque, *se transforme en un anneau parfaitement régulier* (fig. 3).

Cet anneau est arrondi sur son épaisseur, et semble avoir pour section génératrice un cercle. Au moment de sa formation, il augmente rapidement de diamètre jusqu'à une certaine limite ; dès que celle-ci est atteinte, il faut cesser le mouvement du disque. L'anneau alors se maintient pendant quelques secondes dans le même état ; puis, la résistance du liquide ambiant affaiblissant son mouvement de rotation, il revient sur lui-même et se transforme de nouveau en sphère autour du disque et de son axe.

La vitesse de la manivelle la plus convenable pour produire un bel anneau, est d'environ trois tours par seconde. L'anneau obtenu ainsi, a un diamètre moyen de 9 à 10 centimètres.

12. Lorsque, à l'instant de la formation de l'anneau, la masse d'huile qui le constitue s'éloigne du disque, on remarque une parti-

cularité assez singulière : l'anneau reste uni au disque par une pellicule ou nappe d'huile extrêmement mince, qui occupe tout l'espace qu'ils laissent entre eux. Mais à l'instant où, l'anneau ayant atteint son plus grand développement, on cesse de faire mouvoir le disque, cette pellicule se rompt et disparaît d'elle-même, et l'anneau demeure alors parfaitement isolé.

On conçoit que cette pellicule n'est pas une circonstance essentielle au phénomène de la formation de l'anneau, et nous verrons, dans une autre partie de ce travail, qu'elle se rattache probablement à un ordre de faits tout différent.

13. Les cieux nous présentent aussi un corps de forme analogue à notre anneau liquide : je veux parler de l'anneau de Saturne. A la vérité, celui-ci est aplati, tandis que le nôtre semble tout à fait arrondi sur son épaisseur ; mais je ne pense pas que cette différence soit aussi grande qu'elle le paraît d'abord.

En effet, la force centrifuge, qui va en croissant depuis la circonférence intérieure de l'anneau d'huile jusqu'à sa circonférence extérieure, tend nécessairement à étirer cet anneau dans le sens de sa largeur, ou, en d'autres termes, à l'aplatir. Mais l'aplatissement doit être très-peu prononcé : car, à cause des dimensions peu considérables de l'anneau, et de la lenteur de son mouvement angulaire, l'espèce de traction qui résulte de la variation de la force centrifuge doit être très-peu de chose en comparaison des forces développées par l'attraction moléculaire.

14. Nous pouvons donc, me semble-t-il, raisonnablement admettre que notre anneau d'huile est, en réalité, légèrement aplati, et que, par conséquent, il ne diffère de celui de Saturne, quant à la forme générale, que par la moindre quantité de l'aplatissement ¹. Mais il y a plus : dans le système de Saturne, l'aplatissement de l'anneau est

¹ Je fais abstraction ici de la subdivision de l'anneau de Saturne : cette subdivision, comme on sait, n'est pas essentiellement liée aux conditions d'équilibre de l'anneau.

en partie déterminé par l'attraction de la planète centrale. Or, au premier moment de la formation de l'anneau d'huile, celui-ci est soumis à une force particulière qui joue un rôle analogue à celui de l'attraction ci-dessus. En effet, cette attraction agit avec la plus grande intensité à la circonférence intérieure de l'anneau de Saturne, et décroît rapidement, à partir de là, dans le reste de ce corps. Maintenant, au premier moment de la formation de l'anneau d'huile, nous avons vu (§ 12) que celui-ci demeure uni au disque par une mince nappe du même liquide, et l'on peut se convaincre que cette nappe exerce, sur la circonférence intérieure de l'anneau, une force de traction assez considérable. En effet, si l'on arrête le mouvement du disque un peu trop tôt, c'est-à-dire un peu avant que l'anneau ait atteint son maximum de diamètre, la nappe d'huile ne se rompt pas, et l'anneau revient alors sur lui-même (§ 11) avec une rapidité bien plus grande que lorsque la nappe d'huile s'est rompue et que l'anneau est demeuré isolé. La traction que la nappe d'huile exerce sur la circonférence intérieure de l'anneau, doit donc produire un effet analogue à celui de l'attraction de Saturne, c'est-à-dire contribuer à augmenter l'aplatissement. Eh bien, l'anneau d'huile, avant la rupture de la nappe, présente un aplatissement très-prononcé. Pour l'obtenir parfaitement, il faut avoir soin que la sphère soit bien centrée par rapport au disque, avant de commencer l'expérience, et il est avantageux de donner à la manivelle une vitesse un peu moindre que celle qui est indiquée au § 11 : la plus convenable m'a paru devoir être d'environ deux tours par seconde. Aussitôt que la nappe d'huile se rompt, l'aplatissement s'efface, et la section génératrice devient, comme nous l'avons vu, sensiblement circulaire¹.

¹ J'avais pensé qu'il serait possible d'obtenir des anneaux isolés et notablement aplatis, en opérant sur des masses d'huile plus considérables; car alors l'anneau ayant un plus grand volume, l'influence de l'attraction moléculaire doit être moindre. Mais j'ai reconnu qu'en opérant sur de plus grandes masses, il fallait, pour obtenir l'anneau d'une manière régulière, employer une vitesse de rotation plus faible; de sorte que, si l'influence de l'attraction moléculaire était diminuée, celle de la force centrifuge l'était également. L'aplatissement n'en devenait donc pas plus sensible, ou si quelquefois j'ai cru en observer un, je n'ai pu le reproduire à volonté. J'ai opéré ainsi sur des sphères qui avaient successivement environ 10, 11, 12 et 14 centimètres de diamé-

15. Les géomètres qui se sont occupés de la figure d'équilibre d'une masse liquide en rotation, n'ont envisagé que le cas où l'attraction qui lutte contre la force centrifuge est l'attraction universelle, et ils ont démontré que des figures elliptiques satisfont alors à cet équilibre. Faut-il conclure de là que la forme annulaire développée par la rotation de notre masse d'huile, résulte de la loi différente qui régit l'attraction moléculaire (§ 10), et que, dans le cas des corps célestes, la figure d'un anneau isolé n'aurait pu se produire par la seule combinaison de la force centrifuge et des attractions mutuelles des différentes parties de la masse? Je ne le crois pas, et je regarde, au contraire, comme bien probable, que si le calcul pouvait aborder la solution générale de ce grand problème, et conduire directement à la détermination de toutes les figures d'équilibre possibles, la figure annulaire s'y trouverait comprise. Cette solution générale et directe présentant de très-grandes difficultés, les géomètres se sont contentés d'essayer si des figures elliptiques pouvaient satisfaire à l'équilibre, et de prouver qu'elles y satisfont en effet; mais ils laissent dans le doute si d'autres figures ne rempliraient pas les mêmes conditions. A la vérité, M. Liouville, dans ses dernières recherches sur ce sujet ¹, semble, au premier abord, avoir à peu près résolu la question, en intro-

tre, avec des disques ayant un diamètre de 7 et de 9 centimètres, et dans un vase à faces planes ayant un fond carré de 55 centimètres de côté, et une hauteur de 25 centimètres. Du reste, les effets que l'on obtient ainsi sont très-beaux; les anneaux sont magnifiques, présentent un diamètre considérable, et persistent quelquefois pendant huit à dix secondes avant de revenir sur eux-mêmes. Avec une sphère de 10 centimètres de diamètre, un disque de 7, et une vitesse un peu moindre qu'un tour du disque par seconde, on obtient d'une manière très-belle et très-prononcée, l'aplatissement provenant de la traction de la nappe d'huile.

Mais ces expériences sont incommodes et difficiles, à cause des grandes dimensions du vase, et de la grande quantité de liquide alcoolique nécessaire pour le remplir.

On conçoit, du reste, pourquoi une masse d'huile plus considérable exige une vitesse de rotation moindre pour produire un anneau régulier. C'est précisément parce que l'attraction moléculaire a moins d'influence, d'où résulte que, si l'on essaie d'employer la même vitesse de rotation qui donnerait un bel anneau avec une quantité d'huile moindre, la masse se désunit, et s'éparpille en sphérules.

¹ Le mémoire de M. Liouville a été communiqué à l'Académie des sciences, dans la séance du 15 février de cette année. On peut en lire une analyse dans le journal *l'Institut*, n° 477.

duisant la considération de la stabilité de la figure d'équilibre, et en faisant voir que, pour chaque valeur du moment de rotation, ou, en d'autres termes, pour un mouvement initial quelconque de la masse, il y a toujours une figure elliptique, soit de révolution soit à trois axes inégaux selon les circonstances, qui constitue une forme d'équilibre stable. Il paraît, en effet, naturel d'admettre que, pour un ébranlement donné d'une masse liquide, il n'y a qu'un seul état final admissible; et, dans ce cas, cet état doit nécessairement jouir de la stabilité. Cependant je ne crois pas la conclusion que l'on peut tirer de ces résultats aussi générale qu'elle le paraît au premier aspect. Sans doute, pour un ébranlement primitif donné, il n'y a qu'un seul état final possible, et cet état doit être stable; mais la condition de stabilité d'une figure d'équilibre trouvée, n'entraîne pas nécessairement la conséquence que cette figure constituera l'état final en question: car il se pourrait que plusieurs figures d'équilibre correspondantes au même ébranlement primitif jouissent également de la stabilité, et que le choix de la masse pour l'une de ces figures fût déterminé par d'autres circonstances; par exemple, par les modifications que son mouvement éprouve dans les premiers moments de la rotation. C'est, en effet, en examinant ces modifications, sur lesquelles l'attention des géomètres ne s'est pas dirigée, que je vais essayer d'arriver au mode de génération des figures annulaires.

16. Lorsque la masse commence à tourner sur elle-même, la vitesse angulaire des portions qui s'éloignent de l'axe emportées par leur force centrifuge, va nécessairement en diminuant. Cette diminution est surtout prononcée à l'équateur de la masse; et elle est d'autant plus considérable que le mouvement initial de rotation était plus rapide. Il résulte de là que, dans les premiers temps d'une rotation suffisamment rapide, il y aura une grande différence de vitesse angulaire entre les portions qui avoisinent l'axe, et celles qui avoisinent l'équateur. Cependant si l'on admet, pour un moment, qu'en vertu de l'adhérence du liquide pour lui-même, et du frottement de ses diverses

parties, les portions qui tournent le plus rapidement communiquent peu à peu une partie de leur vitesse aux autres, de sorte qu'il en résulte à la fin une vitesse angulaire moyenne correspondante au même moment de rotation et égale en tous les points de la masse, celle-ci pourra prendre une figure ellipsoïdale. Mais, bien avant que les faibles forces dont nous venons de parler aient pu amener ce résultat moyen, il devra se manifester un autre ordre de phénomènes, qui pourra empêcher le développement de la figure elliptique, et donner naissance à une forme annulaire.

En effet, il suit nécessairement des considérations précédentes, que, dans les premiers temps d'une rotation suffisamment rapide, la force centrifuge à l'équateur de la masse sera beaucoup moindre que celle qui correspondrait à la vitesse moyenne ci-dessus; et que, par contre, la force centrifuge des portions voisines de l'axe sera de beaucoup supérieure à celle qui correspondrait à cette même vitesse moyenne. Le liquide voisin de l'axe sera donc chassé vers le liquide de l'équateur, d'où résultera nécessairement la formation d'une sorte de bourrelet plus ou moins prononcé. En d'autres termes, la masse se creusera bientôt en son milieu, et se renflera tout à l'entour. Or, dès que ce phénomène a lieu, on conçoit que l'attraction exercée par ce bourrelet sur le liquide resté autour de l'axe, doit s'ajouter à l'action de la force centrifuge, et contribuer à augmenter le volume du bourrelet aux dépens du liquide central. Il peut donc évidemment résulter de là, que tout le liquide abandonne l'axe pour se rendre au bourrelet, et que celui-ci devienne de la sorte un véritable anneau.

Cette génération des figures annulaires serait donc indépendante de la loi que suit l'attraction, et serait, par conséquent, la même dans le cas de l'attraction universelle et dans celui de l'attraction moléculaire.

17. Il est aisé de vérifier ce mode de génération sur notre masse d'huile, ou, du moins, de s'assurer que pendant la formation du bourrelet et de l'anneau, la vitesse angulaire est beaucoup moindre

à l'équateur de la masse que vers l'axe. Pour cela, je ferai d'abord remarquer que lorsqu'on a exécuté un certain nombre d'expériences sur une même masse d'huile, et que celle-ci a été plusieurs fois dé-sunie et reformée en sphère unique et en anneau, elle renferme toujours dans son intérieur une multitude de petites bulles de liqueur alcoolique, lesquelles entraînés par l'huile qui les entoure, rendent parfaitement observables les mouvements des différents points de la masse. Or, si l'on répète les expériences que nous avons décrites, à l'aide d'une sphère d'huile ainsi remplie de bulles alcooliques, on observe ce qui suit. Tant qu'on ne donne au disque que des vitesses assez faibles pour déterminer un simple aplatissement, il n'y a pas une grande différence de vitesse angulaire entre les portions voisines de l'axe et les portions voisines de l'équateur; mais cette différence devient très-considérable, lorsque le disque tourne plus rapidement, et que le bourrelet et l'anneau se développent.

On peut aussi constater, par le moyen des petites bulles alcooliques, que la vitesse angulaire moyenne s'établit dans l'anneau une fois formé, et que tous les points de celui-ci exécutent alors leurs révolutions dans le même temps.

Du reste, dans nos expériences sur les masses d'huile, il y a deux forces étrangères qui s'ajoutent aux causes que nous avons signalées, pour faciliter le développement du bourrelet et de l'anneau. L'une est la résistance du liquide ambiant, qui contribue à affaiblir la vitesse angulaire de l'équateur de la masse; l'autre est l'action de la main qui entretient la vitesse de rotation du disque, et empêche, par conséquent, les portions centrales de la masse, de participer graduellement au ralentissement des portions équatoriales. Mais ce que produisent ces deux forces étrangères, une plus grande vitesse initiale de rotation le produirait également si on pouvait les annuler.

18. Lorsque, à l'aide d'une vitesse modérée du disque, l'on se borne à produire l'aplatissement de la masse, les deux forces étrangères dont nous venons de parler empêchent nécessairement celle-ci d'arriver à

prendre une vitesse angulaire égale en tous ses points, quand même on continue à faire tourner le disque. Il en résulte que la masse ne peut prendre exactement la figure qui correspondrait à cette égalité de vitesse angulaire. Celle qu'elle adopte est une figure de révolution ; mais, en plaçant l'œil à la hauteur du centre de la masse, on reconnaît aisément que ce n'est pas un ellipsoïde : la courbure à l'équateur est trop faible, et cela se remarque d'autant plus que l'aplatissement est plus considérable.

Maintenant, cette différence entre la figure ainsi produite et celle qui correspondrait au cas de l'attraction universelle, est-elle uniquement le résultat de l'action des deux forces étrangères dont il s'agit, ou bien a-t-elle en partie pour cause la différence des lois que suivent les deux genres d'attraction ? En d'autres termes, si l'on pouvait éliminer ou rendre insensibles les différences de vitesse angulaire des diverses parties de la masse d'huile, la figure produite serait-elle, ou non, un ellipsoïde ? Or, on rendrait insensibles ces différences de vitesse angulaire, si l'on pouvait imprimer un mouvement de rotation à une masse d'huile suspendue isolément, sans système intérieur, dans le liquide alcoolique, et l'abandonner ensuite à elle-même. Alors, en effet, la résistance du liquide ambiant s'exercerait bien à l'extérieur de la masse ; mais rien n'entretenant la constance de vitesse des parties centrales, celles-ci, en vertu de la forte adhérence de l'huile pour elle-même, participeraient de suite au ralentissement des portions extérieures, et l'on pourrait considérer la masse comme ayant à chaque instant une vitesse angulaire égale partout.

Or, il est très-facile de réaliser ce qui précède, en profitant du fait que, lorsque l'anneau d'huile est formé, il revient, après quelque temps, sur lui-même (§ 11). A l'instant où l'anneau est bien développé et où l'on vient d'arrêter le disque, on enlève celui-ci avec précaution à l'aide du bouchon métallique qui porte son axe. Alors la masse d'huile qui se reforme par le retour de l'anneau sur lui-même, continue encore à tourner pendant quelque temps, complètement isolée dans le liquide ambiant. Or sa figure est alors, autant que l'œil peut en

juger, un parfait ellipsoïde de révolution, qui se rapproche graduellement de la sphère à mesure que le mouvement de rotation s'affaiblit ¹.

Ainsi la différence des lois qui régissent les deux sortes d'attraction, paraît ne pas avoir d'influence sur la nature de la figure que prend la masse qui tourne sur elle-même.

19. Une masse liquide ne peut affecter et conserver une forme annulaire, que sous l'influence d'une force centrifuge suffisante. Aussi, comme nous l'avons vu, lorsque la résistance du liquide alcoolique a diminué au delà d'une certaine limite la vitesse de rotation de l'anneau d'huile, celui-ci obéissant à l'action prépondérante de l'attraction moléculaire, revient sur lui-même, perd sa forme annulaire, et se reconstitue

¹ J'avais cru pouvoir obtenir une masse tournant isolément, à l'aide d'un autre procédé : savoir en formant une sphère d'huile au milieu d'un flacon cylindrique disposé de manière à pouvoir tourner sur son axe; faisant alors tourner ainsi ce flacon avec rapidité, jusqu'à ce que tout le liquide intérieur, mélange alcoolique et masse d'huile, ait pris le même mouvement; puis arrêtant brusquement le flacon. En effet, il semble qu'alors la liqueur alcoolique perdant la première son mouvement de rotation par le frottement contre les parois immobiles du flacon, il doit arriver un moment où la masse d'huile conserve un excès de vitesse angulaire sur le liquide ambiant, et qu'alors les effets de la force centrifuge sur cette masse peuvent se manifester. Mais l'expérience donne peu de résultats. Il est d'abord extrêmement difficile de maintenir une masse d'huile au milieu du flacon. On la maintient passablement dans l'axe de celui-ci, parce que, si l'on est parvenu à la placer de manière que son centre soit peu éloigné de cet axe, la rotation du liquide ambiant achève de l'y amener, et l'y retient ensuite assez bien. Mais il n'en est pas de même dans le sens de la hauteur du flacon. Si l'on se sert d'un mélange alcoolique homogène, et que la sphère d'huile soit placée, avant de faire tourner le flacon, un peu plus haut ou plus bas que le milieu de la hauteur de celui-ci, elle quitte sa place lorsque le flacon tourne, pour monter, dans le premier cas, ou pour descendre, dans le second, jusqu'à ce qu'elle vienne s'éparpiller contre l'une des deux bases du flacon. Cet effet est dû, je pense, à ce que les deux bases exerçant, sur les tranches liquides qui les touchent, une action motrice bien plus grande que celle à laquelle sont soumises les tranches parallèles de l'intérieur de la masse, il en résulte, près de ces bases, au commencement de la rotation, un excès de force centrifuge, qui détermine, vers le haut et vers le bas, un appel du liquide voisin de l'axe. Il faudra donc tâcher de placer la sphère d'huile dans une position très-voisine du milieu de la hauteur du vase. Malheureusement, on ne peut pas employer, pour cela, le procédé de la superposition des couches alcooliques de densité inégale (§ 9); car alors, dans la rotation du flacon, les couches inférieures plus denses viennent nécessairement, par l'excès de force centrifuge qui résulte de leur excès de densité, s'élever contre les parois, en forçant le liquide le moins dense à se rendre dans l'axe; et, dans ce mouvement, la masse d'huile est entraînée vers le bas, et va encore s'éparpiller contre le fond du vase.

en une masse unique, ellipsoïdale d'abord, puis sphérique. Mais si, par un moyen que je vais indiquer, on empêche l'anneau de se ramasser ainsi, tout en laissant s'amoinrir l'action de sa force centrifuge, on voit se manifester alors d'autres phénomènes bien dignes d'intérêt. Pour les produire parfaitement, il faut substituer au disque de 35 millimètres, un disque d'environ 5 centimètres de diamètre¹, ce qui nécessite, pour bien former l'anneau, une vitesse de rotation plus petite qu'avec le disque précédent (la plus convenable m'a paru être un peu moindre que de deux tours par seconde). Maintenant, au lieu de cesser le mouvement du disque à l'instant où l'anneau a atteint son plus grand développement, il faut continuer à mouvoir la manivelle. Alors la pellicule d'huile se rompra, au bout de quelque temps, comme si

En employant un mélange alcoolique homogène, et une sphère d'huile qui n'avait qu'environ trois centimètres de diamètre, je suis cependant parvenu plusieurs fois, à force de patience, à donner à cette sphère une position assez exacte dans le flacon, pour pouvoir la maintenir à la même hauteur, jusqu'à ce qu'elle eût pris elle-même le mouvement de rotation de tout le système. Mais alors, quand j'arrêtais le flacon, il se produisait une agitation intérieure violente qui, presque toujours, éparpillait l'huile en d'innombrables sphérules dans tout le liquide alcoolique, ou, du moins, la déformait d'une manière complètement irrégulière. J'attribue ces effets à la cause suivante. Lorsqu'on arrête le flacon, les portions du liquide alcoolique qui touchent les parois et les bases perdant d'abord leur force centrifuge, les portions plus intérieures, qui conservent encore la leur, se font jour à travers les premières en les divisant, et cette confusion se propage bientôt jusque dans l'axe, où elle donne lieu soit à l'éparpillement, soit à la déformation irrégulière de la masse d'huile.

Dans les cas où j'ai pu donner à la sphère d'huile une position convenable, j'ai observé un effet assez curieux : c'est que, dans les premiers temps de la rotation du vase, la masse d'huile quitte la forme sphérique pour s'allonger dans le sens de l'axe de rotation. Cet allongement, du reste, s'explique aisément : le mouvement de rotation se communique aux portions du mélange qui avoisinent l'axe au-dessus et au-dessous de la masse d'huile, avant d'avoir pu se communiquer avec la même intensité à celle-ci; il doit donc résulter de là, dans les différents points de cette masse, une force centrifuge moindre que dans les points du mélange alcoolique situés aux mêmes distances de l'axe de rotation. De là un appel de l'huile dans l'axe, et un allongement de la masse de celle-ci dans le sens de ce même axe. Mais, en continuant la rotation, l'huile finit par recevoir le même mouvement que le liquide environnant, et, aussi, elle reprend peu à peu la forme sphérique.

En arrêtant le flacon, non pas brusquement, mais d'une manière assez rapide, je suis parvenu, une fois, à obtenir un résultat assez régulier, et j'ai vu, comme je m'y attendais, la sphère s'aplatir considérablement selon l'axe de rotation.

¹ Cette substitution se fait en détachant l'extrémité supérieure de l'axe du premier disque, du gros fil de fer qui traverse le bouchon métallique (§ 8), et vissant, à sa place, l'extrémité de l'axe du nouveau disque.

L'on avait arrêté le disque ; mais celui-ci continuant à tourner dans la liqueur alcoolique , les portions de cette liqueur qui sont en contact avec lui , prendront elles-mêmes un mouvement de rotation , et la force centrifuge qui en résulte , les chassera continuellement vers l'anneau , de sorte que celui-ci ne pourra revenir sur lui-même. Or , dans ces circonstances , on voit bientôt l'anneau perdre sa régularité , puis se diviser en plusieurs masses isolées , dont chacune prend aussitôt la forme sphérique. Ainsi l'anneau , lorsqu'il ne peut conserver sa figure à cause du décroissement de sa force centrifuge , et qu'un obstacle l'empêche de se reformer en une sphère unique , se résout en plusieurs sphères isolées. Aussitôt que la séparation commence à s'effectuer , il faut cesser le mouvement du disque.

Ce n'est pas tout : on voit presque toujours alors une ou plusieurs de ces sphères prendre , à l'instant de leur formation , un mouvement de rotation sur elles-mêmes , mouvement qui a constamment lieu dans le même sens que celui de l'anneau. En outre , comme l'anneau , à l'instant de sa rupture , avait encore un reste de vitesse , les sphères auxquelles il a donné naissance tendent à s'échapper suivant la tangente ; mais comme , d'un autre côté , le disque , en tournant dans la liqueur alcoolique , a imprimé à celle-ci un mouvement de rotation , les sphères sont surtout entraînées par ce dernier mouvement , et tournent pendant quelque temps autour du disque. Celles qui tournent en même temps sur elles-mêmes présentent donc alors le curieux spectacle de planètes tournant à la fois sur elles-mêmes et dans leur orbite. Le mouvement de rotation de ces masses est , du reste , trop lent relativement à leur diamètre , pour donner lieu à un aplatissement sensible.

Enfin , un autre effet bien curieux se manifeste encore dans ces circonstances : outre trois ou quatre grosses sphères dans lesquelles se résout l'anneau , il s'en produit presque toujours une ou deux très-petites , qui peuvent ainsi être comparées à des satellites.

L'expérience que nous venons de décrire , offre , comme on voit , en petit , une image de la formation des planètes , selon l'hypothèse de

La Place, par la rupture des anneaux cosmiques dus à la condensation de l'atmosphère solaire.

20. Lorsqu'on introduit de l'huile dans un mélange renfermant un petit excès d'alcool, on peut observer un phénomène qui se rattache à celui de la résolution de l'anneau en sphères isolées. Si l'on verse l'huile avec assez de rapidité, celle-ci forme une longue traînée cylindrique à partir du bec de l'entonnoir jusqu'au fond du vase, où la masse se rassemble. Or, cette espèce de queue qui rattache la masse d'huile au bec de l'entonnoir, se maintient tant que l'huile qui la constitue a un mouvement de translation suffisamment rapide, c'est-à-dire tant que l'on continue à verser. Mais dès que l'on cesse de verser et que le mouvement de translation se ralentit, la traînée d'huile se résout instantanément en plusieurs sphérules isolées.

21. La formation d'un anneau analogue à celui de Saturne, inspire naturellement le désir de pousser plus loin la ressemblance avec le système de cette planète, et de chercher si, par quelque modification de notre expérience, il ne serait pas possible de faire en sorte qu'une sphère d'huile demeurât au milieu de l'anneau. Or, je suis parvenu à produire cet effet, à l'aide d'un procédé que je vais décrire. Seulement il ne faut voir dans cette expérience, qu'un simple jeu scientifique : car les circonstances qui donnent naissance au résultat, n'ont évidemment aucune analogie avec celles qui ont pu amener la configuration du système de Saturne.

Il faut d'abord pouvoir donner au disque une vitesse de rotation considérable. Pour cela, on adapte à la partie supérieure du vase, un système de deux poulies, l'une petite et fixée sur le prolongement de l'axe du disque, à la place de la manivelle que l'on a enlevée; l'autre grande et dont l'axe reçoit cette même manivelle; dans mon appareil, les diamètres des deux poulies sont respectivement de 12 et de 75 millimètres. En second lieu, le diamètre de la sphère étant toujours à peu près de 6 centimètres, celui du disque doit n'être que de 2 cen-

timètres. Enfin le disque ne doit pas avoir, comme dans les expériences précédentes, son centre confondu avec celui de la sphère : il doit être placé plus bas, vers la partie inférieure de celle-ci.

Les choses étant ainsi disposées, on fait tourner la manivelle avec une vitesse que l'expérience apprend bientôt à trouver; dans mon appareil, cette vitesse devait être d'environ deux tours et demi par seconde, ce qui correspondait à peu près à quinze tours du disque dans le même temps. Alors on voit, en général, se former rapidement un anneau, qui s'étend en laissant dans son milieu une masse d'huile à laquelle il demeure uni par une mince pellicule. A l'instant où l'anneau a atteint un développement suffisant, et l'habitude seule apprend à bien juger de cet instant, on cesse brusquement la rotation. Alors la pellicule se rompt, l'anneau demeure complètement isolé, et la masse centrale se forme en sphère. On a ainsi, pendant quelques instants, une curieuse représentation du système de Saturne, à l'aplatissement de l'anneau près. L'anneau revient ensuite rapidement sur lui-même, et s'unit de nouveau à la sphère centrale. Cette expérience ne présente pas de grandes difficultés, mais elle exige cependant quelque habitude pour réussir parfaitement ¹.

22. En décrivant (§ 10) l'expérience où l'on produit l'aplatissement de la sphère par l'action immédiate du disque, j'ai fait remarquer qu'il ne fallait pas prolonger trop longtemps le mouvement de ce dernier, parce que la masse d'huile finit alors par se déformer. Or, si l'on continue cependant à faire tourner la manivelle afin d'observer les résultats de cette déformation, l'on voit se manifester des effets nouveaux et très-bizarres.

La sphère étant bien centrée par rapport au disque, si l'on donne à celui-ci des vitesses d'un tour en six, cinq, ou quatre secondes, on commence, après sept ou huit tours, à voir la masse d'huile s'allonger

¹ En communiquant cette même expérience à l'Académie, dans la séance d'avril 1842 (voir les *Bulletins*), j'ai dit qu'il fallait faire varier la vitesse de rotation. J'ai reconnu plus tard qu'en choisissant cette vitesse convenablement, il valait mieux la maintenir uniforme.

horizontalement dans un sens, en prenant une forme qui se rapproche beaucoup d'un ellipsoïde à trois axes; et, ce qu'il y a de plus singulier, cette espèce d'ellipsoïde est placé d'une manière excentrique par rapport à l'axe de rotation. La figure 4 représente, pour une vitesse d'un tour en quatre secondes, la masse vue de trois côtés différents : savoir par dessus et dans les deux sens latéraux du plus petit et du plus grand axe horizontal; les parties ponctuées indiquent les positions du disque et de l'axe de rotation. L'aspect de la masse vue par dessus, montre qu'elle est légèrement fléchie dans un sens; mais cet effet est évidemment dû à la résistance du liquide ambiant.

Une fois que la masse a pris cette forme, elle la conserve indéfiniment, tant que dure le mouvement du disque; elle continue à tourner excentriquement autour de lui, et avec une vitesse beaucoup moindre que celle de ce disque. Cette moindre vitesse, du reste, provient encore évidemment de la résistance du liquide ambiant.

Si l'on donne au disque une vitesse plus grande, sans toutefois dépasser une certaine limite, si on lui fait faire, par exemple, un tour en trois secondes, les phénomènes sont encore du même genre; seulement la masse est plus allongée, la flexion due à la résistance du liquide ambiant est plus prononcée, et la forme s'écarte davantage d'un ellipsoïde. La figure 5 représente la masse vue sur le côté, et montrant à l'œil sa plus grande longueur.

Si l'on porte la vitesse du disque jusqu'à un tour en deux secondes, les phénomènes deviennent moins constants et moins réguliers; on dirait qu'il y a, pour cette vitesse, passage entre un ordre de phénomènes et un autre, et que la masse hésite entre les deux.

En effet, pour une vitesse un peu plus grande encore, savoir d'environ un tour en une seconde et demie, les phénomènes recommencent à être réguliers et constants, mais ils sont différents des premiers. Ils se montrent dans toute leur beauté, lorsqu'on porte la vitesse à un tour par seconde. Alors la masse se creuse d'abord fortement autour de l'axe, comme si l'anneau était près de se développer,

et elle demeure sous cette forme de bourrelet circulaire pendant seize à dix-huit tours du disque; puis on la voit s'allonger graduellement selon un diamètre horizontal, mais non plus excentriquement, de sorte que, vue par dessus, elle présente une figure elliptique quelquefois très-parfaite, dont le disque occupe le centre (fig. 6). Cette ellipse s'allonge ensuite de plus en plus, avec assez de rapidité, et commence à se fléchir par la résistance du liquide ambiant (fig. 7); enfin, tout à coup, la masse se courbe fortement des deux côtés, et sa forme vue par dessus est alors telle que la représente la figure 8. La masse conserve ensuite cette dernière forme d'une manière parfaitement stable, tant que dure le mouvement du disque.

23. Quelque bizarres que paraissent ces phénomènes, le hasard ou des causes accidentelles n'y ont cependant aucune part. J'ai refait un très-grand nombre de fois les expériences ci-dessus, et les effets ont toujours été identiquement les mêmes pour les mêmes vitesses.

Après avoir vu les figures stables que prend la masse dans ces circonstances, on ne peut s'empêcher d'établir un rapprochement entre ces figures et les ellipsoïdes à trois axes de MM. Jacobi et Liouville (§ 15), ellipsoïdes qui sont toujours aussi, comme l'a démontré le dernier de ces deux géomètres, des figures d'équilibre stable. L'identité des phénomènes dans le cas de l'attraction universelle et dans celui de l'attraction moléculaire, se soutiendrait-elle jusque-là? sans doute les figures singulières que nous venons de faire connaître ne sont pas des ellipsoïdes; mais leur aspect permet d'attribuer la différence à la résistance du liquide ambiant, qui, d'une part, détermine les flexions dont nous avons parlé, et, d'une autre part, entretient une inégalité permanente de vitesse angulaire entre les portions voisines du disque et les portions plus éloignées. Le calcul seul pourrait nous apprendre jusqu'à quel point le rapprochement ci-dessus est fondé; la solution complète du problème pour le cas de l'attraction moléculaire, ne présenterait peut-être pas des difficultés aussi insurmontables que pour celui de l'attraction universelle.

24. Dans toutes les expériences que j'ai décrites dans ce mémoire, j'ai supposé que l'huile et le mélange alcoolique étaient chimiquement inertes l'un à l'égard de l'autre, et j'ai dit (§ 6) qu'il était aisé de se procurer en peu de temps deux liquides semblables. Je vais maintenant détailler le procédé à l'aide duquel on atteint ce but.

On commence par faire un mélange d'alcool et d'eau distillée, contenant un certain excès d'alcool, de telle sorte que, soumis à l'essai de l'éprouvette (§ 3), il laisse la petite sphère d'huile descendre au fond avec assez de rapidité. Après avoir formé le mélange en quantité plus que suffisante pour remplir le vase qui doit servir aux expériences, on introduit dans ce même mélange une quantité d'huile double environ de celle que l'on juge nécessaire pour ces expériences¹. Si l'on n'a pas à sa disposition un flacon assez grand pour contenir le tout, on partage les masses entre plusieurs flacons séparés; mais alors il faut avoir soin que chacun d'entre eux contienne les mêmes proportions d'eau, d'alcool, et d'huile. Après cela, on retourne ces flacons rapidement un grand nombre de fois, mais sans les secouer, jusqu'à ce que l'huile ait été divisée en sphérules de la grosseur d'une tête d'épingle; puis on laisse reposer le tout. Alors, si la quantité d'alcool du mélange est convenable, les sphérules doivent descendre avec une extrême lenteur, de manière à employer environ un quart d'heure à se rassembler, pour la majeure partie, au fond des flacons. S'il en est autrement, on ajoutera de l'eau ou de l'alcool selon le besoin, on mélera en retournant plusieurs fois les flacons comme ci-dessus, on laissera encore reposer, et l'on recommencera ainsi jusqu'à ce qu'on soit arrivé au résultat que je viens d'indiquer. Ce point obtenu, on jettera le tout sur des filtres, en ayant soin de couvrir de plaques de verre les entonnoirs qui contiennent ces derniers; cette précaution est nécessaire afin d'empêcher, autant que possible, l'évaporation de l'alcool, et pour une autre raison encore dont nous parlerons plus loin. La liqueur alcoo-

¹ Il est indispensable d'avoir ainsi les deux liquides en excès, à cause des quantités qui se perdent nécessairement pendant les diverses opérations qui vont être décrites, et dans la préparation des expériences.

lique passe la première à travers les filtres, entraînant ordinairement avec elle un certain nombre de très-petites sphérules d'huile. Lorsqu'elle a passé ainsi en majeure partie, les sphérules deviennent plus fréquentes; alors on jette dans un filtre unique placé sur un nouveau flacon, ce qui demeure encore dans les premiers filtres : savoir l'huile et un reste de liqueur alcoolique. Cette dernière filtration se fait avec beaucoup plus de lenteur que la première, à cause de la viscosité de l'huile; on l'accélère notablement, en renouvelant le filtre une ou deux fois pendant l'opération. Si l'entonnoir a été recouvert avec assez de soin, l'huile se rassemblera en une seule masse au fond du flacon, sous une couche de liqueur alcoolique.

Les opérations précédentes nous ont donc donné pour résultats : d'une part le mélange alcoolique inerte, renfermant encore un léger excès d'alcool, et contenant un certain nombre de petites sphérules d'huile; d'une autre part l'huile également inerte, et recouverte d'un peu de ce même liquide alcoolique. Or, une seconde filtration débarrasse complètement le premier des sphérules qu'il renferme; quant à l'huile, on l'extrait de dessous la couche alcoolique, à l'aide d'un petit siphon amorcé par un tube latéral, et on la reçoit dans un flacon sec que l'on bouche parfaitement. On a, de cette manière, les deux liquides séparés, et inactifs l'un à l'égard de l'autre. Quand on veut les employer, si l'on reconnaît que le liquide alcoolique est un peu trop dense, on l'ajuste avec de l'alcool pur; et, s'il a, au contraire, trop peu de densité, on l'ajuste avec de l'alcool à 16 degrés. Dans ce dernier cas, il ne faudrait pas employer de l'eau pure, parce que celle-ci, en se mêlant à la liqueur alcoolique préparée, y détermine un trouble plus ou moins prononcé.

Les divers essais que j'ai faits relativement au procédé ci-dessus, m'ont conduit à reconnaître que les deux liquides, lorsqu'ils n'ont pas été soumis à cette préparation, sont l'un et l'autre modifiés par leur contact mutuel. Le liquide alcoolique dissout de l'huile, et celle-ci, à son tour, dissout probablement de l'alcool. C'est surtout de la modification que l'huile éprouve, que provient sa grande diminu-

tion de densité relative (§ 6). Or, lorsque l'huile ainsi modifiée demeure exposée à l'air, elle repasse peu à peu à l'état d'huile fraîche, et reprend sa densité première. C'est en partie pour éviter cela, que j'ai recommandé de tenir constamment couverts les entonnoirs qui renferment les filtres, et de conserver l'huile dans un flacon parfaitement bouché. Quant au mélange alcoolique, il est évident que cette dernière précaution est également nécessaire.

25. Avant de terminer, je dois prévenir les personnes qui voudront répéter mes expériences, de deux effets qui se présentent quelquefois et qui apportent du trouble dans les opérations, quand on ne connaît pas les moyens de les empêcher ou de les détruire.

Lorsqu'on introduit de l'huile dans un mélange contenant un excès d'alcool, il arrive parfois que la masse qui est descendue au fond du vase, contracte de l'adhérence avec ce fond, et s'étale plus ou moins contre sa surface. Il n'y a alors aucun moyen de l'enlever tout entière; mais pour empêcher le développement de l'adhérence dont il s'agit, il suffit de faire en sorte que le fond du vase soit occupé par une couche d'un mélange plus dense que l'huile (§ 9).

Le second effet qui doit nous occuper, se présente dans les circonstances inverses, c'est-à-dire lorsque la sphère d'huile, au lieu de gagner le fond du vase, s'élève, au contraire, jusqu'à la surface de la liqueur alcoolique, soit parce que cette liqueur renferme trop peu d'alcool, soit à cause d'un abaissement de température, soit parce qu'on n'a pu employer de l'huile préparée. Lorsque cela arrive, la masse s'aplatit d'abord plus ou moins contre la surface du mélange, comme si cette dernière lui opposait une résistance; puis, après quelque temps, elle se fait jour, et présente alors une portion de surface plane plus ou moins étendue, au niveau de celle de la liqueur alcoolique. Mais ce qu'il y a de fâcheux, c'est qu'alors elle a, pour ainsi dire, contracté une adhérence avec cette même surface, dont elle ne se détache que fort difficilement. Il est d'abord aisé d'empêcher la production de cet effet, en versant, à la surface de la liqueur, une

petite couche d'alcool pur ; et ce même moyen pourra aussi servir à détruire l'effet en question , s'il est déjà produit. On peut encore , dans ce dernier cas , renverser le vase avec précaution : le mouvement ainsi imprimé à la liqueur ambiante suffit ordinairement pour détacher la masse d'huile, à l'exception d'une petite portion qui , presque toujours , demeure adhérente à la surface.

26. Enfin, j'ai déjà mentionné ce fait, qu'après un certain nombre d'expériences, l'huile se trouve remplie de petites sphérules de liqueur alcoolique. Or, réciproquement, la liqueur alcoolique ambiante se trouve souvent aussi parsemée d'une multitude de petites sphérules d'huile. Il est presque inutile de faire remarquer que lorsque toutes ces sphérules sont devenues trop nombreuses, et qu'on veut rendre aux liquides leur transparence première, on y parvient aisément par des filtrations analogues à celles dont j'ai parlé plus haut (§ 24).

27. Nous nous sommes occupés jusqu'ici des figures que prend une masse liquide soustraite à l'action de la pesanteur et soumise à l'attraction de ses molécules, soit lorsque cette masse est en repos, soit lorsqu'on lui imprime un mouvement de rotation sur elle-même. Malgré la différence des lois que suivent les forces attractives dans ce cas et dans celui des grandes masses planétaires, nous avons vu se produire, en petit, une représentation frappante de la plupart des phénomènes de configuration relatifs aux corps célestes. Dans la seconde partie de ce travail, nous allons soumettre nos masses liquides à de nouvelles forces, et nous verrons se développer alors une série de phénomènes tout aussi curieux, mais d'un ordre différent.



