JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ STATISTIQUE DE PARIS

PIERRE VENDRYÈS

Déterminisme et aléatoire de la relation articulaire

Journal de la société statistique de Paris, tome 104 (1963), p. 131-157
<http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1963__104__131_0>

© Société de statistique de Paris, 1963, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société statistique de Paris » (http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM
Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

VI

VARIÉTÉ

DÉTERMINISME ET ALÉATOIRE DE LA RELATION ARTICULAIRE

En physiologie théorique, la notion de *relation articulaire* doit prendre une grande importance.

Cet article n'a pas seulement pour objet de définir et d'analyser cette notion. Il se propose de montrer qu'elle a une valeur scientifique très générale. C'est ainsi qu'il va être beaucoup question de géométrie et de cinématique appliquée. Les fondements mêmes de

la géométrie seront en cause. Pour comprendre l'idée de relation articulaire, il faut avoir bien distingué la relation *déterministe* et la relation *aléatoire*. En effet, la relation articulaire comporte du déterminisme et de l'aléatoire.

Grâce à cette analyse théorique, la relation articulaire prendra sa pleine valeur pour la physiologie théorique. J'ai proposé, il y a plus de vingt ans, l'interprétation probabiliste de l'autonomie physiologique. Or, le corps animal est un système articulé. Par ce qu'elle comporte d'aléatoire, la relation articulaire devient donc partie intégrante de cette interprétation probabiliste de l'autonomie.

Donc, l'idée de relation articulaire mérite d'être analysée autant pour sa valeur scientifique générale que pour le rôle qu'elle doit jouer en physiologie théorique.

I. LA RELATION ARTICULAIRE

1. *La relation déterministe et la relation aléatoire*

Il faut commencer par rappeler les définitions suivantes, que j'ai déjà eu l'occasion d'énoncer dans ce journal, au cours de mon article : « Mathématique déterministe et mathématique de l'aléatoire », en janvier 1962.

Entre deux systèmes, les relations sont *déterministes* lorsqu'elles sont ce qu'elles sont, et ne peuvent simultanément être autres que ce qu'elles sont. Ce caractère d'unicité leur est essentiel.

Entre deux systèmes, les relations sont *aléatoires* lorsque, avant de se réaliser, elles peuvent se réaliser de plusieurs manières simultanément possibles. Ce caractère de multiplicité leur est essentiel. Avant de se réaliser, un événement aléatoire comporte plusieurs cas possibles. Mais, au moment de sa réalisation, un seul de ces cas possibles se réalisera, à l'exclusion de tous les autres. On exprime cette exclusion dans le temps en disant que les cas possibles sont incompatibles entre eux. Multiplicité et incompatibilité sont les deux caractères spécifiques de l'événement aléatoire.

Par exemple, les jeux de hasard sont construits dans le but précis d'offrir au joueur de multiples choix simultanément possibles. Les relations sont aléatoires entre les choix du joueur et les jeux de cartes dont une carte sera tirée au hasard. Au moment où le jeu sera effectué, une seule de ces éventualités possibles se réalisera, à l'exclusion des autres. Et c'est ainsi que le joueur se trouvera dans le cas de perdre ou de gagner.

Chacun des cas possibles n'a qu'une certaine probabilité de se réaliser. Il arrive que cette probabilité puisse être définie mathématiquement et qu'elle puisse être alors soumise au calcul des probabilités. Le qualificatif d'aléatoire est même réservé, en général, à ces événements mathématiquement probabilisables. Sinon, on peut parler d'événement éventuel. Pour simplifier, je n'utiliserai que le terme aléatoire.

2. *Relation aléatoire et discontinuité*

Les définitions que je viens de donner permettent de distinguer nettement les relations déterministes des aléatoires. Pour les premières, le nombre des cas possibles est égal à un; et, pour les secondes, il est supérieur à un. En réduisant à l'unité le nombre des cas possibles, le déterminisme peut être considéré comme un cas particulier de l'aléatoire.

Le déterminisme a pour conséquence la prévisibilité des événements. En effet, l'évolution des événements, ne pouvant être autre que ce qu'elle doit être, se fera d'une seule-

manière possible dans l'avenir. Au contraire, en raison de la multiplicité de ses cas possibles, l'évolution d'un événement aléatoire est imprévisible. Donc, la prévisibilité et l'imprévisibilité des événements sont des conséquences des définitions que j'ai données; mais elles ne font pas partie de ces définitions elles-mêmes.

La coexistence, dans la nature, de relations déterministes et de relations aléatoires, peut être justifiée par le principe suivant, que j'ai énoncé à plusieurs reprises, en généralisant, avant de la connaître, une conception de Cournot (1801-1877) : les relations sont déterministes entre systèmes liés, et aléatoires entre systèmes indépendants.

Pour que, entre deux systèmes, les relations soient aléatoires, une condition est nécessaire : il faut que ces deux systèmes soient indépendants l'un de l'autre. Il faut que, entre eux, il y ait *discontinuité.*

Cette notion de discontinuité va jouer un grand rôle au cours de cet article.

3. *La relation articulaire*

Les relations articulaires comportent du déterminisme et de l'aléatoire.

Pour vérifier cette proposition, prenons l'exemple d'une articulation entre deux os.

Voici, d'abord, l'aléatoire. Grâce à l'articulation qui les sépare, ces os peuvent effectuer, à tout moment, et l'un par rapport à l'autre, des mouvements très variés, de flexion ou d'extension, d'abduction ou d'adduction, de rotation dans un sens ou dans l'autre. D'un moment à l'autre, un membre peut prendre les postures les plus diverses. Les positions relatives de ses os peuvent donc, à tout moment ultérieur, être simultanément multiples, tout en étant, bien sûr, incompatibles entre elles, puisque les mouvements de flexion excluent ceux d'extension et qu'une rotation ne peut être effectuée simultanément dans les deux sens.

Un des buts essentiels de cet article est de faire reconnaître ce qu'il y a d'aléatoire dans la relation articulaire. Et il est facile de mettre en évidence, entre deux os, la discontinuité, cette condition nécessaire de l'aléatoire. Les articulations des membres, comme le genou, l'épaule, le poignet, comportent une cavité articulaire. Entre les os articulés, il y a discontinuité. On nomme *diarthroses* les articulations, anatomiquement et physiologiquement complètes, qui ont une telle cavité, grâce à laquelle les os sont mobilisables les uns par rapport aux autres.

Voici maintenant le déterminisme. La notion d'articulation comporte aussi l'idée de jointure. Grâce, en particulier, aux muscles qui les unissent, deux os peuvent être rigidement fixés l'un à l'autre. Les relations de position deviennent alors déterministes. Les contractions musculaires, en immobilisant une articulation, obligent les os à n'avoir les uns par rapport aux autres, qu'une seule position possible. La posture est fixée. Elle ne peut être autre que ce qu'elle est. Le déterminisme est bien un cas particulier de l'aléatoire.

En conclusion, voici la définition que je propose de la relation articulaire :

Une articulation est un mécanisme, entre deux ou plusieurs pièces solides, qui a les trois propriétés suivantes :

1° de créer une discontinuité entre ces pièces;

2° de permettre à ces pièces de prendre, grâce à cette discontinuité, les unes par rapport aux autres, une multitude de positions simultanément possibles; donc, comme ces positions sont incompatibles entre elles, de rendre aléatoires les relations de ces pièces;

3° de permettre l'immobilisation, l'une par rapport à l'autre, des pièces articulées, en fixant l'une ou l'autre des multiples positions possibles. La position fixée est alors déterminée.

Supprimons le premier caractère, donc le second : les pièces articulées sont soudées et l'articulation est solidifiée. Supprimons le troisième, les pièces sont ballantes et l'articulation est folle. Ces trois caractères sont donc nécessaires pour définir la relation articulaire. Cette définition associe : la discontinuité, l'aléatoire et le déterminisme.

II. LA RELATION ARTICULAIRE EN GÉOMÉTRIE

Cette notion de relation articulaire n'est pas limitée à la seule physiologie ostéo-articulaire. Pour lui donner une valeur beaucoup plus générale, je vais montrer en quoi elle est importante pour la géométrie. Pour cela, il faut d'abord montrer comment le déterminisme et l'aléatoire interviennent en géométrie.

1. *Déterminisme et aléatoire en géométrie élémentaire*

A l'aide de quelques exemples, pris dans la géométrie euclidienne classique, je veux montrer le géomètre en train de construire une science déterministe, mais ayant, pour atteindre ce but, à éliminer de l'aléatoire.

a) La plus simple des figures géométriques est la ligne droite. Or, le géomètre affirme son caractère déterministe : La droite est la ligne qui est déterminée par deux points. Alors que, par ces points, des lignes courbes différentes peuvent passer, et en nombre infiniment grand, une, et une seule, droite passe. Cette droite ne peut être autre que ce qu'elle est. Toute autre droite, qui passerait, comme elle, par les deux points donnés, se confondrait avec elle. Et, puisque deux points déterminent une seule droite, deux droites distinctes ne peuvent avoir qu'un seul point en commun.

La droite conserve tout le long d'elle-même son même déterminisme. Cette conservation du déterminisme est un véritable axiome. C'est même, sans doute, l'un des premiers axiomes que s'octroie, plus ou moins consciemment, le géomètre.

b) Quand il veut analyser les relations entre deux droites, le géomètre se trouve en plein aléatoire. Car, après s'être donné une première droite, il a encore à choisir entre une infinité d'autres droites simultanément possibles.

Poursuivant son but, le géomètre est alors amené à donner une importance majeure à deux droites, parce qu'elles sont déterminées : la perpendiculaire et la parallèle. Par un point, pris hors d'une droite, il peut mener à cette droite, une, et une seule, perpendiculaire, et une, et une seule, parallèle.

C'est le déterminisme qui donne leur importance aux relations de parallélisme et de perpendicularité dans les raisonnements de la géométrie. La parallèle et la perpendiculaire sont reliées par plusieurs théorèmes. Et, dans certains théorèmes, elles jouent le même rôle. Par exemple, deux angles, qui ont leurs côtés soit parallèles soit perpendiculaires chacun à chacun, sont égaux ou supplémentaires.

C'est par rapport à la perpendiculaire, parce qu'elle est déterminée, que les obliques sont analysées. Car il entre de l'aléatoire dans la définition des obliques, puisque le nombre des obliques, qui peuvent joindre un point à une droite, est infiniment grand. Pour faire une étude déterministe des obliques, le géomètre utilise la relation d'ordre, qui est déterministe. Le symbole $a < b$ signifie que la grandeur a est plus petite que la grandeur b, et n'est ni égale à elle, ni plus grande qu'elle. Comparant les longueurs des segments de droite compris entre les pieds de deux obliques et celui de la perpendiculaire, le géomètre

détermine la plus longue de ces obliques comme étant celle pour laquelle cette longueur est la plus grande.

c) Au moment d'analyser les relations entre trois droites, dans le plan, le géomètre se retrouve aux prises avec l'aléatoire. Le nombre des triangles simultanément possibles est infiniment grand.

Le géomètre cherche alors des relations déterministes qui soient valables pour tous les triangles possibles. Il applique, dans l'ensemble des triangles possibles, une méthode de quantification, en désignant par ce mot une opération selon laquelle on reconnaît qu'une propriété est vraie pour tout élément d'un ensemble, quel que soit cet élément. Les énoncés des théorèmes commencent donc par ces mots : « Dans tout triangle... ».

Certaines relations déterministes ne sont exactes que pour certaines variétés de triangles. Le géomètre s'en sert pour définir des sous-ensembles dans l'ensemble des triangles possibles. Et il utilise alors l'expression conditionnelle : dans le cas où, c'est-à-dire : si. Par exemple, après avoir défini le triangle isocèle, qui a deux côtés égaux, il énonce : « Si un triangle a deux angles égaux, il est isocèle. »

d) Ces quelques exemples doivent suffire à préciser cette idée que le géomètre construit une science déterministe. Cette idée se généralise. Le géomètre affirme aussi le caractère déterministe de la circonférence de cercle, qui est la courbe déterminée par trois points non alignés. Par ces mêmes trois points, peuvent simultanément passer, et en nombre infiniment grand, des courbes non circulaires. Et la science de la circonférence est aussi déterministe que celle de la droite. D'ailleurs, l'arc de grand cercle joue, sur la surface sphérique, un rôle analogue à celui de la droite sur la surface plane.

e) En reprenant encore l'exemple de la droite, et en rappelant les multiples emplois que le géomètre fait de cette figure fondamentale, on peut mettre mieux en valeur le déterminisme géométrique.

La transversale à une figure est une droite, à laquelle Carnot a donné toute sa valeur en 1806. La tangente à une courbe est une droite, et la normale à la courbe est la perpendiculaire à cette tangente. La distance de deux points est définie par la longueur de la droite qui les joint. Tout axe à une courbe est une droite. La polaire d'un point par rapport à un cercle est une droite...

C'est par sa capacité de transmettre des transformations géométriques que la droite prend toute son importance. La parabole est la figure limite d'une ellipse variable dont un foyer s'éloigne indéfiniment le long du grand axe, qui est une droite. L'homothétie, la symétrie, l'inversion..., sont conduites le long de lignes droites. La droite sert aussi de support à la projectivité. Et les points, qui servent à définir le rapport anharmonique ou l'involution, appartiennent à une même droite.

Grâce à son déterminisme, la droite peut servir de support à des relations d'ordre, et aussi de support à la représentation des opérations déterminantes sur les nombres réels.

f) Et, d'une manière générale, c'est par le déterminisme de ses opérations que la géométrie s'apparente à l'algèbre. Géométrie et algèbre sont deux aspects d'une même mathématique déterministe.

Cette parenté est telle que la mathématique moderne a développé l'algèbre géométrique. Les structures de l'algèbre servent de fondements à la géométrie. Et, avant de poser les premiers axiomes de la géométrie, on définit les ensembles élémentaires de l'algèbre, groupe, corps, espace vectoriel. Les points deviennent des couples d'éléments d'un corps, et les droites sont définies au moyen d'équations linéaires.

2. *Le déterminisme des axiomes géométriques*

Toute géométrie suppose, au minimum, trois variétés d'axiomes : ceux d'appartenance, d'ordre et de continuité.

a) *La relation d'appartenance* est déterministe.

Dans l'axiomatisation de Hilbert, le premier axiome d'appartenance s'énonce ainsi : « Deux points distincts déterminent une droite unique. » Si, entre ces deux points, il n'y avait aucune relation déterministe, comment pourraient-ils déterminer une droite?

Il s'en faut, d'ailleurs, que la notion d'appartenance d'un élément à un ensemble soit une donnée impérative. Au nom de quelle évidence le mathématicien s'arroge-t-il le droit de concevoir dans un même ensemble des êtres, abstraits ou réels, qui, en vérité, sont indépendants les uns des autres? A-t-il même le droit de penser un couple de deux êtres indépendants? Se méfiant des propriétés associatives de sa propre intelligence, il doit éviter d'associer ce qui, en vérité, n'est pas uni. Si Un ajouté à Un fait Deux, Un Un ne font pas Deux. A l'état gazeux, une molécule et une autre molécule ne s'associent pas en un couple de molécules. Pour sommer, dans un moteur à explosion, l'action énergétique de très nombreuses molécules à l'état gazeux, il faut enfermer ce gaz dans un cylindre solide, où il se dilatera, en refoulant un piston solide, dans une direction unique et commune à toutes les molécules. L'état solide est indispensable pour obtenir une telle sommation.

b) *La relation d'ordre* est, comme je l'ai déjà remarqué, déterministe. Elle suppose, d'ailleurs, celle d'appartenance. Soit, par exemple, cet axiome d'ordre : « Si A, B, C sont trois points d'une courbe, et si B est entre A et C, il est aussi entre C et A. » Dans cet énoncé, on commence par admettre que les trois points appartiennent à la courbe. L'axiome ajoute l'idée d'ordre à celle d'appartenance.

Le déterminisme de la relation d'ordre apparaît, par exemple, dans cet axiome de la géométrie projective : « Trois éléments d'une forme de première espèce déterminent un ordre sur celle-ci. »

c) La notion de *continuité* mérite d'être précisée, puisque la discontinuité est l'un des trois caractères de la relation articulaire.

Le résultat le plus important des méditations séculaires des géomètres sur la structure de la géométrie est celui-ci : un ensemble de points ne suffit pas à créer un espace. Une condition supplémentaire, dite topologique, est nécessaire. Il faut que puisse être défini le « voisinage » de deux points. Un voisinage d'un point A est un ensemble de points contenant ce point. Ce voisinage sert à caractériser la proximité, plus ou moins étroite, d'un point B par rapport à un point A, par la présence ou l'absence de B parmi les éléments du voisinage de A. L'idée d'appartenance est donc à nouveau utilisée.

Soient, alors, deux ensembles E et F. Une transformation ponctuelle de E en F est dite *continue* au point A de E, lorsque, à tout point B de E, infiniment voisin de A, elle fait correspondre un point N de F, infiniment voisin du point M qui correspond à A. La correspondance est dite bicontinue, si elle est continue aussi bien de F en E que de E en F.

Cette notion de continuité exige celle de déterminisme. Si les relations de situation étaient aléatoires, et si un point pouvait avoir, par rapport à un autre, plusieurs positions simultanément possibles, la présence du point B dans le voisinage du point A ne pourrait être déterminée. L'idée même de voisinage serait impensable.

L'homéomorphie, transformation topologique, est déterministe. Elle est, non seulement bicontinue, mais aussi biunivoque. Or, une transformation univoque est, par définition, déterministe.

Les géomètres ont reconnu que la continuité leur est indispensable. Par exemple, M. Fréchet a rappelé, dans son livre sur *Les Espaces abstraits*, le trouble que G. Cantor a provoqué en établissant une correspondance biunivoque, mais non bicontinue, entre les points d'un segment de droite et ceux d'un carré. Il en résultait que le plan, auquel le géomètre attribue deux dimensions, se trouvait « rabaissé au rang d'une espèce à une dimension ». Cette conclusion, inacceptable pour le géomètre, était due à ce que la correspondance conçue par G. Cantor brisait la continuité. A tout point A du segment de droite, on faisait bien correspondre un point M du carré, et réciproquement; mais, tandis que le point A parcourait le segment de droite toujours dans le même sens, le point correspondant M sautait, instantanément, dans le plan du carré, d'un point à un autre, éloignés l'un de l'autre. Selon la remarque de M. Fréchet, ce n'était plus un plan, mais un chaos de points.

L'irréductibilité pour le géomètre de la continuité est encore montrée par l'exemple suivant, bien connu. Soient deux tubes, en forme de tores. Entre eux, il y a homéomorphie, puisque, à tout point de l'un, correspond un et un seul point de l'autre, et que, à deux points voisins de l'un correspondent deux points voisins de l'autre. Supposons, alors, que l'un des tores soit sectionné, ensuite noué, et enfin recollé. Une fois réparée la continuité de ce tube, on retrouve entre le tore intact et le tore noué une homéomorphie. Or, au moment de la section, cette homéomorphie a disparu. Pendant la durée de la discontinuité, deux points du tore sectionné, un sur chaque bord, ont correspondu à un même point du tore intact. Le rétablissement de l'homéomorphie a exigé le rétablissement de la continuité.

Si le géomètre était supposé maladroit, il risquerait de ne pas recoller les surfaces sectionnées exactement comme elles étaient auparavant. Une multiplicité infiniment nombreuse de recollages seraient alors simultanément possibles. La discontinuité est la condition de l'aléatoire.

Les transformations géométriques ne se font pas seulement dans l'espace. Elles se réalisent, aussi, comme des processus temporels, dans le temps. La parabole est la limite d'une ellipse dont un foyer s'éloigne indéfiniment le long du grand axe, dans l'espace, mais aussi, dans le temps. Au cours de cette transformation, l'ellipse devient une parabole. Mais, une même figure ne peut, simultanément, être ellipse et parabole.

En résumé, les axiomes d'appartenance, d'ordre et de continuité, axiomes de toute géométrie, ont tous les trois un fond commun, que je propose de nommer : l'axiome du déterminisme, axiome unique et fondamental de toute géométrie. Selon cet axiome, la position d'un point, par rapport à un autre point, est déterminée. Sinon, il n'y a ni appartenance possible d'un élément à un ensemble, ni relation d'ordre possible entre les éléments d'un ensemble, ni continuité possible.

Les types de déterminismes sont aussi variés que les géométries. Mais, sans déterminisme, il n'y a pas de géométrie.

La succession de nos pensées, lorsque nous commençons à créer la géométrie, peut alors se décrire de la manière suivante.

Au commencement, le néant.

Pensons un être infiniment réduit, qui ait toute son existence concentrée en lui-même, et nommons le point.

Nous commençons la science de ce point en analysant les relations qu'il a avec un autre point.

Et nous commençons la géométrie en convenant que ces relations sont déterministes, et, d'une manière générale, qu'elles sont déterministes entre deux points quelconques.

Tous ces points peuvent alors être conçus comme compris dans un même espace, qui transmet ces relations déterministes. Le néant est alors habité par un espace, par des lignes, par des surfaces. Les êtres géométriques sont créés.

Ainsi définie, la géométrie est la science des relations déterministes entre des points et un espace est un transmetteur de relations déterministes.

3. *Les systèmes articulés en géométrie*

En géométrie plane, un système articulé est un appareil constitué de tiges solides qui sont articulées entre elles de telle manière que chacune d'elles puisse tourner autour de ses axes de jonction avec les tiges voisines.

a) Pendant la seconde moitié du XIXe siècle, les géomètres ont fait une étude systématique de ces systèmes, parce qu'ils ont reconnu qu'ils pouvaient s'en servir pour effectuer des transformations géométriques.

Les tiges de ces systèmes sont articulées de telle manière que l'ensemble n'ait plus qu'un seul degré de liberté. Comme le triangle est la seule figure qui soit indéformable, le nombre des tiges doit être au minimum de quatre.

Capables d'effectuer des transformations géométriques, ces appareils peuvent servir de translateurs, d'inverseurs, de réverseurs..., de figures.

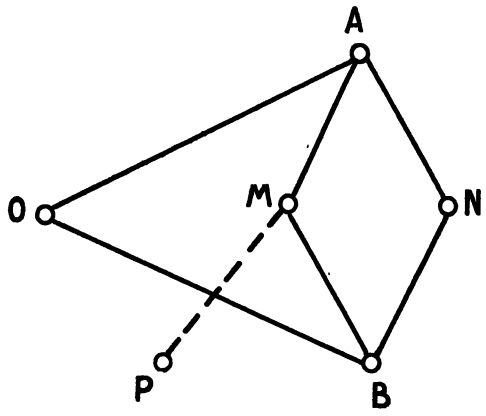

FIGURE 1. — L'inverseur de Peaucellier.

L'un des premiers d'entre eux, et l'un des plus célèbres, est l'inverseur que Peaucellier conçut en 1864. Rappelons qu'il est constitué de six tiges. Quatre d'entre elles sont disposées en losange AMBN. Deux autres, plus longues, forment le rhomboïde OANB. Fixons l'axe de l'articulation O. Quand l'un des deux sommets du losange, M ou N, décrit une courbe, l'autre décrit la transformée de cette courbe par inversion à partir du point O. Lorsque la courbe est une circonférence, la transformée est aussi une circonférence. Mais, si l'on ajoute une septième tige, PM, qui soit articulée en un point fixe P, et dont la longueur soit égale à PO, le point N parcourt un segment de droite, tandis que le point M décrit un cercle. L'inverseur de Peaucellier a ainsi permis de résoudre, pour la première fois rigoureusement, le problème de tracer une droite sans utiliser de règle.

Sylvester en parla avec admiration : « Il serait difficile de citer une découverte qui ouvre des horizons aussi vastes et aussi variés que celle de Peaucellier, d'un côté se prêtant aux besoins de l'atelier, et de l'autre s'élevant aux hauteurs les plus ardues des théories

les plus avancées de l'analyse moderne, aidant et éclairant d'une manière tout à fait inattendue les recherches des Abel, des Nieman, des Clebsch, et des Cayley. »

Un tel hommage permet d'apprécier l'intérêt que les géomètres ont porté aux systèmes articulés. Une théorie générale fut élaborée. Kempe énonça ce théorème : On peut toujours imaginer un système articulé dont un point décrive une courbe algébrique donnée. Kœnigs étendit ce théorème à l'espace.

b) Mais je vais montrer que les géomètres utilisent la relation articulaire plus encore qu'il ne semble au premier abord.

Pour tracer une droite sur un plan rigide, le géomètre se sert d'un solide, la règle. En choisissant deux points, il détermine, en même temps, la droite qui passe par eux. Mais, lorsqu'il ne choisit qu'un seul point, il ne peut plus, avec cette condition unique, obtenir cette détermination. Il y a un nombre infiniment grand de droites simultanément possibles. Et, entre ces cas possibles, il y a incompatibilité, puisqu'une même règle ne peut être dirigée en même temps selon des orientations diverses. Entre la règle et le plan, les relations sont aléatoires. C'est cet aléatoire qui permet au géomètre de tracer des obliques. La condition nécessaire de l'aléatoire existe effectivement : entre la règle et le plan, il y a discontinuité.

Au moment de tracer sa droite, le géomètre immobilise sa règle. Par la pression qu'il exerce sur elle, il la rend solidaire du plan, et il supprime la discontinuité, donc l'aléatoire. Le tracé est alors déterminé.

Par conséquent, entre la règle et le plan, les relations ont les trois caractères de la relation articulaire : la discontinuité, la possibilité de relations aléatoires, et la détermination de l'un des cas possibles.

Si la règle a des relations articulaires avec le plan, on peut dire qu'elle est articulée avec lui.

Pour tracer une circonférence, le géomètre utilise le compas. Cet appareil comporte deux articulations. En lui-même, il est constitué de deux branches articulées entre elles. En outre, il s'articule avec le plan, par celle de ses pointes autour de laquelle il pivote. Le géomètre dispose donc de deux possibilités. Il peut déplacer sur le plan la pointe de son compas, et il peut ouvrir à volonté l'angle des deux branches. Une fois ses choix faits, il peut tracer une circonférence déterminée.

Pendant des siècles, les géomètres ont voulu édifier toute leur science avec la règle et le compas seulement. C'est dire combien l'idée de relation articulaire a d'importance pour eux.

III. LA RELATION ARTICULAIRE EN CINÉMATIQUE APPLIQUÉE

Pour donner toute son importance à l'idée de relation articulaire, je vais insister sur le rôle qu'elle joue en cinématique appliquée.

1. *Le déterminisme en cinématique appliquée*

La cinématique appliquée a pour objet d'étude les mécanismes. Ceux-ci, dans les machines, servent à transmettre et à transformer des mouvements. Les organes, solides, des machines ne peuvent être conçus isolément. Ils ne prennent leur intérêt que dans leurs relations avec les organes qui les précèdent et ceux qui les suivent.

Ces relations doivent, en vérité, être dédoublées en : déterministes et aléatoires.

Or, depuis Monge, la cinématique appliquée décrit les transformations élémen-

taires que les mécanismes font subir aux mouvements dans les machines, mais elle ne décrit que des transformations déterministes.

Par exemple, les mécanismes accomplissent les transformations suivantes : mouvement rectiligne continu en mouvement rectiligne continu; mouvement rectiligne alternatif en mouvement circulaire continu; mouvement circulaire continu en mouvement rectiligne continu... Le mouvement transformé est, par la machine elle-même, déterminé. Les organes qui ont à l'effectuer sont dirigés par des pièces fixes, les guides, qui ramènent à l'unité la multiplicité des mouvements possibles.

Un engrenage, qui transmet le mouvement circulaire continu d'un arbre moteur à un arbre récepteur parallèle, réalise une transformation déterministe. Entre les vitesses angulaires ω_1 et ω_2 des deux roues dentées, les relations sont déterministes. En désignant par R_1 et R_2 les rayons primitifs des roues non dentées qui seraient tangentes, on a, en effet, la relation déterministe : $\omega_2/\omega_1 = R_1/R_2$. Les vitesses angulaires sont dans le rapport inverse des rayons.

2. *Solide, géométrie et forces*

Il est important de mettre alors en évidence le fait que la géométrie, la science du corps solide et la science des forces sont unies dans leurs structures profondes. Ces trois sciences sont déterministes.

a) *La science des forces et la géométrie*

La statique, qui combine les grandeurs spatiales avec les forces, est une géométrie des forces.

La science des forces est géométrique. Une force, grandeur mécanique, est représentée par un vecteur, grandeur géométrique. La droite, qui est le premier support des raisonnements géométriques, est aussi le support des raisonnements sur les forces. La ligne d'action d'une force est une droite. Deux forces sont en équilibre lorsqu'elles sont, non seulement égales, mais directement opposées, en ligne droite. Les opérations sur les forces utilisent des concepts géométriques. Par exemple, trois forces concourantes en équilibre sont dans un même plan. Et chacune des trois forces est proportionnelle au sinus de l'angle formé par les deux autres.

La cinématique appliquée, pour décrire les transformations des mouvements, tout en faisant abstraction de leurs vitesses et de leurs accélérations, utilise des figures géométriques. Un axe de rotation est une droite. Tout point d'un solide en rotation qui n'est pas sur l'axe de rotation, décrit une circonférence dans un plan perpendiculaire à cet axe. Les mouvements élémentaires de la cinématique appliquée sont : le rectiligne, le circulaire, l'hélicoïdal, le sinusoïdal. Il est significatif que l'un des créateurs de la cinématique appliquée ait été Monge, un pur géomètre.

Et la cinématique appliquée, autant que la statique, unissent étroitement dans certains de leurs concepts les concepts de force et de longueur. Les définitions du moment d'une force, d'un couple, du travail d'une force, associent l'intensité de cette force à des grandeurs spatiales.

b) *La science des forces et le corps solide*

La définition elle-même du corps solide suppose l'emploi de la notion de force. Un solide parfait a une forme et un volume fixes. Il est un assemblage de points matériels rigidement liés entre eux par des forces.

Il en résulte qu'un solide peut servir à réaliser des opérations sur des forces.

Par exemple, on peut faire glisser le point d'application d'une force sur sa ligne d'action, à la condition que celle-ci soit matérialisée dans un solide. La théorie des vecteurs glissants s'applique directement. Et, d'une manière générale, la statique du solide est assimilée à l'équilibre de systèmes de vecteurs glissants.

Autre exemple, un système de forces quelconques, appliquées à un solide, peut être réduit à deux forces dont l'une est appliquée en un point quelconque de ce même solide.

c) *Géométrie, solide et forces*

Certes, depuis ses origines, qui se perdent dans la nuit des temps, la géométrie n'a fait que s'abstraire de toute matérialité. Dès les Éléates, le point était devenu un être purement idéal. Et le corps solide, support des premiers essais géométriques, semble avoir disparu de l'esprit des géomètres. Et pourtant, il ne s'est pas liquéfié. Lorsque, même à notre époque, un géomètre, revenant sur sa pure abstraction, essaye de donner une image matérielle de ses constructions abstraites, il choisit ses exemples, non plus seulement dans le corps solide parfaitement rigide, mais aussi dans le corps élastique. Il donne ainsi une première intuition de la topologie. Or, s'il passe de la rigidité à l'élasticité, il ne va pas jusqu'à la fluidité. Car, à l'état fluide, la matière est discontinue. Or, la continuité, pour un géomètre, est irréductible.

Comme l'a remarqué Poincaré, « s'il n'y avait pas de corps solides dans la nature, il n'y aurait pas de géométrie ».

Pour faire une théorie logique de l'état gazeux, il faut donc pulvériser la géométrie.

D'après ce qui précède, il devient possible de concevoir dans un même ensemble scientifique les sciences du solide, des forces et des figures géométriques. Voici, à titre d'exemple, un raisonnement qui mêle étroitement ces trois sciences. Je le prends dans les *Éléments de statique* que Poinsot (1777-1859) publia en 1803.

Poinsot, le créateur de la théorie des couples, se refusait à considérer dans sa statique autre chose que des corps parfaitement rigides. « Ma canne n'est pas un corps solide; non seulement elle peut rompre, mais elle plie, ce qui est cent fois pire. » Qu'aurait-il dit si sa canne avait été articulée? Par principe, il excluait de ses raisonnements tout corps élastique. On comprend que, pour lui, « tous les théorèmes de la statique ne sont, au fond, que des théorèmes de géométrie ».

Dans le raisonnement suivant, il applique sa notion de couple. Cette notion unit la science des forces à celle des solides. En effet, elle n'est utilisable que pour les solides, puisque le bras de levier d'un couple doit être solide. Le raisonnement utilise l'idée suivante. Une force F, appliquée en un point A d'un solide, équivaut à une force équipollente F_1 appliquée en un autre point quelconque M de ce même solide, et à un couple qui soit constitué de la force F et de la force F_2 égale et opposée à F_1, et dont le moment soit égal au moment de la force F par rapport au point M. Ce couple a pour bras de levier le segment AM.

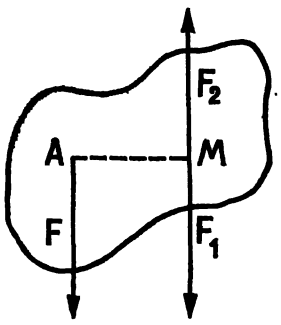

FIGURE 2.

Or, ce point M, Poinsot le déclare « arbitrairement pris dans ce corps, ou *au dehors*, pourvu qu'on l'y suppose invariablement fixé ». C'est moi qui écris en italique cet « au dehors ». Ainsi, Poinsot raisonne sur le couple, dont le bras de levier doit être solide, puis il continue à raisonner sur lui tout en sortant du corps solide. Ce procédé n'est évidemment valable qu'à la condition de supposer que le point M, qui se trouve

alors dans l'espace, reste invariablement fixé au solide. Donc, les points de l'espace sont supposés aussi rigidement liés entre eux que les points matériels du solide. La rigidité du solide, ainsi transférée à l'espace, est conçue alors indépendamment de toute matérialité.

Poinsot effectue le même transfert lorsqu'il étend son raisonnement au cas où plusieurs forces coplanaires parallèles et de même sens sont appliquées à un même solide. Pour déterminer, par rapport à un point M, la position du point où est appliquée la résultante de ces forces, Poinsot emploie encore sa notion de couple. Or, ce point M peut être « pris où l'on voudra dans leur plan ».

Et, lorsque ces forces parallèles ne sont plus coplanaires, Poinsot mène « à volonté », deux plans parallèles à leur direction commune, perpendiculaires entre eux, et tels que leur droite d'intersection contienne le point M. A l'aide de ces plans, Poinsot décompose et compose ses couples. Ainsi, il commence par calculer sur des forces, à l'intérieur d'un même solide, puis il poursuit ses raisonnements en sortant de ce solide. Ses couples, qui ne valent que pour les solides, restent valables pour l'espace environnant. Dans de tels raisonnements, l'ensemble des points de l'espace et l'ensemble des points matériels du solide sont bien considérés comme isomorphes. On y déplace les points d'application des forces selon les mêmes lois.

Un tel isomorphisme semble avoir été accepté inconsciemment par la mathématique du XIXe siècle d'une manière très générale. Par exemple, on peut choisir, comme représentant de cette mathématique, Riemann, qui, après Cauchy, et avec Weierstrass, créa la théorie des variables complexes, qui créa la géométrie de Riemann, qui créa les surfaces de Riemann, qui créa l'intégrale de Riemann. Son œuvre mérita cet éloge que lui décerna en 1897 Hermite : « L'œuvre de Riemann est la plus belle et la plus grande de l'analyse à notre époque. »

Or, à la fin du XIXe siècle, Klein, insistant sur la conception générale qui est à la base des conceptions riemaniennes, reconnut que cette base est physique. « C'est à Riemann le premier que l'on doit ce progrès consistant à donner à la théorie du potentiel une signification fondamentale en mathématiques. » A propos des célèbres surfaces, Klein remarque que Riemann les « a tirées de l'intuition physique pour les appliquer aux mathématiques pures ». Et il donne cette formule frappante : « Riemann, dans le domaine des mathématiques, et Faraday, dans celui de la physique, marchent en avant parallèlement. »

La physique, alors, reposait sur « l'hypothèse d'après laquelle l'espace est rempli d'un fluide répandu d'une manière continue et qui est, en même temps, le véhicule des manifestations de la lumière, de l'électricité et de la gravité ». L'éther, espace physique du XIXe siècle, a servi de support aux méditations de Riemann. Dans cette mathématique, le champ de forces a joué le rôle que les corps solides avaient joué dans l'élaboration de la géométrie.

3. *L'aléatoire en cinématique appliquée*

Si la cinématique est appliquée, c'est par l'homme. Or, l'homme est un être autonome, et son autonomie doit s'interpréter par la probabilité. Nous sommes loin de la théorie du potentiel, base de la mathématique riemanienne. Pour être vraiment au service de l'homme, les mécanismes ne doivent pas être assujettis au seul déterminisme; mais ils doivent comporter de l'aléatoire.

Depuis la fin du XIXe siècle les ingénieurs ont reconnu, dans leurs mécanismes, divers degrés de liberté, et Kœnigs a critiqué les classifications habituelles de la cinématique appliquée.

Pour faire apparaître l'aléatoire en cinématique appliquée, je prendrai un seul exemple, celui de la transmission des mouvements par engrenages dans une voiture automobile. En effet, cette voiture est construite dans le but précis d'offrir à son conducteur les moyens d'accroître son autonomie motrice.

La conduite libre, selon mon interprétation probabiliste de l'autonomie, a un caractère aléatoire. Autant que le Code de la route le lui permet, un automobiliste a la possibilité de suivre une trajectoire brownoïde. Mais, si les choix du conducteur sont libres, les circonstances dans lesquelles il a l'occasion de les faire, sont des plus variés. En construisant des autoroutes, on cherche à réduire à leur minimum les incidents de la conduite. Mais, sur ces routes à longs parcours, il n'y a plus de trajectoire brownoïde possible. Le promeneur, qui désire encore suivre les caprices de sa flânerie, préfère les routes mineures, même accidentées. Et, tout le long de son voyage, il découvre successivement des côtes plus ou moins raides, des virages plus ou moins aigus, des croisements plus ou moins dégagés. L'aléatoire des choix du conducteur et l'aléatoire des circonstances de la conduite exigent que les mécanismes de la voiture comportent de l'aléatoire.

Or, la transmission des mouvements, entre moteur et roues, se fait par engrenages, et, entre deux roues dentées, les relations sont déterministes. Pour que ses voitures soient vraiment automobiles, l'homme a dû les doter de changements de vitesses. Je vais montrer que ces mécanismes établissent, entre le moteur et les roues, des relations aléatoires.

Le couple moteur du moteur à explosion ne peut varier qu'entre des limites étroites. Or, la conduite exige des variations importantes du couple résistant. Un mécanisme variateur de vitesses doit être placé en intermédiaire entre le moteur et les roues. La transformation à effectuer est entre le mouvement circulaire continu du moteur et le mouvement circulaire aléatoirement variable des roues.

a) Le conducteur commence par débrayer. Par ce geste, il crée une discontinuité entre le moteur et les roues, c'est-à-dire la condition nécessaire de l'aléatoire. Un point mort est un point d'indétermination.

b) Ensuite, le conducteur agit sur son mécanisme de changement des vitesses. A l'intérieur de ce mécanisme, l'arbre de transmission entre moteur et roues est interrompu. Entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire, il y a discontinuité. Cette condition de l'aléatoire est offerte à un arbre intermédiaire grâce auquel plusieurs combinaisons d'engrenages sont rendues possibles. Voilà réalisée la multiplicité des cas possibles, première caractéristique de l'aléatoire.

c) Tout en engageant l'engrenage qu'il a choisi, le conducteur fait intervenir un mécanisme de sécurité, qui exclut toute autre combinaison de vitesses. Et voilà l'incompatibilité des cas possibles, deuxième caractéristique de l'aléatoire.

d) Et, enfin, en embrayant, le conducteur rétablit la continuité entre moteur et roues. Entre ces deux organes, les relations redeviennent déterministes.

La réversibilité des manœuvres met le mécanisme à la disposition entière du conducteur.

Entre le moteur et les deux roues motrices, un autre mécanisme fonctionne, le différentiel. Au cours de tout virage, les roues parcourent des longueurs différentes. Comme la conduite est libre, les relations entre les vitesses des deux roues sont aléatoires. Le différentiel permet, quelle que soit la différence des vitesses, d'assurer la transmission du mouvement depuis le moteur. Son pignon satellite, monté fou sur son axe, permet la multiplicité des re ations possibles entre les deux roues. A l'intérieur du différentiel, se trouve effectivement la condition nécessaire de l'aléatoire. Il y a discontinuité entre les deux roues,

puisqu'elles sont portées par deux arbres indépendants l'un de l'autre. Et il y a discontinuité entre le satellite et son axe, ce qui lui permet de tourner fou.

L'asservissement

Par les asservissements, la théorie des machines a été renouvelée au xxe siècle. Reprenant l'exemple du changement de vitesses, on peut donner toute sa signification au mécanisme asservi.

Pour que le conducteur gagne en autonomie, et qu'il devienne maître des deux seuls facteurs de ses déplacements, la vitesse et la direction, les constructeurs ont essayé de faire effectuer par la machine elle-même le maximum des manœuvres, et, en particulier, de rendre automatique le changement des vitesses. Le problème est rendu difficile par le mélange d'aléatoire et de déterminisme qu'il doit résoudre. D'une part, il y a l'aléatoire des décisions du conducteur; d'autre part, il y a l'aléatoire des conditions dynamiques de la conduite; et enfin, il faut, dans tous les cas possibles, établir des transmissions déterministes entre moteur et roues motrices.

Le principe de la solution c'est de rendre chacun des cas possibles déterminant lui-même de la transmission. Et ainsi, quelle que soit la variété de relation aléatoire entre moteur et roues, une relation déterministe est établie entre ces deux organes. Ce résultat est obtenu en asservissant la transmission du mouvement entre ces deux organes, d'une part, aux décisions aléatoires du conducteur, d'autre part, aux variations aléatoires de la conduite. Le déterminé est asservi à l'aléatoire.

Ainsi présenté, l'asservissement prend en cinématique appliquée toute sa signification. C'est l'autonomie de l'homme, et son interprétation probabiliste qui est la donnée initiale. L'asservissement devient l'un des mécanismes nécessaires à la réalisation effective de l'autonomie.

4. *L'articulation en cinématique appliquée*

C'est la nécessité de faire intervenir de l'aléatoire dans le jeu des mécanismes qui a fait utiliser des articulations par la cinématique appliquée.

a) Certains mécanismes sont purement et simplement des articulations.

Le meilleur exemple est celui du joint universel à la Cardan. Ce joint articule deux arbres en rotation, alors même que leurs directions relatives ont la possibilité de varier. Entre les deux arbres, au niveau du joint, il y a effectivement discontinuité, grâce à laquelle l'angle peut varier aléatoirement. Et, grâce au joint, la vitesse de rotation d'un arbre détermine celle de l'autre. En associant deux joints, on peut même obtenir, quel que soit l'angle, la même vitesse pour l'arbre mené que pour l'arbre menant. On retrouve bien les trois caractères de la relation articulaire.

b) Mais on peut donner à l'idée d'articulation une très grande place en cinématique appliquée.

Une rame est articulée avec sa barque. Un rhéostat est un appareil articulé. Il a effectivement les trois caractères de la relation articulaire. Le déplacement de la manette crée les discontinuités de courant; les divers plots offrent une multiplicité de cas possibles, qui sont incompatibles entre eux; et, enfin, la manette peut être immobilisée au contact de l'un des plots, ce qui détermine une certaine variété de courant.

Dans une voiture automobile, l'ensemble fonctionnel débrayage — changement de vitesses — embrayage a aussi les trois caractères de la relation articulaire. Le débrayage

crée la discontinuité, le changement de vitesses la relation aléatoire, et l'embrayage la relation déterministe entre moteur et roues. Le conducteur, grâce à cet ensemble fonctionnel, articule les roues avec le moteur.

L'une des grandes inventions humaines a été celle de la roue. Or, dans les relations entre la roue et son support, on retrouve les caractères de la relation articulaire. Entre l'essieu et le moyeu, il y a discontinuité; les positions futures simultanément possibles de la roue, par rapport à son support, sont en nombre infiniment grand, tout en étant incompatibles entre elles; et, dans chacune de ces positions, la roue peut être immobilisée. La roue est articulée avec son support. En cinématique appliquée, roues et systèmes articulés sont, d'ailleurs, interchangeables. Un cycliste est un être articulé qui fait mouvoir deux roues. La roue, dont le roulement continu exige des routes planes, est remplacée, dans les terrains discontinus, par des chenilles articulées.

D'après ce qui précède, on comprend que toute machine humaine doive comporter des discontinuités. L'homme a même mis à son service les discontinuités entre molécules, dans sa chimie et son énergétique des fluides; et les discontinuités entre électrons, dans son électronique. La discontinuité est, en effet, la condition nécessaire de l'aléatoire. En raison de l'interprétation probabiliste de l'autonomie, sans discontinuités entre leurs organes, les machines ne seraient d'aucun emploi pour l'homme, puisqu'elles n'auraient aucun jeu aléatoire.

En définissant d'une manière générale la *relation articulaire* par les trois caractères que j'ai énoncés, on peut se demander si toute machine, pour être vraiment au service de l'homme, ne doit pas être articulée.

Et, en particulier, la première machine que l'homme ait à sa disposition, son propre corps.

IV. LA RELATION ARTICULAIRE EN PHYSIOLOGIE DU SQUELETTE

Un os peut être considéré comme un solide rigide. Entre deux points d'un même os, les relations de position sont déterministes. Sur l'extrémité supérieure du fémur, la situation du petit trochanter est bien déterminée. On peut suivre un os, d'une extrémité à l'autre, d'une manière continue. Il en résulte que la description des os, et celle des muscles qui s'insèrent sur eux, utilise de nombreux termes à tendance géométrique : trapèze, pyramidal, cuboïde, droit, oblique, carré, rhomboïde..., et que la description de l'ensemble et des parties du corps est rapportée à trois plans géométriques, frontal, sagittal et transversal.

Mais le corps, dans son ensemble, ne peut être considéré comme un solide rigide. Entre les os, les relations se font par l'intermédiaire d'articulations.

1. *Les articulations*

Galien avait établi la classification des articulations d'après leur anatomie, et Bichat tint compte aussi de leur physiologie. La classification anatomo-physiologique distingue trois variétés : 1° les diarthroses, ou articulations mobiles; 2° les amphiarthroses, ou symphyses peu mobiles; et 3° les synarthroses, ou sutures immobiles.

Ces variétés ne diffèrent pas seulement par leur anatomie et leur physiologie. Leur répartition dans le corps a une signification. Les os de la tête sont fixés les uns aux autres par des sutures, ce qui transforme le crâne en une boîte solide. Les corps vertébraux et les os du bassin, organes de support, sont unis par des symphyses, qui associent la solidité

à une mobilité réduite. Les membres, organes de la motilité corporelle, outils de l'autonomie motrice, ont pour articulations des diarthroses. La hanche, le genou, sont des diarthroses.

C'est, bien sûr, la diarthrose, articulation anatomiquement et physiologiquement complète, qui comporte les trois caractères de la relation articulaire.

a) Dans sa définition même, se trouve la discontinuité, la cavité articulaire. Si chacun des deux os, qui sont articulés par une diarthrose, est un solide, l'ensemble de ces deux os ne l'est pas. La relation articulaire n'est pas géométrisable.

b) Grâce à cette discontinuité, les relations entre deux os peuvent être aléatoires. Aucune relation d'ordre ne peut être définie entre les valeurs que peut prendre l'angle de deux os. A tout moment ultérieur, cet angle peut avoir une valeur ou égale, ou supérieure, ou inférieure, à la valeur qu'il avait au moment précédent. Le champ des mouvements possibles d'une diarthrose est défini par la forme même des surfaces articulaires. C'est même d'après cette forme, c'est-à-dire d'après le champ des possibles, que la classification des diarthroses est faite. Le genou est une trochléenne, l'extrémité inférieure du fémur ayant une forme de poulie, et a pour mouvements possibles la flexion et l'extension. La hanche est une énarthrose, la tête fémorale ayant une forme sphérique, et a pour mouvements possibles la flexion, l'extension, l'abduction, l'adduction, la circumduction et la rotation. La classification des articulations est bien probabiliste, puisqu'elle a pour base les possibilités fonctionnelles de chacune d'elles.

c) Enfin, troisième caractère, grâce à sa capsule, à ses ligaments, et aux tendons musculaires qui lui sont associés, une diarthrose établit une jonction entre les os. Il suffit d'une contraction musculaire tonique pour immobiliser ces os dans une posture fixe.

En passant d'une attitude à l'autre, et, par conséquent, en changeant de forme, le corps articulé montre en quoi il se distingue du corps solide, qui conserve sa forme et son volume. Tout en changeant de forme, l'être articulé conserve, d'ailleurs, son volume. On peut déplacer ses membres dans son bain sans faire varier le niveau de l'eau.

Lorsqu'une articulation est une suture, sans cavité articulaire, la relation articulaire est dégénérée. Les os au contact sont fixés l'un à l'autre. Le nombre de leurs positions relatives possibles est réduit à l'unité. Le déterminisme est un cas particulier de l'aléatoire. L'ensemble de plusieurs os rigidement fixés devient à lui seul un os solide. La description anatomique porte alors sur l'ensemble, plus que sur ses parties. La base de la boîte cranienne est décrite en bloc, et sans distinction entre le frontal, l'ethmoïde, le sphénoïde, le temporal et l'occipital. Les articulations ayant perdu leur cavité, les os ont perdu leur individualité.

2. *Le membre articulé*

L'idée de relation articulaire ne suffit pas, à elle seule, à la mécanique animale. Elle doit être complétée par celle de *membre articulé.*

Les systèmes articulés des géomètres sont fermés sur eux-mêmes. C'est le cas, par exemple, de l'inverseur de Peaucellier. Voilà pourquoi ils doivent comporter, au minimum, quatre tiges. Deux tiges articulées par deux pivots, trois tiges articulées deux à deux par trois pivots, constituent des systèmes indéformables. Les géomètres, poursuivant leur but de créer une science déterministe, ont réduit les possibilités de leurs systèmes articulés de telle manière qu'ils puissent tracer des courbes déterminées.

Les systèmes articulés qui participent à la mécanique animale ne sont pas fermés. Le bras est articulé avec le tronc, l'avant-bras avec le bras, la main avec l'avant-bras, et les doigts avec la main. Cette succession de segments donne au membre articulé ses possi-

bilités cinématiques et lui permet d'accomplir des gestes. On sait depuis longtemps que l'on peut, en associant plusieurs axes d'articulation, obtenir un déplacement quelconque d'un solide autour d'un centre fixe. La multiplicité des mouvements possibles d'un segment se combine avec la multiplicité des mouvements possibles du segment précédent.

La cinématique appliquée s'est trouvée parfois dans l'obligation de créer elle aussi des membres articulés. C'est le cas lorsque l'homme doit réaliser des gestes aussi précis et aussi variés que les siens propres, mais dans des conditions dans lesquelles il ne peut opérer, par exemple dans le maniement de substances radio-actives et dangereuses. Ce n'est pas par anthropomorphisme que l'homme crée ses machines à son image. S'il les pourvoit d'une épaule, d'un coude, de pinces articulées, préhensiles, c'est qu'il veut leur conférer les mêmes possibilités motrices que celles qu'il doit à ses membres.

3. *La mécanique de l'être articulé*

La mécanique animale doit ses particularités au fait que l'animal est un être articulé. La segmentation du corps en parties mobiles les unes par rapport aux autres est la condition première de l'autonomie motrice, que j'ai qualifiée d'autocinèse. Pour qu'un système soit autocinétique, il faut que certaines de ses parties puissent être mises en mouvement par rapport aux autres et que certaines de ces parties prennent appui sur un support extérieur. Pour se mouvoir librement, l'animal doit pouvoir se rendre mécaniquement indépendant du milieu extérieur. Ce sont les articulations qui sont génératrices de ces discontinuités mécaniques. Un animal a la possibilité de lever un de ses membres articulés et de le reposer, après un intervalle libre, à une distance variable des membres fixes. Un cheval au galop, parcourt même, les quatre pattes repliées, des segments de trajectoire libre. Nijinski a donné forme d'art à ces trajectoires aériennes.

L'articulation a tellement d'importance pour les animaux qu'elle a joué un rôle dans les classifications de la zoologie. Un embranchement entier, le plus riche en espèces, est celui des arthropodes, dont les membres sont articulés. Certes, le mot d'articulation n'est utilisé que pour les animaux qui sont pourvus d'un squelette composé de pièces solides. Les animaux mous n'ont pas besoin d'articulations. Mais on peut considérer que l'idée est générale et vaut pour tout le règne animal. Le corps d'un animal mou, sans squelette solide, et doué d'une flexibilité continue, serait fait d'une suite infiniment nombreuse d'articulations. De même, dans une machine, la transmission à distance des mouvements peut se faire soit par câbles, d'une flexibilité continue, soit par chaînes, constituées de pièces solides et articulées.

La mécanique corporelle, ayant affaire à un être articulé, a donc ses problèmes propres. Par exemple, le corps étant fait de pièces squelettiques superposées, la statique corporelle doit traiter le problème essentiel de son équilibration. Et, comme l'équilibre de l'ensemble dépend de celui des parties, il faut distinguer : les *postures* segmentaires, c'est-à-dire les positions des divers segments corporels, les uns par rapport aux autres; et *l'attitude* générale du corps, c'est-à-dire sa position par rapport aux supports extérieurs.

Le corps étant fait de parties articulées, son centre de gravité se déplace en lui lorsque les centres de gravité particuliers se déplacent les uns par rapport aux autres, au cours des changements de postures. Et, réciproquement, tout déplacement du centre de gravité corporel, en conséquence du déplacement relatif de l'une de ses parties, peut être annulé par le déplacement compensateur d'une autre partie. C'est ainsi que les risques d'une perte

d'équilibre, lorsque le corps se penche avec excès, peuvent être réduits par des redressements des membres supérieurs, qui servent de balanciers.

La physiologie osseuse et articulaire ne peut donc se suffire à elle-même. On ne peut l'analyser en faisant abstraction des muscles et des nerfs. En agissant sur le squelette osseux, la musculature sera le facteur de sa statique. Et le système nerveux aura pour rôle d'assurer le maintien de cette statique dans toutes les attitudes possibles. La physiologie musculaire, participant à la fois à la physiologie ostéo-articulaire et à la neurophysiologie, est leur intermédiaire. Il y a, entre ces trois physiologies, un ordre fonctionnel. Les nerfs moteurs innervent les muscles, et non les articulations.

V. LA RELATION ARTICULAIRE EN NEUROPHYSIOLOGIE

Or, la première notion que l'on trouve, dès que l'on pénètre en neurophysiologie, est celle d'articulation!

Les neurones, cellules élémentaires du système nerveux, sont articulés entre eux au niveau de leurs synapses. Le système nerveux apparaît même comme l'ensemble d'un nombre prodigieusement grand d'articulations neuronales. Le fait d'être articulé avec d'autres neurones appartient à la définition même du neurone.

L'articulation synaptique

Encore faut-il retrouver au niveau de la synapse les trois caractères de la relation articulaire.

a) La discontinuité est formellement affirmée par l'histologie nerveuse depuis la fin du XIXe siècle. C'est en examinant, dans le cortex cérébelleux, les terminaisons, autour des cellules de Purkinje, des corbeilles des cellules à corbeilles, que Ramon y Cajal démontra pour la première fois, en 1888, que les cellules nerveuses ont des relations de contiguïté et non de continuité. Comme les fibrilles axiles des corbeilles s'appliquent contre la surface des corps cellulaires de Purkinje, Ramon y Cajal parla d'articulation axo-somatique.

Cette discontinuité anatomique fut démontrée par le microscope électronique. Une membrane existe réellement entre les neurones.

Mais la discontinuité essentielle est physiologique. Entre deux neurones (I) et (II), il y a bien une discontinuité fonctionnelle. Un neurone a pour rôle de transmettre un signal. Or, le neurone (II) n'émet ses signaux que d'une manière discontinue, lorsqu'un certain seuil est atteint. Il obéit à la loi du tout ou rien. Sans cette loi, le moindre signal du neurone (I) serait transmis par le neurone (II), et il y aurait continuité.

b) L'aléatoire, deuxième caractère de la relation articulaire, peut déjà être mis en évidence par le fonctionnement même de la cellule nerveuse. Pour être capable d'émettre un influx, elle polarise sa membrane, en créant une différence de potentiel entre ses deux faces. Un influx est transmis lorsqu'une dépolarisation transitoire se propage le long de la fibre nerveuse. Au repos, la cellule dépense de l'énergie pour polariser sa membrane. Ce potentiel, dit de repos, est une véritable réserve fonctionnelle. C'est un potentiel d'attente, un potentiel potentiel. Dans cette expression, le nom doit être pris dans son sens électrophysiologique, et l'adjectif doit être utilisé avec le sens : en puissance. De même, on peut dire qu'une automobile a, grâce à son réservoir d'essence, de la puissance en puissance. Le potentiel du neurone au repos représente une possibilité d'action. Le neurone se prépare, en se polarisant, à être en état de transmettre éventuellement un signal.

Pour décrire cette mise en réserve fonctionnelle, il faut donc se servir d'une terminologie probabiliste. J'ai déjà eu l'occasion à maintes reprises, au cours de mes travaux sur l'autonomie, d'insister sur l'importance des réserves.

Un neurone n'émet un influx que lorsqu'un certain seuil a été atteint. Or, vers un neurone convergent des axones issus de multiples neurones. Et chacun de ces multiples neurones a son rôle propre, indépendant de celui des autres. Des signaux, issus d'origines bien différentes, ont ainsi la possibilité de converger sur un même neurone. Le meilleur exemple en est, dans la moelle, celui du motoneurone, la voie finale commune de Sherrington, destinée à l'innervation musculaire. Vers ces motoneurones, arrivent les voies les plus diverses, les voies de la sensibilité, circuits des réflexes, les axones des cellules de Renshaw, transmetteurs de leur inhibition rétro-active, les voies médullaires descendantes, réticulo-spinale, olivo-spinale, vestibulo-spinale, rubro-spinale, et, enfin, la grande voie cérébro-spinale. Voilà la multiplicité des cas possibles.

Le temps nécessaire pour que le seuil critique d'un neurone soit atteint, dépend de la somme algébrique de toutes ces afférences, et aussi de leur répartition dans le temps. L'émission d'un influx résulte d'une sommation spatiale et d'une sommation temporelle. Or, tous les multiples neurones, qui conditionnent la réponse d'un neurone donné, fonctionnent indépendamment les uns des autres. Là est l'aléatoire. Il y a sommation sur un même neurone d'afférences entre lesquelles les relations sont aléatoires. La barrière du seuil sert à révéler cet aléatoire, car, sans elle, il n'y aurait pas de sommation des afférences. Tout signal reçu serait transmis.

Ces remarques prennent toute leur importance dans le cas des interneurones, qui, dans les centres nerveux, fonctionnent en intermédiaires entre des neurones afférents et des neurones efférents. Par leurs deux pôles, ces interneurones entrent en relation avec de multiples neurones. On imagine toutes les possibilités fonctionnelles dont le système nerveux peut disposer grâce aux interneurones. Leur importance n'a fait que croître en neurophysiologie. En particulier, la substance réticulaire du tronc cérébral, dont le rôle fonctionnel apparaît de plus en plus depuis une vingtaine d'années, est une masse considérable d'interneurones. Et c'est grâce à ses interneurones variés, intercalaires, commissuraux, segmentaires, que la moelle n'est pas un simple lieu de passage pour des voies nerveuses, mais a une physiologie propre.

c) Quand le seuil critique est atteint, il y a émission d'un influx. Le franchissement de ce seuil détermine cette émission. Voilà le troisième caractère de la relation articulaire.

De même que dans l'idée d'articulation, il y a celle de jonction, dans le mot synapse, il y a le sens de connexion. Le mot lui-même, créé par Sherrington, dérive de συν-άπτω j'attache ensemble.

Il y a donc du déterminisme dans l'émission d'un influx. En deçà du seuil, il n'y a qu'un seul cas possible, le silence, sans émission; au delà, il n'y a qu'un seul cas possible, la réponse, avec émission. C'est le tout ou rien.

Ce mécanisme est intermédiaire entre le déterminisme et l'aléatoire. La conjonction *ou* a bien une valeur exclusive : il y a signal, ou bien il n'y a pas signal. Mais il n'y a pas encore vraiment aléatoire, comme dans l'exemple de pile ou face. Car, dans le tout ou rien, les deux cas ne sont pas vraiment simultanés. Le fonctionnement par tout ou rien, sans être encore l'aléatoire, permet l'aléatoire, en ce qu'il témoigne de l'existence d'un seuil. L'aléatoire se trouve dans les relations entre un neurone et les multiples neurones qui lui transmettent ou auxquels il transmet des signaux.

VI. L'AUTONOMIE STATIQUE

Un corps articulé est en équilibre instable, car son centre de gravité tend à descendre pour peu que ses pièces superposées de travers soient libres de jouer entre elles. L'équilibration est une stabilisation de l'équilibre.

Depuis le milieu du XIXe siècle, on sait que le maintien de l'équilibre corporel est une fonction neuro-musculaire active. Duchenne de Boulogne décrivit les troubles de la statique qui résultent de paralysies ou d'atrophies musculaires. Les ligaments articulaires sont incapables, à eux seuls, de fixer les attitudes corporelles. Sans muscles, les mammifères quadrupèdes, dont les membres sont à demi fléchis, ne pourraient se tenir debout. Pour maintenir dressée une poupée articulée, il faut soumettre ses différentes pièces à la tension de fils élastiques.

La musculature doit même intervenir d'une manière permanente, puisque l'animal vit dans le champ de pesanteur terrestre. Une activité antigravifique est constamment nécessaire. Elle est exercée par l'appareil musculaire et par le système nerveux. On nomme *tonus musculaire* l'état de tension dans lequel se trouve tout muscle strié qui est sous l'influence de son innervation. Cette contraction musculaire tonique est la principale responsable de la statique corporelle. Elle varie sous l'influence de multiples réflexes nerveux. Agissant surtout sur les muscles extenseurs des membres, elle tend à transformer les membres porteurs en des étais solides.

Pour assurer son équilibre, l'organisme ne fait pas seulement varier son tonus musculaire. Il a la possibilité, pour élargir sa base de sustentation, de déplacer ses membres porteurs. Par exemple, sous le terme de réaction de cloche-pied, Rademaker a décrit le déplacement réflexe grâce auquel un chien, que l'on tient sur une seule patte, tout en exerçant sur lui une poussée latérale, projette cette patte en un saut à cloche-pied, dans le sens même de la poussée.

1. *L'interprétation probabiliste de l'autonomie statique*

Depuis Sherrington, une expérience est devenue classique en neurophysiologie. Elle consiste à sectionner le tronc cérébral d'un chat, entre les tubercules quadrijumeaux antérieurs et postérieurs. Le chat entre alors en état de rigidité de décérébration. Le tonus des muscles extenseurs de ses membres est augmenté au point que l'animal, posé sur ses pattes raidies, tient debout par le seul effet de cette rigidité. Or, s'il tient debout, il ne se tient pas debout. Il a perdu toute autonomie statique. Ce corps rigide, que les physiologistes eux-mêmes traitent de « préparation » plus que « d'animal », a de quoi intéresser le géomètre autant que le biologiste. Ce chat, absurdement solidifié, appartient plus au règne minéral qu'au règne animal.

Un animal, justement, n'est pas un corps solide. Il a la possibilité de changer, d'un moment à l'autre, et librement, d'attitude. Il a son autonomie statique.

En raison de l'interprétation probabiliste de l'autonomie, les postures et les attitudes corporelles sont des variables aléatoires. Quelle que soit son attitude, à un moment donné, un homme peut, à un moment ultérieur, se coucher, s'asseoir, se lever et se tenir debout. Et il peut avoir à rester debout sur un plancher uni, ou sur les marches d'un escalier, ou sur le pont d'un bateau en pleine mer, ou sur la plate-forme d'un autobus en virage rapide. Et il peut avoir à maintenir ses attitudes alors qu'il a sur les épaules des charges pesantes.

Il en résulte que le tonus musculaire, responsable de la statique corporelle, doit être *une variable aléatoire*, c'est-à-dire doit être capable de prendre, à tout moment futur, l'une ou l'autre de multiples valeurs simultanément possibles et incompatibles entre elles. Le tonus étant une variable continue, le nombre des cas possibles est infiniment grand.

Cette conclusion doit être fondamentale pour la neurophysiologie théorique. En effet, la définition même du tonus musculaire fait état de l'innervation du muscle. C'est dans le système nerveux qu'il faut chercher les mécanismes capables de transformer le tonus musculaire en une variable aléatoire.

2. *La statique articulaire*

Mais il faut encore préciser certains points de statique articulaire, pour mieux comprendre en quoi la musculature doit participer à l'aléatoire et au déterminisme de la relation articulaire.

Soit un genou schématique, dont le fonctionnement comporte des mouvements de flexion et d'extension du fémur, os supérieur (II), sur le tibia, os inférieur (I), considéré comme un support immobile, étant fixé par les ligaments et les muscles qui le relient au pied et par l'adhérence du pied sur le sol. L'os (II) est articulé par son extrémité inférieure, de profil courbe, ou trochlée, avec la surface supérieure plane, ou plateau de l'os (I).

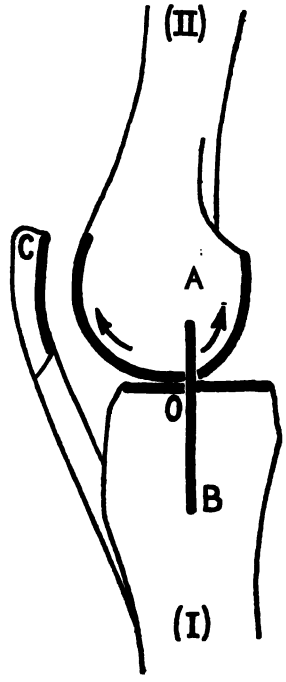

FIGURE 3. — (Genou schématique)

Par rapport à (I), (II) est un solide gêné. Ses déplacements doivent être compatibles avec les liaisons qu'imposent les ligaments articulaires, et, en particulier, les ligaments latéraux et les ligaments croisés, que l'on peut considérer comme inextensibles. Ces liaisons suppriment toute possibilité de translation avec glissement, et de rotation avec roulement, de (II) par rapport à (I). (II) peut accomplir un mouvement de rotation autour d'un axe transversal, avec glissement de la trochlée sur le plateau. L'axe de rotation est situé au niveau de l'insertion supérieure des ligaments latéraux. Sur la figure, la ligne AB schématise

le ligament latéral interne. Le point A, par lequel passe l'axe de rotation est donc distinct du point O, par lequel passe la ligne de contact ou d'articulation entre (II) et (I).

Donc, par rapport au tibia, le point A du fémur a une position déterminée. Comme, dans un plan, la position d'une figure est déterminée par celles de deux de ses points, la position du fémur serait univoquement déterminée par rapport au tibia, si le fémur était fixé à la rotule au point C, puisque la rotule est fixée au tibia par un tendon inextensible. Un tel déterminisme serait incompatible avec le jeu articulaire. Il faut qu'il y ait discontinuité entre le fémur et la rotule. C'est la condition nécessaire pour que la position du fémur puisse être une variable aléatoire.

Le muscle quadriceps, en se contractant, immobilise le fémur par rapport à la rotule et au tibia. Il supprime alors cet aléatoire. Il ne reste plus qu'une seule position possible. La contraction musculaire est déterminante. C'est elle qui immobilise les membres dans des postures déterminées. Voilà en quoi la musculature participe à la statique corporelle. Réciproquement, le relâchement musculaire rend au jeu articulaire tout son aléatoire.

Passant de l'état décontracté à l'état contracté, le muscle fait passer la relation articulaire de sa phase aléatoire à sa phase déterministe. Comme la physiologie musculaire est éminemment réversible, le muscle joue sur l'aléatoire et le déterminisme articulaire. Élastique, il permet l'aléatoire; contractile, il impose le déterminisme.

On comprend alors pourquoi le tonus musculaire, pour se prêter au jeu articulaire, doit être transformé, par le système nerveux, en une variable aléatoire.

3. *La régulation de l'équilibre corporel*

Or, une telle transformation est obtenue grâce à des régulations nerveuses.

Le principe de cette régulation est que le tonus musculaire, responsable de la statique corporelle, est soumis à l'influence des conditions statiques elles-mêmes dans lesquelles se trouve le corps.

C'est sans doute à Flourens (1794-1867), le père de la physiologie du cervelet et de l'appareil vestibulaire, qu'il faut attribuer le mérite d'avoir introduit en neurophysiologie l'idée de régulation. Dès ses premières expériences sur le cervelet, en 1822, il conclut que : « le cervelet est le balancier et le régulateur des mouvements de translation de l'animal »; et, en 1842 : « Dans le cervelet, réside une propriété dont rien ne donnait encore l'idée en physiologie et qui consiste à coordonner les mouvements. »

Avant d'être aléatoire, le tonus musculaire doit être une grandeur variable. Il est bien connu que le motoneurone, subissant lui-même de multiples influences activatrices ou inhibitrices, module le tonus.

Mais le tonus n'est pas seulement modulé par le système nerveux; il est régulé. Je vais donner quelques exemples élémentaires de mécanismes régulateurs réflexes.

La moelle, étage inférieur du système nerveux central, est le lieu des réflexes qui interviennent dans le maintien des postures segmentaires. Le plus célèbre d'entre eux est le réflexe myotatique de Liddell et Sherrington. Un muscle, qui a conservé son innervation, se contracte en réponse réflexe à une élongation modérée, et avec une intensité proportionnelle à cette élongation. Voilà le type même de ces réactions qui prouvent que le tonus subit l'influence des conditions mécaniques mêmes dans lesquelles se trouve le muscle.

A l'intérieur même des muscles, certaines fibres, les célèbres fuseaux neuro-musculaires, sont différenciées pour servir de récepteurs d'élongation. Ruffini, dès 1898, remarquait que ces fuseaux bénéficient d'un tel raffinement dans la différenciation qu'ils méritent

d'être classés immédiatement après des appareils hautement spécialisés comme ceux de la vue et de l'audition. Toutes les découvertes récentes n'ont fait que confirmer ce jugement. Les signaux, émis par ces récepteurs sont transmis directement aux motoneurones, dans la moelle, par des voies à conduction rapide, à la vitesse moyenne de 100 m/s.

D'autres récepteurs, décrits par Golgi dans les tendons, sont sensibles aux efforts de traction que les muscles exercent sur les tendons. Certains récepteurs émettent donc des signaux-longueur, et d'autres des signaux-force. Imaginons que, sur un même centre, convergent un signal-longueur et un signal-force, émis à partir d'un même muscle. Tout se passera comme si le centre recevait un signal-travail. Cette remarque devrait prendre de l'importance pour une application du théorème des travaux virtuels à l'analyse de l'équilibration corporelle. Un tel centre pourrait être cherché au niveau du cervelet. L'histologie du cortex cérébelleux est tout à fait favorable à un brassage des signaux.

Intervenant sur des centres nerveux situés à un étage supérieur à celui de la moelle, les réflexes issus de l'appareil vestibulaire jouent plus sur les attitudes générales du corps que sur les postures segmentaires. Les récepteurs vestibulaires sont sensibles à des grandeurs mécaniques; les uns, grâce aux otolithes, aux changements de position statique de la tête dans le champ de pesanteur et aux accélérations des mouvements de translation; les autres, grâce aux cupules ampullaires des canaux semi-circulaires, aux accélérations angulaires des mouvements de rotation. Ces récepteurs sont à l'origine de réflexes, qui modifient la répartition du tonus dans l'ensemble de la musculature, et qui déclenchent des mouvements dans les membres, en particulier ceux d'extension et d'abduction indispensables pour l'équilibration.

Ces quelques données élémentaires permettent de comprendre que les neurophysiologistes puissent, par des opérations successives, obtenir alternativement des effets d'activation et d'inhibition du tonus musculaire. Voici, par exemple, l'expérience progressive que firent sur le chat, en 1956, Batini et Moruzzi. Après décérébration par section du tronc cérébral, il y eut : rigidité des extenseurs dans les quatre membres. Ensuite, après déafférentiation des membres antérieurs, par section des racines médullaires dorsales, il y eut : flaccidité de ces membres. Ensuite, après section post-brachiale de la moelle, il y eut à nouveau : rigidité de ces membres, par suppression de l'action inhibitrice dite de Schiff-Sherrington. Ensuite, après destruction électrolytique des noyaux fastigiaux du cervelet, il y eut : augmentation de cette rigidité. Ensuite, après la section de l'un des nerfs vestibulaires, il y eut : flaccidité dans le membre antérieur ipsilatéral, résultant d'une action inhibitrice issue du vestibule controlatéral. Et enfin, après la section de l'autre nerf vestibulaire, il subsista une certaine rigidité dans les deux membres antérieurs. De telles expéeiences permettent de démonter les mécanismes complexes grâce auxquels le tonus musculaire rst modulé et régulé par le système nerveux.

Participant à l'équilibration, l'activité réflexe acquiert un sens nouveau. Elle devient régulatrice.

4. *La régulation avec action intégrale*

Les ingénieurs, élaborant la théorie des régulations, ont décrit la boucle de régulation, avec sa chaîne d'action et sa chaîne de contre-réaction. Cette boucle comporte trois systèmes, le *système réglé* S, le *régulateur* R et le *comparateur* D. La grandeur de sortie du régulateur est la *régulatrice*, 4, qui agit sur le système réglé. Ce système a pour grandeur de sortie la grandeur qu'il faut régler, que je nommerai la *régulande*, 2. Lorsqu'une *perturbation*, 3,

agit sur le système réglé, elle tend à faire varier la régulande. Une telle variation est détectée par le comparateur et comparée à la grandeur de référence, qui, dans le cas d'une régulation de maintien, est fixe et que je nommerai la *norme*, 1. L'écart, mesuré entre la nouvelle valeur de la régulande et la norme sert de grandeur d'entrée pour le régulateur. La boucle, ainsi, est fermée. Elle a un sens fonctionnel irréversible. Par le symbole — 1, on indique que la boucle comporte une inversion de signe, puisque multiplier une grandeur par — 1 c'est la transformer en la grandeur de signe opposé.

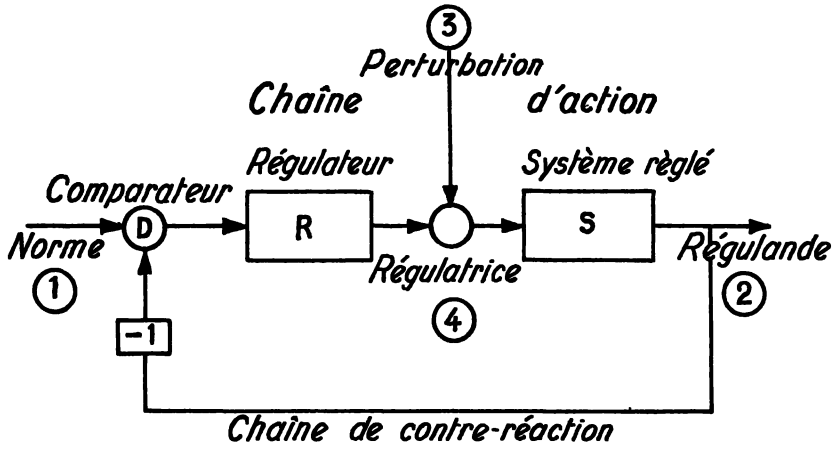

FIGURE 4. — La boucle de régulation.

Entre la régulande et la régulatrice, il peut y avoir différents types de relations mathématiques. En particulier, on distingue la régulation avec *action proportionnelle* et celle avec *action intégrale*. Dans le premier cas, les variations de la régulatrice y sont proportionnelles à celles de la régulande x. Dans le deuxième, ce sont les variations de la dérivée par rapport au temps de la régulatrice qui sont proportionnelles à celles de la régulande. Mais, comme il faut connaître y en fonction de x, et non x en fonction de y, il faut utiliser l'opération inverse de la dérivation, c'est-à-dire l'intégration. Les variations de la régulatrice y deviennent alors proportionnelles à celles de l'intégrale dans le temps de la régulande x.

L'intérêt de cette distinction entre ces deux variétés de régulation est d'ordre fonctionnel. Seule, la régulation qui comporte une action intégrale est capable d'annuler un écart. Selon que la grandeur d'entrée est un échelon de position, ou un échelon de vitesse, ou un échelon d'accélération, il faut une simple, ou une double, ou une triple action intégrale. Cette superposition d'actions intégrales augmente d'ailleurs, les risques d'instabilité. Les exigences de précision et de stabilité sont souvent contradictoires.

Depuis l'avènement de la cybernétique, la neurophysiologie utilise de plus en plus couramment des schémas fonctionnels, avec leurs boucles de régulation, pour représenter les circuits nerveux. Par exemple, à propos du réflexe myotatique, on peut proposer le schéma plausible suivant. Le système réglé est la fibre musculaire. La régulande, 2, est la longueur de cette fibre. C'est en fixant cette longueur que le muscle immobilise l'articulation. Toute cause d'allongement joue le rôle de la perturbation, 3.

Admettons, en première approximation, qu'il s'agisse d'une simple régulation de maintien. La grandeur de référence est alors une norme, 1. Le muscle doit conserver une

longueur bien définie. Provoqué par une perturbation, un écart de longueur est détecté par la fibre fusoriale. Ce récepteur transmet au motoneurone, dans la moelle, un signal proportionnel à l'écart. Le motoneurone exerce une influence activatrice sur le muscle, qui se contracte. La boucle est fermée. Tout allongement est annulé par un raccourcissement.

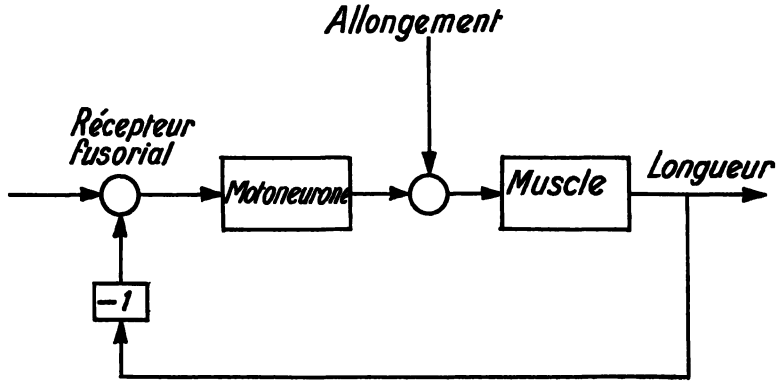

FIGURE 5. — La régulation par réflexe myotatique.

Mais je pense que l'on peut appliquer la théorie des régulations avec une meilleure approximation, et faire apparaître en neurophysiologie, à propos de l'équilibration corporelle, des régulations avec action intégrale.

Il y a régulation avec action intégrale lorsque la régulatrice a la valeur de la dérivée par rapport au temps de la régulande. Or, en régulation de l'équilibre, on trouve de telles dérivées. Par exemple, dans ses analyses des récepteurs articulaires, S. Skoglund, en 1955, a distingué : les récepteurs ligamentaires, qui émettent des signaux de position; les récepteurs capsulaires, qui émettent des signaux de vitesse; et une troisième variété de récepteurs, qui émettent des signaux d'accélération. Les différents récepteurs musculaires sont, eux aussi, sensibles à des grandeurs qui dérivent les unes des autres. Certains récepteurs fusoriaux émettent des signaux-longueur; d'autres, d'après Laporte et Bessou, des signaux-vitesse; et les récepteurs tendineux émettent des signaux-force, homogènes à des signaux-accélération. Dans l'appareil statolithique d'un crustacé, Melvin J. Cohen, distingua en 1955 deux variétés de récepteurs de position et un récepteur d'accélération. L'appareil vestibulaire de l'homme comporte, avec ses organes otolithiques et ses canaux semi-circulaires, des récepteurs de position, des récepteurs d'accélération pour les mouvements de translation, et des récepteurs d'accélération angulaire pour les mouvements de rotation. Donc, les centres nerveux reçoivent, non seulement des signaux correspondant à une grandeur donnée, mais aussi des signaux correspondant à la dérivée première et à la dérivée seconde de cette grandeur.

Il ne semble guère possible d'en dire plus actuellement, puisque tous les circuits nerveux ne sont pas décrits, et que nous ne savons pas encore comment sont assurées exactement la convergence, l'harmonisation et la synchronisation des signaux dans les centres nerveux. En 1959, Alan R. Adolph, appliquant l'analyse harmonique et la théorie des régulations au système antagoniste fléchisseurs-extenseurs, en vérifia la stabilité.

Il paraît logique d'accepter l'idée que, dans le système nerveux, s'accomplissent des régulations avec action intégrale, et même avec double action intégrale. Ce sont les récepteurs qui en ont la charge. Différents récepteurs sont sensibles à des grandeurs de

SALLES D'ÉTUDES

nature mathématique différente. Et il deviendra nécessaire de distinguer les divers circuits nerveux, non seulement d'après la nature des signaux émis, extéroceptifs, intéroceptifs, proprioceptifs, auditifs, visuels..., mais aussi d'après la nature mathématique de ces signaux, les uns transmettant, par exemple, des signaux-longueur, d'autres des signaux-vitesse, dérivée première, d'autres des signaux-accélération, dérivée seconde.

5. *Déterminisme et aléatoire des régulations nerveuses*

D'après ce qui précède, le tonus musculaire est modulé et régulé par le système nerveux. Il ne manque plus qu'un dernier élément pour résoudre le problème de savoir comment ce tonus est transformé en une variable aléatoire. Cette condition est nécessaire pour que la musculature puisse participer à la physiologie articulaire.

Reprenons alors le mécanisme régulateur. Dans sa théorie n'est apparu encore que du déterminisme. Que la régulation comporte une action proportionnelle ou une action intégrale, les relations entre la régulatrice et la régulande sont déterministes. Mais l'aléatoire va apparaître lorsque les autres variables de la théorie des régulations, la référence et la perturbation, vont entrer en jeu.

Le mot de *perturbation* désigne toutes les circonstances aléatoirement variables, dans lesquelles peut se trouver l'organisme et qui peuvent mettre en action ses mécanismes régulateurs. Le tonus musculaire, soumis aux régulations nerveuses, elles-mêmes soumises aux perturbations aléatoires, devient effectivement une variable aléatoire.

Mais la véritable raison de l'aléatoire doit être cherchée dans les variations de la grandeur de référence. En première approximation, je l'ai considérée comme une norme fixe. En fait, c'est une *commande*, variable. Il s'agit, non d'une régulation de maintien, qui asservit la régulande à une référence fixe, mais d'une régulation de correspondance, qui asservit la régulande à une référence variable. Or, la commande est une fonction autonome, et, en vertu de l'interprétation probabiliste de l'autonomie, c'est une variable aléatoire.

La commande a beaucoup plus d'intérêt théorique que la perturbation. Si les circonstances extérieures à l'animal varient aléatoirement, c'est surtout parce que l'animal les fait varier aléatoirement lui-même, en se promenant dans le monde extérieur.

Et alors, en raison de l'aléatoire de la commande et de la perturbation, les mécanismes régulateurs de l'équilibre doivent être en mesure d'intervenir dans toutes les positions possibles. C'est alors que prend tout son intérêt un mécanisme nerveux très complexe, décrit sous le nom de système gamma. Les fuseaux neuromusculaires, récepteurs dont les influx activent les motoneurones, sont eux-mêmes soumis à une innervation motrice, car ils sont contractiles. En 1945, Leksell révéla que le tiers des fibres, qui forment les nerfs issus de la moelle pour les muscles, sont destinées aux fuseaux. Plus petites que les fibres destinées aux fibres musculaires principales, elles sont nommées : fibres gamma. Or, Granit et ses collaborateurs montrèrent ultérieurement que ce système gamma est, lui aussi, sous l'influence activatrice ou inhibitrice des centres nerveux. En particulier, le contrôle de ce système est l'une des fonctions importantes du cervelet et de la substance réticulaire du tronc cérébral. Et ainsi, les fuseaux neuromusculaires, adaptés à toutes les postures possibles, peuvent être mis en état de remplir leur fonction quelle que soit la posture.

D'une manière générale, le système nerveux doit être capable d'assurer, par le jeu des articulations synaptiques, des fonctionnements d'ensemble dans toutes les conditions possibles. Peut-être l'une des propriétés du thalamus, situé au centre du cerveau, à l'arrivée de toutes les voies afférentes, avec les connexions de ses divers noyaux et ses connexions

aller et retour avec l'ensemble du cortex cérébral, est-elle de fonctionner fou. Quand on voudra chercher pour lui un équivalent en cinématique appliquée, peut-être le trouvera-t-on dans le satellite du différentiel dans une voiture automobile.

La véritable explication de l'autonomie devra être cherchée dans le cerveau. Les hommes sont parfois éblouis par les performances de leurs propres machines. Ils oublient que ce sont eux qui les ont conçues et réalisées. En les créant, ils leur ont conféré leurs propres qualités, celles dont ils ont besoin. Tous les circuits, nerveux ou non, de la civilisation passent par le cortex du cerveau humain.

Conclusions et résumé

La relation articulaire, avec ses trois caractères, la discontinuité, l'aléatoire et le déterminisme, a une valeur scientifique très générale. Son intervention en géométrie et en cinématique appliquée le prouve. Et, en particulier, elle a un rôle majeur à jouer en physiologie, non seulement pour la physiologie du squelette, mais aussi pour celle du système nerveux.

Par ce qu'elle comporte de probabiliste, la théorie de l'articulation devient donc partie intégrante de l'interprétation probabiliste de l'autonomie, que j'ai proposée il y a plus de vingt ans. La physiologie théorique tend vers l'unité. Son idée centrale doit être celle d'autonomie. Par exemple, l'animal a lui-même, en lui-même, et pour lui-même, tous les mécanismes nécessaires pour assurer son équilibre dans les circonstances les plus aléatoirement variables.

La mécanique corporelle ne peut faire abstraction de l'autonomie motrice, l'autocinèse. C'est au-dessus de cette mécanique corporelle que doivent se placer les sciences du comportement, car seuls peuvent avoir un comportement les êtres qui ont acquis leur autocinèse. Et, encore au-dessus, il faut placer le libre arbitre, conscience que chaque homme a d'être responsable de son comportement. L'homme est alors, là, en pleine morale, sinon en pleine métaphysique, au delà de la science.

L'idée centrale de toute cette construction est celle d'autonomie. Elle doit être acceptée comme une donnée scientifique. En effet :

— si les animaux offrent tous les signes extérieurs de l'autocinèse;

— si le mouvement brownoïde, manifestation de cette autocinèse à l'état brut, peut aussi bien expérimentalement que théoriquement, être interprété par la probabilité;

— si la physiologie, dans toutes ses parties, et, en particulier avec ses réserves, ses régulations et ses articulations, démontre que l'animal a en lui-même tous les mécanismes nécessaires et suffisants pour acquérir et utiliser son autonomie;

— si chacun des hommes reconnaît en lui le sens intime de l'autonomie;

il serait bien surprenant, en fin de compte, que nous ne soyons pas, réellement, des êtres autonomes.

Pierre Vendryès