

Les actions moléculaires dans l'organisme / H. Bordier.

Contributors

Bordier, Henri, 1863-
Royal College of Surgeons of England

Publication/Creation

Paris : Durand. 898

Persistent URL

<https://wellcomecollection.org/works/kf6a47se>

Provider

Royal College of Surgeons

License and attribution

This material has been provided by This material has been provided by The Royal College of Surgeons of England. The original may be consulted at The Royal College of Surgeons of England. where the originals may be consulted. This work has been identified as being free of known restrictions under copyright law, including all related and neighbouring rights and is being made available under the Creative Commons, Public Domain Mark.

You can copy, modify, distribute and perform the work, even for commercial purposes, without asking permission.

**wellcome
collection**

Wellcome Collection
183 Euston Road
London NW1 2BE UK
T +44 (0)20 7611 8722
E library@wellcomecollection.org
<https://wellcomecollection.org>

4.

Scientia

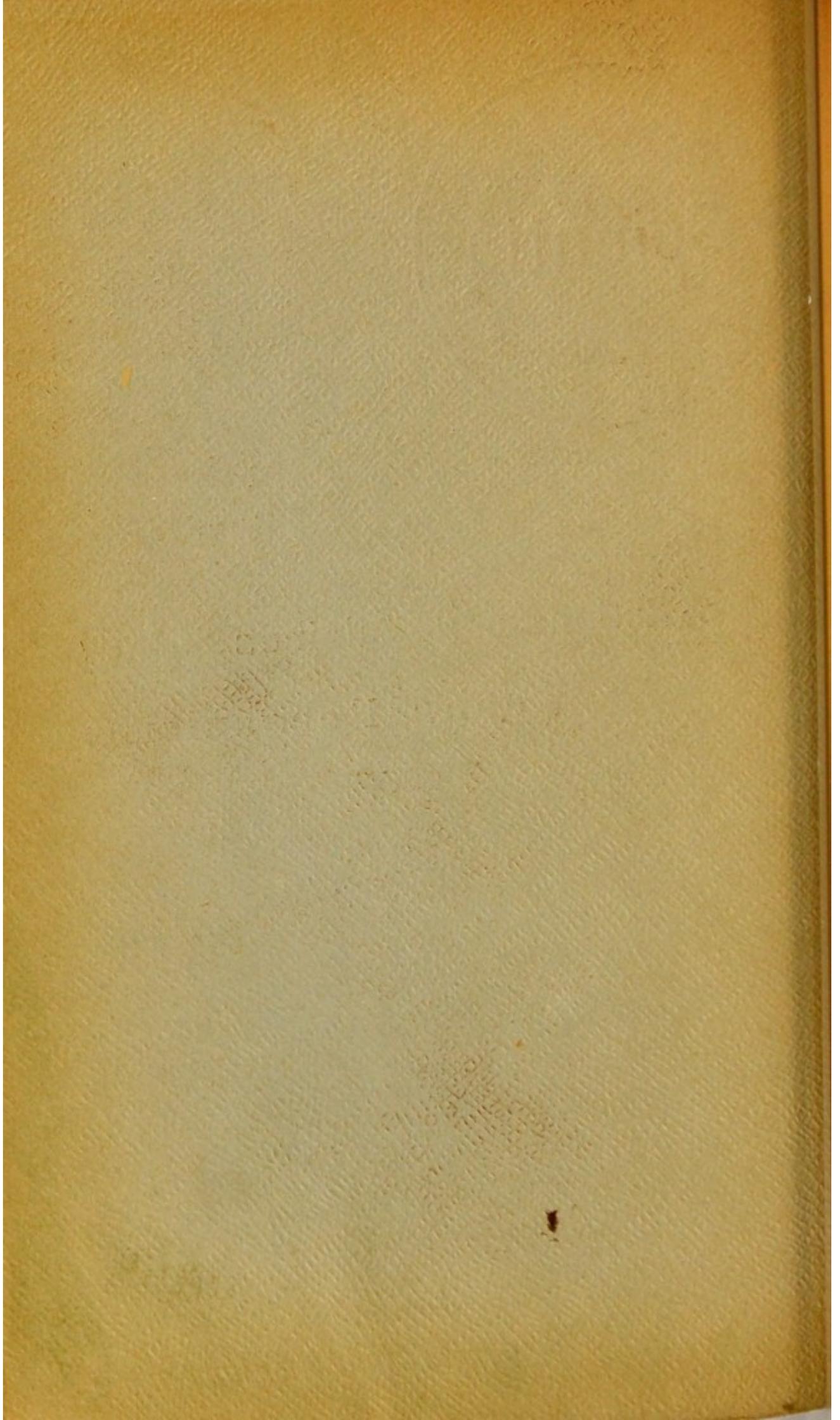


H. Bordier

Les Actions moléculaires
dans l'organisme



24
Georges CARRE & C. NAUD, Éditeurs



SCIENTIA

Exposé et Développement des Questions scientifiques
à l'ordre du jour.

RECUEIL PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION
DE

MM. APPELL, CORNU, D'ARSONVAL, FRIEDEL, LIPPMANN,
MOISSAN, POINCARÉ, POTIER,
Membres de l'Institut

POUR LA PARTIE PHYSICO-MATHÉMATIQUE

ET SOUS LA DIRECTION
DE

MM. BALBIANI, Professeur au Collège de France, D'ARSONVAL,
FILHOL, FOUQUÉ, GAUDRY,
GUIGNARD, MAREY, MILNE-EDWARDS,
Membres de l'Institut

POUR LA PARTIE BIOLOGIQUE

Chaque fascicule comprend de 80 à 100 pages in-8° écu, avec cartonnage spécial.

Prix du fascicule : 2 francs.

On peut souscrire à une série de 6 fascicules (*Série physico-mathématique* ou *Série biologique*) au prix de 10 francs.

A côté des revues périodiques spéciales enregistrant au jour le jour le progrès de la Science, il nous a semblé qu'il y avait place pour une nouvelle forme de publication, destinée à mettre en évidence, par un exposé philosophique et documenté des découvertes récentes, les idées générales directrices et les variations de l'évolution scientifique.

A l'heure actuelle, il n'est plus possible au

savant de se spécialiser ; il lui faut connaître l'extension graduellement croissante des domaines voisins : mathématiciens et physiciens, chimistes et biologistes ont des intérêts de plus en plus liés.

C'est pour répondre à cette nécessité que, dans une série de monographies, nous nous proposons de mettre au point les questions particulières, nous efforçant de montrer le rôle actuel et futur de telle ou telle acquisition, l'équilibre qu'elle détruit ou établit, la déviation qu'elle imprime, les horizons qu'elle ouvre, la somme de progrès qu'elle représente.

Mais il importe de traiter les questions, non d'une façon dogmatique, presque toujours faussée par une classification arbitraire, mais dans la forme vivante de la raison qui débat pas à pas le problème, en détache les inconnues et l'inventorie avant et après sa solution, dans l'enchaînement de ses aspects et de ses conséquences. Aussi, indiquant toujours les voies multiples que suggère un fait, scrutant les possibilités logiques qui en dérivent, nous efforcerons-nous de nous tenir dans le cadre de la méthode expérimentale et de la méthode critique.

Nous ferons, du reste, bien saisir l'esprit et la portée de cette nouvelle collection, en insistant sur ce point, que la nécessité d'une publication y sera toujours subordonnée à l'opportunité du sujet.

Pour paraître prochainement :

SÉRIE PHYSICO-MATHÉMATIQUE

APPELL (P.). *Les mouvements de roulement en dynamique.*

COTTON (A.). *Le phénomène de Zeemann.*

FREUNDLER (P.). *La stéréochimie.*

JOB (A.). *Les terres rares.*

LIPPMANN (G.). *Détermination de l'Ohm.*

MAURAIN (CH.). *Le magnétisme du fer.*

POINCARÉ (H.). *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes.*

RAVEAU. *Les nouveaux gaz.*

VILLARD. *Les rayons cathodiques.*

WALLERAND. *Groupements cristallins : propriétés optiques.*

SÉRIE BIOLOGIQUE

ARTHUS (M.). *La coagulation du sang.*

BARD (L.). *La spécificité cellulaire.*

BERTRAND (M.). *Mouvements orogéniques et déformations de l'écorce terrestre.*

BORDIER (H.). *Les actions moléculaires dans l'organisme.*

COURTADE. *L'irritabilité dans la série animale.*

- DELAGE (YVES) et LABBÉ (A.). *La fécondation chez les animaux.*
- FRENKEL (H.). *Les fonctions rénales.*
- HALLION. *Modifications du sang sous l'influence des solutions salines.*
- HALLION et JULIA. *Action vasculaire des toxines microbiennes.*
- LE DANTEC (F.). *La Sexualité.*
- MARTEL (A.). *Spéléologie.*
- MAZÉ (P.). *Evolution du carbone et de l'azote.*
- MENDELSSOHN (M.). *Les réflexes.*
- POIRAULT. *La fécondation chez les végétaux.*
- RENAULT (B.). *La houille.*
- THIROLOIX (J.). *La fonction pancréatique.*
- VAN GEHUCHTEN (A.). *La cellule nerveuse et la doctrine des neurones.*
- WINTER (J.). *La matière minérale dans l'organisme.*



4.

LES
ACTIONS MOLÉCULAIRES
DANS L'ORGANISME

PAR

H. BORDIER

Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Lyon.

THE HISTORY OF THE

REIGN OF

GEORGE III.

BY

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
INTRODUCTION.	5
CHAPITRE PREMIER. Actions moléculaires dans les solides.	
Élasticité. Élasticité des corps inorganiques. Élasticité des corps organiques. Élasticité des muscles courbes. Élasticité des membranes. Phénomènes d'adhésion. Adhérence des surfaces articulaires.	9
CHAPITRE II. Actions moléculaires dans les liquides.	
Tension superficielle. Théorie du professeur Imbert relative à la contraction musculaire. Muscles lisses. Muscles striés. Phénomènes électriques résultant d'une variation de la tension superficielle.	28
CHAPITRE III. Actions moléculaires entre liquides différents.	
Osmose. Phénomènes électriques liés aux actions moléculaires de l'osmose.	45
CHAPITRE IV. Actions moléculaires entre solides et liquides.	
Phénomènes capillaires. Chapelets capillaires. Phénomènes d'imbibition. Filtration. Phénomènes de dissolution. Pression osmotique. Isotonie. Méthode de H. de Vries. Méthode de Hamburger. Méthode cryoscopique. Liquides de l'organisme. Sécrétion de l'urine. Pression osmotique des liquides de l'estomac. Rôle de la pression osmotique dans la résorption.	57

CHAPITRE V. Actions moléculaires entre solides et gaz.	
Phénomènes d'adhésion gazeuse. Atmosphères adhérentes dans l'organisme.	93
CHAPITRE VI. Actions moléculaires entre liquides et gaz.	
Dissolution des gaz.	95
CHAPITRE VII. Actions moléculaires dans les gaz.	
Diffusion des gaz. Osmose des gaz.	98

LES ACTIONS MOLÉCULAIRES

DANS L'ORGANISME

Les actions moléculaires dans l'organisme constituent l'un des chapitres les plus intéressants de la *Physique biologique*. Cette branche de la science a été introduite récemment dans le programme des études médicales ; elle peut se définir l'étude des phénomènes physiques dont les tissus vivants sont le siège, ainsi que celle des perturbations apportées dans ces mêmes tissus par les agents physiques extérieurs, chaleur, électricité, lumière, etc.

C'est surtout aux professeurs d'Arsonval, Bergonié, Imbert, que l'on doit l'orientation nouvelle donnée à l'enseignement de la Physique tant au Collège de France que dans les Facultés de Médecine, et il y a lieu de se réjouir de la substitution de cette physique vraiment professionnelle à la physique générale, telle qu'on l'enseignait, il y a peu de temps encore, dans les Facultés de Médecine.

L'étude des actions moléculaires forme un chapitre important, aussi bien en Physique biologique qu'en Physique générale, aussi devons-nous indiquer ici l'ordre dans lequel cette étude sera faite.

Notre organisme étant composé de solides, de liquides et de gaz est nécessairement le siège d'actions moléculaires résultant des forces qui s'exercent entre les molécules soit de corps pris sous le même état, soit de corps possédant des états physiques différents.

Il y aura donc lieu d'étudier ces actions d'une part dans les solides de l'organisme, puis dans les liquides de l'éco-

nomie, et d'autre part celles qui s'exercent entre ces solides et ces liquides. Il faudra ensuite passer en revue les actions s'exerçant entre les molécules solides et gazeuses de notre corps, puis entre les liquides et les gaz, et enfin celles qui se manifestent dans les gaz eux-mêmes et en particulier dans les phénomènes respiratoires.

On admet que tous les corps, quel que soit leur état, sont composés de particules infiniment petites auxquelles les physiciens ont donné le nom de *molécules*. Ces molécules, qui ne sont pas au contact parfait, mais sont séparées par des intervalles extrêmement faibles (pores moléculaires), exercent les unes sur les autres des forces qui varient suivant une loi encore inconnue et devenant insensibles dès que les molécules considérées sont distantes d'une longueur plus grande que celle désignée sous le nom de *rayon d'activité moléculaire*. Ce rayon d'activité moléculaire est plus petit que un millionième de millimètre, mais son existence sera mise hors de doute par les phénomènes que nous allons avoir l'occasion d'étudier.

Dans les corps solides, les forces moléculaires attractives l'emportent de beaucoup sur les forces répulsives ; dans les corps liquides, la même inégalité existe entre les forces moléculaires, mais les molécules peuvent rouler les unes sur les autres et prendre la forme du récipient où est placé le liquide. Enfin, dans les gaz, les forces moléculaires répulsives sont plus grandes que les forces attractives, d'où la tendance que possède tout gaz d'occuper le plus grand volume possible.

Dans ce qui va suivre nous avons surtout insisté sur les points suivants, qui nous ont paru mériter un plus grand développement : élasticité musculaire ; adhérence des surfaces articulaires ; forces de tension superficielle dans la contraction des muscles ; osmose ; chapelets capillaires ; pression osmotique ; isotonie ; atmosphères adhérentes ; osmose des gaz.

CHAPITRE PREMIER

ACTIONS MOLÉCULAIRES DANS LES SOLIDES

Élasticité. — Les molécules qui composent un corps solide ne peuvent changer de position respective que si on dépense sur ce corps une certaine quantité d'énergie. Toutes les formes de l'énergie peuvent être employées pour produire cette modification moléculaire, énergies calorifique, électrique, mécanique ; mais l'énergie mécanique peut renseigner mieux que les autres sur les actions qui s'effectuent dans les solides et sur les variations de position des molécules.

Lorsqu'on soumet un corps solide à des actions mécaniques d'une certaine grandeur, il subit des déformations que l'on ne peut expliquer que par un rapprochement ou un éloignement des molécules matérielles dont il est formé. On doit par suite admettre que lorsque le corps est au repos, c'est-à-dire lorsqu'il n'est soumis à aucune action, ses molécules se trouvent à une certaine distance, infiniment petite évidemment, et qu'elles laissent entre elles des intervalles vides de toute matière pondérable. Ces intervalles, si petits que l'on ne peut les mettre en évidence avec les microscopes possédant les plus forts grossissements, sont appelés *pores moléculaires* ou *espaces intermoléculaires*.

Si la force que l'on fait agir sur un corps solide n'est pas trop considérable, la déformation de ce corps peut n'être que passagère et, les différentes molécules des corps qui avaient été dérangées de leurs positions primitives reprenant alors ces positions, le corps lui-même revient à sa forme et à ses dimensions premières, lorsque la force a cessé d'agir.

On donne le nom d'*élasticité* à cette propriété que possède un corps de reprendre sa position, sa forme et ses dimensions pri-

mitives lorsque la cause extérieure qui l'avait déformé a cessé d'agir.

On peut supposer, pour mieux se rendre compte des phénomènes moléculaires, qu'il existe entre les molécules d'un corps solide deux sortes de forces, se faisant équilibre lorsque les molécules sont à leur distance de repos : la première constitue la *cohésion* du corps, et est due à des forces attractives ; la seconde est formée de forces répulsives. Dans cette hypothèse, aujourd'hui admise par tous les physiciens, une force extérieure agissant sur un corps substitue à l'état primitif d'équilibre un autre état d'équilibre correspondant à une déformation du corps solide caractérisée par une diminution ou une augmentation des distances moléculaires ; ce nouvel état est dû à une variation relative des forces attractives et répulsives qui alors ne se font plus équilibre.

Appelons F_a la somme des forces attractives et F_r la somme des forces répulsives dans le nouvel état, c'est-à-dire lorsque le corps a été dérangé de sa position primitive d'équilibre : la force intérieure qui fait équilibre à la force extérieure ayant produit la déformation est égale à $F_r - F_a$ et s'appelle la *force élastique* du corps considéré. On voit ainsi que, dès que la cause extérieure cesse d'agir, la force élastique a pour effet de ramener les molécules à leurs positions respectives premières et de rétablir l'égalité $F_r = F_a$. Il résulte de cette définition de la force élastique qu'elle représente la résistance qu'oppose un corps à une force extérieure qui tend à le déformer ; c'est une force variable puisqu'elle est toujours égale, mais de sens contraire, à la force qui produit la déformation.

L'élasticité d'un corps, caractérisée précisément par la grandeur que peut prendre la différence $F_r - F_a$ entre les forces répulsives et les forces attractives moléculaires ne doit pas être confondue, comme on le fait quelquefois en physiologie, avec l'*extensibilité* qui signifie la propriété d'un corps de se laisser déformer sans se rompre ou se diviser en fragments. Ainsi la gutta-percha n'est pas élastique, mais elle est très extensible ; l'acier n'est pas extensible, ou très peu, mais il est très élastique ; enfin le caoutchouc est très extensible et élastique.

Il peut arriver que la force extérieure qui agit sur un corps possède une trop grande intensité pour que la différence $F_r - F_a$ puisse lui faire équilibre ; la force élastique du corps étant alors plus petite que la force appliquée sur lui, par suite de l'écar-

tement trop grand des molécules en certains points, il y a *rupture* du corps. On dit qu'à ce moment la limite d'élasticité a été dépassée.

Lorsqu'on étudie les lois de l'élasticité, c'est toujours en dessous de cette limite que l'on suppose les corps. Nous avons dit que le terme élastique se rapportait aux corps susceptibles de subir une déformation passagère et disparaissant dès que la cause a cessé. Certains corps conservent la déformation subie après que la force extérieure est supprimée; on dit qu'ils sont *mous*: le plomb, par exemple. D'autres corps au contraire ne peuvent subir une déformation à peine appréciable sans que la limite d'élasticité ne soit de suite dépassée; ils sont dits *cassants*: exemple, le verre.

Élasticité des corps inorganiques. — Il y a autant d'espèces d'élasticité qu'il y a de manières de déformer un corps: élasticité de traction, de compression, de flexion, de torsion, suivant le procédé qui a servi à produire la déformation.

Mais, comme dans l'organisme nous aurons à considérer surtout l'élasticité de traction, c'est aussi celle que nous allons étudier.

Les lois de l'élasticité de traction ont été établies en observant l'allongement du corps étudié: on fixe l'une des extrémités du corps, qui doit présenter sur toute sa longueur une section uniforme, entre les deux mors d'un étau solidement scellé. A la partie inférieure, on fixe un plateau dans lequel on place les poids que l'on veut faire agir sur le corps et qui est munie de vis calantes permettant de l'amener au contact du sol chaque fois que l'on veut ajouter un poids.

Une première loi qui aurait pu être prévue, c'est que *les allongements sont proportionnels aux charges*.

Si, d'autre part, on trace sur le corps des traits distants respectivement de n , $2n$, $3n$, etc., centimètres, on constate qu'après la traction ces distances sont devenues plus grandes et que la première est devenue $n + \varepsilon$; la deuxième $2n + 2\varepsilon$; la troisième $3n + 3\varepsilon$. D'où la loi: *pour une charge donnée, l'allongement est proportionnel à la longueur du corps*.

Lorsqu'on soumet à la traction des tiges d'une même substance, en prenant la même longueur du corps et le même poids tenseur, mais en faisant varier la *section*, on trouve que *les allongements sont d'autant moins grands que la section est plus petite*.

Enfin, si l'on emploie des tiges de substances différentes, on constate que *l'allongement est proportionnel à un coefficient constant pour une même substance, mais variable avec chaque corps et qui est par suite une caractéristique de chaque matière.*

Ce coefficient s'appelle *coefficient d'allongement*.

Les lois de l'élasticité peuvent s'exprimer par la formule suivante, dans laquelle α représente le coefficient d'allongement, P le poids qui exerce la traction, S la section droite du corps et l l'augmentation de longueur subie pendant la traction par le corps qui avait primitivement une longueur L. On a

$$l = \alpha \frac{P L}{S}.$$

On voit de suite que, si l'on a un corps ayant une section égale à l'unité et si l'on désigne par P la charge capable de produire un allongement égal à la longueur primitive L du corps ($l=L$), la formule devient

$$P = \frac{1}{\alpha}.$$

Le poids qui peut amener l'égalité entre l et L, et dont la valeur est égale à l'inverse du coefficient d'allongement, s'appelle *coefficient d'élasticité* du corps, qu'on peut définir de la façon suivante : c'est le poids qui *serait* capable d'allonger un corps d'une longueur égale à celle qu'il avait avant la traction ; ce coefficient n'a évidemment qu'une signification théorique et sa valeur se déduit de la formule précédente. Pour l'acier, ce coefficient est égal à 19,549 kilogrammes ; pour le cuivre écroui 12,449 kilogrammes.

Élasticité des corps organiques. — Connaissant les lois de l'élasticité de traction relative aux corps inorganiques, nous pouvons maintenant étudier l'élasticité des corps organiques qui nous intéresse davantage.

Un premier fait que l'on constate avec les corps organiques, c'est que les allongements qu'ils éprouvent sous l'influence d'une traction ne sont pas proportionnels aux charges : l'allongement d'une artère, par exemple, n'est pas 2 fois plus grand avec un poids de $2n$ grammes qu'avec un autre égal à n grammes.

En opérant sur des lames de caoutchouc de faible épaisseur, M. le P^r Imbert a pu étudier graphiquement la variation de longueur avec les charges. Les allongements croissent d'abord

plus rapidement que les charges; à partir d'une certaine longueur, la lame suit la loi des corps inorganiques, c'est-à-dire qu'à ce moment-là les allongements sont proportionnels aux charges; puis de nouveau la proportionnalité disparaît et les allongements croissent moins rapidement que les charges. Ainsi donc, au début de la traction du caoutchouc, l'allongement est plus grand que ne le voudrait la loi de proportionnalité; à la fin de la traction, au contraire, l'allongement est moindre que ne l'indique la même loi.

Il importe de chercher comment les muscles se comportent à la traction, car ce mode de déformation intervient chaque fois que du travail dynamique ou statique extérieur est effectué: la force qu'on appelle *puissance* dans un levier est représentée, dans le cas des leviers de l'organisme, par un ou plusieurs muscles sur lesquels une traction plus ou moins énergique est exercée indirectement par la force *résistance* au moyen des segments osseux.

Plusieurs méthodes ont été imaginées pour l'étude de l'élasticité musculaire. Weber suspendait le muscle hyoglosse à un crochet et fixait à la partie inférieure un plateau dans lequel on plaçait des poids croissants; les allongements du muscle étaient lus chaque fois sur une règle graduée devant laquelle se déplaçait le plateau.

Ce même physiologiste utilisa encore les oscillations du tissu sous l'influence de la torsion; on sait que, lorsqu'un corps a été tordu, il ne revient à sa position d'équilibre qu'après avoir effectué une série d'oscillations dont la durée est en raison inverse de la racine carrée de la force élastique. Il y a donc là un moyen de mesurer la force élastique par la rapidité avec laquelle un corps tordu exécute ces oscillations. Weber construisait avec des fibres musculaires une sorte de balance de torsion analogue à celle de Coulomb et comptait le nombre d'oscillations de l'aiguille.

On a utilisé aussi la méthode graphique pour enregistrer les allongements du muscle. Ainsi Wolkmann s'est servi du kymographion de Ludwig; Wittich a employé la plaque du sphygmographe de Marey. Mais il est bien préférable de se servir des myographes ordinaires, comme l'a fait Marey lui-même: une grenouille est fixée sur une plaque de liège; le tendon du gastrocnémien est attaché à un fil qui supporte le poids dont on charge le muscle et met en mouvement un levier qui trace par son extrémité sur un cylindre noirci la courbe de l'allongement du muscle. On peut, à la place de poids, employer, à l'exemple de Marey, un vase dans lequel on fait arriver lentement du mer-

cure; l'accroissement de la charge se faisant alors régulièrement et sans saccades, la courbe s'inscrit très régulièrement.

M. le P^r Bergonié, dans son étude sur l'élasticité du muscle, a imaginé un appareil dans lequel le corps à étudier est tendu d'une manière uniformément croissante par la flexion d'une lame d'acier et les flexions s'inscrivent sur le cylindre enregistreur.

Par la méthode de Donders et V. Mansvelt, applicable à l'homme, l'expérience se fait sur les fléchisseurs de l'avant-bras. Le bras est placé verticalement et maintenu immobile, l'avant-bras est fléchi à angle droit et horizontalement et l'angle qu'il fait avec le bras dans une position quelconque est indiqué au moyen d'un arc de cercle gradué dont l'épitrôchlée occupe le centre. Les charges sont suspendues au poignet. Pour apprécier la force élastique développée dans les fléchisseurs par une charge donnée, on coupe le fil qui supporte les poids et on lit l'angle dont l'avant-bras remonte à ce moment, angle qui varie avec la charge supportée. Nous verrons plus loin la méthode suivie par le P^r Chauveau et qui se rapproche beaucoup de cette dernière.

Un des premiers résultats constatés, c'est que le muscle est peu élastique, mais parfaitement élastique et en même temps très extensible; un poids faible suffit pour l'allonger beaucoup.

Wertheim a vu que, comme dans le cas du caoutchouc, il n'y avait pas pour le muscle proportionnalité entre les allongements et les charges; mais la variation, au début de la traction, est inverse de celle du caoutchouc, c'est-à-dire qu'au commencement de l'expérience, pendant les premiers poids ajoutés dans le plateau, les allongements croissent moins rapidement que les charges. Vers la fin de la traction les allongements vont en augmentant plus vite que les charges. Ces résultats ont été confirmés par Marey sur le muscle gastrocnémien de grenouille; par Weber sur le muscle hyoglosse du même animal. Ainsi, voici une des expériences de Weber :

CHARGES EN GRAMMES	LONGUEURS DU MUSCLE	ALLONGEMENTS SUCCESSIFS
0 gr 3	24 ^{mm} 9	»
1 3	30	5 ^{mm} 1
2 3	32	2 3
3 3	33 4	1 1
4 3	34 2	0 8
5 3	34 6	0 4

On voit que, pour une charge d'un gramme, l'allongement a été de 5^{mm},1; pour une charge de 2 grammes, l'allongement, qui aurait dû être de 10,2 millimètres s'il y avait proportionnalité, n'a été que de 7,4 millimètres; pour une charge de 3 grammes il y a eu 8,5 millimètres d'allongement, au lieu de 15,3 millimètres.

En sorte que la courbe que l'on obtiendrait, en prenant pour abscisses les charges et pour ordonnées les allongements, serait, non pas une droite comme pour les corps inorganiques peu extensibles, mais bien une hyperbole, dont le sommet serait à l'origine et dont la concavité serait tournée vers l'une des charges.

Wertheim a pu calculer les coefficients d'élasticité des divers tissus de l'organisme; en rapportant les résultats numériques fournis par l'expérience à l'unité de section et à l'unité de longueur, il a trouvé les coefficients suivants:

Tendons.	163,41
Nerfs.	18,89
Muscles vivants au repos.	0,95
Veines.	0,863
Artères.	0,052

La limite d'élasticité du muscle est assez vite dépassée: un gastrocnémien de grenouille chargé d'un poids de 50 grammes ne revient plus à sa longueur primitive.

Les muscles sur le vivant, en rapport par conséquent avec les vaisseaux et les nerfs de l'animal, sont plus extensibles que les muscles détachés. Les muscles tout à fait frais, en deçà de leur limite d'élasticité, présentent au début des allongements proportionnels aux poids qui les tendent (Landois).

En revanche, les muscles morts et surtout les muscles rigides possèdent une élasticité plus considérable que les muscles vivants; mais leur élasticité est moins parfaite, ils atteignent plus vite leur limite d'élasticité.

Les phénomènes d'élasticité qui se rapportent aux muscles vivants, ayant pour nous plus d'intérêt que ceux des muscles morts, c'est l'étude des premiers que nous allons faire maintenant. Voyons quelles sont les variations d'élasticité présentées par le muscle avec l'état de repos ou d'activité.

Lorsqu'un muscle est contracté, quel que soit l'excitant qui ait produit cet état d'activité (volontaire, électrique, etc.), l'élasticité qu'il présente est plus faible qu'avant. Weber est arrivé à cette

conclusion à l'aide d'une sorte de balance de **Coulomb**, construite avec des fibres musculaires, avec laquelle il vit que les oscillations de l'aiguille étaient plus rapides pour le muscle au repos que pour le muscle en contraction.

En partant de cette idée Weber fit l'expérience suivante: il chargea d'un poids considérable un muscle à l'état de repos et excita ce muscle; il constata que celui-ci s'allongeait au lieu de se raccourcir, comme doit le faire normalement un muscle excité. On a donné à cette dérogation à la règle habituelle des phénomènes musculaires le nom de *paradoxe de Weber*. Mais il y a plusieurs objections à formuler contre la conclusion de Weber. D'abord il faut, pour que l'expérience réussisse, que le muscle soit fatigué; de plus, la charge supportée doit être considérable, et il se pourrait fort bien, comme on opère sur un muscle détaché de l'animal, que ce poids modifie les conditions physiologiques de la fibre musculaire, par exemple en tirillant trop fortement les disques clairs qui, nous le savons, sont les parties élastiques du muscle, et en leur faisant dépasser pour ainsi dire leur limite d'élasticité. D'ailleurs Volkmann a combattu les conclusions de Weber et a donné de ce paradoxe l'explication suivante: la diminution de l'élasticité pendant la contraction est due non à l'activité musculaire, mais au raccourcissement; si on empêche, en effet, le muscle de se raccourcir en augmentant beaucoup le poids tenseur, le muscle ne s'allonge pas au moment où on l'excite; or c'est ce qui devrait arriver si c'était la contraction même qui fût la cause de la diminution de l'élasticité.

D'autre part, Marey en faisant inscrire, d'après la méthode que nous connaissons, les variations de la longueur d'un même muscle tendu par le même poids, à l'état de repos et à l'état de contraction, a constamment trouvé que la longueur du muscle au repos était plus grande que celle du muscle actif, ce qui infirme la conclusion de Weber. Cependant, un point qui paraît bien établi, c'est que l'*allongement* d'un muscle en contraction est plus grand, toutes choses égales d'ailleurs, que celui qu'il éprouve à l'état de repos. Ainsi la longueur totale d'un muscle supportant une charge n'est pas, comme le voulait Weber, plus grande quand ce muscle se contracte que lorsqu'il est au repos, mais son allongement seul est plus considérable dans le premier cas que dans le second.

Une modification de l'élasticité du muscle qu'il importe de signaler, c'est celle que l'on observe après une contraction; ainsi,

lorsqu'un muscle vient d'entrer en activité, son élasticité est plus grande que celle qu'il possédait auparavant. Plusieurs expériences ont démontré l'exactitude de cette proposition.

Sur l'homme, Marey a trouvé que, lorsqu'un sujet effectue deux sauts en hauteur, l'un après l'autre, en développant chaque fois l'effort maximum, il s'élève toujours plus haut la seconde fois que la première. Ce fait est bien connu des gymnastes, qui en font une application constante, sans probablement en connaître l'explication scientifique. Sur le muscle détaché du corps, la même vérification a été faite par Boudet de Paris : si on tend un gastrocnémien de grenouille par un poids de 60 grammes, on trouve qu'il s'allonge de 32 millimètres, à l'état de repos ; mais, après avoir été excité électriquement, l'allongement n'est plus que de 22,5 millimètres lorsqu'on le soumet à l'action de la même charge. Il y a donc bien eu, par le fait de la contraction, une augmentation de l'élasticité du muscle.

Les actions moléculaires dont un muscle est le siège pendant sa contraction sont évidemment différentes suivant le degré de raccourcissement du muscle, suivant que ce muscle effectue du travail mécanique extérieur ou bien qu'il est en contraction statique. En d'autres termes, la force élastique d'un muscle en activité ne peut pas être représentée, comme pour les corps inorganiques, seulement par la force extérieure qui agit sur lui, et par suite le travail mécanique, dynamique ou statique, effectué extérieurement par le muscle ne représente pas l'énergie totale mise en jeu pendant la contraction musculaire.

Au travail extérieur appréciable par les procédés ordinaires de la mécanique, et qui est équilibré dans les corps dépourvus de contractilité par la différence $F_r - F_a$ des forces moléculaires, différence qui mesure la force élastique du corps ainsi déformé, il convient ici d'ajouter une autre forme de l'énergie dont l'apparition est due à la résistance qu'opposent les molécules constituant le muscle à la déformation dont tout travail est précédé, la contraction musculaire. Cette contraction est bien, en effet, une véritable déformation des fibres ; elle met donc en jeu une certaine force élastique pour se développer, et cette force élastique, ainsi créée dans le muscle, va s'ajouter à la force élastique provenant de la force extérieure qui tend à déformer le muscle contracté. D'après cela, il apparaît dans le muscle en activité une force élastique totale, résultant de la déformation produite par la contraction et de la déformation due à la force extérieure.

M. le P^r Chauveau a donné à cette partie de la force élastique qui fait équilibre à la force extérieure le nom de *force élastique effective*, car c'est bien elle qui produit l'effet extérieur, qui constitue un des facteurs du travail mécanique, dynamique ou statique, *effectué* par le muscle; tandis qu'à l'autre partie de la force élastique totale, mise en jeu dans le muscle, il a réservé le nom de *force élastique latente*, car c'est cette portion-là qu'on ne voit pas *a priori* et qu'il faut rechercher pour la découvrir.

Mais M. Chauveau n'a pas fait que montrer l'utilité de cette distinction; il a pu mesurer la valeur respective de ces deux sortes de force élastique. La disposition expérimentale qu'il a utilisée ressemble beaucoup à celle décrite plus haut, de Donders et Van Mansveldt. Dans la méthode de M. Chauveau, l'avant-bras est placé en supination, de façon à ce qu'il n'y ait que le biceps et le brachial antérieur qui interviennent dans la flexion de l'avant-bras sur le bras; de plus, les déplacements de l'avant-bras sont d'une amplitude inférieure à 40°, l'horizontale étant la bissectrice de cet angle; dans ces conditions, on peut admettre que les deux muscles fléchisseurs exercent une action dirigée suivant la verticale. La charge étant toujours suspendue au poignet et à la même distance de l'axe de rotation de l'avant-bras, on a le droit de prendre pour mesure de la force développée par les muscles le poids auquel elle fait équilibre, puisque le rapport des bras de levier, et par suite celui des forces, reste constant.

M. Chauveau a cherché à établir la loi qui régit la variation de la force élastique totale avec le degré de raccourcissement du muscle. Pour cela, on place au poignet du sujet en expérience un poids invariable P; puis on l'invite à donner successivement à son avant-bras des directions déterminées sur l'arc gradué par l'angle fait avec l'horizontale: par exemple, l'avant-bras prendra des positions faisant avec la direction verticale du bras des angles de 90 + 20, 90 + 10, 90, 90 - 10, 90 - 20.

Dans chaque position, on prie le sujet de maintenir constante l'excitation volontaire qui a produit le raccourcissement de ses muscles. Puis, sans que le sujet s'en aperçoive, on ajoute, pour une position donnée de l'avant-bras, au poids P une surcharge *p* constante; à ce moment, les muscles fléchisseurs s'allongent sous l'influence de la surcharge et on lit sur l'axe un certain déplacement de l'index, déplacement qui peut servir à mesurer l'allongement produit. La force qui déforme les fibres musculaires est maintenant P + *p*, et nous savons que cette force mesure la force

élastique effective. Mais, au moment où p a été ajouté à P , une partie de la force élastique latente, due à la résistance des molécules des muscles, a disparu, puisque la déformation créée par la contraction a diminué. Cette portion de la force élastique latente qui a disparu se retrouve sous une autre forme : c'est elle qui actuellement fait équilibre à la surcharge p ; elle est donc devenue effective et peut se mesurer par ce poids ajouté p . Que représente en somme cette portion de la force élastique latente qui vient de devenir effective? Elle n'est autre chose que la résistance qu'oppose le muscle à une déformation de contraction égale, mais de sens inverse, à l'allongement lu sur l'axe gradué. C'est-à-dire que, pour se raccourcir de la même longueur que celle dont le muscle s'est allongé sous l'influence de p , ce même muscle doit développer en lui une force élastique précisément égale à p . En répétant la même expérience pour les diverses positions de l'avant-bras, M. Chauveau a trouvé que l'allongement produit par une surcharge constante p est indépendant du degré de contraction du muscle, lorsque la charge P reste elle-même constante.

D'où la loi : la force élastique latente créée dans un muscle pour le contracter est proportionnelle au raccourcissement du muscle. Ce qui veut dire, et l'expérience le confirme exactement, que, pour un même poids P , l'allongement subi par un muscle sous l'influence d'une surcharge $2p$ est deux fois plus grand que celui qui résulte d'une surcharge p moitié moindre que la première.

Une autre loi, non moins importante que celle-ci, a pu être établie par M. Chauveau, relativement à la variation de la force élastique totale d'un muscle avec force extérieure qui agit sur ce muscle. On invite le sujet à amener toujours l'index fixé à son avant-bras sur une même division de l'arc gradué : les muscles fléchisseurs sont alors toujours dans le même état de contraction. Dans ces conditions, on suspend au poignet successivement des poids P , $2P$, $3P$..., et chaque fois on ajoute *la même* surcharge p ; au moment où cette surcharge agit, il se produit un déplacement de l'index qui mesure l'allongement musculaire. Or, on constate que cet allongement n'est pas le même dans toutes les expériences : plus le poids primitif est fort, moins le déplacement de l'index est faible. En d'autres termes, la même surcharge produit, pour un même état de contraction ou mieux de raccourcissement du muscle, un allongement inversement proportionnel à la charge primitive supportée.

Ce qui veut dire que, pour amener le muscle à s'allonger de la même valeur lorsqu'il subit l'action d'une force extérieure double d'une autre sous un même raccourcissement, il faut ajouter à cette force une autre force double de celle qui avait produit le premier allongement.

Mais nous savons que la surcharge mesure la portion de force élastique qui de latente devient effective ; par conséquent, la force élastique latente, celle qui se développe dans le muscle afin de faire équilibre à la résistance opposée par les molécules à la déformation de contraction, est proportionnelle à la force qui agit sur ce muscle.

Pour mieux comprendre cette conclusion, supposons à l'exemple de M. le P^r Imbert un muscle qui subit un raccourcissement de 17 millimètres pendant que sur lui agit une force de 1 kilogramme. Soit π le poids nécessaire pour allonger ce muscle de 1 millimètre. D'après ce que nous avons dit, la force élastique effective du muscle est égale à 1 kilogramme et sa force élastique latente à $\pi \times 17$. Par conséquent la force élastique *totale* a pour valeur $1^{\text{kg}} + \pi \times 17$.

Si maintenant le muscle, toujours raccourci de 17 millimètres, supporte 2 kilogrammes, sa force élastique effective sera 2 kilogrammes, et sa force élastique latente aura pour valeur $2 \times \pi \times 17$. Dans ce cas, la force élastique totale sera donc $2^{\text{kg}} + 2 \times \pi \times 17$, c'est-à-dire exactement le double de celle de l'expérience précédente.

On voit, par ce rapide exposé, combien l'étude de l'élasticité du muscle est plus complexe que celle d'une tige d'acier par exemple, et que la *Physique biologique* présente non moins de difficultés que la *Physique générale* dont elle se distingue nettement.

Élasticité des muscles courbes. — Les actions moléculaires qui engendrent les phénomènes d'élasticité doivent encore être étudiées à propos des muscles qui n'effectuent plus dans l'organisme de travail mécanique externe, tel que le soulèvement d'un poids ou le soutien d'une charge à une hauteur fixe : tels sont les sphincters et les muscles à surfaces courbes.

La force élastique totale qui se développe dans cette catégorie de muscles se présente d'une part sous la forme latente, en donnant à ce terme la signification que nous avons établie plus haut, et d'autre part sous la forme effective ; mais celle-ci ne peut plus

se mesurer par un poids soulevé. Il faudrait alors avoir recours à des manomètres, et il serait intéressant de faire de ces muscles une étude aussi complète que celle des autres muscles agissant sur des leviers osseux.

Quoi qu'il en soit, examinons comment on peut se rendre compte des actions élastiques des muscles de cette catégorie.

Considérons un muscle à surface courbe, tel que l'utérus par exemple, et supposons une section faite dans une région quelconque de la convexité du muscle, de manière à détacher une calotte musculaire : sur chaque unité de la longueur du pourtour de la section, les fibres musculaires peuvent exercer dans les conditions ordinaires une traction dont la direction est tangente à la surface musculaire ; désignons par φ la force spécifique de ce muscle, c'est-à-dire la force maxima que la fibre puisse exercer par millimètre. Toutes ces forces, qui peuvent être dans une certaine mesure rapprochées des forces de tension superficielle, donnent naissance à une composante normale à la surface musculaire et passant par le pôle de la calotte considérée.

Comme dans le cas de la surface d'un liquide, la composante normale peut s'exprimer en fonction des rayons des courbures principales et de la force spécifique. Soit r et r' les rayons des méridiens principaux de la calotte : dans ces deux méridiens, qui sont rectangulaires, la courbure est maxima et minima ; la composante normale a pour expression

$$N = \varphi \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right).$$

En chaque point d'un muscle courbe, on voit ainsi que la force élastique effective est inversement proportionnelle aux rayons des courbures principales.

Dans le cas où la surface du muscle, au lieu d'être quelconque, est sphérique, les rayons r et r' sont égaux et la formule devient

$$N = \varphi \times \frac{2}{r}.$$

L'énergie des contractions d'un muscle à surface courbe est donc d'autant plus grande, que le rayon de courbure est plus petit ; ce résultat permet d'expliquer pourquoi un muscle courbe dont la courbure diminue dans tous les méridiens ne peut pas se contracter aussi énergiquement qu'avant l'augmentation des rayons de courbure. C'est ainsi, par exemple, que les contractions

de l'utérus sont d'autant plus faibles que l'utérus est plus volumineux ; que la force de propulsion du sang dans les artères par le cou est d'autant plus petite que le cœur est plus dilaté, d'où la nécessité de l'hypertrophie cardiaque qui s'oppose à l'affaiblissement trop grand de cette force en augmentant la force spécifique φ par un accroissement des fibres musculaires.

Ces considérations doivent assurément intervenir, d'après M. le Pr Bergonié, dans l'explication des troubles mécaniques liés à la dilatation stomacale : l'estomac dilaté a en effet des composantes normales (dont l'action est employée à la trituration des aliments) plus petites que celles de l'estomac sain.

Dans le cas des muscles sphincters, la force élastique est en chacun des points d'une fibre dirigée suivant la tangente à cette fibre. Si on prend deux points voisins sur un des anneaux constituant le sphincter, les forces appliquées en ces deux points peuvent être remplacées par une autre force, normale à la fibre et dirigée, si le sphincter est circulaire, suivant un des rayons du cercle. C'est par toutes les composantes normales qui existent en chaque point de l'anneau sphinctérien que l'action de cette catégorie de muscles se produit.

Ces composantes normales permettent aussi de comprendre quelle doit être la direction des fibres antagonistes des sphincters : celles-ci doivent être disposées en rayonnant autour du centre de l'anneau et être par conséquent perpendiculaires aux fibres annulaires.

Si on désigne par φ la force spécifique d'une fibre sphinctérienne et par r le rayon de courbure du sphincter, la valeur de la composante normale a pour expression

$$N = \frac{\varphi}{r}.$$

D'où il résulte que l'énergie de contraction d'un sphincter est d'autant plus grande que la courbure est plus grande ou que son *rayon de courbure est plus petit*.

Élasticité des membranes. — Ce sont les mêmes considérations qu'il faut invoquer pour comprendre les phénomènes élastiques développés dans l'organisme par les membranes courbes. Notre organisme possède en effet de telles membranes renfermant soit des gaz, soit des liquides, qui mettent en jeu une certaine force élastique de la part de ces membranes.

L'élasticité des parois donne naissance en chaque point à une force qui est normale à la paroi, qui est toujours dirigée vers l'intérieur de la cavité et qui est égale à la pression exercée par le fluide intérieur. La valeur de cette composante normale est donnée par l'expression suivante, dans laquelle φ est la tension élastique spécifique de la membrane, r et r' les rayons des 2 méridiens principaux

$$N = \varphi \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$$

ou, si la membrane est sphérique, ce qui est le cas du globe oculaire,

$$N = \frac{2\varphi}{r}.$$

La tension élastique des parois membraneuses de l'œil fait équilibre à la pression hydrostatique des liquides intra-oculaires, et sa valeur est souvent recherchée comme élément de diagnostic et de pronostic. C'est pour l'évaluer qu'on a imaginé des appareils appelés *ophthalmotonomètres*, dont la description n'entre pas dans le cadre de ce travail. Disons seulement que, pour apprécier exactement la tension élastique de la sclérotique, il faut éviter de produire une cavité à la surface du globe oculaire, car il naît alors une composante normale dirigée vers l'extérieur et qui vient s'ajouter à la pression intra-oculaire que l'on trouve alors posséder une valeur trop grande (A. Imbert. Théorie des ophthalmotonomètres. *Annales d'oculistique*, 1887).

Il peut être intéressant, dans certains phénomènes de l'organisme, de connaître quel est le rôle qui revient à l'élasticité d'une enveloppe dans la transmission des pressions. Supposons le cas, par exemple, où l'on exerce une pression sur l'abdomen pour favoriser l'émission de l'urine chez certains malades ; chacun sait qu'il faut développer un effort considérable pour obtenir le résultat désiré. Voyons par quel mécanisme se fait la transmission de la pression exercée sur l'abdomen.

Appelons P la pression du milieu qui entoure une enveloppe élastique contenant un liquide sous la pression h . A la pression extérieure P vient s'ajouter la composante normale N , due à l'élasticité de l'enveloppe, et s'il y a équilibre on doit avoir évidemment

$$P + N = h \quad (1).$$

Si la membrane est assez extensible pour qu'une augmentation

p' de la pression extérieure produise une diminution sensible du volume limité par la membrane, la pression intérieure augmentera et le nouvel état d'équilibre sera exprimé par la relation

$$P + p' + N' = h + h' \quad (2).$$

La composante normale N' est différente de N , car la force élastique spécifique φ de la membrane s'est modifiée sous l'influence de la pression.

Il est aisé de tirer, en retranchant (1) de (2),

$$h' = p' + N' - N.$$

h' pourra être plus petit, égal ou plus grand que P , suivant la valeur de $N' - N$.

Supposons que la membrane soit peu extensible, le volume de l'enveloppe élastique sera peu modifié, à cause de la résistance opposée par la membrane. On pourra donner à p' une valeur très grande sans faire varier la pression h ; il n'y aura que la composante normale qui sera diminuée: tant que la pression intérieure l'emportera sur la pression extérieure, ce sera le seul phénomène observé. Si l'on peut alors communiquer à la pression extérieure une valeur supérieure à la pression intérieure, l'élasticité de la membrane n'intervient plus et une augmentation p' de P se traduira par une augmentation égale de h . Par conséquent, dans ce cas, il n'y a que l'excès de la pression extérieure sur la pression intérieure qui se transmette au fluide contenu dans l'enveloppe.

On comprend ainsi l'énorme pression qu'il est nécessaire d'appliquer sur l'abdomen pour provoquer l'issue de l'urine de la vessie: c'est seulement lorsque cette pression est supérieure à celle exercée par le liquide sur les parois élastiques de la vessie qu'il y a une augmentation de la pression intérieure, et c'est alors la différence entre les deux pressions qui agit sur le liquide pour en favoriser l'expulsion. On conçoit que l'effort mécanique exercé par le médecin doive acquérir une grande valeur, et c'est encore par les actions moléculaires que ce mécanisme peut être expliqué.

M. le P^r Imbert, à qui est due cette théorie de la transmission des pressions par l'intermédiaire des membranes élastiques, a pu interpréter les graphiques obtenus par M. Poulet (de Lyon) dans des études sur l'effort d'expulsion du fœtus pendant les accouchements, et déterminer la part qui revient dans cet acte aux couches superposées des muscles de l'utérus et de l'abdomen.

PHÉNOMÈNES D'ADHÉSION

Les molécules qui composent un corps exercent les unes sur les autres des forces attractives et répulsives, ainsi que nous le savons déjà, jusqu'à une distance égale au rayon d'activité moléculaire. Dans les solides, les forces attractives l'emportent beaucoup sur les forces répulsives; c'est ce qui communique aux corps de cet état leur grande cohésion ou résistance à la rupture. Dans les liquides cette cohésion n'est pas aussi grande que dans les solides, mais elle existe également et est d'autant plus développée, que le liquide est plus visqueux, qu'il se rapproche davantage de l'état solide.

Le rayon d'activité moléculaire est infiniment petit, mais on peut cependant mettre en évidence les forces attractives dans les solides. Si on coupe en deux parties une balle de plomb, de façon à ce que la section soit bien nette, et qu'on replace ensuite les deux faces ainsi obtenues l'une contre l'autre, il se produit une adhérence tellement grande, que l'on peut exercer sur chacune des moitiés une traction égale à plusieurs kilogrammes. Cette adhérence est due aux forces exercées par les molécules de l'une des sections sur les molécules de l'autre, à peu près de la même façon que si ces molécules étaient situées dans le même corps.

Si l'on prend, au lieu de deux hémisphères de plomb, deux disques en verre bien rodé maintenus dans un châssis en bois, disques qui portent le nom de plans de Magdebourg, le même phénomène moléculaire se produit : si l'un des plans est fixé à un support, on peut suspendre à l'autre des poids assez forts.

Mais le phénomène devient beaucoup plus marqué lorsqu'on interpose entre les plans quelques gouttes de liquide, surtout de liquide visqueux, tel que de la glycérine; du sirop, de la synovie, etc.

Lorsqu'on exerce une traction sur les disques ainsi accollés, on éprouve une résistance très notable, allant de 15 à 20 kilogrammes avec des disques de 5 centimètres de diamètre. Il se produit là deux phénomènes moléculaires : un premier phénomène d'adhésion des molécules liquides pour le solide et un phénomène de cohésion qui s'oppose à l'écartement des molécules liquides les unes des autres.

Pour évaluer la force nécessaire à amener la séparation de deux disques séparés par une couche liquide extrêmement mince,

j'ai opéré de la façon suivante : le disque inférieur est fixé solidement à un obstacle résistant, pendant que le disque supérieur est suspendu au crochet d'un dynamomètre à ressort gradué en kilogrammes; ce dynamomètre est attaché à l'extrémité d'un levier du premier genre, à l'aide duquel on peut exercer un effort *lent et régulièrement progressif*. L'index du dynamomètre indique à chaque instant la force développée. Si l'on vient, dans ces conditions, à agir sur la grande branche du levier, pendant qu'un aide a soin de maintenir les disques de chaque côté pour empêcher leur glissement, il arrive un moment où la séparation des disques se produit; il suffit de lire le dynamomètre pour connaître l'effort développé.

Avec des plans de Magdebourg ayant 72 millimètres de diamètre, l'effort nécessité pour vaincre les actions moléculaires ayant lieu entre les deux surfaces planes a varié de 17 500 à 18 000 grammes. Il ne faut pas confondre ces phénomènes avec ceux qui ont été étudiés par Gay-Lussac et Simon, de Metz, qui opéraient, soit avec un seul disque en contact avec une surface liquide, soit avec deux disques séparés par une couche liquide, épaisse de plusieurs millimètres : ici la tension superficielle du liquide joue le principal rôle, tandis qu'elle est tout à fait à négliger dans nos expériences d'adhésion.

D'ailleurs, il est facile de montrer que la tension superficielle n'est pas la cause de l'adhérence des disques : si on place une ou deux gouttes d'huile d'olive entre les disques et qu'on étende bien cette huile en exerçant une pression assez forte en faisant glisser les disques l'un sur l'autre, on trouve que, pour séparer les deux plans, il faut un effort de 13 500 grammes. En faisant la même expérience avec de l'eau dont la tension superficielle est 7,5 milligrammes, la séparation a lieu pour un effort égal à tout au plus 2 000 grammes. Or, la tension superficielle de l'huile est de 3,5 milligrammes; mais sa viscosité est beaucoup plus grande que celle de l'eau. Ce sont bien les forces moléculaires de cohésion du liquide interposé qui interviennent dans l'adhérence des disques. Voici les résultats de plusieurs expériences faites avec des corps de plus en plus visqueux :

Huile d'olives.	13,500 grammes.
Sirop de sucre (D = 1,3).. . .	14,000 —
Glycérine.. . . .	17,500 —
Glucose en pâte.. . . .	24,000 —
Suif.	25,500 —

A mesure que la viscosité augmente, ou, ce qui est la même chose, à mesure que la mobilité des molécules diminue, on voit que l'effort à développer pour amener la séparation des disques va en augmentant.

La nature du solide qui constitue les disques n'intervient pas dans le phénomène ; que les disques soient en verre, en bois, en cuivre, l'effort à développer est, toutes choses égales d'ailleurs, le même.

Voyons maintenant comment varient les forces moléculaires entre les disques avec la *surface* : avec des disques dont les surfaces étaient entre elles comme 1, $3/2$ et 3, les nombres trouvés ont été 6 000, 9 000 et 1 800 grammes ; il résulte de là que les forces qui maintiennent les disques accolés sont proportionnelles à la surface de ces disques.

Lorsque les surfaces en contact, au lieu d'être planes, sont courbes, les forces que nous venons de mettre en évidence existent encore, et des expériences ont été faites dans le but de déterminer l'effort nécessaire pour séparer deux surfaces sphériques accolées suivant un grand cercle. Si l'on prend deux demi-sphères, l'une creuse, l'autre pleine, de même rayon, on trouve qu'en plaçant par exemple une ou deux gouttes de glycérine entre leurs surfaces, l'effort développé pour les séparer est exactement le même que pour deux disques *plans* de même diamètre. Voici quelques nombres :

	GLYCÉRINE	GLUCOSE
	—	—
Surfaces sphériques de 50 ^{mm} de diam.	8,750 gr	11,000 à 12,000 gr
Surfaces planes	— — 9,000 »	12,000 gr

Ce résultat expérimental est facile à vérifier par le calcul, ainsi que je l'ai démontré.

Adhérence des surfaces articulaires. — Ces données physiques n'auraient pas grand intérêt, si elles n'avaient pas une application immédiate dans l'organisme : nous allons montrer que ces phénomènes d'adhésion et de cohésion interviennent pour maintenir les têtes osseuses dans leurs cavités articulaires.

Entre les surfaces polies qui forment nos articulations, il existe en effet un liquide très visqueux, la synovie, sous une couche très mince, analogue à la couche liquide que nous inter-

positions dans nos expériences entre les surfaces planes ou sphériques. Les mêmes phénomènes moléculaires doivent donc se retrouver dans les deux cas. Grâce à la dernière loi que nous avons énoncée pour connaître la force d'adhésion de deux surfaces sphériques, il suffira de déterminer l'effort de séparation de deux surfaces planes *de même diamètre*, entre lesquelles on aura disposé un peu du liquide considéré. Dans le cas de la synovie, en particulier, on saura immédiatement quelle est la force avec laquelle deux surfaces articulaires de forme sphérique sont maintenues au contact, en déterminant cette force pour deux plans de même diamètre accolés avec de la synovie. Par exemple, dans le cas de l'articulation coxo-fémorale, que l'on peut regarder comme sphérique et dont le diamètre moyen est égal à 50 millimètres, les forces qui maintiennent les deux surfaces rapprochées l'une de l'autre seront déterminées en mesurant l'effort à développer pour séparer 2 disques plans de 50 millimètres de diamètre. Cet effort, avec de la synovie prise sur un cadavre 28 heures après la mort, a été trouvé égal à 1 000 grammes ; il est très probable que, si l'on faisait l'expérience avec de la synovie fraîche, on obtiendrait un nombre plus élevé.

Quoi qu'il en soit, le mécanisme du maintien des têtes osseuses articulaires trouve une explication logique dans les actions moléculaires que nous venons d'exposer. Qu'il s'agisse de telle ou telle articulation, de l'articulation scapulo-humérale, moindre d'une demi-sphère, ou de l'articulation coxo-fémorale, légèrement plus grande qu'une demi-sphère, partout les phénomènes moléculaires ci-dessus exposés ne peuvent pas ne pas exister. Par suite, point n'est besoin de faire intervenir la pression atmosphérique pour expliquer des phénomènes aussi simples. On sait en effet que, depuis les expériences des frères Weber sur l'articulation coxo-fémorale, les anatomistes et les physiologistes ont répété à l'unisson que c'était le vide semblable à celui de la machine pneumatique qui maintenait accolées nos surfaces articulaires !

D'abord le vide ne peut pas exister dans un point de notre organisme ; dès qu'il tendrait à se produire, il serait aussitôt comblé soit par les gaz dissous dans les liquides de l'économie, sang, synovie, lymphe, etc. Il y a donc là une impossibilité physique et physiologique. D'autre part, comment admettre la théorie de la pression atmosphérique pour les articulations qui, comme celle de l'épaule, sont inférieures à une demi-sphère et où l'on ne pourrait jamais, malgré le plus grand soin, faire le

moindre vide en se servant de la tête de l'humérus comme piston et de la cavité glénoïde comme corps de pompe ! Il n'y a d'ailleurs pas de raison pour que le mécanisme du maintien des têtes articulaires soit différent à l'épaule et à la hanche ; bien plus, si l'une des articulations devait être plus solidement fixée que l'autre, ce devrait être la première, qui supporte constamment le poids du bras, tandis que la jambe repose souvent sur le sol et n'agit pas pendant ce temps-là sur l'articulation coxo-fémorale.

Il ne nous paraît donc pas douteux que les actions moléculaires grâce auxquelles nous avons trouvé, dans les expériences relatives à l'interposition de synovie, des forces considérables, soient bien la cause du maintien des têtes osseuses dans leurs cavités articulaires et non pas la pression atmosphérique, comme on l'a écrit pendant longtemps.

Ces actions moléculaires d'adhésion se retrouvent d'ailleurs dans une infinité de phénomènes de l'organisme. C'est ainsi, par exemple, que se fait l'occlusion des paupières pendant le sommeil : le muscle orbiculaire des paupières étant complètement relâché, les bords des paupières s'adaptent exactement l'un contre l'autre suivant une surface polie, assez rigide, grâce au cartilage tarse, et sur laquelle se dépose l'enduit d'une assez grande viscosité sécrétée par les glandes de Meibomius. La cohésion de la mince couche interposée maintient l'accolement des deux paupières en économisant le travail interne du muscle orbiculaire. Le même phénomène pourrait être encore invoqué pour expliquer l'occlusion de la bouche, sans la participation de l'orbiculaire des lèvres, des masséters, des ptérygoïdiens, etc. ; mais ces phénomènes sont trop simples à comprendre maintenant pour que nous insistions.

CHAPITRE II

ACTIONS MOLÉCULAIRES DANS LES LIQUIDES

Tension superficielle. — Lorsque l'on considère deux molécules liquides situées, l'une à une distance de la surface libre du liquide plus petite que le rayon d'activité moléculaire, l'autre à une distance plus grande de cette même surface libre, on conçoit qu'il y aura dissymétrie d'action pour la première, tandis que pour la seconde tout sera symétrique autour d'elle. La dissymétrie moléculaire sera maxima lorsque la molécule considérée sera située dans le plan horizontal formant la surface libre du liquide. Dans la couche superficielle d'un liquide il existe, jusqu'à une profondeur égale au rayon d'activité moléculaire, des forces tangentes ou parallèles à la surface libre et provenant précisément de la dissymétrie signalée.

De cette brève analyse il résulte que chaque molécule placée dans la couche superficielle liquide est soumise à une certaine force, qui s'appelle *la tension superficielle* du liquide. On se représente bien cet élément dû aux actions moléculaires, en assimilant la couche superficielle d'un liquide à une membrane élastique très mince, toujours tendue, qui se laisserait facilement déformer et serait capable de se reformer dès qu'elle a été rompue.

Mais la tension superficielle mérite une définition plus précise que celle qui précède : c'est une certaine force qui correspond à une certaine longueur. Arrivons à la définition exacte, en nous servant de la comparaison du P^r Duclaux. Soit la surface d'un liquide qu'on suppose divisée en deux parties 1 et 2 par une ligne médiane ; admettons que l'on supprime la tension superficielle dans la partie 2 : il est clair que, pour maintenir dans sa position primitive la ligne médiane, il faudra appliquer à *chaque millimètre* de cette ligne médiane une certaine force dirigée vers

la partie 2 dans laquelle on a supposé la tension supprimée. C'est cette certaine force, variable suivant les liquides, qu'il faudrait ainsi appliquer à chaque millimètre, qui est exactement la tension superficielle du liquide. Nous donnerons à cette force-là le nom de *tension superficielle spécifique*, pour la distinguer du terme vague de tension superficielle qui se rapporte au phénomène lui-même. Pour l'eau, la tension superficielle spécifique est égale à 7,5 milligrammes.

Si les actions moléculaires qui constituent la tension superficielle d'un liquide s'exercent sur une longueur l évaluée en millimètres, et si f représente la somme des forces ainsi mises en jeu, il est évident que la tension superficielle spécifique φ du liquide est donnée par la formule.

$$\varphi = \frac{f}{l}.$$

Nous indiquerons tout à l'heure un des procédés servant à mesurer expérimentalement φ .

L'existence de la tension superficielle peut être démontrée par un grand nombre d'expériences que nous n'avons pas à reproduire ici ; cependant rappelons-en deux pour la clarté de l'exposition.

Plongeons dans du liquide sapo-glycérique de Plateau un anneau métallique d'environ 8 centimètres de diamètre : nous le retirons avec une mince lame liquide ; projetons alors sur cette nappe un fil fin mouillé au préalable avec le même liquide et dont les deux bouts ont été noués ; ce fil prend une forme quelconque sur la nappe qui le supporte. Crevons la lame en un point quelconque pris à l'intérieur du contour fermé par le fil, et nous voyons aussitôt le fil prendre la forme parfaitement circulaire et se tendre excentriquement,

Cette forme et cette tension résultent de la tension superficielle du liquide sapo-glycérique, qui s'exerce tout autour de la circonférence du fil (Van der Mensbrughe).

Dans ce même liquide sapo-glycérique (très commode pour ces expériences) plongeons un entonnoir en verre : en le retirant, nous apercevons une lame liquide ; celle-ci, au lieu de rester dans sa position initiale, remonte vers la partie la moins large de l'entonnoir. Ce mouvement que prend ainsi la nappe liquide, quelle que soit l'orientation donnée à l'entonnoir, est dû à une des deux composantes en lesquelles la tension superficielle de la lame

liquide peut se décomposer; la composante dirigée le long de la paroi de verre entraîne la lame liquide vers le sommet du cône constituant l'entonnoir.

Une autre expérience que nous devons mentionner ici, parce qu'elle nous permettra de comprendre facilement un phénomène de l'organisme, est celle de Plateau: elle consiste à introduire au sein d'un mélange d'eau et d'alcool de même densité qu'elle, une goutte d'huile. Dans ces conditions, la goutte d'huile prend la forme sphérique, se maintient dans le liquide et reprend sa forme primitive si on vient à la déformer. C'est grâce à l'existence de la tension superficielle que l'huile prend la forme sphérique: tout autour d'elle, en effet, et excentriquement, sont appliquées des forces perpendiculaires en chaque point à la surface de l'huile, forces représentant la tension superficielle de la surface de séparation de l'huile et du liquide hydro-alcoolique. Toutes ces forces étant égales en chaque point, on comprend facilement que c'est la forme sphérique que doit prendre l'huile immergée.

Pour mesurer la tension superficielle spécifique des liquides, on peut employer la méthode directe suivante, qui utilise la formule indiquée plus haut. On prend un petit tube de verre de 1 millimètre de diamètre, que l'on maintient rapproché d'un fil de coton tendu horizontalement, et dont on prévient la chute à l'aide de deux petits anneaux à chaque extrémité. Un fil fixé au tube de verre contient un plateau léger. On passe un pinceau chargé du liquide examiné entre le fil de coton et le tube de verre, de façon à produire une lame liquide entre ces deux corps, puis on place dans le plateau des poids croissants jusqu'à ce que la chute ait lieu, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'effet de la tension superficielle soit vaincu. Si on appelle l la longueur de la couche liquide interposée, l'effet de la tension superficielle s'exerce non pas sur la longueur l , mais bien sur une longueur double $2l$, puisqu'il y a 2 faces à considérer à la couche liquide; soit p le poids qui a produit la chute de l'équipage, on a évidemment

$$p = \varphi \times 2l$$

d'où

$$\varphi = \frac{p}{2l}$$

Tout étant connu dans cette égalité, la valeur de φ est immédiatement trouvée. La tension φ est: pour le mercure, de 47 milligrammes; pour l'eau, 7,5 milligrammes; pour la glycérine, 7,25:

pour l'huile, 3,5 ; pour l'alcool absolu, 2,5 : pour l'éther, 1,8 milligrammes.

Il n'y a pas qu'à la surface libre d'un liquide que la dissymétrie dont nous avons parlé se fait sentir dans les forces moléculaires auxquelles chaque molécule est soumise.

Il y a lieu d'en tenir compte aussi à la surface de séparation de deux liquides non miscibles superposés. Il est facile de comprendre que, si un liquide est placé au-dessus d'un autre, la tension superficielle de cet autre sera diminuée par suite de l'existence de molécules sus-jacentes. Lorsque le liquide superposé possède la même tension superficielle que le liquide placé en dessous, la tension de la couche superficielle du liquide inférieur, tension par conséquent de la surface de séparation des liquides, est nulle, car la surface du liquide inférieur est, au point de vue des actions moléculaires, dans les mêmes conditions qu'une couche quelconque prise dans ce même liquide, où nous savons que tout est symétrique autour de chaque molécule.

Si la tension superficielle du liquide recouvert subit une diminution, il en est également de même pour celle du liquide supérieur. Il résulte de là que la somme des tensions superficielles spécifiques des deux liquides au niveau de leur surface de contact est

$$\Phi = \varphi + \varphi' - f.$$

Supposons maintenant le cas où il n'y a qu'une petite quantité de liquide, une goutte par exemple, superposée au premier : considérons une section faite perpendiculairement au liquide B,

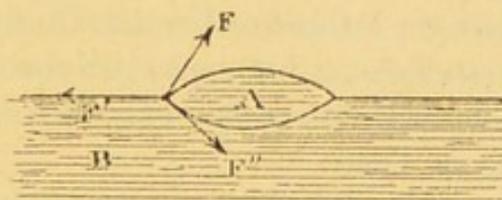


FIG. 1.

suivant un diamètre de la goutte A. En tout point du pourtour de la goutte A s'exercent trois forces F, F', F'' qui sont respectivement les tensions superficielles des deux liquides A et B et la tension des deux liquides sur leur surface de séparation.

La goutte A sera en équilibre lorsque ces trois forces s'équilibreront, ou, en d'autres termes, lorsque l'une quelconque d'entre elles sera égale et directement opposée à la résultante des deux autres.

Ces trois forces sont tangentes, la première F à la surface libre du liquide A ; la seconde F' à la surface libre du liquide B ; la troisième F'' à la surface de contact des deux liquides.

Si l'une des trois forces, F' par exemple, est plus grande que la résultante des deux autres F et F'' , la goutte s'étale sous l'influence de la traction de la force F' ; c'est ce que l'on constate dans le cas d'une goutte d'huile déposée à la surface de l'eau. Ici la tension spécifique de l'eau est 7,5 milligrammes, celle de l'huile 3,5 milligrammes et celle de la surface de séparation des deux liquides 2,09 milligrammes. On comprend ainsi pourquoi l'huile et les corps ayant la même tension superficielle spécifique s'étalent à la surface de l'eau, phénomène mis à profit par les marins pour empêcher les vagues de se produire.

Lorsqu'on dépose avec soin une petite goutte d'une huile à la surface de l'eau, celle-là prend une certaine forme qui varie avec la nature de l'huile et qu'on appelle *figure de cohésion*. Ces figures, étudiées surtout par Chatain (de Lyon), peuvent être mises à profit pour reconnaître la pureté d'une huile,

Enfin, on sait que des parcelles de camphre projetées sur l'eau se mettent à tourner chacune pour leur propre compte sur cette eau, lorsque le vase et l'eau n'ont aucune trace de corps gras. Ce mouvement giratoire est bien simple à comprendre : le camphre se dissout dans l'eau (1^{gr},50 par litre) (1) ; or, l'eau camphrée ayant une tension superficielle plus faible que l'eau pure, il en résulte que la force F' a des valeurs inégales et variables à chaque instant tout autour de la parcelle de camphre considérée ; c'est la variation de la force F' qui est par conséquent la cause de la giration. Mais, vient-on à toucher l'eau à l'aide d'un corps gras, celui-ci s'étale à la surface, si bien que la tension superficielle du liquide devient alors celle du corps gras qui se substitue à la couche superficielle de l'eau.

Cette tension spécifique beaucoup plus faible du corps gras est impuissante à déplacer chaque parcelle, et, en outre, la solubilité du camphre est en même temps modifiée.

Théorie du P^r Imbert relative à la contraction musculaire.

— Les actions moléculaires qui donnent naissance aux forces de ten-

(1) H. BORDIER. *Société des Sciences phys. et naturelles de Bordeaux*, 1889.

sion superficielle se retrouvent dans l'organisme, où elles donnent lieu à des phénomènes biologiques de la plus haute importance. Nous étudierons plus loin les cas où des manifestations électriques accompagnent des variations produites dans la tension superficielle, et nous verrons alors comment on peut expliquer la variation négative du muscle et du nerf, comment on peut comprendre la valeur de la vitesse de propagation de cette variation électrique, comment aussi on peut concevoir la production d'énergie électrique chez certains poissons. Tous ces phénomènes sont des conséquences de l'existence de la tension superficielle. Mais, pour l'instant, bornons-nous à introduire ces forces moléculaires, d'où dérive la tension superficielle, dans l'explication de la contraction musculaire. Cette idée est due à M. le P^r d'Arsonval, et M. le P^r Imbert, dans un travail récent (1), a donné une nouvelle théorie de la contraction musculaire que nous allons rapporter ici. Grâce à l'introduction des forces de tension superficielle, nous allons pouvoir pénétrer plus avant dans le mécanisme de la contraction, montrer comment paraît s'opérer la création de la force élastique du muscle au moment où il se contracte, force élastique étudiée plus haut, et enfin prévoir les lois qui régissent les variations du rendement du moteur animé.

Il faut étudier séparément, à cause de leur différence de structure, les muscles lisses et les muscles striés.

Muscles lisses. — On sait que les fibres lisses sont des cellules nues, sans enveloppe, sans rien d'analogue au myolemme des fibres striées; elles sont bien striées, mais longitudinalement et elles renferment des fibrilles contractiles placées côte à côte dans le protoplasma, dans la direction de l'axe de la cellule; ces fibrilles sont situées à la périphérie et forment une écorce contractile à la fibre lisse.

Par suite de la consistance semi-fluide de leur substance et de l'existence du protoplasma qui les entoure, ces fibrilles sont assimilables à des gouttes d'huile placées au sein d'un liquide hydro-alcoolique de même densité. La forme de l'équilibre de chacune des fibrilles est donc la sphère, quelle que soit la valeur de la tension spécifique du liquide ambiant.

L'excitation transmise à la fibre lisse par son nerf doit être

(1) IMBERT. *Archives de Physiologie*, 1897, p. 290.

regardée comme ayant pour effet de faire varier la valeur absolue de la tension superficielle autour de chaque fibrille, l'influx nerveux se comportant, à ce point de vue, comme le courant électrique, et pouvant amener une modification de la tension superficielle.

Remarquons de plus que, les fibrilles lisses ne possédant qu'une seule forme d'équilibre-limite, la sphère, les muscles lisses ne pourront effectuer par eux-mêmes aucun travail mécanique extérieur ; car il faudrait pour cela que ses éléments se déforment sous l'action d'une force qui leur serait propre.

Il faut donc de toute nécessité qu'une force extérieure aux fibres lisses agisse d'abord et produise une déformation préalable des fibrilles ; lorsqu'ensuite les fibrilles tendront à devenir sphériques, il y aura contraction du muscle, et par suite effet utile produit. Ainsi donc, le mécanisme de la contraction des muscles lisses serait le suivant, d'après l'ingénieuse explication de M. Imbert :

1° Action d'une force extérieure destinée à produire une déformation plus ou moins considérable des fibrilles.

2° Intervention de l'influx nerveux dont l'effet est d'augmenter la tension superficielle, qui peut alors faire prendre aux fibrilles une forme se rapprochant de la sphère et amenant celles-ci à vaincre la force extérieure qui agit sur elles.

Cette manière de comprendre le mécanisme de la contraction des muscles lisses est d'accord avec les données de l'anatomie qui montre que les fibres sont toujours disposées de manière à pouvoir être soumises à la déformation préalable dont il vient d'être question et sans laquelle il ne pourrait y avoir aucun effet utile produit.

Où sont en effet les muscles lisses ? Dans les parois des cavités, intestin, vessie, matrice, dont le contenu exerce sur les fibrilles la déformation préalable nécessaire à leur contraction ultérieure. On les rencontre aussi disposés en deux groupes antagonistes qui, en se contractant isolément, se déforment mutuellement, muscle ciliaire, etc.

Muscles striés. — Nous ne retrouvons pas dans les fibrilles des muscles striés l'homogénéité des fibrilles lisses. Rappelons que chaque fibrille striée est formée par la succession de disques ayant une composition différente les uns des autres. Les uns sont sombres, les autres clairs ; les disques sombres sont très réfringents et bi-réfringents ; ils sont donc anisotropes. Les disques clairs sont au contraire peu réfringents, mono-réfringents et isotropes.

La succession de ces disques est la suivante : entre deux

disques sombres minces, on trouve un demi-disque clair, un disque sombre épais et un demi-disque clair.

Il y aurait bien à indiquer la strie intermédiaire de Hensen dans le disque sombre épais, mais nous n'avons pas besoin d'une structure plus détaillée pour l'étude que nous faisons en ce moment.

Supposons la surface de séparation $m n$ de deux disques qui se touchent, par exemple d'un disque épais et d'un demi-disque clair. En chaque point de la courbe de raccordement de ces deux disques, il y a à considérer les trois forces F , F' , F'' qui représentent : 1^o la tension à la surface de l'un des disques ; 2^o la tension à la surface de l'autre disque ; 3^o la tension à la surface de séparation des deux disques, comme dans le cas de la goutte A sur le liquide B. On doit donner à la force F' une grandeur plus considérable qu'à la force F , car, en plus des phénomènes de tension, il y a à faire intervenir la force d'adhésion de la substance constituant le disque clair C pour la paroi plus concrète du disque épais A qu'elle mouille. La règle du parallélogramme appliquée aux trois forces montre que la résultante R est dirigée vers la substance du disque épais A.

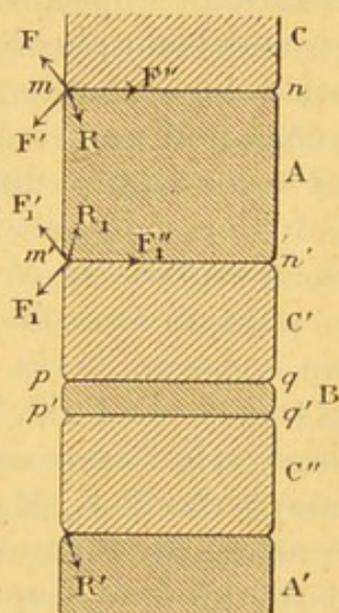


FIG. 2.

Nous pouvons admettre que, comme dans le cas des fibres lisses, l'influx nerveux modifie les valeurs absolues de ces tensions. N'oublions pas qu'au moment de la contraction, une substance liquide sort des fibrilles et y rentre de nouveau quand le muscle revient au repos. Or, le passage de cette substance liquide en sens inverse doit amener, pour les substances constituant les disques et pour le milieu ambiant, des variations de composition qui exercent sûrement une action sur la valeur des forces F , F' , F'' .

Au moment où une contraction musculaire a lieu, les variations

des trois forces F , F' , F'' produisent la rupture de l'équilibre qui existait entre elles, et il en résulte un changement dans la forme des disques, changement qui constitue la contraction musculaire elle-même. Pendant cette contraction, il est clair que le muscle peut effectuer un travail extérieur utile; la possibilité de ce travail extérieur utile apparaît comme une conséquence de leur constitution non homogène. Il n'y a plus besoin ici, comme on le voit, d'une déformation préalable comme pour les fibrilles lisses.

Il faut préciser maintenant davantage le mécanisme d'après lequel les forces de tension font équilibre à une charge extérieure dans un muscle contracté.

Les seules forces propres au muscle étant les forces F , F' , F'' , celles-ci ne doivent plus se faire équilibre entre elles, dans le cas du soutien d'une charge, et les deux forces F et F'' par exemple ne donnent plus une résultante égale et directement opposée à F' . Des composantes dirigées suivant la longueur du muscle prennent alors naissance. Il est évident que les formes des disques en contact, au niveau $m n$ et au niveau $m' n'$, sont identiques, puisque ce sont des substances identiques qui se touchent à chacun de ces niveaux.

Si les trois forces F , F' , F'' donnent en m une résultante R dirigée de haut en bas, les trois forces identiques F_1 , F_1' , F_1'' donneront en m' une résultante R_1 également dirigée vers le disque épais. Il en sera de même aux niveaux $p q$, $p' q'$ où le disque mince B est en contact avec les demi-disques clairs C' et C'' . Toutes les forces R , R_1 , etc., auxquelles donnent lieu les phénomènes de tension superficielle, sont deux à deux égales et directement opposées, mais leurs effets ne se détruisent pas pour cela. Ces forces, remarquons-le, ne sont pas appliquées à des corps solides, mais bien à des substances fluides qu'elles tendent à déformer. Par un examen attentif au microscope, ainsi que l'a établi Ranvier, on constate que la substance vraiment contractile est celle du disque sombre épais; or, les forces R , R_1 ont bien pour résultat de tendre à faire rapprocher les bases $m n$ et $m' n'$ des disques épais, comme le veut la théorie histologique de la contraction musculaire. Quant aux forces identiques à R , qui sont appliquées aux surfaces $p q$, $p' q'$, elles tendent à comprimer le disque mince; mais la substance de ce disque est très peu compressible, comme le prouve l'examen microscopique, en sorte que pendant une contraction il varie peu d'épaisseur.

Il en résulte donc que les forces R, R_1, \dots ont pour effet de déterminer un raccourcissement du muscle par une diminution de l'épaisseur des disques épais, ce qui est en accord complet avec les données histologiques.

Si donc les extrémités du muscle étaient libres, le raccourcissement se produirait par un déplacement des deux extrémités. Si au contraire une extrémité est fixée, l'effet total des forces R, R_1, \dots , est de déplacer seulement l'extrémité libre. Il ressort de là que le jeu des forces élémentaires R, R_1 est identique de tous points à celui des forces élastiques élémentaires qui existent dans un corps élastique soumis à une traction.

D'après ce qui précède, on conçoit que l'ensemble des forces R soit capable de déterminer un raccourcissement, même sous l'action d'une charge : ce raccourcissement s'arrêtera lorsque, par suite du changement de forme des disques épais et clairs et des nouvelles directions des forces de tension, les forces R auront acquis des valeurs telles, qu'elles seront devenues impuissantes à continuer le soulèvement de la charge.

Il va sans dire que les forces R, R_1 n'existent pas seulement aux points m, m' , mais bien en tous les points de la courbe de séparation de deux disques successifs.

Si l'on suppose l'excitation volontaire constante et que le muscle supporte une surcharge, les explications précédentes permettent de voir ce qui arrive alors : les forces R, R_1 , suffisantes pour faire équilibre à la charge primitive, ne sont plus assez grandes pour équilibrer la surcharge. Le muscle s'allonge par suite, les disques se déforment et les forces F, F' et F, F'' changent de direction, mais leurs intensités restent constantes. Au moment où les nouvelles forces R résultantes des trois forces de tension feront équilibre à la charge et à la surcharge, l'allongement s'arrêtera.

Si l'on considère le cas où un muscle supporte des charges croissantes sous un même raccourcissement, les directions des forces F, F', F'' restent alors invariables, mais l'intensité de ces forces change, car l'excitation nerveuse volontaire, dont dépend la grandeur de ces forces, varie elle-même. Ces variations d'intensité des forces F entraînent des variations correspondantes des intensités R, R_1 , d'où il résulte que le muscle peut équilibrer des charges différentes sous un même raccourcissement.

Comment expliquer dans la théorie du P^r Imbert la tonicité musculaire ? Elle est due, d'après l'auteur, à ce que les forces de tension F ont une certaine intensité, même en l'absence de toute

excitation volontaire, par le seul fait que les substances constituant les disques clairs et sombres sont différentes du plasma ambiant. La tonicité musculaire existe alors toutes les fois que la distance des points d'insertion musculaire est, au repos, supérieure à la longueur que prendrait le muscle, supposé entièrement libre, sous l'influence de ces forces moléculaires.

Maintenant, la disparition de la tonicité musculaire, après la mort par exemple, s'explique par le mélange des substances constituantes des disques et du plasma ambiant à la suite duquel se produit, ou tend à se produire, une homogénéité générale qui entraîne l'égalité des forces F et F' et la nullité de la force F'' .

Cette théorie de la contraction musculaire, à l'aide des forces moléculaires de la tension superficielle, permet-elle de se rendre compte de la différence qui existe entre les muscles lisses et les muscles striés, au point de vue de la rapidité de la contraction ? Très facilement. Les forces de tension ont en effet à déformer dans les premiers la masse totale de chaque fibrille ; dans les seconds, au contraire, la subdivision de la fibrille en un grand nombre de disques entraîne une sorte de multiplication des forces de tension qui n'ont ainsi à agir séparément que sur la faible masse de chaque disque : il se fait par les muscles striés une véritable division du travail, et la déformation doit être plus rapide que pour les fibres lisses.

Dans l'étude de l'élasticité, nous avons vu que lorsqu'un muscle contracté est soumis à l'action d'une charge, il s'allonge ; l'allongement cesse, d'après la théorie d'Imbert lorsque les directions nouvelles des forces de tension donnent des résultantes dont l'ensemble est capable de faire équilibre à la charge. Un muscle contracté oppose donc une certaine résistance à l'allongement, comme le fait une tige solide élastique. Des forces moléculaires agissent dans les deux cas pour s'opposer à l'allongement et faire équilibre à la charge lorsqu'un certain allongement s'est produit. Puisqu'il existe entre le muscle contracté et une tige élastique une analogie aussi complète, il est permis d'employer le même terme pour caractériser deux phénomènes identiques, et l'on peut dire que la contraction musculaire se résume à la *création d'une force élastique*. L'élasticité qui en résulte ne doit pas, ainsi que le fait remarquer avec raison M. Imbert, être confondue avec celle que manifeste un corps solide, c'est-à-dire que, dans le cas d'un muscle contracté, ce mot d'élasticité signifie résistances à la déformation dues seulement aux forces de tension qui existent à la surface de contact des différents disques.

L'introduction des forces de tension superficielle dans les phénomènes de la contraction musculaire permet de prévoir les lois des variations de la force élastique d'un muscle avec le degré de contraction et avec la charge, lois que nous avons déjà étudiées et qui ont été établies expérimentalement par M. Chauveau.

Voyons d'abord les variations avec le degré de contraction. Considérons, comme l'a fait M. Imbert, un certain nombre, huit par exemple, de rangées successives de 2 molécules dans un muscle au repos ; lorsqu'un raccourcissement se produit, les 16 molécules prennent une disposition autre, par exemple en formant 4 files de 4 molécules. Soit a la distance des molécules entre elles dans les deux sens, horizontal et vertical ; elle ne change pas lorsque le muscle passe d'un état à un autre, car les substances qui composent le muscle peuvent être regardées comme incompressibles. La déformation éprouvée par le muscle se résume à un déplacement de 8 molécules égal à $4a$.

Le travail accompli à l'intérieur du muscle par les forces de tension, en ne considérant que les déplacements verticaux, est proportionnel à la somme des déplacements verticaux de 8 molécules, c'est-à-dire à $8 \times 4a$. Si un nouveau raccourcissement se produit, les molécules prendront une disposition telle, qu'il y aura deux rangées horizontales de 8 molécules, par exemple. Ici le déplacement vertical est, pour passer de la seconde position à la 3^e, égal à $2a$, et pour les 8 molécules le travail interne est proportionnel à $8 \times 2a$. Le raccourcissement du muscle est égal à $4a$ dans le passage de la 1^{re} forme à la 2^e forme, et à $2a$ dans le passage de la 2^e forme à la 3^e. On voit immédiatement que le travail interne est proportionnel au raccourcissement du muscle.

Par un raisonnement analogue, on verrait de même que le travail interne nécessité par les déplacements des molécules suivant l'horizontale est lui aussi proportionnel à la variation de la largeur du muscle, et l'on peut dire que le travail interne total est à la fois proportionnel aux variations des deux dimensions, longitudinale et transversale, du muscle.

Mais, si l'on compare les déplacements moléculaires verticaux et horizontaux correspondant à un raccourcissement donné, on s'assure aisément que le nombre des premiers l'emporte d'autant plus sur celui des seconds, que la longueur du muscle est supérieure à la largeur. Pour passer, par exemple, d'un groupement de 48 molécules en deux files verticales au groupement de ces

mêmes molécules sur 3 files verticales, il faut qu'il y ait 24 déplacements horizontaux et 92 déplacements verticaux. Comme les fibrilles musculaires striées sont beaucoup plus longues que larges, on peut négliger les déplacements correspondant à la largeur et admettre que le travail interne total dépensé pendant la contraction d'un muscle, est sensiblement proportionnel au nombre des déplacements verticaux, c'est-à-dire au raccourcissement du muscle.

Il résulte de là que, pour produire une même variation de longueur, il faut toujours le même travail, quel que soit l'état primitif du muscle.

Si l'on suspend à l'extrémité d'un muscle en contraction une charge P , l'allongement produit sera constant, quel que soit le degré de raccourcissement du muscle ; appelons l l'allongement qui résulte de l'action de P sur le muscle contracté : à chaque addition nouvelle d'un poids égal à P , il se produira toujours un même allongement l , pourvu que l'excitant conserve la même intensité.

On voit que nous retombons exactement sur la loi énoncée par M. Chauveau : l'élasticité réelle du muscle raccourci par une contraction est proportionnelle au raccourcissement.

Examinons maintenant comment on peut expliquer et prévoir, dans la théorie d'Imbert, la variation de la force élastique du muscle avec la charge. Soit un muscle qui, sous un même état de raccourcissement, soutient deux charges doubles l'une de l'autre, P et $2P$.

Nous savons que les forces de tension F, F', F'' précédemment considérées ont des résultantes R qui font équilibre à la charge actuelle P .

Supposons que l'intensité de l'excitant reste constante, les forces de tension conservent aussi la même intensité. Ajoutons une surcharge p , comme dans les expériences de Chauveau : le muscle va éprouver un certain allongement ; les disques musculaires seront déformés, et l'allongement s'arrêtera au moment où les nouvelles directions des forces de tension seront telles que leurs résultantes longitudinales seront capables de faire équilibre à la charge totale de $P + p$. Faisons maintenant soutenir au muscle, sous son état primitif de raccourcissement, un poids double $2P$; il faudra que l'intensité de l'excitant soit ici plus grande que primitivement. Puisque la longueur du muscle est la même, la direction des forces de tension est restée aussi la même, mais

leurs intensités respectives sont devenues deux fois plus grandes, pour que les résultantes longitudinales puissent maintenant équilibrer la charge $2P$. Si nous ajoutons une surcharge telle que l'allongement obtenu soit le même que dans le premier cas, les résultantes longitudinales des forces de tension deviendront doubles des premières et seront ainsi capables de faire équilibre à la charge totale $2(P + p) = 2P + 2p$: la surcharge ajoutée au poids $2P$ devra donc être deux fois plus grande que dans le premier cas, pour amener un allongement égal. On voit que ces considérations permettent de prévoir la loi de M. Chauveau : l'élasticité réelle d'un muscle contracté est proportionnelle aux charges qu'équilibre le muscle raccourci.

Les deux lois établies par cet éminent physiologiste se trouvent donc vérifiées et pouvaient être prévues par la théorie du P^r Imbert.

On voit par ce qui précède qu'on peut pénétrer assez avant dans le mécanisme de la contraction musculaire par le développement de l'idée et de la considération de la tension superficielle. Nous avons pu ainsi établir des différences très nettes, caractéristiques, entre le mode de fonctionnement des muscles lisses et striés, fixer le sens précis que l'on doit donner au terme élasticité musculaire.

Il est donc rationnel d'admettre cette théorie, quoique encore schématique, puisqu'elle permet non seulement d'expliquer les faits connus, mais aussi de prévoir d'autres faits mis en évidence et bien établis par l'expérience.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES RÉSULTANT DE LA VARIATION DE TENSION SUPERFICIELLE

Les variations de tension superficielle au niveau des disques clairs et épais de la fibre musculaire, sur lesquelles repose la théorie du P^r Imbert, sont accompagnées d'une production d'électricité que le P^r d'Arsonval a utilisée depuis longtemps pour expliquer l'oscillation négative du muscle et du nerf.

On sait qu'à l'état normal la fibre musculaire striée présente un courant électrique allant de sa partie médiane à ses deux extrémités, à travers le galvanomètre. Au moment où une contraction musculaire se produit à la suite d'une excitation quelconque, le courant tend à devenir nul et l'aiguille du galvano-

mètre revient vers le zéro tout le temps que dure la contraction : c'est le phénomène de l'oscillation négative.

Considérons, avec M. d'Arsonval, un globule de mercure plongé dans l'eau acidulée et relié à une des bornes d'un galvanomètre par un fil isolé du liquide acidulé, l'autre borne communiquant à une masse de mercure située dans la même eau acidulée. Si l'on vient à déformer mécaniquement le globule métallique, on sait, d'après les travaux de M. Lippmann, que cette déformation s'accompagnera d'une production de courant électrique : quand la déformation augmente la surface du globule de mercure, celui-ci devient positif ; si, au contraire, la surface est diminuée, le globule devient négatif.

Supposons que le globule vienne à se déformer spontanément et que, d'étalé qu'il était, il tende à devenir sphérique, il deviendra négatif. Or, comme le fait remarquer M. d'Arsonval, un

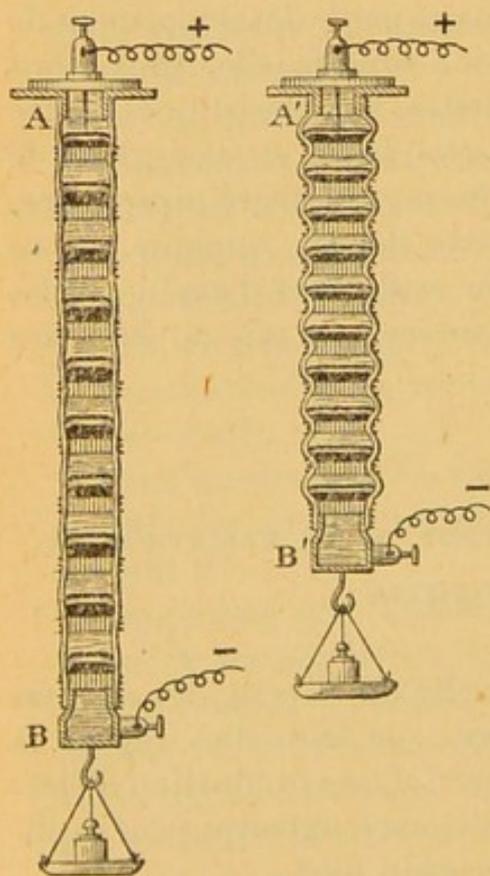


FIG. 3.

globule de protoplasma, placé au sein d'un plasma liquide, réalise ces conditions ; s'il se contracte, il doit devenir négatif. C'est en effet ce que l'expérience montre dans le cas de tous les tissus contractiles. La fibre musculaire présentant une structure capable de donner lieu à ces phénomènes, on peut attribuer l'oscillation négative du muscle, lors de sa contraction, à la déformation mécanique qui se produit au niveau de la surface de contact des disques clairs avec les disques épais.

Ce phénomène a pu être reproduit artificiellement par M. d'Arsonval de la façon suivante. On prend un tube de caoutchouc AB qu'on divise en une série de compartiments par des disques poreux en roseau ou en terre poreuse,

au niveau desquels on ficelle le tube. Chaque compartiment est rempli par du mercure et de l'eau acidulée. On a ainsi un véritable schéma de la fibre striée. Si on suspend ce tube par sa partie supérieure et qu'on fixe à la partie inférieure un poids B

qu'on fait osciller de haut en bas et de bas en haut, de manière à ce que le système prenne successivement les formes AB, A' B', on constate facilement la production de courants dirigés alternativement en sens contraire.

D'ailleurs, si l'oscillation négative du muscle est due à la déformation interne moléculaire de la substance musculaire, on doit l'observer encore si on empêche le muscle de se déformer en masse lors de sa contraction, pourvu que le changement de forme puisse se produire au contact des disques clairs et des disques épais : l'expérience vérifie complètement cette déduction. En effet, si on emprisonne un muscle dans du plâtre, de façon à ce qu'il ne puisse pas se déformer, l'oscillation négative apparaît quand même lors de sa contraction (Dubois-Reymond).

D'autre part, si on tend un muscle par un poids trop fort pour qu'il puisse le soulever, sa variation électrique est alors maxima, et en même temps, comme l'a montré Ranvier, le changement de forme des disques clairs et des disques épais est à son maximum. Tous ces faits sont bien d'accord avec la théorie de d'Arsonval.

Cet éminent physicien biologiste a pu faire la preuve pour ainsi dire de sa théorie ; si celle-ci est vraie, on doit en allongeant mécaniquement un muscle, produire une variation *positive* inverse de celle qui se produit lors de son raccourcissement actif. C'est ce que l'expérience confirme pleinement : tout se passe comme dans le tube de caoutchouc précédemment décrit. On voit combien l'oscillation négative se comprend plus facilement en faisant intervenir les variations de tension superficielle qu'en invoquant, comme le faisait Dubois-Reymond, une bipolarité des molécules composant la fibre striée.

Ainsi donc, en récapitulant les phénomènes moléculaires qui résultent de la variation des forces de tension, nous voyons que, d'après la théorie du P^r Imbert, l'excitation, volontaire ou autre, de la fibre musculaire, a pour conséquence une augmentation des forces de tension au niveau de la surface de séparation des disques clairs et des disques sombres, déterminant le raccourcissement du muscle, et que, d'après d'Arsonval, la déformation qui résulte de ce raccourcissement entraîne une variation de potentiel dont le sens s'oppose à la continuation du mouvement communiqué au muscle par la partie contractile de la fibre.

On voit qu'il y a dans cette dernière proposition un point qui rappelle la loi de Lenz relative au sens d'un courant induit : celui-ci est toujours tel, qu'il tend à s'opposer à la cause qui le produit.

La différence de potentiel qui s'établit pendant la variation de la tension superficielle du protoplasma a conduit M. d'Arsonval à concevoir une explication de l'électricité chez les poissons électriques, dont nous devons indiquer ici le principe.

Les organes électriques sont formés par une série de cellules hexagonales superposées : chaque cellule est remplie en partie par une masse granuleuse, probablement de nature protoplasmique, dans laquelle se ramifie le nerf, et par une substance amorphe, plus ou moins fluide, surmontant la plaque nerveuse, comme l'ont démontré les recherches de Ranvier.

Considérons une cellule : sa base protoplasmique excitée par le nerf s'électrise négativement (oscillation négative due à la variation de tension superficielle du protoplasma), la substance non protoplasmique qui est au-dessus positivement.

La superposition des cellules accouple ces éléments en tension. Les variations négatives s'additionnent et sont multipliées par le nombre des cellules superposées, qui s'élève à plusieurs milliers dans une colonne de l'organe. Ces colonnes sont elles-mêmes au nombre de plusieurs milliers, associées par les pôles de même nom, c'est-à-dire en quantité. Ces organes peuvent donc donner à la fois la tension et la quantité : voilà comment on peut comprendre l'énergie considérable de leur décharge.

Donc, d'après cette théorie ingénieuse, l'organe électrique se comporte comme un muscle, et les lois de la décharge électrique sont les mêmes que celles de la secousse musculaire : la décharge de cet organe et la variation négative du muscle se produisent par le même mécanisme, en sorte que le schéma de la fibre musculaire striée obtenu avec le tube de caoutchouc précédemment décrit est en même temps le schéma du prisme de l'organe électrique.

L'électrogénèse chez les poissons électriques se conçoit ainsi comme une exagération de l'oscillation négative du muscle.

CHAPITRE III

ACTIONS MOLÉCULAIRES ENTRE DES LIQUIDES DIFFÉRENTS

Osmose. — Lorsque deux liquides se mélangent à travers une cloison perméable, ou septum poreux, le phénomène porte le nom d'osmose. L'étude de l'osmose est très importante pour nous, car ce phénomène joue dans notre organisme un grand rôle pour les échanges nutritifs, que ces échanges soient d'ailleurs liquides ou gazeux ; mais nous réserverons l'étude de ces derniers pour le chapitre de l'osmose des gaz.

Nous possédons sur tous les points de notre organisme, en contact avec les substances provenant du milieu extérieur, une couche continue d'épithélium. Sur toute l'étendue des muqueuses et de la peau, on trouve une couche épithéliale simple ou stratifiée. Un fait physiologique d'une haute importance résulte de cette continuité de l'épithélium : c'est que toutes les substances qui doivent pénétrer dans l'organisme, de même que toutes celles qui doivent en sortir, sont forcées de traverser une membrane épithéliale.

De plus, les tissus connectifs sont en rapport de tous côtés avec les liquides de l'organisme, sang, lymphe, transsudations séreuses, qui peuvent être considérées comme des mélanges de substances cristalloïdes et colloïdes. Or, les membranes qui limitent ces liquides et les séparent les uns des autres sont en grande partie constituées par de la substance connective ; les échanges qui s'opèrent entre ces liquides et les tissus ne peuvent donc avoir lieu qu'à la condition qu'il y ait des phénomènes d'osmose, les septums étant formés par les membranes tégumentaires, les séreuses, les parois des vaisseaux, etc. Il est donc essentiel, pour comprendre ces échanges, de bien connaître les lois générales de l'osmose.

L'osmose a été découverte par l'abbé Nollet, en 1748, d'une façon inattendue : il recherchait les causes de l'ébullition et fut

amené à remplir d'alcool un flacon qu'il avait fermé à l'aide d'un morceau de vessie et qu'il avait placé au fond d'un vase plein d'eau. Après quelque temps, Nollet remarqua que le couvercle membraneux était devenu convexe vers le haut et qu'en même temps de l'eau était entrée dans le flacon.

Il fit l'expérience inverse, plaça de l'eau dans le flacon et de l'alcool dans le grand vase, et constata qu'alors la vessie devenait concave après quelques heures. Il y avait donc passage à travers la membrane d'une plus grande quantité d'eau que d'alcool.

Ce phénomène fut étudié soigneusement par Dutrochet; il se servit d'abord d'une poche membraneuse, constituée par un cæcum de poulet, remplie de lait, d'albumine, etc., qu'il plongeait dans l'eau.

Il adaptait à la partie supérieure de la poche un tube de verre, de façon à suivre plus facilement les échanges s'opérant à travers la membrane.

Dutrochet perfectionna ensuite son appareil en remplaçant la poche membraneuse par un cylindre de verre dont la partie supérieure se continuait par un tube fin gradué en millimètres et sur l'ouverture inférieure duquel était tendue une membrane poreuse. Il donna à cet appareil le nom d'*endosmomètre*. La solution à étudier étant placée dans le cylindre, on plongeait l'appareil dans un vase plein d'eau, jusqu'à ce que le niveau des deux liquides fût sur le même plan horizontal. Un double courant se produisait alors à travers la membrane, l'un allant de l'eau vers le liquide du cylindre, *courant d'endosmose*, l'autre allant du liquide vers l'eau extérieure, *courant d'exosmose*.

Liebig a utilisé un appareil un peu différent : l'endosmomètre plonge dans une des branches d'un tube en U; les 2 branches de ce tube sont égales et réunies par un tube capillaire; au début de l'expérience, le niveau des liquides se trouve à la même hauteur dans les 2 branches. Quand le liquide du tube en U a pénétré dans l'endosmomètre, il suffit d'ajouter de ce même liquide (qui est en général de l'eau) dans l'autre branche libre, jusqu'au niveau primitif, pour savoir quelle quantité de liquide est passée dans l'endosmomètre.

Boulland emploie comme réservoir de l'endosmomètre la tunique fibreuse de l'estomac de la grenouille; le tube de verre de l'endosmomètre, recourbé à angle droit, présente une branche horizontale. L'appareil est rempli de mercure, puis on y introduit une petite quantité du liquide qu'on veut étudier et

qui remplace un volume correspondant de mercure. On place alors le réservoir dans le second liquide, et les déplacements du mercure dans le tube horizontal, qui a été divisé et gradué d'avance, indiquent le sens et l'intensité du courant d'osmose.

Carlet a construit un appareil permettant d'enregistrer directement les variations de niveau du liquide de l'endosmomètre, auquel il avait donné le nom d'osmographe.

Quelque soit l'appareil employé, on peut utiliser comme septum tous les diaphragmes poreux, les membranes sèches et humides : les plus usités sont les lames d'argile, les membranes animales et végétales, les membranes de parchemin, le papier parchemin, etc.

Dutrochet a montré que l'intensité des courants d'osmose est proportionnelle à la surface du septum employé, qu'elle augmente avec la température et enfin qu'elle dépend beaucoup de la nature du septum.

Lorsqu'on a disposé une expérience d'osmose de telle façon que le liquide le plus dense, solution de sucre, de sel marin, etc., soit dans l'osmomètre, pendant que celui-ci plonge dans l'eau pure, les courants d'endosmose et d'exosmose durent jusqu'à ce que les deux liquides soient au même titre de la substance dissoute.

Demandons-nous maintenant quelle est la nature du phénomène de l'osmose, et voyons comment on peut expliquer les actions moléculaires qui prennent naissance dans ces conditions.

D'abord, remarquons que, pour qu'il y ait osmose, il faut que les liquides qui se trouvent de chaque côté du septum soient miscibles ; il faut en outre que les liquides, ou au moins l'un des deux, puisse imbiber la membrane poreuse interposée. Mais, pour mieux comprendre la cause des courants osmotiques, prenons, à l'exemple de Lhermite, comme septum, une mince couche liquide. Dans une éprouvette on place une couche de chloroforme, puis une très faible épaisseur d'eau et enfin une couche d'éther : dans ces conditions, les liquides séparés par l'eau sont miscibles (éther et chloroforme), et le septum (eau) est mouillé par l'éther. Si on laisse l'expérience se continuer pendant un temps assez long, on constate que le niveau du chloroforme augmente, tandis que celui de l'éther diminue, mais que la couche d'eau a conservé la même épaisseur. Tout se passe comme si l'éther, après s'être dissous dans l'eau, se diffusait dans le chloroforme ; tandis

que le chloroforme, ne pouvant traverser l'eau, ne s'est pas diffusé vers l'éther.

Un phénomène absolument analogue se produit lorsqu'on prend pour septum une lame de caoutchouc ; si l'on place de l'alcool dans l'osmomètre ainsi formé et qu'on le plonge dans l'eau, l'alcool ayant la propriété de mouiller le caoutchouc diffuse vers l'eau, mais il n'y a aucun courant d'endosmose de l'eau vers l'alcool, en sorte que le niveau du liquide dans le tube de l'osmomètre baisse, au lieu de s'élever comme cela a lieu habituellement.

Considérons maintenant le cas où les deux liquides mouillent la membrane ; supposons que l'on prenne comme septum une vessie, et comme liquides de l'alcool et de l'eau : la vessie se laissant mieux imbiber par l'eau que par l'alcool, il y a une plus grande quantité d'eau absorbée par la membrane, en sorte que l'alcool qui se trouve de l'autre côté enlèvera par diffusion l'eau qui imbibe la vessie et dont il tend à se saturer ; une nouvelle quantité d'eau sera absorbée par la membrane, puis diffusera vers l'alcool, et ainsi de suite. Il s'établira donc un courant de l'eau vers l'alcool beaucoup plus intense que celui de sens opposé, car l'imbibition de la vessie par l'alcool est moins rapide que par l'eau. On comprend ainsi pourquoi le niveau du liquide s'élève dans le tube de l'osmomètre, lorsque celui-ci contient une substance pour laquelle le coefficient d'imbibition de la membrane est plus fort que pour le liquide dans lequel plonge l'osmomètre,

Le phénomène de l'osmose a donné lieu à un grand nombre de recherches, dues pour la plupart à des physiologistes, à cause du rôle important qu'il joue dans l'organisme.

Matteucci et Cima firent un grand nombre d'expériences en se plaçant dans des conditions se rapprochant de celles de l'organisme. Ils essayèrent comme membranes des muqueuses d'estomac, des vessies, des peaux, etc. ; ils se servirent, comme liquides, de l'eau, de l'alcool, de dissolutions de sucre, de gomme, d'albumine.

Leur appareil était celui de Dutrochet. Ils divisèrent les membranes en 3 catégories : la première, comprenant les peaux de grenouille, de torpille et d'anguille ; la seconde, l'estomac d'agneau, de chat, de chien, le gésier de poulet ; la troisième, la vessie de bœuf et de porc. Voyons les résultats propres à chaque espèce de membrane.

1° *Peaux*. — Deux osmomètres avaient été montés avec la

même peau tournée en sens inverse dans chaque appareil. Le même liquide était placé dans l'osmomètre, et celui-ci plongeait dans la même eau.

Ils constatèrent que l'intensité du courant d'endosmose était différente dans les deux appareils ; dans celui où la face interne de la peau était tournée vers l'eau, le niveau du liquide montait beaucoup plus vite dans le tube. Ils répétèrent l'expérience en prenant des solutions de sucre, de l'albumine ; le résultat fut toujours le même : le passage de l'eau dans l'osmomètre est plus rapide lorsque c'est la face interne de la peau qui est en contact avec l'eau. Lorsqu'on veut répéter ces très intéressantes expériences, il faut que les peaux soient très fraîches.

2° *Estomacs*. — Matteucci et Cima se servaient de la muqueuse de l'estomac qu'ils prenaient comme membrane d'osmomètre ; ils en montaient toujours deux semblables, en tournant la membrane dans un certain sens pour l'un, dans un sens opposé pour l'autre.

Avec l'estomac d'agneau, ils trouvèrent les résultats suivants : si l'on prend comme liquide de l'eau sucrée ou de l'eau gommée, le niveau dans le tube osmométrique s'élève plus rapidement dans l'appareil dont la muqueuse stomacale a sa face interne tournée vers l'eau. Avec les muqueuses d'estomac de chien et de chat, les résultats sont les mêmes quand on introduit de l'alcool dans l'osmomètre. L'ascension du liquide dans le tube est plus rapide lorsque la face interne, c'est-à-dire celle qui est en contact avec les aliments, est tournée vers l'eau, que quand cette même face est tournée vers le liquide de l'osmomètre.

3° *Vessies*. — En prenant comme liquide une solution de blanc d'œuf, Matteucci et Cima constatèrent que le courant d'endosmose n'a plus lieu, quel que soit le côté de la vessie tourné vers l'eau. Avec une solution de gomme, le liquide s'élève plus rapidement dans le tube, lorsque la face interne de la vessie est en contact avec l'eau ; au contraire, avec une solution sucrée, c'est quand la face externe regarde l'eau que l'ascension du liquide se fait le plus activement.

De toutes ces expériences, les auteurs tirèrent quelques conclusions que nous devons mentionner :

1° Il y a en général, pour ne pas dire toujours, une position de la membrane dans laquelle l'endosmose est favorisée :

2° L'endosmose est en général plus active lorsqu'elle se fait de la face interne vers la face externe.

M. le P^r Gayon a aussi découvert d'intéressantes particularités de l'osmose, au point de vue biologique. On sait que l'albumine de l'œuf est complètement entourée par une double membrane adhérente à la coquille ; on arrive assez facilement à enlever cette fine membrane sur une étendue suffisante pour permettre de l'employer comme septum.

Si l'on monte avec cette membrane deux osmomètres semblables ayant même surface de septum, et qu'on les dispose de telle manière que dans l'un la face externe de la membrane soit en contact avec l'eau, tandis que dans l'autre ce soit la face interne, on trouve que l'ascension du liquide ne se fait pas avec la même vitesse dans les deux osmomètres. Dans l'appareil où la face externe de la membrane de la coque est tournée vers l'eau, l'ascension se fait rapidement en employant de l'eau sucrée ; dans l'appareil où c'est la face interne qui regarde l'eau, le niveau du liquide dans le tube de l'osmomètre reste le plus souvent stationnaire ; on constate cependant des stries abondantes, partant de la face inférieure de l'osmomètre et descendant jusqu'au fond du liquide extérieur. Par conséquent, les courants d'osmose existent bien, mais, l'endosmose étant égale à l'exosmose, le liquide ne s'élève pas, ou très peu, dans l'osmomètre. L'état de fraîcheur de la membrane ne joue aucun rôle dans la marche du phénomène.

Sur les membranes végétales le même savant a fait des expériences d'osmose qu'il est intéressant pour nous de connaître : elles ont principalement porté sur la peau des grains de raisin et de la pêche. Ces expériences ont été consignées dans la thèse de M. Doumer (Bordeaux, 1881). Avec la peau de pêche, il faut prendre quelques précautions en vue d'empêcher les bulles d'air d'adhérer à la surface. On sait en effet que celle-ci est recouverte d'un enduit cireux qui s'oppose à ce qu'elle soit mouillée par l'eau. On plonge pendant quelque temps la peau dans de l'alcool, pour enlever cet enduit, puis on la lave à l'eau pure. Si l'on monte deux osmomètres identiques avec cette membrane, la face externe regardant à l'intérieur dans l'un et à l'extérieur dans l'autre, et que l'on place de l'eau sucrée dans les deux appareils, on constate que le niveau baisse dans le tube du premier osmomètre où la face externe touche l'eau, tandis qu'il s'élève au contraire progressivement dans le second où c'est la face interne qui est en contact avec l'eau.

Avec la peau des grains de raisin on obtient les mêmes ré-

sultats. Ces expériences généralisent les résultats de Matteucci et Cima.

M. Doumer a repris d'ailleurs les expériences de ces derniers physiologistes dans le but de rechercher quelle est l'influence de l'air adhérent à la paroi poreuse employée comme septum.

Ainsi que l'a si bien mis en évidence le P^r Merget, il existe une grande quantité de gaz dans le tissu conjonctif des animaux, non seulement chez ceux qui vivent dans l'air, mais aussi chez les animaux aquatiques ; nous aurons occasion de reparler de ces atmosphères adhérentes dans un chapitre suivant.

Après avoir écorché une anguille sous l'eau, Doumer a monté trois paires d'osmomètres avec la peau tournée, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre ; puis il soumit au vide de la machine pneumatique ces deux osmomètres. Une autre paire préparée de la même façon fut plongée dans une solution sursaturée d'acide carbonique et mise ensuite dans de l'eau pendant quelques heures. Enfin, une troisième paire d'osmomètres ne reçut aucune préparation spéciale, pour servir d'appareils témoins. Tous ces osmomètres furent remplis d'alcool ordinaire. Voici la marche du phénomène de l'osmose dans ces 3 paires d'appareils :

ASCENSION APRÈS 6 h. 1/2

	FACE EXTERNE en contact avec l'eau —	FACE INTERNE en contact avec l'eau —
Osmomètres témoins.	+ 90 millim.	+ 160 millim.
Osmomètres traités par le vide. . .	+ 60 —	+ 2 —
Osmomètres traités CO ²	— 35 —	+ 295 —

Ces chiffres montrent bien que le phénomène a été profondément modifié par l'altération apportée aux membranes d'anguille par le vide et l'acide carbonique.

Enfin, nous devons dire quelques mots de ce qu'on a appelé *l'équivalent osmotique*. C'est Jolly qui a montré le premier que, lors de l'osmose d'une solution saline, il paraissait y avoir un certain rapport entre la quantité d'eau ayant endosmosé et la quantité de sel ayant exosmosé : il appela équivalent osmotique le poids de l'eau susceptible de se substituer, à travers la membrane de l'osmomètre, à 1 gramme de la substance contenue dans l'osmomètre.

Certains auteurs ont montré que cet équivalent était très variable pour une même substance, qu'il varie entre autres avec la densité de la solution et aussi avec la nature de la membrane interposée. Cependant on doit, d'après Doumer, accorder une valeur certaine à cet équivalent osmotique, lorsque les conditions de l'osmose restent les mêmes. Il faut entendre de plus l'équivalent osmotique comme étant toujours rapporté à l'eau, c'est-à-dire que la substance est placée dans l'osmomètre et celui-ci plongé dans l'eau.

Voici quelques nombres empruntés au mémoire de Jolly. La membrane utilisée était une vessie bien desséchée; les sels étaient pesés exactement et pris à l'état de pureté. Lorsque tout le sel avait osmosé, on pesait la quantité d'eau introduite; le rapport indiquait l'équivalent osmotique.

SUBSTANCES	ÉQUIVALENT
Bisulfate de potasse.	2,345
Chlorure de sodium.	4,223
Sucre.	7,157
Sulfate de cuivre.	9,554
Sulfate de magnésie.	11,65
Sulfate de potasse.	12,277
Potasse hydratée.	215,745

Il est une objection pourtant que nous devons faire à la notion de l'équivalent osmotique: puisque cet équivalent varie avec la densité de la solution, il ne possède pas la même valeur au commencement et à la fin de l'osmose; on ne sait pas alors à quelle phase du phénomène se rapporte le nombre indiqué comme équivalent osmotique.

On peut, il est vrai, tourner la difficulté et prendre l'équivalent moyen. Quoi qu'il en soit, il faut, pour que cet équivalent possède une véritable valeur scientifique, le faire accompagner des indications nécessaires sur les conditions expérimentales qui ont présidé à sa détermination: nature de la membrane, titre de la solution, température, etc.

Phénomènes électriques liés aux actions moléculaires de l'osmose. — Nous ne voulons pas parler ici des phénomènes qui

apparaissent lorsqu'on fait passer un courant dans un liquide contenu dans deux compartiments ayant une cloison médiane poreuse, ou du moins, si nous en parlons, ce sera pour montrer que l'on a tort de rapprocher de l'osmose le mouvement des molécules liquides ainsi engendré. On sait en effet que, si l'on place un *même* liquide, de l'eau, du sulfate de cuivre, etc., de chaque côté d'un septum poreux et que l'on fasse aboutir à chaque masse liquide ainsi délimitée les rhéophores d'une source d'électricité galvanique, il se fait un transport du liquide relié au pôle positif vers le liquide communiquant au pôle négatif, à travers la cloison interposée; on constate après un moment que le niveau du liquide $+$ a baissé pendant que celui du liquide $-$ s'est élevé dans l'autre compartiment.

Certains auteurs ont donné à ce phénomène le nom d'osmose ou d'endosmose électrique: c'est là un terme tout à fait impropre, et l'on comprendra facilement pourquoi, après ce que nous avons dit de l'osmose. Ce n'est là qu'un phénomène de transport, dû au courant électrique qui agit comme le ferait une augmentation de pression sur le liquide placé du côté positif. D'ailleurs, ainsi que nous le savons, pour qu'il y ait osmose, il faut que les deux liquides imbibent la membrane poreuse d'une façon différente, ce qui exige que les deux liquides soient différents. Or, le phénomène d'entraînement des molécules liquides par le courant a lieu lorsque les deux masses liquides ont exactement la même composition!

Bien plus, pendant l'osmose proprement dite, il s'établit à travers le septum un double courant, un courant d'endosmose et un courant d'exosmose, dirigés en sens inverse; dans le transport dû au courant électrique, au contraire, il n'y a de courant liquide que dans un seul et même sens, du côté positif vers le côté négatif du septum. La différence est donc bien tranchée et nous voyons maintenant combien est mauvaise l'expression d'osmose électrique, puisqu'elle peut faire confondre deux phénomènes qui n'ont rien de commun: il est bien préférable de désigner le phénomène de transport par le courant électrique à travers un septum par le nom de cataphorèse ou encore de phénomène de Porret; de cette façon, toute ambiguïté est évitée.

Laissons donc de côté la cataphorèse, pour nous occuper des phénomènes électriques qui apparaissent grâce aux actions moléculaires de l'osmose.

Si l'on relie les deux liquides d'un osmomètre aux deux bornes

de l'électromètre capillaire de Lippmann, ou à tout autre appareil sensible, on constate qu'il se produit une déviation ou une dénivellation du ménisque mercuriel, qui persiste tant que dure le phénomène. Il faut avoir soin dans cette expérience de prendre des électrodes ne pouvant pas subir d'action chimique au contact des liquides de l'osmomètre : c'est là un point très important, car, avec des électromètres très sensibles, la moindre action sur les électrodes entraîne une très légère différence de potentiel que révèle aussitôt l'appareil.

Le courant électrique que l'on peut mettre en évidence pendant l'osmose est le résultat des actions capillaires dont la membrane est le siège pendant que les molécules liquides l'imbibent; ces actions capillaires consistent surtout en des variations de tension superficielle subies par l'un et l'autre liquide, pendant que leurs molécules cheminent péniblement à travers le septum poreux. Il suffit, pour comprendre la production d'électricité par ces actions capillaires, de rappeler l'expérience suivante : si on fait écouler par un tube de verre très effilé plongeant dans de l'eau acidulée du mercure goutte à goutte, et que l'on relie l'eau acidulée et le mercure du tube à un galvanomètre très sensible, on voit, au moment où une goutte de mercure se forme à l'extrémité du tube effilé, se produire une déviation du galvanomètre; cette déviation est le résultat d'une modification de la tension superficielle du mercure.

La différence de potentiel, engendrée ainsi par les actions électro-capillaires dont la membrane est le siège pendant l'osmose, n'est pas la cause du phénomène osmotique, comme certains auteurs ont voulu le soutenir; elle n'est au contraire qu'une conséquence de l'osmose, et ce sont les variations de la tension superficielle des liquides qui entraînent la production du courant électrique.

Quoi qu'il en soit, ces phénomènes électriques dus aux actions moléculaires grâce auxquelles les échanges osmotiques ont lieu à travers un septum, se produisent chaque fois qu'il y a osmose; ils se produisent donc à chaque instant dans notre organisme, où l'on sait exister de fréquentes applications de l'osmose.

Nous avons montré que ces phénomènes électro-capillaires étaient modifiés par l'action des rayons X sur la membrane. Ce fait a une certaine importance, car il peut contribuer à expliquer les altérations des tissus qui sont traversés pendant un temps assez long par les radiations de Röntgen.

Nous avons pris une cuve en bois paraffiné dans laquelle était

placée de l'eau pure, et dans cette eau plongeait l'osmomètre dont le tube était gradué en parties d'égale hauteur.

Le tube de Crookes était disposé au-dessous de la cuve, et, grâce à la transparence du bois de la cuve, de la paraffine et de l'eau, les rayons X pouvaient arriver facilement sur la membrane de l'osmomètre.

On était libre de faire passer la décharge dans le tube de Crookes et de l'arrêter à un moment quelconque donné.

Voici une expérience qui montre bien l'influence exercée par les rayons X sur les phénomènes électro-capillaires produits par l'osmose, et par suite sur l'osmose elle-même.

Osmomètre dont la membrane en parchemin animal a une surface de 38,46 centimètres carrés; tube capillaire fixé au-dessus; liquide introduit, solution saturée de sucre de canne. On note l'ascension du liquide pendant 10 minutes chaque fois :

1° Sans rayons X. . . .	Ascension 38	millim.
2° Avec rayons X. . . .	— 28	—
3° Sans rayons X. . . .	— 40,2	—
4° Avec rayons X. . . .	— 27	—

Il y a eu dans cette expérience un ralentissement très marqué du phénomène de l'osmose chaque fois que la membrane a subi l'action des radiations émanées du tube de Crookes. Ce ralentissement s'est produit dans chaque expérience et cela malgré l'interposition d'une grande feuille d'aluminium reliée soigneusement au sol, entre le tube de Crookes et la cuve de l'osmomètre.

Comment expliquer cette influence des rayons X sur l'osmose? Il faut se rappeler d'abord que les rayons X ont la propriété de décharger les corps électrisés; ensuite, il importe de savoir que la modification des conditions électriques qui président aux actions capillaires entraîne une perturbation de ces actions. C'est sur cette remarque qu'est basé l'électromètre capillaire de Lippmann. Or, pendant le phénomène de l'osmose, avons-nous dit, les actions capillaires qui lui donnent naissance sont accompagnées de phénomènes électriques.

Si donc les rayons X ont la propriété, en modifiant ces phénomènes électriques, de gêner les actions capillaires dont la membrane est le siège, il est facile de concevoir que les courants d'endosmose seront ralentis et que par suite l'ascension du liquide dans le tube sera moins rapide qu'avant la perturbation apportée au phénomène.

La découverte que nous avons faite de cette influence des rayons X sur la marche des échanges osmotiques pourra peut-être contribuer à éclairer d'un jour nouveau les phénomènes biologiques dus aux radiations de Röntgen, lorsqu'un faisceau de rayons X traverse pendant un certain temps une région de l'organisme

CHAPITRE IV

ACTIONS MOLÉCULAIRES S'EXERÇANT ENTRE SOLIDES ET LIQUIDES

Il convient de classer ces actions en trois groupes distincts pour en faciliter l'étude : 1° le solide et le liquide conservent chacun leur état physique primitif ; 2° le liquide disparaît du système ; 3° le solide cesse d'exister et passe à l'état liquide.

Phénomènes capillaires. *Les deux corps conservent leur état primitif.* — Lorsqu'un solide est mis en contact avec un liquide, il peut être mouillé ou non par ce liquide.

Nous ne nous occuperons que des actions moléculaires qui se manifestent dans le cas où le solide est mouillé, car on ne trouve pas dans l'organisme d'exemples du second cas. Au contact d'un solide, le liquide qui le mouille s'élève, en formant une certaine surface courbe qu'on appelle ménisque, et l'angle de raccordement est nul.

Si l'on introduit dans un tel liquide un tube capillaire, on constate que le liquide s'élève, contrairement aux lois de l'hydrostatique, dans ce tube, en formant un ménisque concave. L'ascension du liquide est due à la tension superficielle du liquide dont l'effet contrebalance l'action de la pesanteur.

Jurin a établi que la hauteur d'ascension dans un tube capillaire est en raison inverse du diamètre du tube et de la densité du liquide, et en raison directe de la tension superficielle du liquide.

Ces lois trouvent leur application dans l'organisme, où le tube capillaire joue un rôle si important ; mais, ce qui est plus intéressant à considérer pour nous, c'est le cas où le liquide peut circuler dans le tube capillaire.

Cette circulation a été bien étudiée par Poiseuille : il se servait d'un vase en verre en forme de fuseau, se continuant à la partie

inférieure par un tube ayant une ampoule et se recourbant horizontalement pour se terminer par une partie capillaire ; au-dessus et au-dessous de l'ampoule, dont la capacité est connue, sont marqués 2 traits. On remplit d'abord l'ampoule d'eau distillée et on place le tube capillaire dans un réservoir d'eau ; on fait ensuite communiquer la partie supérieure du vase avec un réservoir d'air comprimé et on ouvre le robinet supérieur.

Le liquide s'écoule par le tube capillaire et on note le temps employé par le liquide pour que le niveau passe du trait supérieur au trait inférieur.

Le diamètre du tube ayant été mesuré au préalable, on note la température et la pression exercée sur le liquide par l'air du réservoir. Poiseuille a ainsi trouvé les lois suivantes, renfermées dans la formule

$$q = \frac{k Hd^4}{l}$$

La quantité de liquide qui s'écoule par un tube capillaire est : 1° proportionnelle à une certaine constante k , qui dépend de la nature du liquide, de la température, etc. ; 2° proportionnelle à la pression exercée du liquide ; 3° à la 4^e puissance du diamètre du tube capillaire ; 4° en raison inverse de la longueur du tube capillaire.

Ces lois sont immédiatement applicables à la circulation des liquides de l'organisme dans les espaces étroits, et en particulier à la circulation sanguine dans les capillaires. Cette circulation peut être étudiée au microscope très facilement, surtout chez les animaux à température variable : sur la grenouille on peut examiner la membrane interdigitale, le mésentère, la langue ou le poumon ; on tend la membrane sur une plaque de liège percée d'un trou. La queue du têtard, les jeunes embryons, surtout ceux de poisson, se prêtent très bien à l'étude de la circulation capillaire ; sur les animaux homœothermes, cet examen est plus difficile ; cependant, on peut le faire assez facilement sur le mésentère des petits animaux, ou sur la membrane nictitante des pigeons ou des poulets, ou encore sur la 3^e paupière du lapin. On a proposé, sous le nom de cheilo-angéioscopie, un procédé pour étudier la circulation capillaire chez l'homme. La lèvre inférieure est attirée en avant et maintenue par de petites pinces ; on l'examine à un grossissement de 50 diamètres, suffisant pour distinguer nettement les petits vaisseaux.

Dans cet examen, il ne faut pas oublier que la vitesse du liquide paraît très augmentée par le pouvoir amplifiant du microscope. On observe ainsi que le liquide sanguin se meut avec une vitesse uniforme et ne présente pas d'accéléérations périodiques correspondant à la systole du ventricule. Ce courant a toujours la même direction et se fait toujours des artères vers les veines. Quand le diamètre du capillaire est assez considérable, on voit que la couche liquide adhérente à la paroi du vaisseau paraît immobile (couche inerte) et que le mouvement du liquide est plus rapide dans l'axe que sur les bords. Les globules rouges sont entraînés par l'écoulement du sang et subissent des déplacements qui permettent de voir tantôt leur face, tantôt leur profil.

Le diamètre d'un capillaire donné est sujet à des variations tantôt passives, tantôt actives : les premières sont dues à la quantité de sang plus ou moins grande qui afflue par les artères et à celle qui s'écoule par les veines efférentes ; les secondes consistent en des alternatives de rétrécissement et de dilatation mises hors de doute par les expériences de Stricker. Ces variations ont évidemment pour conséquence de diminuer ou d'augmenter la quantité de sang qui circule dans les capillaires d'après la loi de Poiseuille.

Quant à la continuité de l'écoulement du liquide sanguin dans les capillaires, on sait qu'il est dû à l'élasticité des artères qui transforme le mouvement saccadé résultant des systoles cardiaques en un mouvement continu, comme l'a montré expérimentalement M. Marey.

Les phénomènes capillaires interviennent encore dans le mécanisme de l'absorption des corps gras par les chylifères. Les matières grasses, telles que l'huile, s'écoulent très difficilement à travers les tubes capillaires, et l'on aurait de la peine à concevoir l'absorption de ces matières, si l'on ne faisait intervenir l'action de la bile. On sait que cette absorption a seulement lieu au niveau de l'intestin grêle, à partir de l'endroit où se déverse la bile, et que d'autre part la bile a la propriété d'émulsionner les graisses.

Le rôle de la bile paraît en effet considérable dans le mécanisme de l'absorption des graisses. Si l'on plonge dans de l'huile deux tubes capillaires, préalablement mouillés l'un avec de l'eau, l'autre avec de la bile, on trouve que l'huile monte 12 fois plus haut dans le tube à bile que dans le tube à eau.

Voilà déjà un premier point établi, qui montre combien

la bile favorise l'adhésion des corps gras pour les parois. D'autre part, l'écoulement des graisses est très notablement augmenté lorsque celles-ci sont émulsionnées avec de la bile, ainsi que Duclaux l'a montré expérimentalement. En faisant écouler dans un tube capillaire donné de l'huile pure, puis des émulsions d'huile et de bile en certaines proportions, il a obtenu les résultats suivants :

100 parties d'huile s'écoulent en.	140 minutes		
80 — et 20 parties de bile	23 —		
60 — 40 —	21 —		
40 — 60 —	15 —		
20 — 80 —	14 —	15 secondes.	
100 p. d'eau pure.	10 —	10 —	

Ce tableau montre bien que le rôle de la bile est considérable pour faciliter le passage des corps gras à travers les canalicules qui se trouvent dans la paroi libre des cellules épithéliales de l'intestin.

Chapelets capillaires. — Il peut quelquefois se former dans un des vaisseaux un phénomène physique auquel on donne le nom de chapelets capillaires. Si l'on pratique une petite ouverture, par exemple dans la paroi d'un vaisseau sanguin, il y aura, sous l'influence du courant circulatoire, entraînement de bulles d'air qui sépareront successivement de petits index liquides ; il pourra se faire un grand nombre de ces index, et l'on aura ainsi un chapelet capillaire. Pour comprendre les dangers de la formation de ce phénomène, il est utile d'indiquer ici en quelques mots l'explication de ces chapelets, mais il est indispensable auparavant de savoir ce qu'on entend par *composante normale* de la tension superficielle.

Lorsque la surface libre d'un liquide est plane, la tension superficielle ne peut donner naissance à aucune composante normale ; tout se passe comme si la membrane élastique à laquelle on peut comparer la tension superficielle était tendue horizontalement sur le liquide. Lorsque la surface libre d'un liquide est courbe, il n'en est plus de même : dans ce cas, la tension superficielle donne naissance en chaque point à une certaine force qu'on appelle la composante normale.

Il est facile de démontrer que, si on désigne par R et R' les rayons des deux courbures principales de la surface du liquide et

par φ la tension superficielle spécifique de ce liquide, on a pour valeur de la composante normale, par unité de surface du liquide :

$$N = \varphi \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

S'il s'agit par exemple de la surface d'un liquide contenu dans un tube capillaire cylindrique, les rayons R et R' sont égaux, et alors la composante normale N de la tension superficielle est

$$N = \frac{2\varphi}{R}.$$

L'existence de la composante normale permet d'expliquer comment certains corps peuvent rester à la surface d'un liquide, tout en étant plus denses que le liquide; tout le monde a vu faire l'expérience qui consiste à faire flotter sur l'eau une plume ou une aiguille d'acier préalablement rendue grasse: l'eau ne mouille pas le métal dans ces conditions, et il se fait une surface courbe concave, en dessous de l'objet, donnant naissance à une composante normale de la tension superficielle, plus grande que le poids de l'objet métallique.

C'est encore grâce à l'existence d'une composante normale que certains insectes, plus lourds que l'eau, peuvent se maintenir à la surface liquide: tels sont les Hydrométra, les Limnobates, etc.

Maintenant que nous savons ce qu'est la composante normale de la tension superficielle, nous allons comprendre facilement comment la formation des chapelets capillaires peut constituer un obstacle énorme à la transmission d'une pression ou d'une circulation quelconque.

Soit un index liquide dans un tube capillaire dont la paroi est mouillée par ce liquide, et soit H la pression exercée par l'intermédiaire de la bulle d'air placée du côté amb de l'index: sous l'influence de cette pression, la courbure du ménisque amb va augmenter, c'est-à-dire que le rayon de courbure de ce ménisque va devenir *plus petit*, en sorte que la composante normale due à la tension superficielle a pour expression

$$h = \frac{2\varphi}{r'},$$

r' désignant le nouveau rayon de courbure plus petit que le rayon primitif r . Du côté $a'm'b'$, la courbure du ménisque a diminué sous l'influence de la pression, et le rayon de courbure, qui primi-

tivement était aussi r , est devenu *plus grand* et égal à r'' ; la composante normale h' a ici pour valeur

$$h' = \frac{2\sigma}{r''}.$$

Or, remarquons que de ces deux composantes, l'une h se retranche de la pression H exercée sur l'index, tandis que l'autre s'ajoute à H . Mais quelle est celle des deux qui a la plus grande

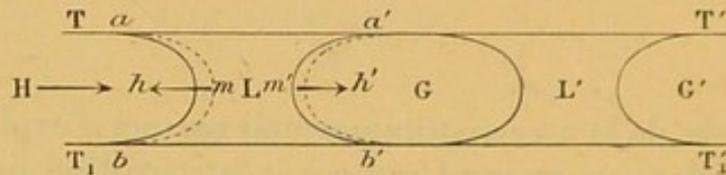


FIG. 4.

valeur, h ou h' ? Il suffit de considérer les expressions de ces deux forces, pour voir que h est plus grande que h' , puisque les numérateurs sont les mêmes et les dénominateurs sont tels que r' est plus petit que r'' .

Il en résulte donc que la force h qui se retranche de H est plus grande que celle h' qui s'y ajoute, et que par suite la pression transmise à l'index liquide suivant par l'intermédiaire de l'index gazeux interposé est nécessairement plus petite que la pression exercée à l'extrémité du tube capillaire.

On conçoit aisément que, s'il existe un assez grand nombre d'index successifs dans le tube capillaire, la pression H pourra parfaitement être équilibrée; c'est ce que l'expérience vérifie, et Jamin a pu faire équilibre à la pression atmosphérique, et même à des pressions de plusieurs atmosphères, à l'aide de tubes contenant des chapelets. Si l'on fait passer dans le bouchon d'une cloche reposant sur la platine de la machine pneumatique un tube à chapelets convenablement préparés, on pourra faire le vide dans la cloche et l'on verra ce vide être très bien tenu par les chapelets.

Si la pression H exercée dans un tube capillaire renfermant une série d'index liquides séparés par des index gazeux est due à la pression artérielle, et si ce tube est un vaisseau sanguin, on comprend, d'après ce qui précède, que le cours du sang pourra parfaitement être arrêté. C'est ce phénomène qui doit quelquefois se produire lors de l'introduction de l'air dans les vaisseaux. Il se fait une véritable émulsion du sang avec l'air; ce sang, ainsi mélangé d'air, en arrivant dans les vaisseaux de petit calibre, forme

de fins chapelets capillaires, et en très grand nombre, qui constituent alors un danger mortel pour le sujet.

Bien que l'explication de la mort par l'introduction de l'air dans les veines soit en général donnée de façon différente, il n'est pas douteux que, dans quelques cas, suivant la façon par exemple dont s'est faite l'entrée de l'air, le phénomène des chapelets ait une très grande part dans l'issue funeste de l'accident. C'est d'ailleurs la théorie dite *pulmonaire* soutenue par Poiseuille et Ericksen : ainsi que l'a constaté Poiseuille, le sang spumeux circule très difficilement dans les capillaires, et la circulation doit nécessairement s'arrêter si le nombre des index est assez grand.

Phénomènes d'imbibition. *Le liquide disparaît du système.* — Ce phénomène capillaire constitue l'*imbibition* ; il est caractérisé par ce fait que le liquide pénètre en certaine proportion dans le solide, sans que celui-ci change d'état. La cause de ce phénomène est l'adhésion qui s'exerce entre les molécules solides et les molécules liquides.

Pour que l'imbibition soit possible, il faut que le liquide mouille le solide, cela est évident.

On appelle coefficient d'absorption ou d'imbibition le rapport qui existe entre le poids du corps solide après l'imbibition et avant l'imbibition. Ce coefficient est très élevé pour certaines substances ; pour le coton hydrophile il doit être égal à 18, pour qu'on puisse l'employer dans la chirurgie.

L'imbibition des corps solides s'accompagne en général d'une augmentation de volume, propriété qui est mise à profit dans certaines applications thérapeutiques, tiges de laminaire, ivoire décalcifié, etc. ; il y a de plus presque toujours, pendant l'absorption du liquide par le solide, élévation de température résultant de la transformation en énergie calorifique de l'énergie mécanique développée par les forces d'adhésion des molécules liquides pour le solide.

L'imbibition des membranes connectives de l'organisme se fait de la même façon que celle des corps poreux ordinaires. Le coefficient d'imbibition n'est pas le même pour tous les tissus ; ainsi, la cornée a un coefficient d'absorption pour l'eau plus élevé que le tissu cartilagineux ; on se sert précisément de cette différence d'absorption pour colorer tel ou tel élément dans les préparations microscopiques.

La nature du liquide qui doit être absorbé par un tissu a

également une grande influence dans la valeur du coefficient d'imbibition. Ainsi, l'imbibition des tissus connectifs par l'eau est plus intense que si cette eau renferme des substances dissoutes : il résulte de là que, pendant l'imbibition d'une membrane, il y aura plus d'eau absorbée que de substance saline dissoute, et par suite le liquide qui reste après l'absorption sera plus riche en sels que le liquide qui imbibe la membrane, ainsi que l'ont démontré Ludwig et Gunning. C'est là l'explication de ce fait que le liquide séreux des transsudations contient moins de sels que le plasma sanguin qui avait produit l'imbibition des tissus ambiants. Il semble qu'avec les solutions des sels de soude, le coefficient d'imbibition des tissus organiques soit moins élevé que celui des dissolutions de potasse.

Le coefficient d'imbibition des membranes a été déterminé par M. Doumer, qui a trouvé des résultats intéressants. Le parchemin végétal présente un coefficient d'imbibition plus grand pour l'eau que pour les diverses solutions ; ainsi, en prenant la même feuille de papier parchemin, on trouve les nombres suivants :

Eau.	1,59
Solution de carbonate du soude au 1/10..	1,53
— — — — — 1/5.	1,49
— d'acide sulfurique au. . . 1/10..	1,56
— de chlorure de sodium. . . 1/10..	1,45
Alcool à 85°.	0,03

Avec le parchemin animal les résultats sont plus intéressants : les acides sont absorbés par cette substance plus facilement que l'eau :

Eau.	2,61
Solution de carbonate de soude au 1/10..	2,19
— d'acide sulfurique . . . 1/10..	2,72
— d'acide citrique.. . . . 1/10..	6,60
Alcool à 85°.	1,18

L'imbibition du parchemin par l'acide citrique est énorme : en effet, lorsqu'on plonge un fragment de parchemin dans une solution citrique, on le voit se gonfler et devenir 4 à 5 fois plus volumineux. Les membranes déjà humides plongées dans l'eau se comportent différemment, suivant leur degré de saturation : si elles ne sont pas saturées, elles absorbent de l'eau jusqu'à saturation complète.

Lorsqu'on plonge une membrane saturée d'eau dans une solution de sel marin, on constate une diminution dans la quantité d'eau absorbée, ce qui s'explique par la diffusion d'une partie du sel dans l'eau d'imbibition, et par une dissolution saline dans l'intérieur de la membrane. Or, cette dissolution ayant un coefficient d'imbibition inférieur à celui de l'eau, une certaine quantité de la dissolution doit sortir de la membrane : de même, si l'on saupoudre de sel marin la surface d'une membrane saturée d'eau, on voit le liquide suinter et s'écouler. Disons enfin que, jusqu'à une certaine limite, l'élévation de température favorise l'imbibition.

Filtration. — Les phénomènes de filtration prennent naissance dans l'organisme, où on rencontre des membranes jouant le rôle de véritables filtres et des liquides placés en contact avec ces membranes sous une certaine pression.

Les actions moléculaires qui ont lieu pendant la filtration permettent d'expliquer comment des particules solides d'une ténuité extrême sont séparées du liquide où elles sont en suspension. Cette séparation n'a pas du tout lieu, comme beaucoup le croient, par tamisation ; ce n'est pas parce que les pores qui constituent un filtre quelconque sont plus étroits que les dimensions des corpuscules contenus dans le liquide qu'il y a filtration ; ce n'est pas comme des grains de blé sur un crible ou de la salade dans un panier, comme le dit M. Duclaux, que les particules solides sont retenues sur la membrane filtrante : c'est grâce à un phénomène d'adhésion moléculaire que ces particules sont arrêtées dans les pores du filtre.

Une expérience, facile à répéter, et due à M. Duclaux, montre bien l'existence de ces phénomènes d'adhésion des particules suspendues dans le sein d'un liquide par les parois solides. Dans un tube étroit, ouvert aux deux bouts, on verse de l'eau tenant en suspension de l'oxalate de chaux, puis on lave le tube à l'eau distillée, de manière à chasser le dépôt d'oxalate qui s'est fait par adhésion moléculaire le long des parois. Si on ferme l'extrémité inférieure et qu'on introduise dans le tube un peu d'eau, on constate que, même après un lavage prolongé, on peut recueillir par ramonage du tube par l'eau introduite une quantité d'oxalate assez grande pour rendre louche l'eau du tube.

Les conditions physiques qui accompagnent la filtration sont déterminées par les lois de Poiseuille relatives à l'écoulement des

liquides dans les tubes capillaires et sur lesquelles nous nous sommes déjà étendus. On a vu que la quantité de liquide qui traverse un tube capillaire est donnée par la formule

$$Q = \frac{K H d^4}{l}.$$

Dans la filtration, les canaux capillaires constituant les pores se comportent comme des tubes capillaires et les lois leur sont applicables.

Dans l'organisme, les membranes poreuses diffèrent les unes des autres ; ainsi, les membranes connectives n'ont pas de pores proprement dits ; la filtration se fait à travers les interstices moléculaires : par suite, toutes les causes qui modifieront la grandeur de ces interstices auront une grande influence sur la filtration, par exemple la tension des membranes connectives, ou encore le côté de la membrane qui est tourné vers le liquide à filtrer. MM. Schmidt et Reinhart ont constaté que les différences dans la quantité de liquide filtré pouvaient être comme 1 est à 10, suivant qu'on tournait la face superficielle ou la face profonde vers le liquide aqueux à filtrer.

Le liquide à filtrer intervient aussi pour faire varier la quantité de filtratum : d'une manière générale, un liquide filtre d'autant plus vite qu'il imbibe plus facilement la membrane ; de même, les liquides colloïdes filtrent beaucoup plus lentement que les liquides cristalloïdes.

Enfin, la température du liquide fait aussi varier la quantité de filtratum : plus la température est élevée, plus le liquide filtre rapidement.

Le 2^e facteur à considérer dans la formule de Poiseuille est la pression H supportée par le liquide à filtrer. Cette influence est considérable dans les phénomènes de filtration dans l'organisme.

Le diamètre des pores à travers lesquels se fait le passage du liquide est évidemment l'élément le plus important dans la filtration, puisqu'il entre 4 fois comme facteur : on peut presque dire que c'est lui qui fait la loi. Plus les pores d'une membrane ou d'un filtre seront grands, plus la vitesse de filtration sera elle-même considérable. Le dernier facteur qui fait varier la quantité de liquide filtré est l'épaisseur du filtre ; plus le filtre sera épais, plus sera faible la rapidité de la filtration. Toutes ces lois s'appliquent dans l'organisme.

Un des organes où s'opère le plus fréquemment la filtration, c'est l'intestin. Cette filtration a lieu chaque fois que les parois de l'intestin se contractent et exercent une pression sur le contenu intestinal ; cette action est habituellement très faible. Il y a également filtration quand il s'établit une pression négative dans les villosités : une diminution de pression au-dessous d'un filtre équivaut évidemment à une augmentation qui s'exercerait au-dessus du filtre. Lorsque les villosités se contractent, le contenu de leurs vaisseaux sanguins et de leurs vaisseaux chylifères diminue ; ces derniers, en particulier, restent vides à cause des nombreuses valvules des lymphatiques qui s'opposent au reflux du chyle dans les chylifères. Quand les villosités se relâchent, les liquides de l'intestin passent par filtration dans leur intérieur.

Phénomènes de dissolution. *Le solide disparaît du système et passe à l'état liquide.* — Lorsqu'un corps solide et un corps liquide sont en présence sans exercer d'action chimique l'un sur l'autre, il peut arriver que le solide disparaisse en totalité ou en partie, pour passer à l'état liquide. Ce phénomène moléculaire s'appelle dissolution. Comme on le voit, c'est la contre-partie de l'imbibition. Dans l'un et l'autre cas, l'un des corps disparaît dans l'autre.

Pendant qu'un corps solide passe à l'état liquide en disparaissant dans le milieu liquide ambiant, il se fait un travail moléculaire qui absorbe de la chaleur à ce milieu ambiant, en sorte que la température du système s'abaisse. Si donc on fournit de la chaleur au dissolvant, le phénomène de la dissolution sera activé, c'est-à-dire que la rapidité du phénomène sera augmentée. L'élévation de température a une autre influence : elle accroît la quantité du corps solide que doit dissoudre le liquide. C'est un fait connu de tout le monde.

Cependant, il existe des exceptions à cette règle : la solubilité de certains composés de calcium, hydrate, isobutyrate, le sulfate de cérium, diminue lorsqu'on élève la température.

Lorsqu'à l'aide d'une élévation de température, on a fait dissoudre dans un liquide une grande quantité de corps solide et qu'ensuite on laisse refroidir la dissolution à l'abri des poussières de l'air et sans agiter, il arrive que la dissolution reste intacte, qu'il ne se dépose aucune parcelle solide, quoique, pour la température ordinaire, le liquide renferme une plus grande quantité

de solide que celle qui correspond à son coefficient de solubilité à la même température. On dit dans ce cas que le liquide est sursaturé et le phénomène prend le nom de sursaturation. Les molécules dissoutes sont alors dans un état d'équilibre instable, et il suffit d'une modification brusque, d'un ébranlement subit, ou mieux de l'introduction d'un fragment du corps dissous, pour voir le système devenir solide. Le groupement moléculaire qui s'opère à ce moment produit une élévation de température très notable.

Le point de congélation d'une dissolution est toujours plus bas que celui du dissolvant: ainsi, une dissolution aqueuse d'un sel se congèle au-dessous de zéro, au lieu de se congeler, comme l'eau, à 0° exactement. M. Raoult a trouvé des lois qui ont permis de déterminer le poids moléculaire des substances par la connaissance de l'abaissement du point de congélation, lois dont nous devons dire quelques mots, parce que nous aurons occasion de nous en servir plus tard.

Si l'on a fait dissoudre un poids p d'une substance dans 100 grammes d'un dissolvant pur, et si l'abaissement du point de congélation produit par ce poids p est égal à θ° , le quotient $\frac{\theta}{p}$ représente l'abaissement produit par l'unité de poids de la substance: c'est le *coefficient d'abaissement* du point de congélation.

Le produit de ce coefficient d'abaissement $\frac{\theta}{p}$ par le poids moléculaire m de la substance dissoute, a été appelé par M. Raoult *abaissement moléculaire* du point de congélation. Eh bien, une des principales lois découvertes par le savant chimiste de Grenoble, est la suivante: dans un dissolvant donné, aucune substance ne produit un abaissement moléculaire supérieur à un chiffre donné, variable avec chaque dissolvant. Ainsi, pour l'eau, l'abaissement moléculaire $\frac{\theta}{p} \times m$ est égal à 47° ; pour l'acide acétique il est égal à 39° , etc. Il résulte de là que, si l'on connaît p et θ , il sera très facile d'obtenir la valeur de m .

La méthode dont nous venons d'exposer le principe s'appelle *cryoscopie*; elle est aujourd'hui très employée concurremment avec d'autres, d'ailleurs, qui doivent toutes se vérifier mutuellement.

La dissolution d'une substance solide dans un liquide modifie

aussi la tension de vapeur du dissolvant. La tension de vapeur émise par un liquide contenant en dissolution une certaine quantité de substance fixe, est plus petite que celle du liquide pur.

Si on désigne par n le nombre de molécules dissoutes dans 100 molécules du dissolvant, par f la tension de vapeur du liquide pur et par f' celle de la dissolution, l'expression $\frac{f-f'}{f-n}$ s'appelle la *diminution moléculaire* de la tension de vapeur du liquide. Raoult a trouvé que, pour une molécule d'une substance fixe dissoute dans 100 molécules d'un liquide volatil quelconque, la tension de vapeur de ce liquide diminuait d'une fraction à peu près constante de sa valeur et voisine de 0,0104. On a donc :

$$\frac{f-f'}{fn} = 0,0104.$$

Cette égalité permet de déterminer soit le poids moléculaire du corps dissous, en fonction du poids moléculaire du dissolvant, soit le poids moléculaire du dissolvant, si l'on connaît celui du corps dissous, en se servant de la formule

$$\frac{m}{m'} = 0,0104 \times \frac{fp}{f-f'}$$

p étant le poids de substance dissoute dans 100 grammes du dissolvant volatil, car on a aussi :

$$\frac{m}{m'} = \frac{p}{n}$$

On a donné à cette méthode de détermination des poids moléculaires le nom de *tonométrie*.

Enfin, le point d'ébullition, comme le point de congélation, des dissolutions n'est pas le même que celui du dissolvant pur : on sait que, lorsqu'un liquide contient un corps solide en dissolution, la température à laquelle il bout est plus élevée qu'avant la dissolution. C'est ainsi que l'eau contenant 40 pour 100 de sel marin entre en ébullition à 108°,4 ; avec 325 pour 100 de chlorure de calcium, le point d'ébullition est porté à 179°,5.

Pression osmotique. — Un autre phénomène qu'il faut étudier maintenant, à propos des dissolutions, c'est la pression osmotique. On verra quelles sont les nombreuses applications que

nous en ferons pour expliquer certains phénomènes de l'organisme.

Les phénomènes moléculaires qui se rapportent à cette intéressante question ne doivent pas être confondus avec ceux qui constituent l'osmose ordinaire, telle par exemple qu'on l'étudie avec l'osmomètre de Dutrochet. La pression osmotique n'est pas synonyme de force osmotique, et il est regrettable de voir quelquefois employer ce dernier terme à la place du premier. C'est à des molécules salines en dissolution que se rapporte l'expression de pression ou de tension osmotique, et cette expression a le même sens que celui qu'on lui donne quand il s'agit de molécules gazeuses. D'ailleurs, la description qui va suivre fera bien comprendre la différence qui existe entre les actions moléculaires qui donnent naissance à l'osmose ordinaire et celles qui sont la cause de la pression osmotique.

C'est à la suite des travaux de botanistes, Hugo de Vries, Pfeffer, que ce phénomène fut étudié méthodiquement par les physiciens et que Van't Hoff établit une théorie nouvelle des dissolutions.

En étudiant les échanges qui ont lieu chez les végétaux entre l'eau puisée dans le sol et les sucres salins des cellules végétales, Pfeffer fut amené à expérimenter sur un certain nombre de parois poreuses artificielles perméables aux liquides, entre autres les vases poreux en faïence déglazée, tels que les vases de piles : mais, au lieu de se servir de ces vases tels qu'on les trouve dans le commerce, Pfeffer eut l'idée d'en modifier la porosité en faisant déposer dans l'épaisseur de la cloison un précipité chimique, capable de faire acquérir une propriété tout à fait particulière à la paroi, qui devient alors imperméable.

Pour obtenir une telle paroi, on prend un vase de pile soigneusement lavé aux acides et aux alcalis, puis bien rincé à l'eau. Le vase, bien essuyé et séché, est rempli d'une solution à 3 pour 100 de sulfate de cuivre, et, dix minutes après, placé debout dans une solution au même titre de ferrocyanure de potassium. Les deux liquides pénètrent en sens inverse dans la substance poreuse et se rencontrent vers le milieu de la cloison, où ils forment un précipité de ferrocyanure de cuivre gélatineux ; ce précipité constitue une sorte de membrane interne très délicate, protégée de chaque côté par un revêtement solide de faïence.

La propriété particulière de la paroi ainsi obtenue est la suivante : au lieu de se laisser traverser, comme avant la manipu-

lation précédente, aussi bien par l'eau que par les solutions, et cela dans les deux sens, la cloison renfermant le précipité se laisse traverser par l'eau pure, mais *ne laisse plus passer la moindre quantité de matière saline*.

Si l'on place à l'intérieur du vase préparé une solution de sel marin et que l'on plonge l'appareil dans de l'eau pure, l'eau pourra traverser la paroi de dehors en dedans, mais la solution saline ne passera pas à travers cette paroi, et il n'y aura par conséquent pas de courant osmotique en sens inverse, de dedans en dehors. C'est à cause de cette nouvelle propriété de la paroi qu'on lui a donné le nom de *membrane hémiperméable*. L'obtention d'une telle membrane est très difficile, car, sur cent vases traités, Pfeffer n'en réussissait que deux seulement.

Avant Pfeffer, Traube avait, en 1867, obtenu une membrane hémiperméable avec laquelle il avait fait des expériences très curieuses. Cette membrane était formée de la façon suivante : il avait pris deux solutions assez faibles, l'une de gélatine, l'autre de tannin, et avait fait avec la première une grosse goutte à l'extrémité d'une baguette de verre qu'il laissa sécher pendant plusieurs heures, et qu'il plongea ensuite dans la seconde solution ; il vit se former à la surface de la goutte de gélatine une pellicule irisée, qui constituait une véritable membrane hémiperméable que Traube appela membrane de précipitation.

Lorsque cette sorte de cellule artificielle est plongée dans une solution de tannin, on constate que l'eau pénètre seule, sans entraîner le tannin dissous ; en effet, la masse de gélatine contenue à l'intérieur de la membrane continue à rester fluide, tandis qu'elle se prendrait en une masse solide s'il y avait pénétration de tannin.

Prenons maintenant une paroi hémiperméable de Pfeffer et fixons-y par un bouchon solide un tube à deux branches, permettant de le remplir du liquide qu'on étudie et de le mettre en communication avec un manomètre à air libre. Si l'on a placé dans le vase une solution saline à 1 pour 100, de façon à remplir complètement le vase et le tube manométrique jusqu'au mercure, puis que l'on plonge l'appareil dans de l'eau distillée, celle-ci entre dans le vase clos pour diluer le sel, et cela malgré la pression qui est la conséquence de sa pénétration dans un récipient rigide et déjà plein. La pression, qui peut atteindre ainsi plusieurs atmosphères, est la *pression osmotique*. Elle est dans chaque cas parfaitement fixe et définie après l'état d'équilibre qui se produit toujours.

A priori, il est permis de se demander, puisque la paroi hémiperméable laisse passer l'eau en tous sens, pourquoi l'eau extérieure, qui est à la pression normale, entre dans un vase exactement rempli de solution sous cette même pression : il ne devrait se produire aucune action, semble-t-il, car si la tension de l'eau s'accroît par hypothèse dans le vase interne, elle peut en sortir aussitôt à travers la paroi et rétablir l'équilibre. Mais la pression osmotique n'est pas due au liquide ; c'est aux *molécules salines seules* que l'on doit, ainsi que l'a montré Van't Hoff, attribuer cette pression osmotique.

Le vase à membrane hémiperméable a été rempli d'une solution à la pression atmosphérique qui est aussi celle de l'eau extérieure ; mais, dans la solution, le dissolvant d'une part, les molécules salines d'autre part, ont chacun une fraction de la pression totale, absolument comme dans le cas des mélanges gazeux. En sorte que l'eau intérieure servant de dissolvant n'est pas à la même pression que celle qui est à l'extérieur, si bien que celle-ci pénètre dans le vase jusqu'à ce qu'il y ait équilibre de pression pour l'eau en dedans et en dehors. L'augmentation π de la pression, c'est-à-dire la pression osmotique, est donc bien le résultat des actions produites par les molécules salines.

L'existence de la pression osmotique et la possibilité de sa mesure, d'après les expériences de Pfeffer, ont conduit Van't Hoff à une théorie des dissolutions étendues. On admet, d'après les idées de Bernouilli et de Clausius, que les gaz sont constitués par de très petites particules ou molécules animées d'un mouvement extrêmement rapide de translation. Si le gaz n'était contenu dans une enveloppe, ces molécules chemineraient indéfiniment ; mais, placées dans un récipient quelconque, elles viennent heurter continuellement la paroi, et les chocs ainsi produits déterminent une poussée continue qu'on appelle la pression ou la tension du gaz. Si l'on vient à faire occuper au gaz la moitié du volume primitif, la pression augmente du double, parce que le même nombre de molécules, exerçant des chocs sur une paroi deux fois plus petite, y développe une pression deux fois plus grande : on reconnaît là la loi de Mariotte.

D'après la théorie de Van't Hoff, la pression osmotique est aux solutions ce qu'est la tension ordinaire aux gaz et aux vapeurs : les molécules du corps dissous se meuvent librement dans le dissolvant, frappant la paroi du vase, comme les molécules gazeuses, et donnant naissance à la pression osmotique.

Cette théorie est confirmée par l'application des lois de Mariotte, de Gay-Lussac et d'Avogadro aux dissolutions. On sait que le produit de la pression d'un gaz par son volume est égal au produit de la température *absolue* T de ce gaz par une constante R, en sorte que l'on a

$$p v = R T.$$

Cette constante R pour les gaz est égale à 84 700.

Si on applique cette formule à une solution en remplaçant p par la pression osmotique π , on arrive au même résultat numérique. Les solutions suivent donc bien les mêmes lois que les gaz, à savoir :

1° A une même température, à concentration moléculaire égale, c'est-à-dire quand le même nombre de molécules occupe le même espace, les divers corps dissous ont la même pression osmotique (loi d'Avogadro).

2° Pour une augmentation de température d'un degré centigrade, un gaz augmente de $\frac{1}{273}$ de son volume ; mais, si le volume ne peut varier, c'est la pression qui augmente. Cette pression est en raison directe de la température absolue et en raison inverse du volume.

Pour une solution, cette loi s'applique aussi : la pression osmotique augmente avec la température et l'accroissement de pression est de l'ordre de grandeur tel que l'indique la loi de Gay-Lussac. Ainsi, pour le sucre de canne, on trouve :

		CALCULÉE	OBSERVÉE		
Températures	{	32°	Pression osmotique {	544	»
		14°		510	512

De même, avec le tartrate de sodium, la vérification se fait encore très bien.

		CALCULÉE	OBSERVÉE		
Températures	{	37°3	Pression osmotique {	983	»
		13°3		908	907

3° Lorsqu'on augmente la quantité de matière dissoute dans un espace donné (concentration), la pression osmotique croit (Pfeffer et Van't Hoff).

CONCENTRATION c	PRESSION OSMOTIQUE π	RAPPORT $\frac{\pi}{c}$
1 o/o	535 mm	535
2	1016 .	508
2,74	1518	554
4	2072	521
6	3075	513

Il y a donc bien proportionnalité entre les concentrations et la pression osmotique correspondante.

Il existe encore une proportionnalité entre la pression osmotique et l'abaissement du point de congélation des dissolutions. On a en effet

$$t - t' = k \pi,$$

formule qui montre que l'abaissement $t-t'$ du point de congélation est proportionnel à la pression osmotique.

En déterminant l'abaissement du point de congélation d'une dissolution par l'appareil à cryoscopie de M. Raoult, il est donc possible de connaître la pression osmotique due aux molécules dissoutes.

Isotonie. — Mais il est un autre phénomène qui permet d'avoir une valeur de la pression osmotique d'une dissolution, c'est l'*isotonie* découverte par Hugo de Vries, d'Amsterdam.

Supposons une membrane hémiperméable séparant deux solutions salines ayant des concentrations différentes; l'eau, capable de traverser la paroi, cheminera dans cette membrane jusqu'à ce qu'il s'établisse un équilibre osmotique.

M. de Vries est arrivé à la notion de l'*isotonie* en opérant sur des cellules végétales. Si l'on fait une coupe assez mince d'un végétal pour qu'elle puisse être vue au microscope dans toute son épaisseur, on peut apercevoir des cellules intactes contenant leurs sucs, revêtues de leurs enveloppes et jouant le rôle de parois hémiperméables, grâce à la couche cuticulaire de leur protoplasma.

Si, sur le porte-objet du microscope, on mouille la préparation avec la solution aqueuse d'un sel à 1, 2, ... n pour 100, il y aura intervention de phénomènes moléculaires commandés par la pression osmotique: les cellules intactes prendront de l'eau aux solutions

les plus étendues et on les verra se *gonfler*, tandis qu'au contraire *elles se contracteront* pour les solutions d'un rang plus élevé dans la série, auxquelles elles cèderont de l'eau. La concentration pour laquelle il n'y a aucune variation de turgescence sera en équilibre osmotique avec le suc cellulaire du végétal considéré. En examinant de la même façon plusieurs sels, on obtiendra par tâtonnement pour chacun d'eux une concentration correspondant à l'équilibre osmotique du suc cellulaire. On aura donc facilement ainsi ce qu'on appelle le *coefficient isotonique* de chaque solution.

Il résulte de là que, si on rapporte les résultats obtenus pour divers corps à un sel dont on connaît déjà la pression osmotique π correspondant à la concentration isotonique, la pression osmotique pour ces corps se trouve déterminée. Il y a donc dans un simple examen microscopique un moyen détourné de mesurer la pression osmotique.

Mais le point le plus important, au point de vue pratique, de la découverte de H. de Vries et de la notion du coefficient isotonique, c'est moins la possibilité de mesurer la pression osmotique elle-même que celle de reconnaître à quel moment l'équilibre osmotique est atteint, lorsque deux solutions de concentration différente sont séparées par une paroi hémiperméable.

Dans ces conditions, il y a un courant du dissolvant de la solution ayant la plus faible concentration vers celle dont la concentration est la plus grande. Les molécules du corps dissous se disputent pour ainsi dire le dissolvant à travers une membrane qui ne les laisse pas passer.

Bien que la pression osmotique soit le point de départ de cette étude si importante, c'est l'isotonie qui, en réalité, va nous intéresser le plus dans les phénomènes moléculaires de ce genre relatifs à l'organisme, et nous devons nous y arrêter un instant.

Nous examinerons le cas des cellules végétales et ensuite le cas des globules rouges comme moyens de mesure des coefficients isotoniques.

Méthode de H. de Vries. — Les cellules végétales, dont nous avons mis tout à l'heure en évidence le rôle physique, sont constituées par une enveloppe, une couche de protoplasma, un noyau et une grande vacuole remplie d'une solution complexe qu'on appelle suc cellulaire. Le protoplasma jouit de la propriété d'être hémiperméable comme la membrane de Pfeffer. Que va-t-il arriver lorsqu'une cellule est plongée dans l'eau ? Ce que nous

savons déjà de la pression osmotique et de l'isotonie nous indique que l'utricule protoplasmique va être distendue et appliquée fortement contre l'enveloppe de la cellule qui est très élastique : il arrive donc un moment où la tension de cette enveloppe fait équilibre à la pression osmotique due aux molécules dissoutes dans le suc cellulaire. La cellule est alors turgescente.

Si, au contraire, la cellule plonge non plus dans de l'eau mais dans une solution suffisamment concentrée, l'eau du suc cellulaire traverse la couche de protoplasma et la cellule diminue de volume ; à mesure que l'eau sort de la vacuole, le protoplasma remplit de moins en moins l'espace limité par l'enveloppe, il se détache et bientôt l'ensemble de la vacuole, du protoplasma et du noyau est réduit à une masse arrondie. La succession de ces phénomènes régis par l'existence de la pression osmotique et de l'isotonie a reçu le nom de plasmolyse ; celle-ci est donc produite par la nécessité de l'équilibre entre la concentration du suc cellulaire et celle de la solution extérieure.

H. de Vries attribue à la couche limitante interne formant la paroi des vacuoles une existence propre et lui donne le nom de *tonoplaste*. Pour isoler le tonoplaste, H. de Vries plonge la cellule dans une solution de nitrate de potassium à 10 pour 100, colorée en rose par l'éosine. Sous l'influence de ce liquide, la turgescence disparaît, le protoplasma se contracte et il ne tarde pas à se colorer en rouge, ce qui indique qu'il est mort. On voit apparaître alors une ou plusieurs vésicules claires, remplies de suc cellulaire et entourées d'une membrane hyaline et incolore ; la paroi de ces vésicules est restée incolore, tandis que le noyau et le protoplasma tout entier sont imprégnés d'éosine : seule, dans le contenu cellulaire, elle s'est maintenue en vie.

Les vacuoles ainsi isolées peuvent persister pendant plusieurs jours après la mort du protoplasma et l'on peut faire sur elles les expériences de tension osmotique : elles augmentent de volume quand la concentration du liquide extérieur devient moindre ; elles se contractent au contraire quand on remplace cette solution par une autre plus concentrée. Ces faits conduisirent H. de Vries à admettre que le tonoplaste forme dans la cellule végétale un organe différencié du protoplasma. Il se rapproche par ses caractères d'hémiperméabilité de la couche limitante externe du protoplasma, mais il résiste beaucoup mieux qu'elle aux influences nocives.

Maintenant que nous avons étudié le mécanisme de la plasmolyse-

lyse, voyons comment on peut déterminer le coefficient isotonique de diverses solutions salines en se servant de ce phénomène. Si l'on cherche les concentrations les plus faibles, non seulement de nitrate de potassium, mais aussi d'autres sels capables de produire encore la plasmolyse, on trouve qu'entre ces concentrations il existe un rapport simple : pour quelques sels, les concentrations sont proportionnelles aux poids moléculaires. Si une solution de nitrate de potassium à 1,01 pour 100 peut produire une plasmolyse appréciable, la plasmolyse se produira également avec une solution de bromure de potassium à 1,14 pour 100, avec une solution de chlorure de potassium de 0,745 pour 100, les poids moléculaires de ces sels étant respectivement 101, 119, 74,5. Cependant, pour les sels alcalins à deux et à trois atomes d'alcali par molécule, il faut multiplier le poids moléculaire par un certain coefficient.

On trouve aussi que si une solution de nitrate de potassium à 1,01 pour 100 peut encore produire la plasmolyse dans une cellule végétale, la même chose se produira aussi avec une solution de sulfate de potassium à 1,3 pour 100 et une solution de sucre de canne à 5,13 pour 100. Nous savons que les solutions du genre des trois précédentes, qui possèdent la même puissance d'attraction à l'égard de l'eau, sont isotoniques. Une solution de sucre à 5,13 pour 100 est isotonique avec une solution de nitrate de potasse à 1,01 pour 100 ; c'est à cette dernière solution que H. de Vries compare les autres solutions.

Méthode de Hamburger. — Il n'y a pas que les cellules végétales qui puissent servir à étudier l'isotonie des différentes solutions ; récemment, Hamburger a pris comme réactif de l'isotonie les *globules du sang*.

Le principe de sa méthode est le suivant. Versons 20^{cc} d'une solution de nitrate de potassium à 1,1 ; 1,08 ; 1,06 ; 1,04 ; 1,02 ; 1 ; 0,98 ; 0,96 ; 0,94 pour 100 dans neuf éprouvettes et ajoutons 5 gouttes de sang de bœuf défibriné ; laissons reposer après agitation. Nous constaterons que, dans les premières éprouvettes, les globules rouges se sont déposés et *n'ont communiqué au liquide aucune teinte*, tandis que dans les autres le liquide est, au-dessus des globules déposés, *coloré en rouge*. Avec la solution à 1,02 pour 100 les globules gardent leur matière colorante ; avec la solution à 1 pour 100 ils en perdent une petite quantité.

Si maintenant on cherche pour d'autres sels deux limites de concentration produisant le même résultat que les deux précé-

dentes relatives au nitrate de potassium, on trouve que les solutions moyennes entre ces deux limites de concentration sont isotoniques.

Cette méthode de détermination du coefficient isotonique est, comme on le voit, très simple et les résultats qu'elle fournit s'accordent bien avec les nombres trouvés par la méthode de la plasmolyse. Voici quelques chiffres obtenus par l'un et par l'autre procédé.

SELS	HAMBURGER	DE VRIES
Nitrate de potassium..	1.01 0/0	1.01 0/0
Chlorure de sodium. .	0.59	0.585
Sulfate de potassium..	1.11	1.30
Sucre de canne. . . .	5.96	5.13
Sulfate de magnésie. .	1.78	1.80
Chlorure de calcium..	0.823	0.83

Ces données, établies avec le sang de bœuf, sont également exactes avec le sang humain, le sang de cheval, d'oiseau, de grenouille et de poisson. Hamburger a pu, sur le sang de grenouille, trouver quelle est la concentration de la solution de chlorure de sodium qui est isotonique avec le plasma de cet animal : par l'examen microscopique des hématies, on constate que les globules restent inaltérés avec une solution de NaCl à 0,64 pour 100, de AzO^3K à 1,09 pour 100, de sucre à 5,59 pour 100, tandis qu'avec de plus fortes concentrations, les globules sanguins sont altérés.

Il en résulte que ces solutions doivent être isotoniques avec le plasma ou avec le sérum ; en effet, il faut étendre le sérum de la grenouille de la même quantité d'eau que la solution de NaCl à 0,64 pour 100, pour produire le dégagement de la substance colorante hors des globules rouges. La concentration du NaCl produisant ce résultat est de 0,21 pour 100.

Ce fait est certainement d'un haut intérêt : il prouve que le sérum de la grenouille est isotonique avec une solution de NaCl à 0,64 pour 100 ; ensuite il montre que l'on peut étendre le sérum avec beaucoup d'eau avant que la substance colorante se dégage des hématies. Cela est vrai aussi pour le sang d'homme, de cheval, de bœuf, d'oiseau, de poisson. Ainsi, pour le sang de bœuf, il faut étendre le sérum de 60 à 90 pour 100 avant qu'il soit capable d'enlever à ses globules un peu de la matière colorante.

L'importance de ces expériences est considérable, si l'on se

rappelle que la richesse en eau du plasma est soumise à de grandes variations et que la présence d'hémoglobine libre dans le sang est pleine de dangers pour la vie de l'individu.

Tout en permettant de faire la détermination du coefficient isotonique des différents corps, la méthode de Hamburger a permis de découvrir certaines propriétés importantes des globules rouges. Une de ces propriétés des hématies est de conserver constante leur tension osmotique.

Nous pouvons comprendre par ce qui précède que, si on ajoute un peu de sang défibriné à une très faible solution de nitrate de potassium, les hématies absorberont de l'eau jusqu'à ce que la concentration de leur contenu représente le même pouvoir attractif à l'égard de l'eau, c'est-à-dire la même tension osmotique, que la solution de nitrate. Par suite de cette absorption d'eau, quelques globules se gonflent à tel point, qu'ils perdent leur substance colorante, et le liquide qui est au dessus des hématies prend alors une teinte légèrement rouge. Eh bien, lorsqu'on étudie les globules traités par une solution de nitrate de potasse ou de chlorure de sodium au moment où ils laissent échapper leur matière colorante, les limites de concentration, aussi bien pour le non-dégagement que pour le dégagement de cette substance colorante, demeurent *sans changement*. Si, par exemple, les limites sont pour le NaCl 0,61 pour 100 et 0,60 pour 100, elles restent encore les mêmes, lorsque ces globules ont été au préalable traités par le nitrate et qu'ils ont par conséquent dégagé beaucoup de chlore et absorbé du nitrate de potassium.

Cette constance de la tension osmotique des globules ne s'explique que si on admet que les hématies échangent quelques-uns de leurs éléments avec les corps ambiants. Cette propriété est fondamentale, car elle permet de comprendre pourquoi, dans les globules rouges du sang, on retrouve les chiffres d'isotonie de H. de Vries, lorsqu'on utilise comme réactif indicateur le moment même de la sortie visible de la matière colorante.

Un autre point étudié par Hamburger est relatif aux globules *en circulation*. Si on injecte sur un cheval 7 litres d'une solution à 5 pour 100 de sulfate de soude, qui devrait porter le coefficient isotonique de 1,6 à 3,2, en admettant que les vaisseaux et les corpuscules du sang soient parfaitement imperméables, on constate déjà pendant l'injection une abondante évacuation d'urine, de la salivation, du larmolement, et dans toutes les sécrétions on trouve une grande quantité de sulfate sodique.

En cherchant, après l'injection, le coefficient isotonique du milieu qui baigne les globules, on observe que ce coefficient, qui devrait être très supérieur à celui du plasma du cheval, ne l'est déjà plus *quelques minutes après l'injection*. Quelle est la raison de ce retour à la valeur normale du coefficient isotonique du sérum sanguin ? La composition du sérum s'est-elle reconstituée aussitôt ? Des analyses ont montré qu'il n'en était rien. C'est au système vasculaire, d'après Hamburger, qu'est due cette constance du coefficient isotonique, et c'est à une sécrétion endothélio-vasculaire qu'il faut attribuer cette constance isotonique des globules rouges.

Méthode cryoscopique. — Dans l'étude générale de la pression osmotique, nous avons vu que cette pression est proportionnelle à l'abaissement du point de congélation de la dissolution saline considérée. Nous savons aussi que deux solutions qui sont isotoniques contiennent le même nombre de molécules du corps dissous et que la pression osmotique qui se rapporte à ces deux solutions est la même. Il résulte de là qu'indépendamment des deux méthodes de détermination du coefficient isotonique que nous venons d'étudier, on a aussi dans la mesure du point de congélation des dissolutions salines un moyen commode pour rechercher l'isotonie : c'est la *méthode cryoscopique*. Le réactif, dans cette troisième méthode, est donc la température de congélation du liquide étudié.

Etant donné un liquide aqueux dont on veut, par exemple, trouver le coefficient isotonique par rapport au chlorure de sodium, la méthode cryoscopique consiste à déterminer le point de congélation du liquide à l'aide de l'appareil de Raoult, puis à faire une série de solutions de NaCl à des concentrations variables, comme pour les méthodes de H. de Vries et de Hamburger, et à déterminer ensuite pour chacune d'elles le point de congélation : celle qui, à la même température de solidification, est isotonique avec le liquide étudié. Par conséquent, ces deux liquides, liquide étudié et solution de NaCl, se comporteraient de la même manière avec les cellules végétales et avec les globules rouges : ils ont même coefficient isotonique, même pression osmotique.

La méthode cryoscopique est certainement la plus commode pour l'étude des liquides physiologiques de l'organisme, et c'est à elle que s'est adressé M. Winter qui a fait sur cette question d'importants travaux. On conçoit en effet qu'il soit beaucoup plus facile de rechercher le point de solidification des liquides *aqueux*

de l'organisme que d'employer pour ces mêmes liquides, toujours plus ou moins visqueux, les procédés de de Vries ou de Hamburger.

Liquides de l'organisme. — Un des premiers résultats de Winter (1) est relatif au sérum des différents animaux. Si on détermine les températures de congélation des sérums, ou trouve, comme abaissement du point de congélation par rapport à l'eau :

Sérum de cheval..	0°,55
— bœuf.	0°,55
— chien.	0°,565
— lapin.	0°,57
— mouton.	0°,55
— porc.	0°,55

On voit nettement, par la concordance de ces chiffres, que les sérums de ces différentes espèces animales sont isotoniques.

Un autre point important trouvé par Winter, c'est que le lait d'un animal a le même coefficient isotonique que le sérum de ce même animal.

Il est facile, d'après ce qu'on sait sur la pression osmotique, de comprendre le rôle de la constance ou de la variation du coefficient isotonique des différents liquides de l'organisme, au point de vue des échanges cellulaires qui règlent la nutrition des tissus. Dès qu'en un point de l'organisme il y a modification de la concentration du suc cellulaire, des échanges, commandés par la nécessité de l'équilibre osmotique, interviennent, de manière à ramener la concentration du liquide cellulaire à une valeur correspondant à l'isotonie du liquide des cellules voisines.

Le mécanisme des sécrétions s'éclaire alors d'un jour nouveau, et il est impossible aujourd'hui de ne pas faire intervenir le phénomène de la pression osmotique dans les actes sécrétoires.

Sécrétion de l'urine. — Parmi les liquides les plus importants que nous éliminons, il faut placer l'urine. Examinons la manière dont intervient l'isotonie dans l'excrétion de l'urine et par suite dans la fonction rénale. D'après les déterminations de Winter, l'urine est le liquide de l'organisme qui a le plus fort coefficient isotonique, c'est-à-dire le point de congélation le plus bas. La concentration saline de l'urine est plus grande que celle des autres liquides organiques et en particulier du sérum. Le point de con-

(1) WINTER. *Archives de Physiologie*, 1896, p. 114.

gélation de l'urine est en moyenne — 1°,85, tandis que celui du sérum est — 0°,55.

Si nous considérons un point du rein où l'urine est en rapport osmotique avec le sang, l'entraînement de l'eau du sang vers l'urine est sous la dépendance de l'isotonie, c'est-à-dire de la tendance à cet équilibre osmotique dont nous avons parlé souvent déjà.

Si bien que, si on désigne par C la concentration de l'urine correspondant à l'abaissement du point de congélation de l'eau pure de 1°,85 et par c celle du plasma sanguin dont la congélation se produit à — 0°,55, le passage de l'eau du sang vers l'urine sera sous la dépendance de la différence des coefficients C et c : c'est-à-dire que, si on appelle q la quantité d'eau qui passe du sang dans l'urine dans une minute, on a, en désignant par K une constante dépendant du sujet et de certaines conditions biologiques :

$$q = k (C - c).$$

Il y a proportionnalité entre la quantité d'eau qui va du sang vers l'urine, dans un temps donné, et la différence de concentration de ces deux liquides. La fonction du rein dépend de cette différence. Si ces deux coefficients deviennent égaux, ce qui aurait lieu si le point de congélation de l'urine était trouvé égal à 0°,55, on aurait alors $C = c$ et par suite $q = 0$. Il n'y aurait alors aucune sortie de l'eau du sang, aucune excrétion urinaire: il y aurait par conséquent de l'anurie totale.

Que le phénomène osmotique dont nous venons de parler se passe au niveau du glomérule de Malpighi du côté de l'endothélium de la capsule de Bowmann, ou au niveau des tubuli contorti, peu importe au point de vue physique: ce qu'il y a de très important à retenir, c'est que la recherche du coefficient isotonique de l'urine par l'une quelconque des méthodes, mais surtout par celle employée par Winter, donnerait des renseignements physiologiques et pathologiques d'une réelle importance et bien supérieurs à ceux obtenus par les analyses chimiques habituelles.

Quant au mécanisme lui-même du passage de l'eau urinaire, la nécessité de l'équilibre isotonique de deux liquides de concentration différente nous paraît être la vraie cause du phénomène. Ce n'est donc pas la filtration qu'il faut invoquer, comme on a l'habitude de le faire dans tous les traités de physiologie, pour expliquer l'apparition de l'eau urinaire, mais bien la pression osmotique de Van't Hoff.

Le grand nombre de déterminations cryoscopiques faites par Winter lui ont montré que le point de congélation de l'urine n'est pas constant: il varie entre $1^{\circ},55$ et $0^{\circ},55$. Le meilleur moyen, d'après cet auteur, de se rapprocher de la limite pour chaque sujet, c'est de faire l'examen des urines à jeun, c'est-à-dire des urines recueillies après la miction du matin, au lever et avant le premier déjeuner. Les mesures cryoscopiques traduisent bien les variations apportées dans la sécrétion urinaire par les écarts de régime, tels que les excès de boissons, mais pendant quelques heures seulement.

On conçoit, par l'aperçu que nous venons de donner des résultats de Winter, combien l'application des lois qui régissent les actions moléculaires relatives à la pression osmotique et à l'isotonie peut rendre de services en biologie. Mais ce n'est pas seulement pour la sécrétion de l'urine que la détermination du coefficient osmotique est utile à introduire: nous en trouvons une autre application très intéressante à propos des phénomènes de la digestion, ainsi que l'a parfaitement établi M. Winter.

Pression osmotique des liquides de l'estomac. — La fonction stomacale est, comme la plupart des autres fonctions de l'organisme, une fonction intermittente, rythmée, c'est-à-dire qu'il y a dans les actes digestifs des périodes de repos et d'activité, commandées par le genre de vie de l'animal considéré. Si nous portons en effet notre attention sur les liquides de l'estomac, nous y constatons l'existence de modifications cycliques liées précisément aux variations de concentration saline de ces liquides par rapport à la concentration saline du sérum du sang.

Étudions, comme l'a fait Winter (1), le liquide de l'estomac dans les diverses phases de la fonction stomacale, de façon à tirer de cette étude les déductions qui intéressent le biologiste.

A jeun, le liquide stomacal possède un point de congélation qui varie entre $0^{\circ},36$ et $0^{\circ},55$. Or, nous savons que $0^{\circ},55$ est le point de congélation du sérum sanguin, et Winter a, d'autre part, démontré que la température $0^{\circ},36$ correspond à la concentration d'une solution de NaCl, à 0,61 pour 100, c'est-à-dire que lorsque le liquide stomacal a un point de congélation de $0^{\circ},36$, il est isotonique avec une solution de NaCl à 0,61 pour 100: c'est la solution-limite de résistance des globules rouges du sang (Hamburger).

(1) *Archives de Physiologie*, 1896, p. 299.

Ainsi, le liquide de l'estomac à jeun a une concentration qui ne s'élève pas au-dessus de celle du sérum et qui ne tombe jamais au-dessous de celle d'une solution à 0,61 pour 100 de sel marin.

Il résulte nécessairement de là que, tant que la concentration du liquide stomacal n'est pas isotonique avec une solution à 0,61 pour 100 de NaCl, l'estomac, quoique à jeun, est en activité à des degrés variables. Tout courant osmotique est arrêté lorsque la concentration est telle que le point de congélation du liquide est égal à 0°,36; à ce moment-là, se produit un arrêt complet dans l'acte digestif.

Mais, pour connaître les différentes phases du travail digestif, il est utile d'étudier la marche du cycle digestif pendant la digestion alimentaire, depuis l'origine jusqu'à la fin de cet acte physiologique. C'est ce qu'a fait M. Winter, et pour cela il a fait prendre soit à des animaux, soit à l'homme, des repas d'épreuve, et il a prélevé des échantillons du contenu stomacal à des moments bien déterminés, échantillons qu'il a soumis à l'analyse cryoscopique et aussi à l'analyse chimique.

Un premier point constaté est le suivant : pour que la digestion puisse se mettre en marche, il faut que les corps dissous commencent par se mettre dans un certain rapport d'équilibre. Cet équilibre ne peut se produire que par le mécanisme de courants osmotiques et non pas par évacuation, car il est clair que la concentration d'une solution saline à $\frac{1}{n}$ pour 100 restera la même jusqu'à la dernière trace pendant qu'on videra le vase qui la renferme; si cette concentration se modifie, cela ne pourra être obtenu que par une soustraction d'eau ou du sel *isolément*, ou une addition *isolée* de l'un ou de l'autre. Cette remarque est importante à faire,

Voyons ce que devient la concentration du contenu stomacal chez l'homme après un repas d'épreuve, et dont la valeur va nous être donnée par la cryoscopie. Repas comprenant pain, thé et sucre :

Après 36 minutes.	0°,80
— 66 —	0°,60
— 94 —	0°,50
Limite.	0°,36

On voit que le point de congélation est d'abord plus bas que 0°,55, et qu'il y revient une heure et demie environ après le repas; mais la concentration reste telle que jamais le point de congé-

lation ne remonte au dessus de $0^{\circ},36$, ce qui correspond à la concentration d'une solution de 0,61 pour 100 de NaCl, solution isotonique avec le sérum du sang. Donc, on peut dire que, *tant que les liquides de l'estomac ne sont pas isotoniques avec le sérum sanguin, la pression osmotique intervient pour provoquer des phénomènes digestifs.*

Les concentrations qui correspondent aux points de congélation déterminés par Winter sont telles, qu'il peut arriver un moment, par suite de certaines conditions, où la dissolution dans le liquide stomacal de nouvelles molécules salines devient impossible, à moins qu'il ne se produise un appel d'eau destinée à rétablir l'équilibre osmotique dans ce milieu. Ces conditions d'équilibre règlent le cycle digestif, y compris l'évacuation stomacale.

En somme, ce qui se dégage des recherches précédentes, c'est que les lois de l'isotonie maintiennent le cycle de la digestion entre deux limites bien définies, l'une correspondant au coefficient isotonique 0,61 pour 100 de NaCl, constant pour tous les sujets; l'autre, variable avec les individus, ne dépassant jamais le coefficient caractérisé par le point de congélation du sérum $0^{\circ},55$. En sorte que si, au commencement de la digestion, l'une de ces deux limites était dépassée par une trop grande dilution du repas ingéré, le premier phénomène qui aurait lieu dans l'organisme aurait pour but le retour de la dilution aux limites obligatoires; ce retour est produit plus ou moins rapidement, et la vitesse de ce phénomène peut servir à caractériser l'énergie digestive de chaque individu. Elle est en tous cas sous la dépendance étroite des actions moléculaires et représente la lutte de l'organisme commandée par l'intervention des lois osmotiques.

On voit que cette manière nouvelle de comprendre les actes digestifs amène à se faire une idée rationnelle des différentes dyspepsies; celles-ci sont liées à la valeur du coefficient isotonique des liquides de l'estomac qui peut, suivant les cas pathologiques, être soit augmenté, soit diminué. Il n'y aurait donc pas, d'après ces vues nouvelles et originales, à tenir un aussi grand compte de l'hyperchlorhydrie ou de l'hypochlorhydrie, comme on l'a fait jusqu'à l'heure actuelle.

Rôle de la pression osmotique dans la résorption. — La méthode cryoscopique a permis de déterminer le coefficient isotonique de quelques sérosités. Il était intéressant de connaître quel rapport existe entre les différentes humeurs de l'organisme

et le sérum sanguin. Le point de congélation fournit un renseignement suffisant pour cette appréciation.

Voici quelques chiffres déterminés par Winter :

Liquide pleurétique.	0°,50
—	0°,55
Ponction cirrrose.. . . .	0°,523
Ascite.	0°,55
—	0°,525
— chien.	0°,60
Liquide d'hydrocèle.	0°,60
—	0°,55

Tous ces points de congélation sont, comme on le voit, un peu au-dessus ou un peu au-dessous de 0°,55; par conséquent, ils sont voisins du point de congélation du sérum sanguin. Il est donc, d'après cela, permis de dire que les sérosités pathologiques sont des sérums simplement filtrés à travers des lames membraneuses à gros espaces intermoléculaires, espaces très probablement augmentés par l'état inflammatoire des régions où se fait l'épanchement de sérosité.

Une question qu'on doit naturellement se poser, à propos du coefficient isotonique des liquides épanchés dont nous venons de voir le point de congélation, est celle qui se rapporte à leur *résorption*. Hamburger a étudié soigneusement cette intéressante question de la résorption, dont le mécanisme était très peu connu jusqu'à ses propres travaux (1). Les cavités choisies par Hamburger ont été successivement la cavité péritonéale et péricardique, dans lesquelles différents liquides furent injectés.

Les pressions osmotiques, ou mieux les coefficients isotoniques des liquides injectés, ont été déterminées soit par la méthode des globules rouges, soit par la cryoscopie; cette dernière n'étant employée que lorsque le liquide à examiner avait une teinte rougeâtre provenant de matière colorante dégagée et qui rendait douteux les résultats fournis par le procédé des globules.

L'animal choisi pour ces expériences fut le lapin.

Plusieurs liquides ont été injectés par Hamburger : on choisit d'abord des liquides isotoniques avec le sérum du lapin, puis des liquides n'ayant pas le même coefficient isotonique.

(1) HAMBURGER. *Revue de médecine*, 1896, pages 151, 289, 1008.

Voyons les résultats fournis par les injections de liquides isotoniques.

1° *Liquides séreux.* — Il était intéressant de rechercher si le sérum injecté dans la cavité abdominale subirait après quelque temps une augmentation de son coefficient isotonique. A l'aide d'une technique particulière, que nous ne pouvons reproduire ici, Hamburger constata que la concentration du sérum injecté dans la cavité péritonéale est isotonique avec le plasma du lapin d'épreuve *ne se modifie pas*. Le sérum injecté provenait, soit de l'animal en expérience, soit d'un autre lapin, soit d'un cheval. On fit aussi une injection dans la cavité abdominale d'un lapin avec du liquide ascitique d'un homme ramené à une concentration convenable, pour lui faire posséder le même coefficient isotonique que le sérum du lapin. Dans cette expérience encore, on trouva que la pression osmotique de ce liquide ne subit aucune modification pendant son séjour dans la cavité abdominale du lapin. Donc, quelle que soit l'origine du liquide séreux employé pour l'injection dans la cavité péritonéale, quand ce liquide est isotonique avec le sérum de l'animal d'épreuve, le coefficient isotonique de ce liquide ne varie pas pendant son séjour dans la cavité.

Il en résulte que si, dans un cas pathologique, le liquide ascitique possède un coefficient isotonique plus élevé que celui du sérum de l'individu, cette propriété ne peut être attribuée au séjour du liquide dans la cavité abdominale.

2° *Liquides non séreux.* — Il était, après ces expériences, tout indiqué de remplacer le liquide séreux des injections par des liquides non séreux, mais toujours isotoniques avec le sérum de l'animal.

Les différentes solutions employées furent faites avec du chlorure de sodium, 0,94 pour 100 ; du nitrate de potassium à 1,55 pour 100 ; du sulfate de soude à 1,47 pour 100 ; du sucre de canne à 7,95 pour 100.

Toutes les expériences faites avec ces liquides amènent à la conclusion suivante : les liquides isotoniques avec le sérum de l'animal d'épreuve (lapin) ne subissent pas de modification, quant à leur pression osmotique, pendant leur séjour dans la cavité péritonéale. Le résultat est donc le même, que le liquide injecté soit séreux ou non séreux.

Que doit-il arriver maintenant si l'on injecte des liquides n'ayant plus le même coefficient isotonique que le sérum de l'animal ? Voyons d'abord les liquides possédant un coefficient isotonique *supérieur* à celui du sérum.

En employant des liquides séreux ou non séreux, Hamburger constata que la pression osmotique, ou mieux le coefficient isotonique de ces liquides injectés dans la cavité péritonéale d'un animal, devient égal à celui du sérum de cet animal, 2 ou 3 heures après l'injection : ce coefficient diminue donc pendant que se fait la résorption.

Avec des liquides ayant un coefficient isotonique inférieur à celui du sérum de l'animal d'épreuve, on trouve au contraire que le coefficient isotonique s'élève après l'injection, pour devenir encore égal à celui du sérum du lapin d'épreuve.

En somme, les expériences de Hamburger montrent que si le liquide injecté est isotonique avec le sérum de l'animal, il le reste pendant le processus entier de la résorption ; si ce liquide n'est pas isotonique, il le devient pendant que se fait la résorption et reste isotonique jusqu'à ce que la résorption soit terminée.

Par conséquent, si, dans un cas pathologique, le coefficient isotonique du liquide ascitique est plus élevé que celui du sérum du malade, il doit y avoir une cause qui entretient cette inégalité. On peut admettre provisoirement que le liquide sécrété par les vaisseaux sanguins est continuellement résorbé, mais qu'il est toujours remplacé par un nouveau liquide, la lymphe, dont le coefficient isotonique est supérieur à celui du plasma sanguin.

Quoi qu'il en soit, il est logique de se poser les questions suivantes. Comment peut-on expliquer les phénomènes de résorption ? Comment comprendre que le volume du liquide intrapéritonéal n'augmente pas après une injection de chlorure de sodium ayant une concentration beaucoup plus grande que celle qui correspond à l'isotonie du sérum, alors que c'est le contraire qui semblerait devoir se produire ?

Après l'injection des liquides hyperisotoniques, un équilibre osmotique commence à se produire, c'est-à-dire que l'eau passe du torrent circulatoire vers la cavité péritonéale.

Pour les liquides injectés avec un coefficient isotonique plus petit que celui du plasma, l'équilibre osmotique, qui suit immédiatement l'injection, se produit au moyen de l'eau qui passe de la cavité abdominale vers le sang des vaisseaux.

Mais, pour la résorption du liquide rendu isotonique avec le plasma de l'animal, il y a lieu de se demander si ce sont les vaisseaux lymphatiques qui ont le rôle prépondérant ou si ce sont au contraire les vaisseaux sanguins.

Pour trancher cette question, Hamburger a fait des injections

de divers liquides dans la cavité péritonéale d'un lapin, après avoir fait la ligature du canal thoracique d'une part, et des artères rénales d'autre part.

Il a aussi trouvé qu'après la ligature du canal thoracique la résorption et la régulation de la pression osmotique dans la cavité abdominale ont lieu de la même façon et à peu près aussi vite que si le courant lymphatique était resté normal. Il résulte alors de là que ce sont les vaisseaux sanguins qui interviennent, sinon exclusivement, du moins en grande partie, dans le mécanisme de la résorption. Le rôle important de ces vaisseaux est confirmé par le fait qu'après la ligature des artères rénales de l'animal la régulation de la pression osmotique et la résorption deviennent défectueuses, ce qui se comprend facilement en se rappelant que ce sont les reins qui règlent la pression osmotique en maintenant normale la concentration du liquide sanguin.

Quant au mécanisme de la résorption par les vaisseaux sanguins, Hamburger l'explique de la façon suivante : considérons la cavité péritonéale contenant un liquide, les tissus absorbent par imbibition une certaine quantité de ce liquide, et pendant ce phénomène d'imbibition il se fait un échange osmotique entre le liquide intrapéritonéal et le liquide des tissus. Si le liquide injecté est une solution hyperisotonique de NaCl, à 2 pour 100 par exemple, des échanges osmotiques auront lieu entre cette solution et le liquide des vaisseaux sanguins subendothéliaux : le premier liquide ayant un coefficient isotonique plus grand que celui du plasma, l'eau de ce plasma traversera l'endothélium jusqu'à ce que la pression osmotique des deux liquides soit devenue égale.

Lorsque les artères rénales sont liées, le sel absorbé par les capillaires n'est emporté que très insuffisamment, et alors la pression osmotique du plasma augmente jusqu'à ce qu'elle soit devenue égale à celle du liquide intrapéritonéal. Mais, lorsque la fonction rénale n'est pas supprimée, la pression osmotique primitive du plasma reste constante et les lois des phénomènes osmotiques exigent que finalement le liquide intrapéritonéal possède un coefficient isotonique égal à celui du plasma et qu'il conserve cette valeur. Par conséquent, c'est par des phénomènes purement physiques que peuvent être expliquées aussi bien la résorption des épanchements que la régulation de la pression osmotique.

Les conclusions auxquelles est arrivé Hamburger ont pu d'ail-

leurs être confirmées en opérant sur des membranes artificielles, et cela de la manière suivante: les vaisseaux capillaires sont remplacés par une membrane cylindrique de gélatine *G* et l'atmosphère conjonctive dans laquelle sont situés les capillaires par un espace réalisé en plaçant le cylindre de gélatine dans un tube en verre *C* plus large, de façon à faire coïncider les axes des cylindres. Le tube de verre était fermé à ses deux extrémités, tout en livrant passage au cylindre de gélatine maintenu à l'aide d'un treillis nickelé *T* sur lequel il était enroulé.

Lorsqu'on remplit le tube de gélatine et l'espace *E* qui l'entoure au moyen d'un liquide, du sérum sanguin par exemple, le robinet *k* étant fermé et le robinet *k'* ouvert, on constate qu'après un temps très court le liquide s'échappe goutte à goutte par le robinet *k'*, en même temps que la quantité de liquide renfermé dans le manchon de verre diminue, ce liquide étant remplacé par de l'air qui entre par le tube *f* laissé ouvert. On

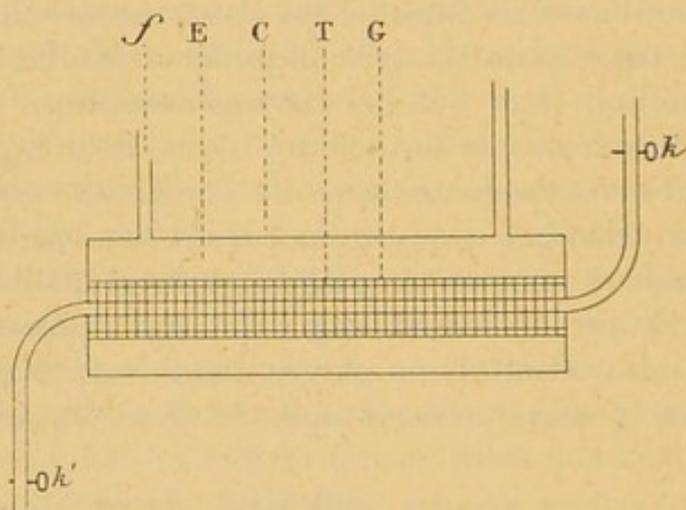


FIG. 5.

doit évidemment conclure de cette expérience qu'une partie du sérum contenu dans l'espace limité par les deux tubes traverse le cylindre de gélatine sous l'influence de l'aspiration produite par la petite colonne liquide du tube d'écoulement.

Si on répète la même expérience en laissant le robinet *k* ouvert et en faisant pénétrer un courant de sérum, libre de s'écouler par *k'*, on voit le sérum diminuer dans le manchon, mais beaucoup plus rapidement que dans le cas précédent. La seule explication qu'on puisse donner de cette différence, c'est que dans le second cas le courant de sérum qui se dirige de *k* vers *k'* aspire

le liquide contenu dans le manchon à travers la membrane de gélatine. Pour que le phénomène puisse s'observer, il est nécessaire que le robinet k' par où s'écoule le sérum soit plus ouvert que le robinet k par où le sérum est amené. Cela n'a rien d'étonnant, si l'on remarque que le robinet k' ne doit pas seulement livrer passage au sérum qui arrive par k , mais aussi à celui qui arrive dans le tube de gélatine en traversant sa paroi.

Dans l'organisme, ainsi que l'observe Hamburger, cette condition se trouve effectivement réalisée, car la section totale des veines afférentes est supérieure à la section de l'artère afférente. De plus, la position du robinet k' a une influence considérable sur le passage du sérum à travers la membrane de gélatine; plus le robinet est situé bas, plus le passage a lieu rapidement, c'est-à-dire que le passage du sérum est d'autant plus intense que la pression dans l'espace annulaire surpasse davantage celle qui existe dans le tube de gélatine.

Ce dernier résultat expérimental a pu être vérifié sur le vivant: la résorption des liquides épanchés dans la cavité péritonéale est favorisée par l'augmentation de pression intra-abdominale (Hamburger).

Les expériences faites sur la cavité péricardique fournissent des résultats qui correspondent absolument à ceux obtenus par les injections intrapéritonéales. Un sérum ayant un coefficient isotonique quelconque, injecté dans la cavité péricardique, y est résorbé: si le liquide est isotonique vis-à-vis du plasma de l'animal d'épreuve, il le reste pendant toute la durée de la résorption; si le liquide n'est pas isotonique vis-à-vis du plasma, il le devient pendant que se fait la résorption, et il reste tel jusqu'à ce la résorption soit terminée. Enfin, des solutions salines isotoniques, hyperisotoniques ou hypoisotoniques suivent exactement la même loi que les liquides séreux (Hamburger).

Telles sont les conséquences que l'on a tirées jusqu'à présent de l'application de la pression osmotique de Van't Hoff aux phénomènes de l'organisme. On voit par ce qui précède que cette notion physique relativement nouvelle permet d'expliquer beaucoup de faits biologiques, et son importance ne peut certainement qu'augmenter à mesure qu'on cherchera à l'appliquer plus largement à la physiologie.

CHAPITRE V

ACTIONS MOLÉCULAIRES ENTRE SOLIDES ET GAZ

Phénomènes d'adhésion gazeuse. — Lorsqu'un solide est plongé dans une atmosphère gazeuse, il se produit des actions entre les molécules du gaz et les molécules solides placées à la surface, qui ont pour effet de faire adhérer au solide une certaine quantité de gaz.

L'adhésion des molécules gazeuses pour le solide dépend à la fois de la nature du solide et de la nature du gaz. Magnus a trouvé par l'expérience que le verre retient à 0° , $0^{\text{mm}^{\circ}}$, 008 d'acide sulfureux par millimètre carré de surface. Graham, qui a étudié ces actions moléculaires sur les métaux, a donné au phénomène le nom d'*occlusion* : il a vu que les métaux retiennent à leur surface avec une énergie plus ou moins grande une certaine quantité de gaz ; ainsi, d'après ses expériences, 1 volume de cuivre poreux retient adhérent à sa surface 0^{v} ,6 d'hydrogène ; 1 volume d'argent en fil retient 0^{v} ,211 d'hydrogène et 0^{v} ,745 d'oxygène. Cette propriété est surtout marquée pour le palladium, qui est capable d'absorber 376 volumes d'hydrogène à la température ordinaire.

L'adhésion des molécules gazeuses pour une surface solide peut avoir lieu non seulement quand le solide est placé dans l'air, mais encore lorsqu'il est dans un liquide. Si l'on place par exemple une lame de palladium dans de l'eau acidulée et que l'on fasse passer un courant dans cette eau, en prenant le palladium comme électrode négative, on voit cette lame augmenter de volume ; le phénomène est rendu plus net si l'on a eu soin de recouvrir l'une des faces du palladium avec un vernis : la lame se recourbe alors du côté du vernis, par suite de l'augmentation de volume de la face non protégée.

Joulin a énoncé la loi suivante, relativement à la quantité de

gaz qui peut être absorbée par un solide : les volumes du gaz absorbé sont sensiblement proportionnels à la pression et inversement proportionnels à la température.

Atmosphères adhérentes. — Les phénomènes moléculaires qui ont pour effet de maintenir une couche gazeuse adhérente à un corps solide mettent en jeu de grandes quantités d'énergie, et il est souvent très difficile de débarrasser la surface d'un corps des dernières traces de gaz adhérent.

Si nous avons rappelé ces notions générales, c'est parce que les actions moléculaires de solide à gaz trouvent des applications importantes dans l'organisme, où elles se manifestent très nettement.

Le P^r Merget a montré par des expériences faciles à répéter que tous les tissus des animaux et des végétaux retenaient des couches gazeuses adhérentes. On peut mettre en évidence l'existence de ces atmosphères adhérentes de trois manières, après avoir plongé le corps qui en est chargé dans un liquide servant à montrer le dégagement des gaz constituant la couche adhérente : 1^o en élevant la température de cette eau ; 2^o en diminuant la pression au-dessus du système ; 3^o en employant une solution sursaturée d'un gaz inerte, par exemple d'acide carbonique.

Si l'on soumet à l'une quelconque de ces épreuves un tissu animal, même lorsqu'on a eu soin de l'exciser sous l'eau, de façon à éviter le contact de l'air atmosphérique, on constate que des bulles se dégagent d'un très grand nombre de points du tissu. D'après Merget, c'est dans la trame conjonctive des tissus qu'existent ces atmosphères adhérentes. Elles accompagnent la surface des animaux, même de ceux qui vivent constamment sous l'eau : un poisson se recouvre d'une infinité de bulles gazeuses lorsqu'on élève la température de l'eau où il vit, ou lorsqu'on ajoute à cette eau de l'eau de Seltz. Cette couche gazeuse adhérente à la surface des animaux et aussi des végétaux aquatiques joue un rôle très important dans les phénomènes respiratoires : c'est dans cette atmosphère que se diffusent, d'une part les gaz dissous dans l'eau, d'autre part les gaz provenant de l'organisme.

Mais, là où apparaît surtout l'importance de la découverte de Merget, c'est lorsqu'on considère que ce savant a démontré l'existence d'une atmosphère adhérente autour des globules sanguins : cette démonstration a été reprise par MM. Jolyet et Sigalas, qui

ont trouvé que le sang débarrassé de ses globules absorbait moins d'azote que le plasma ; les globules, en effet, en apportant avec eux une couche gazeuse adhérente, permettent à l'azote, ou à tout autre gaz, de se diffuser dans cette couche, et par conséquent ont pour effet d'augmenter la quantité de gaz absorbé par le sang ; l'absorption de l'azote par le sang est donc expliquée par le phénomène physique de l'adhésion d'un gaz autour d'un solide en suspension dans un liquide.

Nous verrons plus loin tout le parti qu'a tiré Merget de la présence d'une atmosphère adhérente autour des globules, pour expliquer le mécanisme des échanges respiratoires, tant pulmonaires qu'interstitiels.

CHAPITRE VI

ACTIONS MOLÉCULAIRES ENTRE LIQUIDES ET GAZ

Dissolution des gaz. — Lorsqu'un liquide et un gaz sont en présence, une partie du liquide passe à l'état gazeux, tandis que des molécules gazeuses pénètrent dans le liquide où elles se dispersent uniformément. Ce dernier phénomène est analogue à celui de la dissolution des solides et porte le même nom.

La dissolution des gaz nous intéresse par suite de la présence dans le sang de molécules gazeuses dissoutes. Les lois principales de ces actions moléculaires de liquide à gaz sont :

1° La dissolution dépend de la nature du liquide et du gaz en présence.

2° Le volume de la dissolution d'un gaz est toujours plus grand que celui du liquide, mais la densité de la dissolution est tantôt plus grande, tantôt plus faible que celle du liquide.

3° Sous la même pression et à la même température, une même quantité de gaz se dissout dans un même volume de liquide, d'autant plus rapidement que les molécules gazeuses trouvent une surface liquide plus grande et que le nombre des molécules gazeuses déjà dissoutes est plus petit.

4° A une même température, le poids d'un gaz dissous par un volume donné de liquide est proportionnel à la pression que le gaz exerce sur le liquide à la fin de l'expérience (loi d'Henry). On appelle *coefficient de solubilité* d'un gaz à une température donnée, le volume du gaz capable de se dissoudre à cette température dans l'unité de volume du liquide.

5° Lorsque plusieurs gaz sont en contact avec un même liquide, chaque gaz se dissout comme s'il était seul et comme s'il possédait la tension qu'il avait en occupant seul le volume du mélange gazeux.

6° La solubilité d'un gaz, contrairement à celle des solides, diminue à mesure que la température s'élève.

La cinquième loi va nous permettre de connaître les proportions relatives d'azote et d'oxygène capables de se dissoudre dans les liquides de l'organisme autres que le sang, liquide auquel cette loi n'est pas applicable par suite de la présence de l'hémoglobine.

On sait que l'air atmosphérique renferme $\frac{4}{5}$ d'azote et $\frac{1}{5}$ d'oxygène, ces deux gaz étant pris sous la pression barométrique.

Le coefficient de solubilité dans l'eau est, à 37°, 0,026 pour l'oxygène et 0,013 pour l'azote, ce qui veut dire qu'un litre d'eau à 37° dissoudra 0,026 d'oxygène et 0,013 d'azote, sous les pressions respectives de ces gaz, soit $\frac{4}{5}$ et $\frac{1}{5}$ de la pression barométrique. Pour ramener les volumes dissous V et V' à la pression barométrique H , il suffit d'appliquer la loi de Mariotte ; ce qui donne

$$\frac{V}{0,026} = \frac{1/5 H}{H} \text{ ou } V = 0,0052 \text{ d'oxygène.}$$

et

$$\frac{V'}{0,013} = \frac{4/5 H}{H} \text{ ou } V' = 0,0104 \text{ d'azote.}$$

Or, 0,0104 est le double de 0,0052, c'est-à-dire qu'il y a une proportion d'oxygène dissoute dans l'eau et les liquides de l'organisme, excepté le sang, par rapport à l'azote dissous, deux fois plus grande que celle qui existe dans l'air, qui contient 4 d'azote pour 1 d'oxygène.

Lorsqu'un gaz s'est dissous dans un liquide, il est possible de l'extraire de ce liquide, et cela en utilisant les conditions qui ont pour effet de diminuer son coefficient de solubilité : on s'adresse donc soit à la chaleur, soit au vide. En particulier pour l'extraction des gaz du sang, comme on ne peut pas élever suffisamment la température sans altérer le liquide, on a exclusivement recours à la diminution de pression, et l'on se sert de la pompe à mercure.

Il est important de remarquer que les gaz dissous dans le sang tendront à se dégager de leur dissolution pour s'échapper du liquide, lorsque l'organisme sera soumis à une diminution de

pression suffisante. C'est ce qui arrive chaque fois que l'organisme, après avoir été soumis à une forte augmentation de pression, est exposé à une décompression trop brusque : il se forme alors des embolies et des chapelets capillaires qui peuvent amener la mort. On n'a eu malheureusement que trop souvent l'occasion de vérifier ces lois des actions moléculaires gazeuses sur les ouvriers tubistes et sur les scaphandriers.

CHAPITRE VII

ACTIONS MOLÉCULAIRES DANS LES GAZ

Diffusion des gaz. — Un gaz tend toujours à occuper le plus grand espace possible ; ce résultat est dû aux forces de répulsion qui s'exercent entre les différentes molécules gazeuses.

De plus, un gaz agit sur les parois du récipient qui le renferme en opérant sur ces parois une poussée qu'on appelle la tension ou la force élastique du gaz. Cette tension est due aux chocs des molécules gazeuses contre les parois.

Lorsqu'au lieu d'un seul gaz, on place dans un récipient plusieurs gaz, leurs molécules sont animées des mêmes mouvements que s'ils étaient seuls dans l'espace offert, en sorte que la tension totale est égale à la somme des tensions partielles. Si v, v', v'' , représentent les volumes des gaz, p, p', p'' , leurs forces élastiques respectives, V le volume total et P la pression totale du mélange gazeux, on a :

$$P = \frac{p v}{V} + \frac{p' v'}{V} + \frac{p'' v''}{V}.$$

La fraction $\frac{p v}{V}$ exprime la tension de chaque gaz dans le mélange : pour l'oxygène atmosphérique, par exemple, sa tension partielle est égale à $\frac{21 \times 760}{100}$; celle de l'azote $\frac{79 \times 760}{100}$.

Paul Bert a montré que, lorsqu'on soumet un animal à une diminution de pression progressivement établie, c'est précisément la variation de la tension de l'oxygène qui est la cause des accidents ; en sorte que, si on maintient constante la valeur de cette tension, en augmentant la proportion d'oxygène pendant que diminue la pression, on évite les accidents et l'on peut

abaisser beaucoup la pression, sans que l'animal en paraisse incommodé.

Osmose des gaz. — La diffusion simple des gaz a lieu dans notre organisme pendant la respiration, mais elle ne peut donner lieu à de grands développements. Il n'en est pas de même de la diffusion à travers un septum ou *osmose des gaz*. Les molécules gazeuses sont en effet capables de traverser un septum présentant des pores très fins ou même un septum qui n'a pas de pores visibles. Il convient d'examiner successivement chaque cas.

I. *Membrane poreuse.* — Le passage d'un gaz à travers les pores d'un septum se fait molécule à molécule, c'est une véritable diffusion. Graham a donné la loi de l'osmose des gaz : les vitesses de diffusion des gaz à travers un corps poreux sont en raison inverse des racines carrées des densités de ces gaz. Lorsqu'une cloison poreuse sépare deux gaz différents, chaque gaz diffuse à travers cette cloison avec la vitesse de diffusion qui lui est propre.

II. *Membrane ne présentant pas de pores visibles.* — Les molécules gazeuses peuvent traverser des corps pris sous une très faible épaisseur et n'ayant d'autre discontinuité que des espaces intermoléculaires. Les vitesses de passage des gaz à travers une membrane humide, comme le sont celles de l'organisme, ne sont pas en raison inverse des racines carrées des densités ; la dissolution du gaz dans le liquide de la membrane joue un rôle important.

Si on place une vessie mouillée pleine d'air dans de l'acide carbonique, elle se gonfle ; tandis qu'elle se dégonfle si, étant pleine d'acide carbonique, on la plonge dans l'air.

De même, considérons une bulle de savon gonflée avec de l'air et placée dans un vase à moitié rempli d'acide carbonique : celle-ci se maintient d'abord sur l'acide carbonique, puis augmente peu à peu de volume et descend ensuite au fond du vase. L'acide carbonique se dissout dans la lamelle liquide, puis se dégage à la partie intérieure.

Exner a montré que la quantité de gaz qui traverse une membrane liquide est sensiblement proportionnelle au coefficient de solubilité du gaz dans le liquide et en raison inverse de la racine carrée de la densité.

L'osmose des gaz à travers les membranes de l'organisme a été peu étudiée. Béclard, puis Boulland ont fait cependant quel-

ques recherches dans ce sens. Boulland avait construit un appareil, l'osmopneumètre, avec la tunique fibreuse de l'estomac de la grenouille, à travers laquelle devaient osmoser différents gaz ; il constata qu'en plaçant, d'un côté de l'azote, et de l'autre les gaz à étudier, l'azote passait beaucoup moins vite que les autres gaz. Le passage le plus rapide vers l'azote est celui de l'acide carbonique ; l'oxygène traverse moins vite la membrane que l'acide carbonique.

Ces phénomènes d'osmose gazeuse à travers un septum ne présentant pas de pores visibles sont du plus haut intérêt, lorsqu'on veut se rendre compte du mécanisme des échanges gazeux dans l'organisme. Ces échanges se font au sein des tissus : c'est la respiration interne, et, au niveau des poumons, c'est la respiration externe.

Voyons le premier cas. Nos tissus sont plongés dans des liquides, sang et lymphé, qui ne les mouillent pas, ainsi que nous l'avons dit à propos des atmosphères adhérentes de Merget. Il se passe entre les tissus et les liquides un échange de gaz à travers des membranes mouillées, c'est ce qui constitue la respiration des tissus : dans ce processus, les tissus absorbent de l'oxygène et éliminent de l'acide carbonique.

L'échange d'oxygène et d'acide carbonique à travers une membrane humide est facilité par une inégalité dans la tension de ces deux gaz ; mais il est nécessaire de pénétrer plus avant dans ce phénomène et de voir comment peut se faire cet échange de gaz.

La membrane qui est le siège de l'osmose gazeuse, c'est l'endothélium des capillaires sanguins. Que trouvons-nous de part et d'autre de cet endothélium ? Du côté interne, il y a le sang avec ses globules, de l'autre les tissus avec leurs atmosphères adhérentes. Eh bien, c'est le moment de faire intervenir les atmosphères de Merget. L'acide carbonique des tissus s'est diffusé dans les atmosphères, et d'autre part les globules sont entourés d'une couche gazeuse adhérente riche en oxygène. Or, d'après ce que nous avons dit précédemment, un phénomène d'osmose gazeuse va se produire à travers l'endothélium, entre l'acide carbonique qui des tissus va passer dans l'atmosphère adhérente des globules, où il se diffusera, et l'oxygène du sang qui va passer dans les atmosphères adhérentes des tissus, où il se diffusera, lui aussi, pour servir aux besoins de la respiration interstitielle. Comme on le voit, la théorie de Merget utilise des faits bien

établis et rend bien compte de ces phénomènes respiratoires (1).

Pour la respiration externe, on peut assimiler les capillaires sanguins des poumons à une nappe sanguine de 150 mètres carrés environ et d'une épaisseur de 0^{mm},008 en moyenne. Tout se passe donc comme si une surface de sang était séparée d'un milieu gazeux riche en oxygène par une membrane extrêmement fine et délicate, l'endothélium des capillaires.

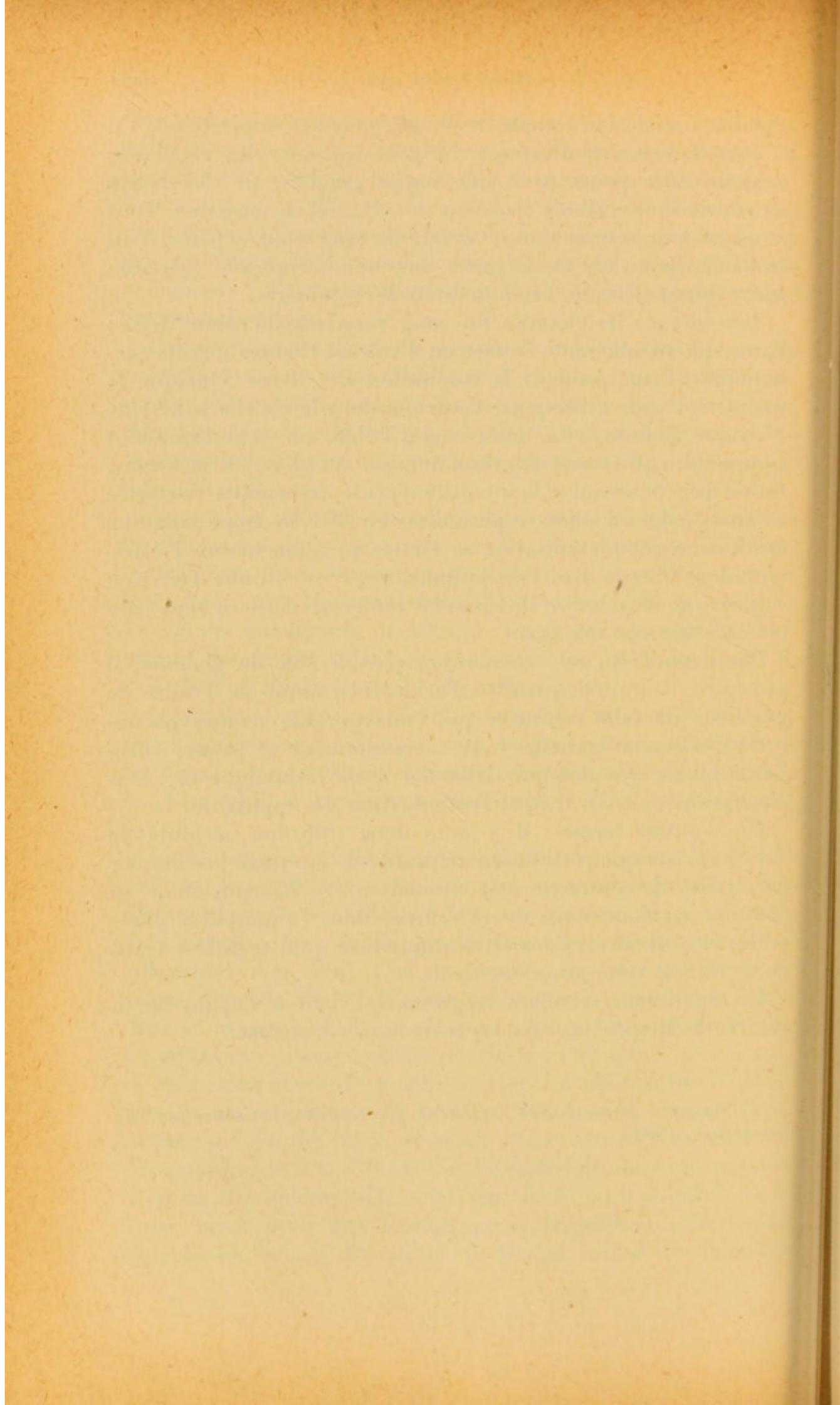
Considérons les globules du sang revenant du cœur droit : l'atmosphère adhérente de chacun d'eux est chargée d'acide carbonique dégagé pendant la respiration des tissus. Quoique la quantité d'acide carbonique contenue dans la couche adhérente à chaque globule soit excessivement faible, on peut cependant comprendre qu'à cause du grand nombre des globules, la somme finisse par représenter la quantité d'acide carbonique retrouvée à l'analyse des échanges respiratoires ; en effet, la nappe sanguine qui vient à chaque pulsation se mettre en contact, sous l'épaisseur de 0^{mm},008, avec l'air pulmonaire, a un volume d'environ 1 litre : or, le nombre de globules renfermé dans ce seul litre est de 5,000,000,000,000.

On conçoit qu'avec ce nombre considérable de globules, il puisse y avoir une quantité d'acide carbonique de l'ordre de grandeur de celle retrouvée par l'analyse. Les mêmes phénomènes d'osmose gazeuse vont nécessairement se passer, entre l'atmosphère des globules riches en acide carbonique et l'oxygène pulmonaire, à travers l'endothélium des capillaires.

En d'autres termes, il y aura donc diffusion sortante de l'acide carbonique et diffusion rentrante de l'oxygène : ce dernier gaz, avant de contracter sa combinaison avec l'hémoglobine du globule, est donc forcé de se diffuser dans l'atmosphère adhérente, et c'est encore dans cette atmosphère qu'il se diffuse avant de servir à la respiration des tissus.

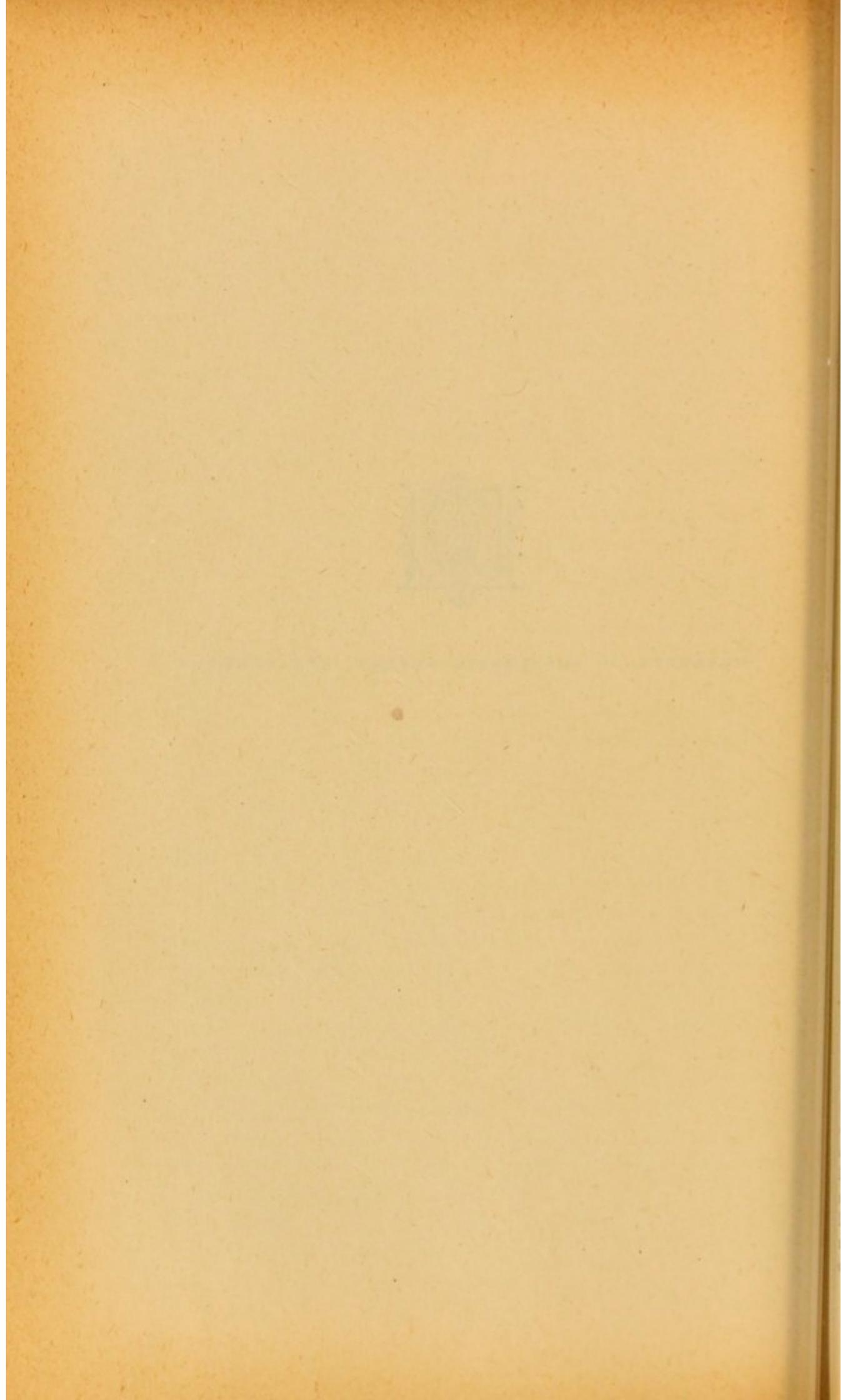
La rapidité des échanges respiratoires vient à l'appui de la théorie de Merget telle que nous venons de l'exposer.

(1) MERGET. *Société des Sciences physiques et naturelles de Bordeaux*, 1883.





CHARTRES. — IMPRIMERIE DURAND, RUE FULBERT



LEÇONS
SUR
LA CELLULE

MORPHOLOGIE ET REPRODUCTION

PAR

L. FÉLIX HENNEGUY

Chargé du Cours d'embryogénie comparée

Recueillies par **FABRE-DOMERGUE**, Docteur ès Sciences

ET REVUES PAR LE PROFESSEUR

1 vol. in-8° jésus, de 574 pages, avec 362 fig. noires et en couleurs

Relié : **25 francs**

L'étude de la cellule, qui se rattache si intimement à celle de toutes les autres sciences biologiques, et à laquelle se trouvent subordonnées tant de questions d'intérêt général, a fait dans ces dix dernières années des progrès considérables. Chaque jour la cytologie voit s'étendre les limites de son domaine, chaque jour de nouveaux faits viennent s'ajouter aux faits déjà recueillis et rendent plus difficile la connaissance complète du sujet, indispensable cependant à ceux qui voudraient aborder de nouvelles recherches.

Par la nature même de ses travaux, M. le professeur Henne-guy était mieux placé qu'aucun autre pour sentir la nécessité de grouper tous ces faits en les résumant, et d'éviter ainsi à chacun la perte de temps qu'occasionne la lecture des mémoires originaux. C'est à la classification et à l'examen critique des documents cytologiques qu'il a employé plusieurs années de labeur et c'est à leur exposé méthodique qu'il a consacré un semestre de son cours du Collège de France que nous offrons aujourd'hui au public savant sous la forme d'un traité de Cytologie.

En entreprenant et en menant à bien une tâche aussi ardue, M. Henne-guy vient de combler une regrettable lacune de la littérature scientifique, car nulle part encore n'existait un traité analogue sur la morphologie de la cellule.

L'auteur a pensé avec raison qu'à côté de la tentative inachevée de Carnoy, de l'ouvrage remarquable de Hertwig, il y avait place pour un livre classique, moins exclusivement physiologique que le dernier, plus complet et plus éclectique que le premier. Il a estimé fort justement que, dans une science où l'observation prime tout, la parole devait être donnée aux faits, et que la théorie ne devait en être que le corollaire et l'accessoire. Aussi, ses leçons sur la cellule sont-elles une mine inépuisable de documents rationnellement exposés et scrupuleusement critiqués. La théorie y tient une place fort petite, qui se trouve plus utilement remplie par des développements sur ses propres recherches et sur celles des auteurs les plus estimés.

LES
CANCERS ÉPITHÉLIAUX

HISTOLOGIE — HISTOGÉNÈSE
ÉTIOLOGIE — APPLICATIONS THÉRAPEUTIQUES

Par **FABRE-DOMERGUE**

Docteur ès sciences, chef de laboratoire à la Faculté de médecine de Paris.

1 volume grand in-8° raisin, de 462 pages, avec 142 figures, dont 76 en couleurs, et 6 planches chromolithographiques hors texte, cartonné à l'anglaise. — Prix : 30 francs.

Les Cancers épithéliaux constituent par leur nombre et leur fréquence la majeure partie des affections que l'on a l'habitude de grouper sous le terme générique et un peu vague de cancer. Les Sarcomes, au contraire, ou cancers conjonctifs, sont plus rares et doivent — de par leurs caractères cliniques aussi bien qu'histologiques — être l'objet d'une étude spéciale. C'est à la première catégorie de tumeurs que l'ouvrage de M. Fabre-Domergue est entièrement consacré.

L'auteur s'est attaché avant tout à donner dans son livre une idée très générale et très nette de l'origine histogénétique des cancers épithéliaux. Au lieu de chercher à en multiplier les types de description sans les réunir par des liens communs, il a voulu démontrer que, du tissu normal au tissu néoplastique le plus aberrant, il existe tous les termes de transition, et que chaque tissu de l'organisme peut de la sorte présenter le même tableau histogénétique, avec des plans rigoureusement parallèles et comparables les uns aux autres.

Mais la démonstration de l'unité histogénétique des tumeurs épithéliales, bien que de nature à jeter un certain jour sur les observations cliniques relatives à ces affections, ne constituait qu'une solution approchée de la question de leur origine. M. Fabre-Domergue a poussé plus avant dans cette voie, en montrant que la cause mécanique de la formation de toute tumeur épithéliale n'était que le résultat de la désorientation des plans de division de ses cellules constitutives. A une désorientation peu accentuée correspondent les Papillomes et les Adénomes que l'auteur réunit sous le terme commun d'Enthéliomes. Plus tard surviennent les Epithéliomes, et enfin, comme manifestation ultime et maxima de la désorientation, nous trouvons l'importante classe des Carcinomes dermiques aussi bien que glandulaires.

On peut donc dire que l'idée fondamentale qui a guidé M. Fabre-Domergue dans l'exposé de ses travaux, c'est l'idée de la désorientation

cellulaire. Grâce à ce principe, il a pu expliquer non seulement la graduation insensible des divers types de tumeurs épithéliales, mais encore donner une explication rationnelle de certaines de leurs propriétés essentielles dont la nature était jusqu'ici problématique. La cachexie, l'ulcération ne sont que le fait de la désorientation et se conçoivent aisément si on les envisage à ce point de vue.

Une autre partie, suite et conséquence de la première, comprend la discussion approfondie de l'origine étiologique des tumeurs épithéliales. Les faits relatifs à la théorie coccidienne y sont discutés et combattus avec l'autorité que donnent à l'auteur de longues années de travail dans le laboratoire de Clinique chirurgicale de l'hôpital Necker. M. Fabre-Domergue, sans nier d'une façon absolue la possibilité d'une étiologie parasitaire, refuse le titre de parasites à toutes les formes que l'on avait voulu jusqu'ici envisager comme telles, et qui ne sont, d'après lui, que des altérations cellulaires.

Dans un dernier chapitre, enfin, l'auteur, se basant d'une part sur ses observations relatives à la désorientation, d'autre part sur les faits de rytotropisme cellulaire constatés avant lui, montre que, loin de désarmer en présence d'une hypothèse purement térato-cellulaire des cancers, la thérapeutique est en droit, au contraire, d'y trouver une voie de recherche rationnelle et peut-être aussi féconde que celle où s'engagent sans grand fondement les partisans de l'origine parasitaire.

INTRODUCTION

A

L'ÉTUDE DE LA MÉDECINE

PAR

G.-H. ROGER

PROFESSEUR AGRÉGÉ A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ DE BIOLOGIE

MÉDECIN DE L'HÔPITAL DE LA PORTE D'AUBERVILLIERS

1 vol. petit in-8°, de 954 pages, cartonné à l'anglaise.

PRIX : 7 francs.

TRAITÉ
D'ANATOMIE COMPARÉE
ET DE ZOOLOGIE

Par **ARNOLD LANG**

PROFESSEUR DE ZOOLOGIE ET D'ANATOMIE COMPARÉE
A L'UNIVERSITÉ DE ZURICH

Ouvrage traduit de l'allemand par **G. CURTEL**
Professeur agrégé de l'Université.

Deux forts volumes in-8° raisin d'ensemble 1212 pages, avec 854 figures,
cartonné à l'anglaise. Prix : 40 fr.

Tome premier : PROTOZOAIRE, ZOOPHYTES, VERS, ARTHROPODES

Un fort volume in-8° raisin de 635 pages, avec 384 figures,
cartonné à l'anglaise. Prix : 22 fr.

Tome deuxième : MOLLUSQUES, ÉCHINODERMES

Un fort volume in-8° raisin de 577 pages, avec 470 figures,
cartonné à l'anglaise. Prix : 22 fr.

L'apparition du second volume du *Traité d'Anatomie comparée et de Zoologie* termine l'important ouvrage de Lang.

On a dit avec raison que l'écueil n'était nulle part plus à redouter que dans cette science, tentée par son caractère même à se faire purement descriptive. A premier examen il n'apparaît pas aisé d'embrasser dans un ensemble didactique la multitude des divisions de tout un Règne et de toucher, le cas échéant, à la phylogénie parfois spéculative qui rattache et soude les uns aux autres les innombrables individus des groupes zoologiques. Avec le traité de Lang, les étudiants posséderont désormais un exposé systématique conforme aux exigences des programmes et un ensemble méthodique de l'anatomie comparée, basé sur l'étude d'un animal type pris dans chaque groupe et considéré au point de vue ontogénique, morphologique et anatomique.

Le règne animal est divisé en neuf embranchements que l'auteur étudie en particulier et pour chacun desquels il entreprend la classification rationnelle en même temps qu'une étude comparative de leur organisation. A l'étude de chaque embranchement s'ajoute un chapitre consacré à la solution des questions générales.

L'importance du *Traité d'Anatomie comparée et de Zoologie* de Lang réside dans ce fait qu'il est vraiment un livre d'étude. Le grand principe de la division du travail en oriente tout l'exposé. L'étudiant peut embras-

ser sans effort le tableau des classifications et se frapper à la définition primordiale de l'individu type sur lequel viennent secondairement se greffer la description des individus du même groupe. Une bibliographie termine chaque chapitre, se prêtant ainsi aux travaux d'érudition. Toutefois le texte d'un tel ouvrage deviendrait facilement diffus si, pour son intelligence, des figures ne venaient apporter le complément de leur enseignement. L'ouvrage de Lang en contient 854 entièrement inédites ou empruntées aux travaux les plus autorisés. C'est la partie descriptive du Traité. La table des matières en fera comprendre l'ampleur.

TABLE DES MATIÈRES

TOME PREMIER

Protozoaires, Zoophytes, Vers, Arthropodes

CHAPITRE PREMIER. — **La Cellule.** — *Protozoaires.* — Premier embranchement du règne animal.

CHAPITRE II. — *Zoophytes ou Cœlentérés.*

CHAPITRE III. — **Platodes.** — *Platodes.* — Troisième embranchement du règne animal.

CHAPITRE IV. — **Organisation et développement des vers.** — *Vers.* — Quatrième embranchement du règne animal.

CHAPITRE V. — **Arthropodes.** — Première partie. — *Branchianta.* — Premier sous-embranchement.

CHAPITRE VI. — **Arthropodes.** — Deuxième partie. — *Tracheata.* — Deuxième sous-embranchement.

De l'organisation et du développement des Trachéates.

TOME DEUXIÈME

Mollusques, Échinodermes

CHAPITRE VII. — **Mollusques.** — Sixième embranchement du règne animal.

CHAPITRE VIII. — **Échinodermes.** — Septième embranchement.

CHAPITRE IX. — **Les Entéropneustes.**

APPENDICE. — *Cephalodiscus et Rhabdopleura.*

LEÇONS

DE

Physiologie générale et comparée

FAITES A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE LYON

PAR RAPHAEL DUBOIS

PROFESSEUR A L'UNIVERSITÉ DE LYON

- I. — Phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux.
- II. — Biophotogénèse ou production de la lumière par les êtres vivants.

Un volume in-8° raisin de XII-534 pages, avec 221 figures dans le texte et 2 planches hors texte. Prix : 48 fr.

L'ouvrage de M. Raphaël Dubois comprend deux parties.

La première traite des *phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. La composition chimique des êtres vivants, les milieux physiologiques, les *zymases* ou ferments solubles, l'organisation physique de la substance vivante, les fonctions de nutrition, de reproduction et de relation sont successivement passés en revue, au cours d'un exposé où abondent, parfois un peu semées au hasard, les vues personnelles. Notons-en quelques-unes au passage. M. Dubois considère les *zymases* comme des particules infinitésimales de matière vivante, de bioprotéon; le fossé qui séparait les ferments figurés des ferments solubles se trouve comblé; et cette manière de voir, encore un peu hypothétique, est défendue par des arguments tout au moins très impressionnants. La nutrition nous apparaît sous un jour nouveau; l'origine de certaines substances, comme le glycogène et le sucre, se trouve expliquée d'une façon originale en même temps que le jeu des actions réciproques des corps dans les profondeurs de l'organisme est élucidé d'une manière plus satisfaisante que dans les théories actuellement en vigueur. En ce qui concerne les fonctions de relation, M. Dubois a conçu et soutient, avec une grande force d'argumentation, une théorie nouvelle du mécanisme des sensations et des fonctions psychiques, une théorie nouvelle sur les anesthésiques, sur le sommeil, sur la mort. Pour ce qui est de l'eau, enfin, le rôle incomparable de ce liquide dans l'organisme est mis nettement en lumière et la vie se montre à nos yeux beaucoup moins comme une oxydation que comme une hydratation continue et progressive. Cette première partie se termine par une comparaison, de haute portée philosophique, entre les phénomènes physico-chimiques et les phénomènes physiologiques; M. Dubois y montre très bien qu'en l'état

actuel de la science, les lois purement physiques ou chimiques ne suffisent pas à expliquer la vie. Il faut regretter seulement que l'auteur n'insiste pas assez sur le caractère *peut-être transitoire* de ce dualisme des causes naturelles.

La seconde partie de l'ouvrage commence par la photogénèse, l'étude de l'énergie rayonnée par les êtres vivants. En abordant la photogénèse, M. Dubois prenait pied sur son domaine propre : l'étude de la production de la lumière par les animaux et les végétaux est son œuvre personnelle et en quelque manière sa création. Tous les physiologistes connaissent ses beaux travaux sur la pholade dactyle et le pyrophore noctiluque. Ils en trouveront ici un résumé et une synthèse et ils reliront avec intérêt l'explication, qu'après une longue série d'expériences délicates, il a donnée de la fonction photogénique.

Telle est la matière du premier volume des *Leçons de Physiologie*. L'exposé que nous en avons fait suffit à montrer le grand mérite du travail de M. Dubois et la haute valeur d'une œuvre qui s'annonce comme magistrale.

Dixième année.

REVUE GÉNÉRALE
DES SCIENCES

PURES ET APPLIQUÉES

Paraissant le 15 et le 30 de chaque mois

PAR LIVRAISONS GRAND IN-8^o COLOMBIER RICHEMENT ILLUSTRÉES

ABONNEMENT ANNUEL :

Paris, 20 fr. ; Départements, 22 fr. ; Union postale, 25 fr.

Prix du numéro : 1 fr. 25

Chaque livraison comprend cinq parties :

- 1^o Une chronique ;
- 2^o Plusieurs articles de fond ;
- 3^o L'analyse critique des ouvrages récents ;
- 4^o Les comptes rendus des travaux soumis aux Sociétés savantes de la France et de l'Étranger ;
- 5^o Le relevé des articles récemment publiés par les principaux journaux scientifiques d'Europe et d'Amérique.

- BOSC (F.)**, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Montpellier. — **Le Cancer** (Epithéliome, Carcinome, Sarcome), maladie infectieuse à sporozoaires (formes microbiennes et cycliques). 1 vol. in-8° raisin de 266 pages, avec 34 figures dans le texte et 11 planches chromolithographiques 20 fr.
- BUNGE (G.)**, professeur à l'Université de Bâle. — **Cours de chimie biologique et pathologique**, traduit de l'allemand par le Dr Jacquet. 1 vol. in-8° raisin, de VIII-396 pages 12 fr.
- DUBOIS (Raphaël)**, professeur à l'Université de Lyon. — **Anesthésie physiologique et ses applications**. 1 vol. in-8° écu, de VIII-200 pages, avec 20 figures. 4 fr.
- ETERNOD (A.-C.-F.)**. — **Guide technique du laboratoire d'histologie normale et éléments d'anatomie et de physiologie générales**. 2^e édit. 1 vol. in-8° raisin de 354 pages, avec 141 figures. 10 fr.
- FLATAU (Edward)**. — **Atlas du cerveau humain et du trajet des fibres nerveuses**. 1 vol. grand in-4° comprenant 8 planches en héliogravure et 2 planches en chromolithographie 22 fr.
- GUÉRIN (G.)**, professeur agrégé à la Faculté de médecine de Nancy. — **Traité pratique d'analyse chimique et de recherches toxicologiques**. 1 vol. in-8° raisin de VI-494 pages, avec 75 figures dans le texte et 5 planches en chromolithographie 15 fr.
- HERTWIG (Oscar)**, directeur de l'Institut d'anatomie biologique de l'Université de Berlin. — **La Cellule et les Tissus**. Éléments d'anatomie et de physiologie générales. Ouvrage traduit de l'allemand par Ch. Julin. 1 vol. in-8° raisin de XVI-350 pages, avec 168 figures. 12 fr.
- JOLLY (L.)**. — **Les Phosphates**; leurs fonctions chez les êtres vivants, végétaux et animaux. 1 fort vol. grand in-8° jésus de 584 p. 20 fr.
- LABBÉ (A.)**, docteur ès sciences. — **La Cytologie expérimentale**. Essai de Cytomécanique. 1 vol. in-8° carré de 188 pages, avec 52 figures, cartonné à l'anglaise. 5 fr.
- LUKJANOW (S. M.)**. — **Éléments de pathologie cellulaire générale**. Leçons faites à l'Université impériale de Varsovie, traduites par MM. Fabre-Domergue et A. Pettit. 1 vol. in-8° raisin de VIII-324 p. 9 fr.
- MIQUEL (P.)**, chef du service micrographique à l'Observatoire de Montsouris. — **Étude sur la fermentation ammoniacale et sur les ferments de l'urée**. 1 vol. in-8° raisin de 320 pages, avec figures. 30 fr.
- OBERSTEINER (H.)**, professeur à l'Université de Vienne. — **Anatomie des centres nerveux**. Guide pour l'étude de leur structure à l'état normal et pathologique. Ouvrage traduit de l'allemand par le Dr J.-X. Coroenne. 1 vol. in-8° raisin de XX-512 pages, avec 184 figures. 18 fr.
- SLOSSE (A.)**. — **Technique de chimie physiologique et pathologique**. 1 vol. in-8° raisin de 260 pages. Cartonné à l'anglaise 6 fr.
- TSCHERNING**, directeur-adjoint du laboratoire d'ophtalmologie de la Sorbonne. — **Optique physiologique**. Dioptrique oculaire. Fonctions de la rétine. Les mouvements oculaires et la vision binoculaire. 1 vol. grand in-8° jésus de 338 pages, avec 201 figures. 12 fr.
- Van GEHUCHTEN (A.)**, professeur à la Faculté de médecine de Louvain. — **Anatomie du système nerveux de l'homme**. 2^e édition. 1 vol. in-8° raisin de 950 pages, avec 619 figures noires et en couleurs . . . 30 fr.