PRÉCIS
DE
PHYSIQUE BIOLOGIQUE

GÉNÉRALITÉS

I. — MESURES

De l'importance des mesures. — Il n'est plus guère nécessaire, à notre époque, de chercher à démontrer l'utilité des mesures dans les sciences expérimentales. Il suffit de jeter un regard sur le passé pour constater que dans l'une quelconque de ces sciences, que ce soit l'astronomie, la physique ou la chimie, les progrès accomplis sont directement liés aux résultats obtenus par les mesures. Dans ces dernières années, nous avons pu assister à l'évolution complète qui s'est opérée dans l'électricité, du jour où l'on a pu y faire une évaluation précise des grandeurs sur lesquelles on opérait.

La pratique des mesures s'introduit de plus en plus en physiologie et en médecine, que ce soit par le thermomètre, le calorimètre, le galvanomètre, la balance ou par tout autre procédé.

Mais il ne suffit pas de faire des mesures, il faut faire de bonnes mesures. Il n'est pas seulement inutile, il est nuisible d'encombrer les périodiques de résultats qui s'évanouissent à la première vérification sérieuse et qui nécessitent de grandes pertes de temps, de la part d'un travailleur consciencieux, pour ramener à la réalité des théories d'autant plus séduisantes parfois qu'elles sont plus erronées.

La science des mesures est une des plus délicates, c'est surtout dans sa pratique que se distingue le bon expérimentateur. Étant donnée son importance je vais entrer dans quelques détails. Il ne suffit pas d'avoir sur cette question des notions approximatives et vagues. Il est indispensable d'avoir des idées précises non seulement pour l'homme de laboratoire, mais pour tout lecteur s'il veut pouvoir faire, en bonne connaissance de cause, la critique scientifique d'un travail qu'il étudie.

Faire une mesure, c'est déterminer le rapport qui existe entre une certaine grandeur et une autre grandeur de même espèce prise pour unité.

Si, par exemple, on veut mesurer une longueur, on la compare à une certaine longueur prise pour unité, qui, en France, est le mètre, et on cherche quel est le rapport entre cette longueur à mesurer et le mètre. Le rapport sera la mesure. Elle sera de 3, 4, 5, etc., suivant que le rapport est lui-même de 3, 4, 5, etc., c'est-à-dire suivant qu'elle contiendra 3, 4, 5, etc., fois le mètre.

Au lieu de se servir du mètre on aurait pu prendre une autre longueur comme unité, par exemple le pied anglais, on aurait alors trouvé d'autres mesures. C'est pourquoi il ne suffit pas de donner la mesure d'une grandeur, il faut indiquer quelle est l'unité dont on s'est servi et l'on dira alors qu'une longueur a 3, 4, etc., mètres ou 3, 4, etc., pieds, ou 3, 4, etc., yards et ainsi de suite.

Il y aurait grand intérêt à ce que toutes les mesures de même espèce se fissent avec la même unité; ainsi, pour rester dans l'exemple que nous avons choisi, que toutes les mesures de longueur se fissent avec le mètre. On conçoit en effet que cela faciliterait beaucoup les comparaisons entre les observations des divers auteurs, et, par suite de l'habitude que l'on prendrait de l'unité, on se rendrait plus facilement compte de la valeur des grandeurs.

Je lis dans un livre anglais qu'un homme a une taille de cinq pieds sept pouces, je ne me figure nullement s'il est grand ou petit, supérieur ou inférieur à la moyenne. Je cherche dans une table et je trouve que le pied anglais vaut 0 m. 305 et le pouce 0 m. 025. A l'aide de deux multiplications et d'une addition, j'obtiens 1 m. 81 et c'est alors seulement que je puis me figurer la taille de cet homme. Même embarras si on me dit que la façade d'une maison est de 18 yards ou la capacité d'un tonneau de 50 gallons. La plupart des peuples civilisés ont maintenant adopté les unités du système métrique, et même dans les pays où, pour des raisons d'amour-propre mal placé, l'ensemble des populations, ou les pouvoirs publics, sont encore réfractaires, les savants n'emploient plus guère qu'elles et ne cessent de demander leur adoption.

Pour mesurer une espèce de grandeur, il faut donc avant tout choisir une unité, puis comparer les grandeurs à mesurer à cette unité.

Nous allons examiner successivement ces deux questions.

Du choix des unités et de leur emploi. — Nous avons dit que pour chaque espèce de grandeur il faut prendre comme unité une certaine grandeur de même espèce adoptée une fois pour toutes. Ainsi, pour mesurer les longueurs, nous prendrons pour unité une certaine longueur qui sera le mètre; pour mesurer le temps, nous prendrons un certain temps, la seconde; pour mesurer les masses, nous prendrons le gramme et ainsi de suite.

Nous voyons immédiatement que les unités sont de deux espèces, suivant qu'elles peuvent se présenter matériellement ou non, ceci a une grande importance; au point de vue de la méthode que nous pourrons employer pour effectuer des mesures au moyen de ces unités.

Prenons l'unité de longueur ou l'unité de masse, elles seront représentées par la longueur d'une tige ou la masse d'un morceau de métal, par exemple. Ces unités ont des représentations matérielles; nous les possédons en main lorsque nous voulons nous en servir.

Mais il n'en sera pas de même de l'unité de vitesse, de l'unité de temps, de l'unité de chaleur et de bien d'autres. Il n'est pas possible de représenter matériellement une vitesse.

Nous sommes alors obligés de nous contenter de définir ces unités.

Nous dirons par exemple : Un point possède l'unité de vitesse quand il se déplace uniformément d'un mètre par seconde. Nous dirons aussi que nous avons communiqué l'unité de chaleur à un corps, quand cette chaleur sera suffisante pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau. Certaines de ces unités sont susceptibles d'une définition très simples; telle l'unité de vitesse. D'autres, au contraire, comme des unités électriques, nécessitent la connaissance approfondie des lois de la physique. Nous nous occuperons plus spécialement des diverses unités lors de l'étude de chaque phénomène en particulier.

Certains systèmes d'unité, comme le système anglais, ont non seulement l'inconvénient de s'écarter du système le plus généralement adopté, mais encore de porter en eux-mêmes une cause d'infériorité ; ils ne sont pas décimaux.

Dans le système métrique une unité quelconque ; et nous continuerons à prendre pour exemple le mètre ; a pour multiples ou sous-multiples des valeurs décimales, c'est-à-dire valant 10 fois, 100 fois, etc., plus ou moins que le mètre. Il en résulte, qu'une mesure quelconque, faite au moyen du mètre, peut s'écrire par un seul nombre suivant la méthode adoptée en arithmétique par tous les peuples. Une telle mesure en mètres sera par exemple exprimée par le nombre 315,64, qui se prête facilement à la combinaison avec d'autres nombres analogues, et en général aux opérations arithmétiques. Une seule mesure, celle des temps, fait exception ; elle comporte des secondes, des minutes, des heures. Aussi l'on sait combien se compliquent alors les opérations. Prenons la plus simple, l'addition. Pour ajouter 2 heures 27 minutes 33 secondes à 1 heure 38 minutes 44 secondes, il faut faire toute une série d'opérations, uniquement parce que l'heure, la minute et la seconde ne sont pas décimales l'une par rapport à l'autre.

Les anciennes mesures françaises avaient le même inconvénient pour toutes les espèces de grandeur, et la décimalisation fut un des grands avantages du système métrique.

Actuellement les mesures anglaises ont conservé ce caractère d'infériorité. Il suffit pour s'en convaincre d'ajouter 5 pieds 7 pouces 8 lignes à 4 pieds 8 pouces 9 lignes. On ne trouve 10 pieds 4 pouces 5 lignes qu'au prix d'une série d'opérations alors que pour ajouter 2 m. 32 à 5 m. 89 on trouve 8 m. 21 par une seule addition.

Mais il ne suffit pas de prendre une unité universellement adoptée et de lui appliquer le système décimal ; un petit nombre d'unités seulement peuvent être choisies arbitrairement, les autres s'imposent comme nous allons le voir dans la suite.

Les unités choisies arbitrairement sont au nombre de trois, celles de longueur, de masse et de temps. On a pu les choisir arbitrairement parce qu'elles sont tout à fait indépendantes l'une de l'autre.

L'unité de longueur sera le mètre, un multiple ou sous-multiple décimal du mètre.

L'unité de masse sera la masse du gramme, un multiple ou sous-multiple décimal de ce gramme.

L'unité de temps sera la seconde.

Ces trois unités sont ce que l'on appelle les unités principales. Les autres seront les unités dérivées; elles dépendent des précédentes, comme on le verra plus loin.

Les longueurs se compareront au mètre d'après des procédés variables que nous ne pouvons tous décrire ici. La méthode la plus simple consiste à placer la longueur à mesurer contre une règle divisée et à déterminer ainsi cette longueur par comparaison directe. Mais il y a des cas où cette méthode n'est pas applicable, où il faut se servir de viseurs, de cathétomètres, etc. Chacun de ces cas doit faire l'objet d'études particulières.

Les masses se comparent à l'unité de masse à l'aide d'une balance, d'un dynamomètre, d'un aréomètre.

Le temps qui s'écoule se détermine par le mouvement d'une aiguille sur le cadran d'une horloge ou d'une montre dont la régularité est donnée soit par les oscillations d'un pendule, soit par celles d'un balancier.

Passons maintenant aux unités dérivées et à leur emploi. Nous prendrons comme exemple la mesure des volumes. Il peut arriver que cette mesure se fasse d'une façon très simple; cela a lieu lorsque l'on veut déterminer la valeur d'une certaine quantité de liquide contenue dans un vase. On peut alors se servir d'un vase pris pour unité, contenant un litre par exemple, et chercher combien de fois on pourra remplir ce vase unité avec la masse liquide à évaluer. Mais souvent cette méthode n'est pas applicable et c'est alors que nous allons voir apparaître la relation entre l'unité dérivée et les unités principales.

Supposons que nous ayons à évaluer le volume d'un corps solide, d'un bloc de pierre, nous ne pouvons opérer comme pour le liquide; mais la géométrie nous apprend à faire cette détermination en mesurant certaines dimensions linéaires du bloc. Par exemple si c'est un parallélipipède, en mesurant la longueur, la largeur et la hauteur. On applique une formule, variable suivant la forme du bloc.

Cette formule contient en général des coefficients numériques qui en compliquent l'application. Ces coefficients disparaissent par un choix judicieux de l'unité de volume et les opérations sont alors simplifiées.

Nous allons rendre cela plus clair par un exemple. L'unité de longueur étant le mètre, supposons que l'on prenne pour unité de volume le pied cube et que l'on demande le volume d'un parallélipipède ayant 2 m. de long, 3 m. de large et 4 m. de haut.

La géométrie nous apprend que le volume sera donné par la formule.

$$V = 2 \times 3 \times 4 \times 29{,}41 = 705 \text{ p. c. } 84.$$

Il faut multiplier entre elles les trois dimensions, puis multiplier encore le résultat par 29,41. Ce nombre 29,41 est une constante, par laquelle il faudra toujours multiplier le produit des trois dimensions d'un parallélipipède, quand ces dimensions seront exprimées en mètres et que l'on voudra avoir le volume en pieds cubes.

Avec un autre choix pour l'unité de volume, ou l'unité de longueur, on aura un coefficient autre que 29,41. A chaque cas correspond un coefficient déterminé.

Si l'on prend le mètre pour unité de longueur et le mètre cube pour unité de volume, le coefficient se réduit à 1, la formule devient plus simple puisqu'en somme il suffit de faire le produit des trois nombres mesurant les arêtes du parallélipipède. On aura alors.

$$V = 2 \times 3 \times 4 = 24 \text{ mètres cubes.}$$

On voit donc que si les unités principales peuvent être choisies arbitrairement sans inconvénient, il n'en est pas de même des unités dérivées. Dans tous les systèmes où ce deuxième choix est également arbitraire il en résulte une complication dans les calculs. Ce n'est que par un choix judicieux que l'on est arrivé à la simplicité du système métrique, où toutes les unités autres que celles de longueur, de masse et de temps se sont imposées par la nécessité d'éviter l'introduction de coefficients inutiles dans les formules de mesure.

Nous verrons toutefois que les unités relatives aux mesures de chaleur n'ont pas encore été convenablement choisies.

Il faut être très circonspect et très attentif dans l'application pratique des formules, très souvent il s'introduit des erreurs parce que l'on n'a pas prêté assez d'attention aux unités avec lesquelles on a fait les mesures des diverses valeurs entrant dans ces formules. A cet égard il y a un principe absolu qu'il ne faut jamais perdre de vue, toutes les grandeurs de même espèce entrant dans une formule doivent être mesurées à l'aide de la même unité. Pour préciser il ne faudra pas introduire dans une formule des mesures de longueur en mètres et d'autres en centimètres ou en millimètres. Si l'on adopte le mètre, les surfaces seront exprimées en mètres carrés, les volumes en mètres cubes. Si on a pris le centimètre pour unité de longueur, les surfaces seront exprimées en centimètres carrés, les volumes en centimètres cubes, etc.

Tous ces détails paraissent évidents ou inutiles à signaler, mais l'expérience montre bientôt que les personnes n'ayant pas une grande habitude de l'application numérique des formules commettent à ce sujet de fréquentes erreurs et éprouvent bien des mécomptes.

II. — ERREURS

Erreurs absolues et erreurs relatives. — Quel que soit le soin apporté dans l'exécution d'une mesure, on ne l'obtient jamais avec une précision absolue. Celles qui peuvent être citées comme le modèle le plus parfait et qui sont exécutées par les physiciens, les astronomes et les géodésiens sont elles-mêmes entachées d'erreurs parfois minimes, mais qu'il est impossible d'écarter complètement.

Les mesures que l'on fait dans les sciences biologiques sont loin de comporter une aussi grande précision, il faut même dire qu'elle serait aussi inutile qu'illusoire. S'il est important de déterminer de la façon la plus rigoureuse le moment du passage d'une étoile au méridien ou la longueur d'une base de triangulation, et de tenir compte dans les éléments de leur calcul de toutes les causes de perturbation, il serait aussi impossible que dénué d'intérêt de chercher à opérer de même pour la durée de la vie d'un animal ou pour la dimension d'un de ses organes. Le propre d'un expérimentateur doué de jugement est, non pas de rechercher la précision la plus grande à laquelle il puisse arriver dans une expérience particulière, mais d'atteindre la précision utile. Ici il est impossible de donner une indication quelconque, il appartient à chacun de fixer l'approximation nécessaire pour le but qu'il se propose.

Prenons comme exemple la durée d'existence des animaux. Si nous voulons déterminer l'étendue de la vie moyenne d'une race de chiens dans les conditions normales d'existence, il nous suffira de noter, pour un grand nombre d'individus, la durée d'existence à un mois près au maximum, car sans aucune cause apparente, les écarts d'une observation à l'autre dépasseront cette erreur et nous arriverons à une moyenne qui pourra être quinze ans quatre mois, valeur très suffisamment approchée puisque tel individu pourra parfaitement mourir six mois plus tôt ou plus tard et même davantage.

Supposons maintenant que nous désirions connaître la durée de survie de chiens après une intoxication lente déterminée. Il nous faudra une plus grande précision, cette survie se mesurera par jours. Si l'intoxication est plus rapide, il faudra noter les heures; dans certains cas nous arriverons aux minutes et peut-être aux secondes.

Nous voyons donc combien toutes ces choses sont variables, et combien le jugement de l'observateur intervient pour la détermination de la précision à rechercher. Toutefois la notion d'erreur relative que nous exposerons plus loin peut nous guider dans la valeur de l'approximation utile.

J'ai pris comme exemple un cas simple et se prêtant facilement à l'exposition, mais nous nous trouverons en présence des mêmes hésitations chaque fois que nous ferons une mesure en biologie, que ce soit la détermination de la chaleur dégagée par un animal, des gaz de sa respiration, de l'excrétion urinaire ou autre, de l'évaluation de la toxicité d'un produit chimique ou de la grandeur d'une décharge électrique nécessaire pour exciter un nerf.

Un phénomène biologique se produisant dans des conditions en apparence identiques, comporte certains écarts dus à des perturbations sur lesquelles nous n'avons aucune action, et provenant de ce que l'on appelle les différences individuelles des sujets sur lesquels on opère. Dans les mesures que l'on fera, on pourra en général négliger les erreurs de même ordre que ces différences individuelles, ou mieux d'ordre un peu inférieur. Ainsi, si dans une série d'analyses de gaz de la respiration correspondant aux mêmes conditions, on trouve, dans un volume donné d'air, des quantités d'acide carbonique variant de 30-36 cm^3; la moyenne sera 33, les écarts seront de 3 cm^3, et l'on aura une précision suffisante en faisant les analyses avec une approximation de 1 cm^3.

Toutefois si dans les expériences de physiologie une précision exagérée n'est en général pas nécessaire, il est au contraire indispensable d'être renseigné sur la nature et l'importance des erreurs que l'on commet.

A ce point de vue il faut distinguer diverses sortes d'erreurs.

En premier lieu nous avons *les erreurs absolues* et *les erreurs relatives*.

Ce sont ces dernières qui sont surtout intéressantes. Prenons encore comme exemple les mesures de longueur; nous commettons, avons-nous dit, sur ces mesures certaines erreurs. L'écart entre la valeur que nous trouvons dans chaque détermination et celle que nous devrions trouver constitue *l'erreur absolue* de la mesure. Par exemple une longueur a 1 m., nous devrons trouver 1 m.; mais notre mesure nous donnera 0,99, l'erreur absolue de cette mesure sera de 0,01 cm. *par défaut*, notre mesure est trop courte. Dans une autre mesure nous obtiendrons 1 m. 02. L'erreur sera de 0,02 cm. *par excès*, notre mesure sera trop grande.

Nous avons parfaitement la notion qu'avec de pareilles mesures, notre détermination ne sera pas bonne, en général les mesures de longueur se font avec plus de précision.

Supposons maintenant que nous fassions des mesures de longueur sur une route et que nous cherchions à déterminer un hectomètre; il se pourra que nous ayons les mêmes erreurs absolues 0,01 par défaut ou 0,02 par excès, mais ces erreurs nous paraîtront très acceptables étant donnée la grandeur à mesurer, la détermination sera bonne.

Elle sera très bonne si nous commettons les mêmes erreurs absolues sur la mesure d'un kilomètre, excellente si nous opérons sur myriamètre. Autrement dit, une même erreur absolue diminue d'importance d'autant plus que la grandeur à mesurer croît davantage. C'est ainsi que s'introduit la notion *d'erreur relative*.

L'erreur relative est égale à l'erreur absolue divisée par la valeur de la grandeur à mesurer. Ainsi, dans les cas que nous venons d'examiner, les erreurs relatives par défaut sont respectivement $\frac{0{,}01}{1}$, $\frac{0{,}01}{100}$, etc., ou, en fractions décimales : 0,01, 0,0001, 0,00001, 0,000001. On voit que l'erreur absolue étant la même, les erreurs relatives deviennent d'autant plus petites que la grandeur à mesurer est plus considérable.

Nous devons faire une distinction entre les grandeurs des erreurs relatives que nous pouvons tolérer, suivant la nature des phénomènes que nous étudions.

S'il s'agit d'opérations du genre de celles qui sont exécutées au Bureau international des poids et mesures, on cherche à pousser la précision jusqu'aux extrêmes limites. Les expérimentateurs sont alors maîtres de toutes les conditions qui peuvent influer sur les résultats, aussi arrivent-ils à déterminer la longueur d'une règle divisée ou le poids d'un corps avec une exactitude remarquable.

Dans les expériences de physiologie il ne peut être question d'atteindre une pareille précision. Les conditions dans lesquelles nous nous trouvons alors sont trop complexes, un grand nombre d'entre elles échappent à notre appréciation, et il s'introduit, du fait des différences entre les animaux sur lesquels nous opérons, des erreurs sur lesquelles nous n'avons aucune prise; aussi devons-nous nous contenter d'approximations beaucoup moindres.

Il est impossible de fixer la limite des erreurs permises dans ce genre de recherches, toutefois nous pouvons dire d'une façon approximative que chaque fois que la matière vivante est en jeu, on ne peut, dans le résultat final, espérer des erreurs relatives de $\frac{1}{100}$, souvent on est obligé de se contenter du $\frac{1}{10}$; $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{30}$ sont des résultats extrêmement satisfaisants.

Une des principales difficultés auxquelles nous nous heurtons dans les sciences biologiques est l'impossibilité où nous nous trouvons de faire la séparation des variables, opération absolument indispensable à toute mesure de précision. Nous allons expliquer cela en prenant un exemple de physique pure.

Supposons que l'on veuille étudier la relation qui existe entre le volume d'un gaz et sa pression, c'est-à-dire la loi de Mariotte. Nous savons que le volume de ce gaz dépend de deux variables, la pression dont nous voulons étudier les effets, et la température. Nous devons dans nos expériences laisser la température absolument constante et ne faire varier que la pression, faute de quoi nos observations seront entachées d'erreur. En ne faisant varier que la pression nous aurons fait ce qu'on appelle, *séparer cette variable*.

Prenons maintenant un exemple dans la biologie Supposons que l'on veuille étudier la loi de consommation de l'oxygène d'un animal quand la température varie : nous devons faire des déterminations d'oxygène, la température variant seule, ce sera la variable séparée; en dehors d'elle il faudra laisser constants l'alimentation, l'état de repos ou de mouvement, etc. Autrement dit, il faudra que l'animal se trouve toujours absolument dans le même état. C'est cette condition qu'il est pour ainsi dire impossible de réaliser dans les sciences biologiques; jamais on ne trouve deux animaux identiques pour faire des expériences comparatives, et même jamais un même animal ne se trouve dans les mêmes conditions, à deux moments différents. Il n'y a qu'un moyen de se tirer de cette difficulté, il faut répéter la même expérience un grand nombre de fois et prendre une moyenne, pour éliminer, ou tout au moins diminuer, les effets des causes accidentelles sur lesquelles nous n'avons pas d'action.

Méthode des moyennes. Erreurs accidentelles et erreurs systématiques. — Comme il vient d'être dit, il ne suffit jamais, dans les expériences de physiologie, de faire une recherche une seule fois, surtout dans les cas où il peut s'introduire des différences qui échappent à nos moyens d'investigation, par exemple celles qui tiennent aux animaux sur lesquels nous expérimentons.

Lorsque l'on a obtenu les résultats provenant d'un certain nombre d'expériences, on en fait la moyenne, et cette moyenne est considérée comme un résultat plus approché de la vraie valeur que chacun des résultats partiels.

Voici le principe sur lequel est basée cette méthode. Considérons une longueur, un mètre par exemple, et cherchons à déterminer cette longueur. Comme nos procédés et nos sens ne sont pas parfaits, nous ferons une certaine erreur sur cette détermination, et nous trouverons une valeur un peu trop petite. Dans une autre détermination de la même longueur, nous trouverons une valeur un peu trop grande; et ainsi de suite. L'expérience prouve que, sauf certains cas spéciaux que nous envisagerons tout à l'heure, les mesures se partagent à peu près également en mesures trop grandes et mesures trop petites. En faisant la somme de tous les résultats obtenus, les erreurs se compensent plus ou moins, et se détruisent d'autant plus que le nombre de résultats que l'on ajoute est plus grand. La somme est, par suite d'autant plus voisine de celle qu'elle devrait être, c'est-à-dire de celle qu'elle serait si l'on n'avait commis aucune erreur. Il en résulte qu'en prenant la moyenne de tous les résultats obtenus, on a une valeur s'approchant d'autant plus de la valeur réelle que le nombre de résultats partiels est plus grand. Les erreurs dont sont entachés ces résultats partiels sont ce que l'on appelle *des erreurs accidentelles*, elles ne dépendent que d'un manque de perfection de nos sens et de nos méthodes, et sont indifféremment par défaut et par excès. En faisant la différence entre le résultat obtenu par la moyenne et chacun des résultats partiels, on obtient les erreurs de ces résultats partiels.

Il faut bien insister sur le fait que cette méthode est d'autant meilleure que le nombre d'observations est plus grand ; ce n'est que dans ces conditions que les erreurs se partagent à peu près également, et que leur influence dans la moyenne disparaît. Ceci est facile à comprendre par une comparaison.

Prenons un sou et lançons-le en l'air, il retombera, par exemple, face. Il pourra arriver que deux ou trois fois de suite il retombe face, et si l'on se bornait à ces deux ou trois expériences, on trouverait que la proportion de chute côté face est de 100 p. 100.

Faisons maintenant dix expériences, nous trouverons peut-être 6 faces et 4 piles, la proportion de faces sera 60 p. 100.

Pour 100 expériences, on aura 55 faces et 45 piles, la proportion sera 55 p. 100.

Et ainsi de suite, on se rapprochera de plus en plus, comme le prouve l'expérience, de la probabilité d'une proportion 50 p. 100.

Mais pour cela il ne faut pas qu'il y ait une cause donnant à la pièce une tendance plus grande à tomber d'un côté que de l'autre. Il ne faut pas d'une façon générale que l'expérience soit entachée de ce que l'on appelle une *erreur systématique*.

Nous allons prendre l'erreur systématique sous sa forme la plus simple.

On veut faire des mesures de longueur, et l'on se sert pour cela d'une règle divisée. Admettons que cette règle ait perdu un centimètre du côté de son zéro, chaque fois que nous lisons une longueur, le chiffre lu aura un centimètre de trop par le seul fait de ce défaut. Ce centimètre en trop sera une erreur systématique ; chaque mesure sera entachée de cette erreur, même en admettant qu'en dehors de cela elle soit exécutée d'une façon parfaite. Dans la moyenne, cette erreur subsistera quel que soit le nombre des observations faites.

L'erreur systématique est l'erreur la plus grave que l'on puisse faire dans les expériences. — Dans l'exemple que j'ai cité, elle apparaît clairement et il semble presque inutile d'attirer l'attention sur elle, et cependant c'est une des plus répandues, car elle échappe facilement à celui qui n'a pas la grande habitude du laboratoire et le soin le plus minutieux de sa technique. C'est à cause d'elle que les mémoires scientifiques sont encombrés de chiffres sans valeur, ne résistant pas au premier contrôle sérieux. Pour ne rester que dans les erreurs les plus grossières, combien n'y a-t-il pas dans les laboratoires de thermomètres dont le zéro s'est déplacé, de poids erronés, de seringues mal calibrées, de liqueurs mal titrées.

Pour faire de bonnes expériences, il n'est pas toujours nécessaire en Physiologie d'avoir des méthodes de haute précision, mais il est indispensable qu'elles ne comportent pas d'erreurs systématiques, et il faut toujours connaître l'erreur relative accidentelle qu'elles peuvent entraîner. Cette erreur relative doit être inférieure à celles qui s'introduisent par suite des différences individuelles entre les divers animaux sur lesquels on opère. Dans ces conditions, en répétant la même expérience un certain nombre de fois, et prenant la moyenne des résultats, on obtient de bonnes mesures. Les écarts entre la moyenne et chaque observation isolée, donneront l'erreur portant sur chacune de ces observations. Donnons, pour terminer, un exemple de cette méthode.

Supposons que l'on veuille déterminer la quantité d'oxygène consommée par un homme en un jour. Par une méthode sur laquelle il n'y a pas lieu d'insister ici, on fera des dosages aux différentes heures de la journée et l'on obtiendra par addition pour 20 jours successifs une série de nombres portés dans la 2e colonne du tableau ci-après :

	Oxygène absorbé.	Écarts avec la moyenne.
1re journée	744 grammes	+ 0,4
2 —	743 —	— 0,6
3 —	741 —	— 2,6
4 —	745 —	+ 1,4
5 —	748 —	+ 4,4
6 —	751 —	+ 7,4
7 —	746 —	+ 2,4
8 —	741 —	— 2,6
9 —	738 —	— 5,6
10 —	737 —	— 6,6
11 —	742 —	— 1,6
12 —	748 —	+ 4,4
13 —	752 —	+ 8,4
14 —	746 —	+ 2,4
15 —	741 —	— 2,6
16 —	736 —	— 7,6
17 —	739 —	— 4,6
18 —	744 —	+ 0,4
19 —	751 —	+ 7,4
20 —	746 —	+ 2,4
Total	14 879 grammes	
Moyenne.	743 gr. 6	

Une expérience de ce genre n'aurait de valeur que si l'on supposait la personne soumise à l'expérience placée autant que possible dans les mêmes conditions et conservant la même alimentation. On arriverait alors à ce résultat que cet homme cosomme en moyenne 743 g. 6 d'oxygène par 24 heures avec des écarts figurés dans la 3ᵉ colonne du tableau, ne dépassant pas 8 g. 4 en plus ou 7 g. 6 en moins de la moyenne. En faisant une observation dans les mêmes conditions un jour quelconque, on trouverait presque à coup sûr un chiffre intermédiaire entre 736 g. et 751 g. et le plus souvent il serait plus voisin encore de 743 g. 6.

III. — REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les tableaux numériques et les courbes. — Lorsque, à la suite d'une série d'expériences ou d'observations, on a obtenu certains résultats numériques, on réunit généralement ces résultats en un tableau en portant dans une première colonne la valeur de la variable, et dans une seconde les valeurs correspondantes de la grandeur étudiée. Par exemple, la première colonne contiendra les diverses valeurs de la pression exercée sur un volume gazeux, la seconde les valeurs correspondantes des volumes. Ou bien encore la première colonne contiendra les températures d'un liquide, la seconde, les tensions de vapeur correspondantes. Prenons encore un exemple tiré de la biologie, la première colonne contiendra l'indication des temps (jours ou heures), la seconde, les températures correspondantes d'un malade ou d'un animal.

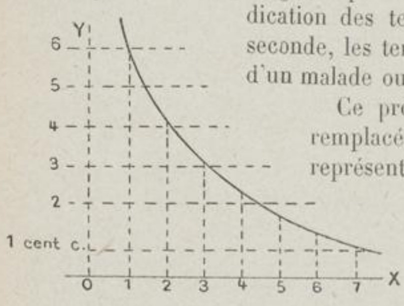

Fig. 1.

Ce procédé est avantageusement remplacé par un autre consistant à représenter le phénomène par une courbe. On trace deux axes rectangulaires, l'un *ox* dit axe des abscisses, l'autre *oy* dit axe des ordonnées. Sur l'axe des abscisses à partir de *o*, on porte les diverses valeurs de la première colonne contenant la variable, en prenant pour unité une longueur arbitraire. Par exemple, s'il s'agit de représenter la variation de volume d'un gaz quand la pression varie, on représentera 1 atmosphère par 1 cm. porté en suivant ox à partir de o ; 2 atmosphères seront représentées par 2 cm. et ainsi de suite. Aux points obtenus ainsi 1, 2, 3,... on élève des ordonnées, parallèles à oy, et ayant une longueur proportionnelle au volume occupé par le gaz sous chaque pression, à l'aide d'une échelle que l'on choisira à volonté. Par exemple 1 cm. figurera 1 dm^3 ou 1 cm^3. On pourra ainsi reporter sur la figure une série de points en se servant du tableau des résultats numériques. En joignant tous ces points par un trait continu on obtient une courbe représentative du phénomène.

Voici les avantages de ce système de représentation :

1° Tous les résultats du tableau numérique se trouvent sur la courbe. Si, par exemple, on veut connaître le volume du gaz à 5 atmosphères, il suffira de mesurer ou de lire la hauteur de l'ordonnée correspondant au chiffre 5 de l'axe des abcisses ; sachant le volume auquel correspond 1 cm. on aura le volume auquel correspond la longueur de l'ordonnée 5. Du reste, il est bon d'indiquer, comme le représente la figure, sur l'axe oy les différents volumes correspondant aux diverses hauteurs d'ordonnées.

2° Si l'on désire connaître le volume correspondant à une pression ne se trouvant pas sur le tableau, par exemple à 3, 2, on le lit directement sans calcul ; il suffit de prendre l'ordonnée correspondant à la division 3, 2 que l'on détermine approximativement ou même avec précision si l'on a eu soin de tracer la courbe sur un papier finement quadrillé, préparé dans ce but, et se trouvant dans le commerce. Ce papier est divisé par centimètre à l'aide de traits accentués, et chaque centimètre est subdivisé en millimètres par des lignes plus fines.

3° On peut facilement résoudre le problème inverse du premier. Connaissant un volume, trouver la pression correspondante. Il suffit pour cela de chercher l'ordonnée ayant la longueur voulue, et de lire à quelle abscisse elle correspond.

4° Enfin un grand avantage est que, du premier coup, on embrasse l'allure générale du phénomène étudié.

Considérons, par exemple la figure 2, représentant graphiquement la variation de taille et de poids d'un enfant, on y voit immédiatement tous les accidents qui se produisent, et la rapidité avec laquelle le poids et la taille varient ; aucun tableau numérique ne pourrait donner cette impression, il nécessiterait tout un travail pour rechercher, par exemple, si l'accroissement est plus rapide dans un mois que dans un autre.

Ce système de représentation se recommande toutes les fois que l'on veux exprimer les variations d'une grandeur correspondant aux variations d'une autre grandeur. Lui seul permet de suivre l'allure d'un phénomène enfoui dans les tableaux de chiffres. Il suffit, pour se convaincre de cela, de comparer les courbes de la figure 2 avec un tableau de chiffres représentant les mêmes phénomènes. On jugera de ce qui peut arriver quand ces tableaux se multiplient. Bowditch a fait une série d'études sur la croissance et l'augmentation de poids des enfants soumis à différentes conditions d'existence, et en a tiré des conclusions très importantes; mais il

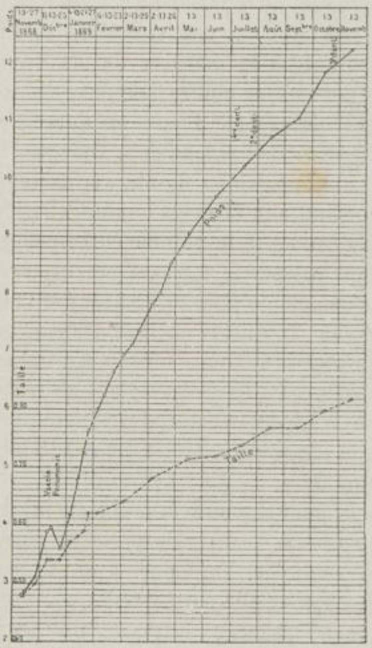

Fig. 2. — Courbes de l'accroissement du poids et de la taille de Jean Lorain pendant la 1re année.

n'a pu arriver à ce résultat que grâce à la représentation par courbes, jamais il n'aurait pu autrement dégager une loi de la foule des chiffres qu'il avait à sa disposition.