

JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ STATISTIQUE DE PARIS

P. VENDRYÈS

R. MALTERRE

Le mouvement brownien de l'homme et des animaux

Journal de la société statistique de Paris, tome 94 (1953), p. 85-97

http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1953__94__85_0

© Société de statistique de Paris, 1953, 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/>

IV

LE MOUVEMENT BROWNOÏDE DE L'HOMME ET DES ANIMAUX

Pour faire comprendre le sens des résultats expérimentaux que nous présentons, nous voulons rappeler ce qu'est le *mouvement brownnoïde*.

Un système doué de l'autonomie motrice, de l'autocinèse, a la liberté de faire varier, à tout moment, la direction et la vitesse de son mouvement. A deux moments successifs, il a la possibilité de prendre des décisions motrices indépendantes l'une de l'autre. En étendant ce raisonnement à de nombreux moments successifs, on déduit qu'un système autocinétique doit pouvoir, à la limite, donner à son mouvement des brisures qui le feront ressembler au mouvement brownien : il lui fera alors acquérir des caractères brownnoïdes.

Ce fait a une grande importance théorique. Le caractère *aléatoire* du mouvement d'une particule brownnienne dans un fluide est devenu, depuis Jean Perrin, un fait expérimental. Par conséquent, les caractères brownnoïdes du mouvement

d'un animal autocinétique le feront rentrer dans le cadre de l'interprétation probabiliste que l'un de nous a proposée (P. Vendryès, *Vie et Probabilité*, 1942) de l'autonomie animale.

Il y a, bien sûr, une différence essentielle de nature entre le mouvement d'une particule brownienne et celui d'un animal autocinétique. La particule a une trajectoire brisée, parce qu'elle subit les chocs de molécules qui lui sont extérieures, et cette trajectoire est aléatoire parce que les molécules percutantes sont indépendantes les unes des autres. L'animal, lui, a en lui-même, indépendamment du milieu extérieur, les raisons des variations de son mouvement. C'est l'*indépendance* qui intervient dans le cas des particules, et c'est l'*autonomie* dans celui de l'animal. Mais si les deux mouvements diffèrent par leur nature, ils sont semblables par la forme. Dans les deux cas, il y a indépendance entre les divers moments successifs de la trajectoire.

Une autre différence très importante entre ces deux mouvements tient à ce que l'animal, s'il a la possibilité de faire varier à tout moment sa trajectoire, a aussi celle de diriger l'ensemble de son mouvement vers un but défini, ou de donner à sa trajectoire une forme très régulière, rectiligne, ou curviligne, par exemple. Dans ce cas, l'animal *lie* lui-même ses déplacements à un repère extérieur ou *lie* entre eux les moments successifs de son mouvement. Un mouvement ainsi dirigé n'aura aucun caractère aléatoire.

Il faut donc penser que, dans la réalité, un mouvement animal aura rarement une allure parfaitement brownienne; et que, le plus souvent, il s'agira de mouvements ou plus ou moins brownoïdes, donc ou plus ou moins aléatoires.

Nous voulons enfin faire une dernière remarque. Une particule n'a de mouvement brownien qu'en l'absence de tout champ directeur. Par exemple, le mouvement des particules browniennes a été analysé par Jean Perrin à l'horizontale, pour annuler les effets du champ de force de gravitation. En appelant *tropisme* la sensibilité d'un animal à une influence extérieure, nous concluons qu'un animal ne peut prendre un mouvement brownoïde que dans un milieu *isotrope*, c'est-à-dire en l'absence de tout champ d'influence auquel il ne puisse se rendre insensible.

Tel est l'ensemble des notions que nous nous sommes proposés de soumettre au contrôle expérimental.

L'animal que nous avons choisi pour nos expériences a été la mouche. « Que l'on suive le vol d'une mouche. Souvent, en été, au-dessous des lustres qui pendent au plafond des chambres, des mouches décrivent inlassablement des trajectoires incessamment brisées. Voilà bien une image du mouvement brownien. » (*Vie et Probabilité*, p. 333). Nous nous sommes donc proposés de réaliser sur la mouche une expérience qui soit le plus comparable possible avec celle que Jean Perrin a réalisée sur sa particule brownienne. Donc, le mouvement de la mouche, pris pour type de mouvement brownoïde, fera le premier objet de notre exposé, que nous généraliserons ensuite.

I. — LA MOUCHE.

Au début de notre exposé, nous voulons exprimer toute notre reconnaissance aux Établissements de construction de matériel cinématographique A. Debrie pour l'amabilité et la générosité avec lesquelles ils nous ont préparé

et prêté les appareils de prise de vue grâce auxquels nous avons pu réaliser notre expérience. Nous avons été obligés de reprendre à plusieurs reprises nos essais, et nous n'avons pu le faire que grâce à la compréhension des Établissements Debie.

Le principe de l'expérience fut celui-ci. Une mouche (une seule) volant en pleine liberté sous un lustre et ayant pris ce mouvement d'allure brownoïde dont nous avons parlé, nous voulions repérer, à des intervalles de temps égaux, et un très grand nombre de fois, ses positions par rapport à un même système de référence, en nous servant d'un appareil cinématographique placé sur le plancher, objectif à la verticale. Les clichés devaient être ensuite projetés l'un après l'autre et les positions successives de la mouche être rapportées à un même repère. Il s'agirait alors de tracer entre ces positions instantanées des segments idéalement rectilignes et de faire des calculs sur les longueurs de ces *déplacements* théoriques.

Nous voulions donc répéter très exactement sur le mouvement brownoïde les expériences de J. Perrin sur le mouvement brownien. Et nous avons même espéré obtenir, comme J. Perrin, 500 déplacements utilisables pour nos calculs.

Nous avons choisi pour intervalle de temps entre les divers clichés le *tiers de seconde*, estimant que le vol des mouches était assez rapide pour que le caractère irrégulier de leur trajectoire apparaisse avec de telles durées. Il fallait donc espérer qu'une mouche voudrait bien voler devant notre appareil pendant environ trois minutes.

Notre appareil fut un appareil Debie « Parvo L » (avec objectif Kinoptik traité $f/2$ F 40 mm). Les Établissements Debie ont monté pour nous sur cet appareil un moteur 220 volts triphasé 50 périodes avec réducteur spécial à trois images par seconde. Le film fut un Panchromatic Kodak plus X, sensibilité 31° Scheiner, 35mm.

La réalisation de l'expérience ne fut pas simple, et nous avons dû la reprendre plusieurs fois. Mais nos premiers échecs nous ont fait percevoir des faits importants. En particulier, nous avons vu que la mouche est sensible aux influences lumineuses. Nous avons voulu, cherchant l'absolu, obtenir des positions vraiment instantanées de la mouche, au $1/500^e$ de seconde. Cela exigeait un éclairage intense. Or, nous avons eu la mauvaise surprise, en allumant nos spots, de voir la mouche fuir vers la limite des zones d'ombre et de lumière. Il fallait donc se contenter de la lumière du jour ordinaire, quitte à n'avoir que des positions presque instantanées, très suffisantes d'ailleurs. Il faut en tout cas tenir compte de ce phototropisme de la mouche, puisque, dans notre dernier essai, la lumière du jour arrivait latéralement. Influence faible et non déterminante du vol de la mouche, certes; mais influence tout de même et qui doit rendre le mouvement imparfaitement brownien, donc brownoïde.

Un autre facteur doit jouer dans le même sens. Manifestement, les mouches restent dans les environs d'un même lustre (même non éclairé, comme ce fut le cas dans notre expérience). Ce goût pour les repères solides témoigne d'un certain *stéréotropisme*.

Mais il y avait une raison beaucoup plus importante pour rendre plus brownoïde que parfaitement brownienne la trajectoire de la mouche. Pendant de

courts moments, les mouches effectuent des vols rectilignes et réguliers. L'intervalle de temps que nous avons choisi, le tiers de seconde, était-il suffisamment long pour que nous dépassions la durée de ces périodes de vol régulier et pour que nous entrions vraiment dans le domaine de l'aléatoire?

Le film définitif fut pris en juin dernier. Pour obtenir nos 500 déplacements, l'enregistrement dura plus de 4 minutes, soit 760 clichés. Chaque position fut repérée au $1/48^e$ de seconde. Entre l'objectif et le lustre la distance verticale fut 1 m 90. Nous estimons à $0 \text{ m}^2 835$ ($0,85 \times 0,98 \text{ m}$) la surface du champ-dans lequel la mouche pouvait être photographiée.

Le dépouillement, image par image, de notre film nous a rapidement fait comprendre que nous ne pourrions pas obtenir 500 positions successives, sans interruptions nombreuses, de notre mouche. Et cela pour deux raisons : la mouche était assez souvent sortie du champ et, assez souvent, son image avait été projetée sur celles de moulures qui se trouvaient au-dessus du lustre, au plafond, et où il fut souvent bien difficile de la retrouver. Nous avons donc dû nous contenter de bandes plus ou moins longues de positions successives, en espérant obtenir, grâce à nos 760 clichés, les 500 déplacements que nous désirions pour rendre notre expérience tout à fait comparable à celle de J. Perrin.

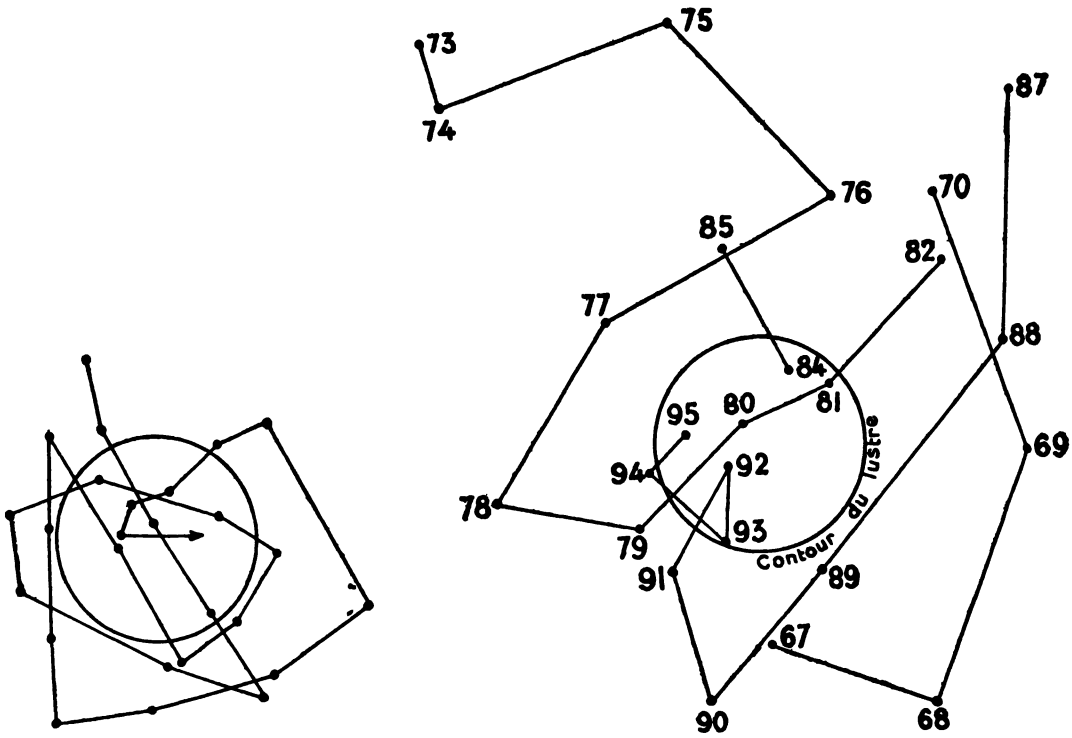
Cela ne fut pas possible. En effet, l'examen des déplacements que nous dessinions entre les positions successives nous a montré que ce n'avait pas été la même mouche qui avait volé pendant la prise du film. A notre insu, une deuxième mouche avait dû relayer la première. L'une, que nous nommerons la mouche A, avait un vol plus lent et bien moins excentrique que la seconde, ou mouche B. Et, pour comble de malheur, la mouche B s'était posée à plusieurs reprises sur le lustre, nous faisant perdre ainsi près d'une centaine de déplacements.

En définitive, nous avons pu faire état de 370 déplacements pour la mouche A, et de 73 seulement pour la mouche B.

Les figures que nous reproduisons correspondent l'une à des déplacements de la mouche A, l'autre à des déplacements de la mouche B. Dans les deux cas, nous avons manifestement obtenu des images de mouvement brownioide. Les tracés sont tout à fait comparables à ceux que J. Perrin a donnés du mouvement brownien des particules.

La comparaison des tracés rend évidente la différence des vols des deux mouches. Mais elle révèle un fait important. Le mouvement de la mouche B paraît encore plus brownioide que celui de la mouche A. Cela est dû à ce que la mouche B avait un vol plus rapide que l'autre, et que, par conséquent, l'intervalle du tiers de seconde, entre les divers clichés, a très bien convenu pour la B, tout en étant un peu bref pour la A et en laissant apparaître pour celle-ci de courts segments de trajectoire rectiligne et presque uniforme. Avant même de faire des calculs, nous avons prévu que, pour la mouche A, qui devait être notre type essentiel puisque nous disposions pour elle de 370 déplacements, l'intervention de ces brefs segments de vol régulier devait favoriser les déplacements de moyenne amplitude au détriment des déplacements courts et des déplacements longs. Nos calculs ne devaient donc aboutir qu'à des chiffres moins voisins de l'aléatoire parfait que ceux de J. Perrin.

Une fois obtenues par projection agrandie de nos films les positions de nos mouches, nous avons tracé les déplacements successifs, puis nous les avons mesurés au demi-millimètre. Et nous avons enfin soumis leurs longueurs à la méthode même de calcul qu'avait utilisée J. Perrin, en imaginant tous ces



Mouvement brownien de la MOUCHE A en dessous du lustre.

La mouche est sans doute sortie du champ aux clichés 71, 72, 83 et 86. MOUCHE B (du cliché 67 au cliché 95, elle se posa alors sur le lustre).

déplacements ramenés à une même origine et en comptant le nombre des déplacements dont l'extrémité tombait dans des anneaux concentriques à cette origine et de rayons calculés à partir du déplacement quadratique moyen e .

Pour notre mouche A, la somme des carrés des déplacements fut égale à 107.323. Cette somme divisée par 370 devint : 290,06. La racine carrée de ce chiffre, le déplacement quadratique moyen, fut : $e = 17,03$. Il n'y eut plus qu'à compter le nombre des déplacements dont les longueurs étaient respectivement comprises entre 0 et $e/4$ (4,25); $e/4$ et $2e/4$ (8,50)...; jusqu'au delà de $8e/4$ (34).

Au tableau de nos résultats, nous avons joint les chiffres obtenus par J. Perrin, mais en les supposant obtenus pour 370 déplacements et non pour 500. Nous signalons, d'ailleurs, que les chiffres théoriques donnés par J. Perrin ne sont pas tout à fait exacts. Il y a une petite erreur dans les valeurs qu'il a données pour les probabilités correspondant à chacun des anneaux, et nous donnons les vraies valeurs des chiffres théoriques.

Les nombres obtenus par J. Perrin correspondent exactement aux nombres théoriques : le mouvement d'une particule brownienne est parfaitement aléatoire. C'est l'exemple même d'un phénomène naturellement aléatoire.

DÉPLACEMENTS compris entre :	PROBABILITÉS par anneau	n calculés (pour 370 déplacements)	n trouvés (mouvement brownien)	n trouvés (mouvement brownnoïde)
0 et $e/4$	0,0606	22,4	25	7
$e/4$ et $2e/4$	0,1606	59,4	58	34
$2e/4$ et $3e/4$	0,2090	77,3	78	112
$3e/4$ et $4e/4$	0,2019	74,7	76	94
$4e/4$ et $5e/4$	0,1583	58,6	55	61
$5e/4$ et $6e/4$	0,1042	38,6	36	28
$6e/4$ et $7e/4$	0,0586	21,7	22	14
$7e/4$ et $8e/4$	0,0285	10,5	12	13
$8e/4$ et au delà	0,0183	6,8	7	7
	1,0000	370	369	370

Les nombres que nous avons obtenus ne correspondent pas exactement aux chiffres théoriques, mais ils tendent nettement vers ces chiffres : le mouvement de notre mouche ne s'est pas révélé parfaitement brownien et aléatoire, mais nettement brownnoïde.

En effet, si, comme nous l'avions prévu, les déplacements moyens furent avantagés, l'important est que, autour de ces déplacements moyens, il y ait eu des écarts. Le mouvement de notre mouche a eu de très fortes tendances brownnoïdes.

Et le problème se pose de lui-même de savoir si ces tendances brownnoïdes ne se seraient pas mieux révélées si les intervalles qui avaient séparé nos clichés avaient duré plus que le tiers de seconde. Il faut, en effet, penser que notre mouche A avait eu des mouvements relativement lents. Sans le vouloir, nous avons surpris de courts, mais assez fréquents, moments de mouvement rectiligne et uniforme. Trois ou quatre positions successives se trouvaient alors en ligne droite et séparées par des segments presque égaux.

C'est alors qu'il devint intéressant de faire intervenir la mouche B. Nous ne disposions pour elle que de 73 déplacements, ce qui n'est pas un très grand nombre. Pour un résultat d'ensemble, nos 370 déplacements de la mouche A étaient plus importants. Mais, pour un contrôle, notre mouche B pouvait nous servir, puisqu'elle avait été animée, elle, d'un mouvement nettement plus rapide. Sur nos tracés, aucune partie de mouvement rectiligne et uniforme; au contraire, de violentes irrégularités.

Voici alors nos résultats expérimentaux concernant la mouche B. (Nous avons supprimé tous les déplacements nuls, correspondant aux arrêts de la mouche sur le lustre). Somme des carrés des déplacements : 79.093. Le déplacement quadratique moyen fut égal à 32,9. Cette valeur servit à calculer les rayons des divers anneaux, comme dans le cas précédent.

Dans le tableau ci-après, nous donnons les nombres d'expériences, comparées aux nombres calculés.

Ainsi, il s'est trouvé que pour la mouche B, à l'inverse de ce qui s'était passé pour la mouche A, les déplacements courts furent favorisés aux dépens des déplacements moyens. L'examen de nos tracés explique ce fait. A cinq reprises différentes, la mouche B est allée se poser sur le lustre. Or, avant de se poser,

elle ralentissait son mouvement, un peu comme si elle hésitait avant de choisir son point d'arrêt. D'où l'existence de déplacements courts.

	NOMBRES CALCULÉS	NOMBRES TROUVÉS
Premier anneau	4,4	11
Second anneau	11,7	9
Troisième anneau	15,2	14
Quatrième anneau	14,7	11
Cinquième anneau	11,5	11
Sixième anneau	7,6	10
Septième anneau	4,3	5
Huitième anneau	2	0
Au-delà	1,3	2
	72,7	73

En définitive, nos deux mouches suivirent très nettement une trajectoire brownoïde, l'une et l'autre. Ni l'une ni l'autre de ces trajectoires ne fut parfaitement aléatoire. Mais, dans le cas de la mouche A, l'imperfection tient à l'excès des déplacements moyens, et, dans le cas de la mouche B, à l'excès des déplacements courts. Dans les deux cas, les raisons de l'imperfection sont faciles à donner. Et nous pouvons imaginer qu'avec un peu de chance, nous aurions pu voir apparaître un mouvement *parfaitement aléatoire*. Il aurait suffi que la mouche B, celle qui avait le mouvement le plus rapide, vole plus longtemps devant notre objectif, sans aller se poser sur le lustre. Il aurait suffi que notre mouche B vole aussi longtemps que notre mouche A.

Dans ces conditions, il semble qu'il serait indiqué de recommencer encore une fois l'expérience, pour tendre vers l'absolu et démontrer que les mouches peuvent suivre des trajectoires non seulement brownoïdes, mais rigoureusement browniennes. Une telle expérience serait évidemment très démonstrative. Mais elle ne nous semble ni indispensable ni vraiment utile.

En effet, l'aléatoire parfait est compris entre les trajectoires de nos deux mouches. Une nouvelle expérience qui atteindrait l'aléatoire parfait ne ferait que confirmer nos résultats. Et si nous avions, avec un peu de chance, atteint cet aléatoire parfait, nous n'aurions pas, en réalité, atteint la vérité dans sa perfection. Dans la réalité, le mouvement des mouches est brownoïde, et non brownien, puisque les mouches ont la possibilité soit de s'arrêter soit de suivre, par moments des trajectoires rectilignes avec un vol uniforme. Un vol parfaitement aléatoire n'est en réalité qu'un cas limite.

Et nous pouvons nous féliciter, malgré la première apparence, de la chance que nous avons eue que deux mouches se soient succédé devant notre objectif. Sans le vouloir, nous avons saisi deux types de mouvement brownoïde qui encadrent le mouvement brownien parfait.

Et nos expériences permettent de conclure, selon l'hypothèse initiale, que les mouches ont la *possibilité* de prendre un mouvement *parfaitement brownien*, tout en reconnaissant que ce mouvement n'est qu'un cas particulier et que, pour diverses raisons, le mouvement réel des mouches est sans doute plus souvent brownoïde que parfaitement brownien.

II. — LE LEUCOCYTE

D'après les idées mêmes exposées dans *Vie et Probabilité*, le cas de la mouche ne devait servir que d'exemple. C'était une manière de démontrer qu'un animal, système autonome, pouvait entrer en relations aléatoires avec son milieu extérieur.

Mais ce caractère brownoïde doit être une caractéristique de tout système doué d'autonomie motrice. Tout système autocinétique doit avoir la possibilité de suivre une trajectoire aléatoire par rapport à un repère extérieur.

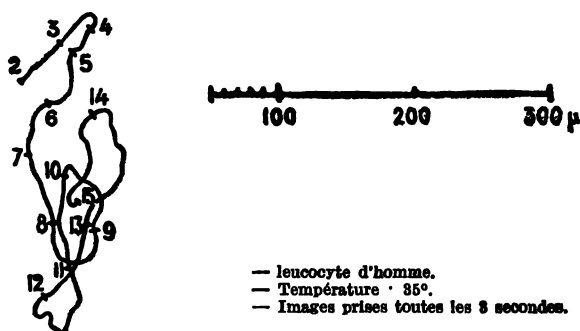
Pour prouver qu'il en est bien ainsi, nous allons montrer que, *quelle que soit leur échelle*, des systèmes autocinétiques peuvent suivre des trajectoires brownoïdes.

Et nous commencerons par l'échelle microscopique. Tout en précisant, entre parenthèses, que cette microbiologie est bien loin d'atteindre à l'échelle de la microphysique. Ce qui veut dire que l'interprétation probabiliste de l'autonomie animale n'a aucun rapport avec l'interprétation probabiliste de la microphysique.

Soit, comme type de système autocinétique microbiologique, le leucocyte. En 1920, M. J. Comandon a publié dans les *Annales de l'Institut Pasteur* les résultats de ses recherches sur les mouvements des leucocytes étudiés à l'aide de l'enregistrement cinématographique. Il a photographié, à des intervalles de temps égaux, les positions successives d'un même leucocyte par rapport à un même repère. M. Comandon s'est donc trouvé faire en 1920 sur le leucocyte l'expérience que nous avons faite sur la mouche.

Or, la trajectoire d'un leucocyte, suivie de trois secondes en trois secondes, est manifestement brownoïde. La reproduction que nous en donnons le prouve.

Et, dans le texte de M. Comandon, se trouve cette phrase qui prend un sens nouveau après notre expérience et que nous transcrivons en italiques : « Dans



Mouvement brownoïde du leucocyte (d'après J Comandon).
(Les chiffres correspondent à des mètres de film, soit 52 images par mètre).

une préparation normale, sans addition d'aucune substance étrangère, les leucocytes, soumis sans doute à une infinité de légers tactismes, *semblent errer à l'aventure* ; ils font des crochets à angle droit, *comme ces mouches qui, au début de l'été, voltigent au centre des pièces d'habitation, sous les appareils d'éclairage* ».

Il aurait été intéressant de faire subir aux déplacements du leucocyte de M. Comandon les calculs que nous avons faits sur le vol des mouches. Mais, à notre demande, M. Comandon nous a répondu : « Malheureusement, je ne possède plus le film d'où a été tiré le graphique. De toutes façons, un leucocyte humain à 37° se déplace en moyenne de 33 μ par minute, c'est un peu plus de 1 μ 1/2 en 3 secondes. Étant donné le peu de netteté de l'image du contour de cette cellule vivante, ou, plus précisément, de ses pseudopodes, je ne crois pas possible de mesurer *exactement* ce faible déplacement. Je ne doute pas d'ailleurs qu'il soit sujet à des fluctuations, en amplitude et en direction, autour de la « moyenne »; comme l'est, d'après Jean Perrin, celui de la particule dont le mouvement brownien traduit l'intégration d'un très grand nombre de chocs de molécules ».

Même si le contrôle numérique manque, nous pouvons dire que le mouvement brownien se constate aussi à l'échelle de la microbiologie.

III. — LE CHAUFFEUR DE TAXI.

Passons alors, par rapport à la mouche, à l'échelle de la macrobiologie, celle de l'homme.

Un système autocinétique, pour prendre un mouvement brownien, doit s'abstenir de se diriger vers un but. Les hommes, sauf lorsqu'ils flânent, ne doivent pas souvent avoir l'occasion de suivre d'eux-mêmes des trajectoires browniennes. Mais il peut se trouver des cas où, par la nature même de leurs occupations, des hommes sont amenés à suivre de telles trajectoires.

C'est le cas des chauffeurs de taxi. Leurs clients successifs, dont les buts sont indépendants les uns des autres, doivent les obliger à suivre des trajectoires plus ou moins browniennes. La voiture automobile dont ils se servent ne fait qu'amplifier leur autocinèse. Voilà bien un cas où il devenait possible de constater, à l'échelle humaine, le mouvement brownien.

On peut remarquer que *par sa nature*, la trajectoire d'un chauffeur de taxi ressemble un peu à celle d'une particule brownienne : les clients du chauffeur agissent *de l'extérieur*, sur ses déplacements, comme les molécules qui perturbent, de l'extérieur, le mouvement de la particule.

Avec une grande amabilité, un chauffeur de taxi a bien voulu se prêter à l'expérience suivante. Pendant plusieurs jours, il a noté avec soin ses positions successives dans Paris, à des intervalles réguliers d'une demi-heure. Il nota ses positions toutes les demi-heures, qu'il soit au repos ou en course.

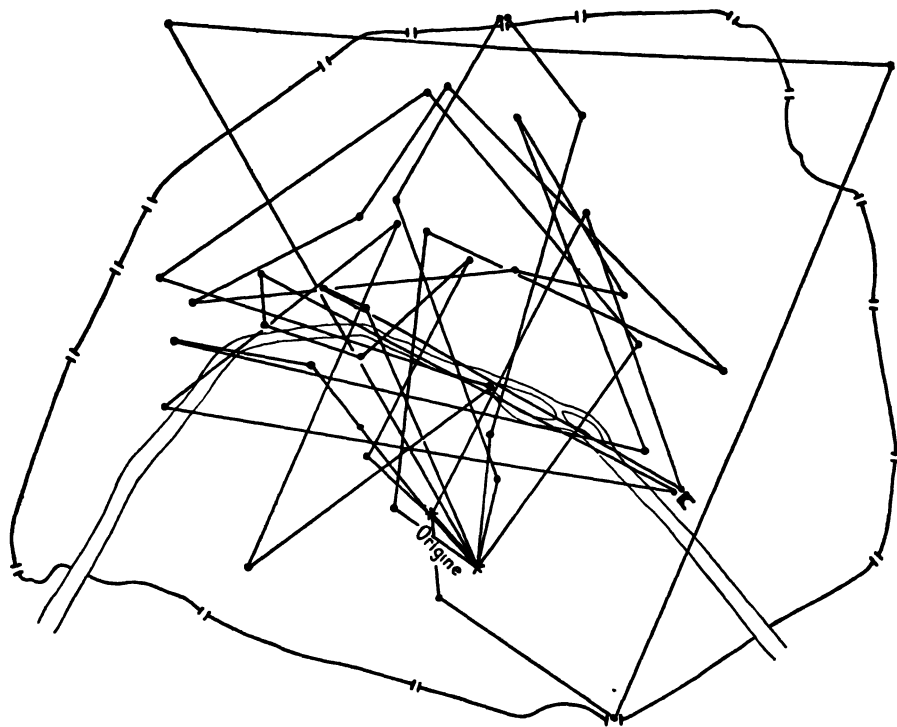
Sur le schéma que nous reproduisons, nous avons marqué ces positions et les déplacements rectilignes que nous avons tracés entre elles. Pour que ce schéma soit encore clair, nous n'avons reporté que les positions qui furent relevées pendant deux jours et demi. Mais notre chauffeur a bien voulu poursuivre ce travail pendant six jours. Et nous avons pu disposer pour nos calculs d'une centaine de déplacements. (Pour obtenir, comme dans l'expérience de J. Perrin, 500 déplacements, notre chauffeur aurait dû continuer ces annotations fastidieuses pendant plus d'un mois. Une centaine de déplacements nous parurent suffisants pour nous conduire à une bonne approximation.)

Avant de donner les résultats numériques, il faut préciser les raisons pour

lesquelles le mouvement est seulement brownoïde, et non parfaitement brownien. De nombreuses actions directrices, volontaires, interviennent encore dans les trajectoires d'un chauffeur de taxi. Par exemple, ces chauffeurs tendent, d'eux-mêmes, à se diriger, à certaines heures, vers les Portes de Paris, où arrivent les autobus de banlieue, vers les Gares, à l'heure de l'arrivée des trains dont ils possèdent les horaires, ou encore vers le Centre de Paris, vers 18 heures. Il faut tenir compte encore de ce qu'ils sont ramenés à d'autres heures, vers leur garage ou vers le lieu de leurs repas. Une cause enfin doit favoriser les courts déplacements : lorsqu'un client les a abandonnés, ils se déplacent lentement vers la station la plus voisine parmi celles qu'ils jugent les meilleures.

Malgré toutes ces raisons, le mouvement de notre chauffeur s'est révélé très nettement brownoïde. Nous n'avons pas tenu compte de ses rares déplacements nuls, ni des déplacements que nous avons reproduits sur notre schéma avec le qualificatif *Origine* et qui correspondent aux trajets qu'il suivit plusieurs fois entre son domicile et la station la plus voisine.

Sur notre plan de Paris, les déplacements furent mesurés au millimètre. La somme des carrés des déplacements fut égale à 612.655. Et le déplacement quadratique moyen fut égal à 78,2.



MOUVEMENT BROWNOÏDE D'UN CHAUFFEUR DE TAXI PARISIEN (pendant 2 jours et demi).

Nous pouvons donc conclure que, compte tenu de l'avantage des déplacements courts, le mouvement de notre chauffeur de taxi a été très nettement brownoïde et même presque parfaitement brownien.

	NOMBRES CALCULÉS	NOMBRES TROUVÉS
Premier anneau	6	14
Second anneau	16	19
Troisième anneau	21	12
Quatrième anneau	20	19
Cinquième anneau	16	16
Sixième anneau	10	6
Septième anneau	6	6
Huitième anneau	3	4
Au-delà	2	4
	100	100

Et ainsi, il est bien prouvé que, quelle que soit l'échelle des systèmes doués d'autonomie motrice, le mouvement brownoïde est l'un de leurs mouvements possibles.

Et pour montrer qu'il s'agit bien d'une propriété des systèmes autocinétiques, nous signalerons qu'elle se retrouve même dans le cas de systèmes *autocinétiques non animaux*. Nous voulons parler des tortues électroniques du cybernéticien Grey Walter. La grande presse a reproduit en 1950 des photographies des déplacements de la tortue « Elsie », sur laquelle avait été placée une bougie allumée pour la rendre visible. Elsie était douée de phototropisme et se dirigeait vers une source de lumière. Or, le tracé de ses déplacements inscrits sur une photographie posée pendant deux minutes, montre que sa trajectoire n'a pas été rectiligne et uniforme vers la source lumineuse. Sa démarche fut irrégulière et brisée. Des éléments brownoïdes se sont ajoutés aux éléments dirigés.

CONCLUSION

Nos expériences nous permettent de conclure que nous avons bien obtenu le résultat que nous cherchions. L'expérience a confirmé l'hypothèse initiale : un système autocinétique a la possibilité de suivre une trajectoire brownoïde, c'est-à-dire d'entrer en relations motrices aléatoires avec son milieu extérieur.

Ces résultats complètent ceux que nous avons présentés en décembre 1949 (Cf. P. Vendryès et R. Malterre : *Théorie probabiliste de la foule*. Journal de la Société de Statistique de Paris. Numéros de janvier et de mars 1950) à la suite de nos expériences sur une foule de têtards. Dans notre premier groupe d'expériences, nous avons étudié un *ensemble* d'animaux *indépendants* les uns des autres. Et nous avons vérifié les caractères aléatoires de l'évolution de cet ensemble, que nous avons qualifié de *foule*. Dans nos expériences récentes, nous avons étudié le mouvement d'un système autonome *isolé*. Il ne s'agissait plus de 80 têtards, mais d'une seule mouche ou d'un seul homme.

Ces deux types d'expériences correspondent à une même théorie, que l'un de nous a qualifiée de *Mécanique autocinétique*. Nous avons réalisé les deux types fondamentaux d'expériences qui correspondent à cette théorie, en observant soit un animal, individuellement, soit un ensemble d'animaux.

Les expériences ont confirmé la théorie. En se rendant *indépendant* du milieu extérieur, un animal *autonome* peut entrer en relations *aléatoires* avec ce milieu.

DISCUSSION

M. AMY. — Les observations de M. Vendryes me paraissent présenter un intérêt considérable en ce sens qu'elles subordonnent, de manière précise, l'activité des animaux et même de l'homme, dans certains cas, au seul hasard. Cependant, je tiens à vous faire remarquer que les trajectoires présentées par M. Vendryes ne me paraissent pas absolument convaincantes. Elles présentent, certes, des caractères communs avec celles du mouvement brownien telles qu'on les trouve dans le livre de Jean Perrin « Les Atomes », mais ne sont pas identiques. Je pense qu'il faut attribuer la différence à deux causes :

D'une part, le trajet parcouru entre deux points n'est pas petit vis-à-vis de la surface disponible dans laquelle reste enfermé l'animal, d'autre part, ce même trajet n'est pas grand vis-à-vis des causes susceptibles de la déformer. Cette objection ne prouve pas dans mon esprit que les conclusions de M. Vendryes sur un mouvement brownoïde doivent être abandonnées, mais simplement que les conditions d'observations ne permettent pas de démontrer son existence.

En raison de l'importance de ces conclusions, je souhaite donc que M. Vendryes puisse reprendre ses travaux, et je me permets de lui suggérer l'étude du mouvement d'une fourmi isolée. Afin de supprimer l'influence du nid ou de l'attrait de nourriture, il faudrait prendre une fourmi en cours de quête non fructueuse ou peut-être une fourmi au retour, la transporter loin de son nid, et attendre le moment où elle cherche en vain celui-ci.

M. BATICLE indique : 1^o Qu'il serait intéressant de mesurer les déplacements angulaires successifs du parcours de la mouche, afin de voir s'il y a une orientation privilégiée et une loi d'écart autour de cette orientation.

2^o Qu'il existe dans la nature beaucoup d'exemples de mouvements soumis aux lois du hasard. C'est ainsi qu'Albert Einstein junior montre que l'étude de la propagation des galets dans une rivière à forte pente, qui se fait par impulsions successives, se ramène à un problème de probabilités (Einstein jr. *Geschiebe-betrieb als Wahrscheinlichkeitsproblem*, Zürich, 1937).

M. RISSER. — J'ai fort goûté la communication de M. le Dr Vendryes et de M. R. Malterre, qui ont pu recueillir et analyser d'une façon originale le mouvement brownoïde chez les mouches. Je me permets de leur signaler qu'il serait peut-être utile de répéter leurs expériences avec des lumières monochromatiques, et en faisant varier la température du milieu expérimental.

Peut-être les expériences avec les leucocytes reprises dans les conditions expérimentales invoquées ci-dessus fourniraient-elles aux physiologistes des considérations intéressantes.

M. HÉNON pense qu'il serait intéressant d'utiliser les tests statistiques pour voir si l'hypothèse d'un schéma de pur hasard est acceptable. Un calcul de probabilité un peu poussé permettrait de connaître la réduction du nombre de degrés de liberté, qui est une conséquence de la part de l'intention volontaire des individus observés. Un de nos membres, M. Dufrenoy, avait examiné, il y a quelques années, l'intérêt de cette notion de nombre de degrés de liberté comme mesurant la part du hasard intervenant dans un phénomène.

On peut encore concevoir un mécanisme brownien de pur hasard, mais plus complexe, en faisant intervenir un champ de probabilité d'*existence* dans l'espace : cas de limitation dans un volume pour des mouches, cas du chauffeur de taxi dans une ville. En ce qui concerne la tortue électronique, il ne semble pas du tout qu'il y ait là un phénomène aléatoire : du fait de la présence de servo-mécanisme, les réactions sont régies par des équations différentielles donnant lieu le plus souvent à des phénomènes de relaxation; dans ce cas particulier si on parle de phénomène de hasard, il s'agirait de ce terme pris dans le sens de Henri Poincaré : le hasard, les yeux de notre ignorance, processus déterministe trop complexe pour être calculé.

M. PRÉVOT. — Les mouvements qui nous ont été présentés ont lieu, sauf celui des leucocytes, dans un milieu non isotrope mais qui est doté d'un centre : le centre de la source lumineuse dans le cas des mouches, comme dans le cas de la tortue robot, et un centre d'attraction, dans le cas du chauffeur de taxi, qui semble situé dans le quartier des Gobelins et où le chauffeur va probablement prendre ses repas et passer ses nuits.

On peut donc penser que les mouvements étudiés sont des mouvements composés, une composante étant le mouvement, présumé brownoïde, en étude, l'autre composante étant un mouvement centrifuge ou centripète susceptible de gêner l'analyse du premier.

Il serait donc probablement souhaitable de trouver pour ces études d'autres mouvements non centrés, comme semble l'être celui des leucocytes, et qui seraient pratiquement observables. »

M. Paul VINCENT fait observer que la technique adoptée ne permet que d'envisager la projection des déplacements sur un plan : de ce fait, des déplacements axiaux de grande amplitude sont comptés pour de petits déplacements latéraux apparents, ce qui entraîne le transfert d'un certain nombre de déplacements réels, au détriment des anneaux les plus grands et au bénéfice des plus petits.

Il suggère d'autre part d'étudier, pour l'espèce humaine, les déplacements de très jeunes enfants autour de leur mère, isolés en liberté (autant que faire se peut!), dans un jeu de poursuite, etc.

Pour clore la discussion, M. BATICLE rappelle le vers du poète Verlaine : « Que crains-tu de la guêpe ivre de son vol fou ».