

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Herausgeber:</b>	Société Vaudoise des Sciences Naturelles
<b>Band:</b>	48 (1912)
<b>Heft:</b>	177
<b>Artikel:</b>	Nouvelle étude expérimentale sur le géotropisme et essai d'une théorie mathématique de ce phénomène
<b>Autor:</b>	Maillefer, Arthur
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-269358">https://doi.org/10.5169/seals-269358</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 14.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

UNIVERSITÉ DE LAUSANNE. LABORATOIRE DE BOTANIQUE

---

## NOUVELLE ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

SUR LE

## GÉOTROPISME

et essai d'une théorie mathématique de ce phénomène

PAR

Arthur MAILLEFER

---

En 1910<sup>1</sup>, j'ai publié une première série d'expériences, faites en 1909, sur le géotropisme de la coléoptile de l'avoine blonde hâtive de Martinet. Dans ce travail, j'étais arrivé à la conclusion que la courbure géotropique commence au moment même où l'on soumet la plante à l'action de la pesanteur et que cette courbure se fait avec une vitesse proportionnelle au temps pendant lequel la pesanteur agit et à un facteur  $b$  que j'ai nommé l'*accélération géotropique*.

J'ai continué et complété cette étude en 1910 et 1911; quoique je ne sois pas encore parvenu à éclaircir certains points pour lesquels je fais actuellement des expériences, je tiens à publier cette nouvelle série d'expériences; on y trouvera une confirmation des résultats obtenus en 1910; lors de mes premières expériences, j'avais déterminé pour chaque plante le moment où la courbure commençait à

---

<sup>1</sup> A. Maillefer. *Etude sur la réaction géotropique*. Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. XLVI, 1910.

être visible à l'œil nu, c'est-à-dire ce que les auteurs ont appelé le temps de réaction ; j'ai utilisé ces chiffres que je n'avais pas encore publiés ; on verra que cette étude du temps de réaction présente un certain intérêt. Enfin pour les expériences déjà publiées en 1910 (n°s 1-300), j'ai refait complètement les calculs des constantes  $a$  et  $b$  de la formule

$$h = at + bt^2$$

en tenant compte du *poids* de chacune des valeurs moyennes de  $h$  servant à calculer ces constantes.

### Méthode et appareils employés.

Je rappelle que la méthode que j'emploie consiste à mesurer, au cathétomètre, de cinq en cinq minutes, le déplacement  $h$  de l'extrémité de la plante dans le plan perpendiculaire à la ligne de visée du cathétomètre ; ce déplacement  $h$  est en réalité la projection de la distance entre deux positions données du sommet de la plante sur une droite perpendiculaire à l'axe de la plante.

Cette méthode est sûre et donne des résultats très précis ; mais elle est longue, car elle ne permet de faire qu'une seule expérience à la fois ; et il en faut une quantité pour obtenir une moyenne un peu sûre ; on ne peut calculer cette moyenne qu'en prenant des plantes ayant, approximativement au moins, la même longueur et ayant été observées à la même température.

Ne disposant pas d'une chambre à température constante, j'ai dû me contenter de la température qui régnait au moment donné dans le laboratoire, de sorte qu'au lieu de pouvoir prendre la moyenne de toutes les expériences en bloc, j'ai dû faire des catégories (température-longueur) nombreuses et par conséquent multiplier les expériences pour avoir dans chaque catégorie un nombre suffisant de cas.

Il est regrettable qu'en général les moyens financiers mis à la disposition des laboratoires ne permettent pas d'organiser les expériences d'une manière plus intensive, plus industrielle pour ainsi dire ; le même observateur pourrait

facilement surveiller au moins cinq expériences, peut-être même sept ou huit; seulement il faudrait avoir les appareils nécessaires et ce n'est pas la coutume d'avoir dans un laboratoire plusieurs appareils identiques. L'expérimenta-

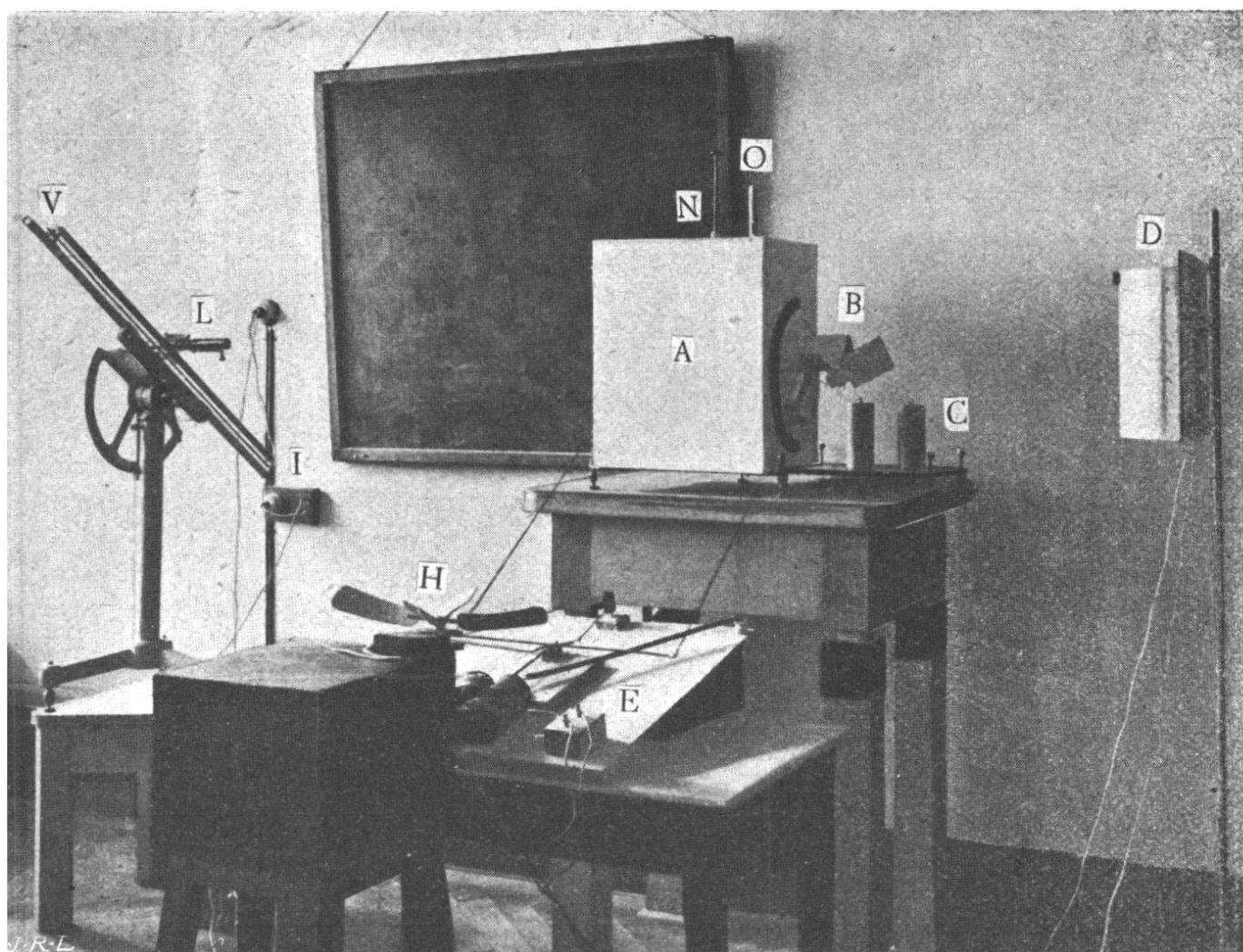


Fig. 1.

teur doit se contenter de rêver, entre chacune des lectures, à son unique appareil, aux beaux résultats qu'il obtiendrait s'il en avait plusieurs. Deux ans suffiraient pour la besogne qu'il mettra dix ans à faire.

Les appareils utilisés pour cette nouvelle série d'expériences sont ceux décrits dans mon *Etude sur la réaction géotropique*<sup>1</sup>; toutefois la caisse dans laquelle est placée la plante en observation a reçu quelques modifications.

La figure 1 montre la disposition générale des appareils.

<sup>1</sup> Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. XLVI, 1910, fig. 2, page 238.

Les vitres demi-circulaires à travers laquelle on examine les plantes étaient en verre recouvert de gélatine colorée au méthyl-orange ; ces plaques présentent l'inconvénient d'avoir une surface légèrement ondulée, ce qui risque de fausser les mesures ; j'ai remplacé ces vitres par une double épaisseur de ce verre jaune-orange qu'on utilise dans les chambres noires photographiques, pour l'éclairage lors du développement des papiers au bromure. La lumière qui passe à travers ces verres, comme celle du reste qui filtre à travers les plaques gélatinées au méthyl-orange agit encore héliotropiquement, mais d'une manière excessivement faible. Afin de diminuer l'action de la lumière, j'ai placé devant les deux fenêtres des disques en carton, les obturant complètement et tournant autour de l'axe qui porte le vase des plantes. Chacun de ces disques est percé d'une ouverture carrée (5 cm.  $\times$  5 cm.) sur le bord de laquelle est collé un tube prismatique de carton (B fig. 1) ; un clapet maintenu par une charnière à ressort ferme le tube<sup>1</sup>. Un électro-aimant E à armature plongeante fait ouvrir les clapets au moyen des ficelles visibles sur la fig. 1. Afin d'avoir un mouvement aussi doux que possible, pour ne pas ébranler la caisse A, j'ai placé un volant H qui freine le mouvement de l'armature en agissant au début par son inertie et ensuite en mettant en jeu le frottement de l'air ; les fils qui ouvrent les clapets sont attachés à l'armature par l'intermédiaire de ressorts en boudin. Le retour en arrière de l'armature se fait aussitôt que le courant est interrompu grâce à un tube de caoutchouc qu'on voit au-dessus de la lettre E et qui se tend quand l'armature est attirée.

Pendant l'expérience, les deux tubes rectangulaires sont placés vis-à-vis l'un de l'autre de telle manière qu'on puisse viser la plante à travers avec le cathétomètre. Du côté opposé à ce dernier se trouve un écran en papier teint au

---

<sup>1</sup> Lors de mes premières expériences (1 à 300), les fenêtres demi-circulaires étaient protégées par un rideau noir que j'enlevais lors des lectures.

méthyl-orange et éclairé vivement par deux lampes à incandescence (charbon) de 50 bougies chacune, trempée dans de la gélatine au méthyl-orange; les lampes sont enfermées ainsi que l'écran dans une boîte D et ne peuvent envoyer de lumière directe dans la caisse.

De cette manière, la lumière qui pénètre dans l'appareil n'agit que peu au point de vue héliotropique. Les clapets ne sont ouverts que le temps strictement nécessaire à la visée au cathétomètre; c'est pour diminuer le temps d'ouverture que les clapets sont mis à l'électricité; c'est lorsque l'œil est à la lunette L et la main droite à la vis micrométrique V du cathétomètre M que, de la main gauche, l'on tourne le bouton I qui fait ouvrir le clapet B et en même temps s'allumer les lampes de l'écran D; dès que la plante coïncide avec le réticule, la main gauche fait rabattre les clapets.

La lumière, agissant ainsi pendant un temps très court, ne peut avoir d'action héliotropique sensible. Du reste, la lumière ne peut entrer dans la caisse que par les tubes de carton, c'est-à-dire parallèlement à la ligne de visée du cathétomètre; par conséquent, s'il y avait, malgré toutes les précautions prises, une légère action phototropique, la coubure se ferait dans un plan passant par la ligne de visée et perpendiculaire à la règle du cathétomètre et serait invisible pour l'observateur.

Afin de diminuer les variations de la température pendant les expériences, variations qui m'ont fait souvent rejeter des expériences en 1910, j'ai tapissé la caisse à l'intérieur avec du carton-feutre noirci à l'encre de Chine et à l'extérieur avec du papier d'étain<sup>1</sup>; j'ai garni les fenêtres du laboratoire (à l'extérieur) avec des feuilles de papiers de soie, collées sur la boiserie de la fenêtre à un centimètre environ de la vitre; ces dispositifs, joints à

<sup>1</sup> Actuellement j'ai enlevé ce papier d'étain et je l'ai remplacé par une couche de vernis ripolin blanc; c'est en cet état que l'appareil est représenté sur la figure 4.

l'utilisation du ventilateur de 1 HP du laboratoire qui m'amenait de l'air ayant passé dans les escaliers de l'Université et dont la température ne varie que très peu, m'ont donné de bons résultats.

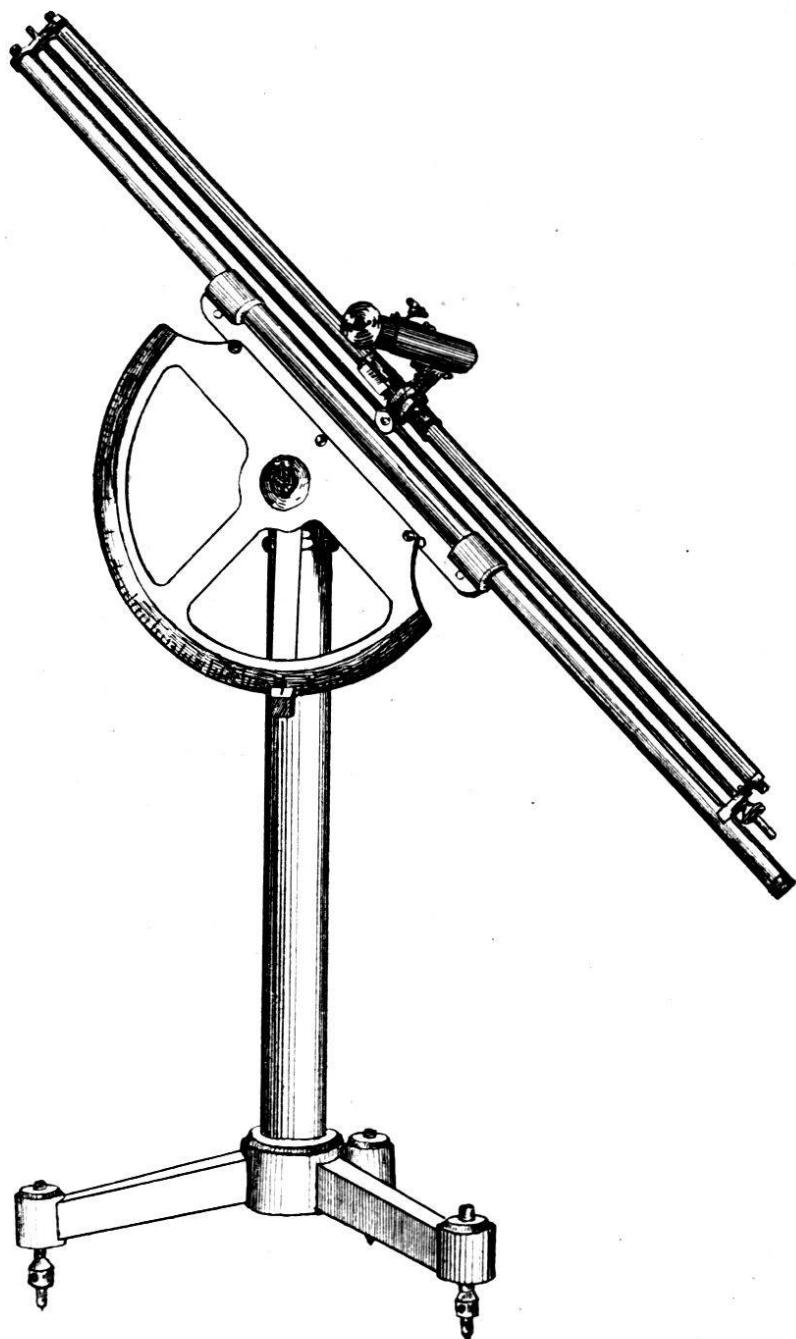


Fig. 2.

Le thermomètre placé auparavant derrière la vitre jaune a dû être déplacé depuis l'adjonction des disques de carton ; il a été suspendu au couvercle d'un tube O ; on n'a qu'à soulever ce couvercle pour faire la lecture. Le réser-

voir du thermomètre est à la hauteur de l'axe auquel les plantes sont fixées. Toutes les dispositions ont été prises pour qu'aucun rayon lumineux ne puisse atteindre les plantes pendant les lectures du thermomètre.

M. le professeur C. Dutoit a bien voulu vérifier (le 6 juillet 1912) le thermomètre dont je me suis servi et le comparer aux thermomètres étalons du laboratoire de physique. Les indications de mon instrument ont été trouvées régulièrement insuffisantes de  $0.1^\circ$  entre  $10^\circ$  et  $30^\circ$ . *Les températures données dans les tableaux de ce travail devront donc toutes être augmentées de  $0.1^\circ$ .*

J'ai renoncé à planter trois grains d'avoine dans chaque pot ; je n'en plante plus qu'un au centre du vase.

Pour utiliser le cathétomètre dans les cas où la plante n'occupe pas la position horizontale, j'ai fait construire un pied solide qui maintient le cathétomètre dans n'importe quelle position (M fig. 1 et 2). Un cercle gradué permet de placer l'instrument dans la position désirée. L'appareil a été réglé pendant sa construction de façon à ce que sa mise de niveau fût le plus simple possible. Elle se fait de la manière suivante : on place le cathétomètre de façon que l'index soit sur le zéro du cadran (au centre); puis à l'aide d'un niveau à bulle placé sur la tige graduée du cathétomètre et des vis calantes placées sous les trois pieds de l'appareil, on s'arrange pour que la tige du cathétomètre soit dans un plan horizontal. Ceci fait, on peut utiliser l'appareil, il est réglé pour n'importe quelle position.

### Interprétation des résultats numériques fournis par les expériences.

Prenons un certain nombre de plantes d'avoine; plâcons-les horizontalement et notons de cinq en cinq minutes le déplacement, que nous désignerons par  $h$ , du sommet de la plante, déplacement compté à partir de la position que ce sommet occupait au début de l'expérience; nous

constaterons que les déviations des diverses plantes, au même moment, ne seront pas les mêmes ; si nous faisons un graphique en portant pour chaque plante en abscisses les temps et en ordonnées les déviations et si nous joignons ces points par une courbe, nous verrons que toutes ces courbes sont différentes. Comme c'est l'allure de ces courbes qui doit nous donner la loi régissant la courbure géotropique, au premier aspect cette loi ne nous semblera pas nette ; pour obtenir une courbe qui résume l'ensemble des expériences, nous prendrons la moyenne de toutes les valeurs de la déviation  $h$  d'une série d'expériences pour chacun des intervalles de temps. En portant les moyennes des déviations en ordonnées, nous pourrons tracer une courbe qui doit nous donner la loi de la courbure géotropique ; mais si nous refaisons une nouvelle série d'expériences dans les mêmes conditions, les moyennes nous fourniront une courbe ressemblant en général à la première, mais cependant différente. Comment interpréterons-nous ces résultats ?

La théorie du calcul des probabilités enseigne que plus l'on part d'expériences nombreuses, plus on a de chances d'arriver à la moyenne exacte ; en pratique, on doit se limiter et se contenter de séries ne comprenant qu'un petit nombre d'expériences (10, 15, 20, peut-être 50 ou 100), de sorte que les moyennes ne nous donnent que des valeurs approchées.

Cela n'empêchera pas d'utiliser ces moyennes à la condition qu'on puisse en mesurer l'approximation. A priori, on peut dire que plus les valeurs expérimentales sont voisines les unes des autres, plus la moyenne aura de chances d'être exacte.

On appelle, en biométrie, *index de variabilité*,  $\sigma$ , un nombre qui mesure l'écart plus ou moins grand des résultats entre eux et qui est donné par

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (x^2)}}{n}$$

où  $x$  est l'écart entre chacun des résultats et la moyenne, et  $n$  le nombre des chiffres dont on cherche la moyenne. Le calcul de  $\sigma$  se fait très facilement en utilisant les schémas donnés dans tous les traités de biométrie<sup>1</sup>.

La précision d'une moyenne varie en sens inverse de l'index de variabilité ; mais elle est également fonction du nombre  $n$  des expériences ; on utilise comme mesure de la précision d'une moyenne, le *poids* de cette moyenne ; c'est l'inverse de l'*erreur probable*  $E$  donnée par

$$E = \frac{\pm 0,6745 \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$$

L'*erreur probable*<sup>2</sup> est une quantité telle qu'il y a autant de chances pour que la valeur exacte cherchée soit comprise entre la moyenne moins l'*erreur probable* et la moyenne plus l'*erreur probable*.

En portant en ordonnées les valeurs moyennes de la déviation pour les divers intervalles de temps portés en abscisses, on obtient une ligne brisée se rapprochant plus ou moins d'une courbe. Cette courbe pourra peut-être se traduire en une loi et mettre sur la piste d'une hypothèse. Je dis peut-être, car il pourra arriver que la loi soit trop compliquée pour qu'à l'inspection de la courbe il soit possible de la deviner. Par une série de points, il est toujours possible de faire passer une quantité de courbes aux équations plus ou moins compliquées mais ne présentant un intérêt que s'il est possible de les ramener à d'autres courbes connues pour le même phénomène, en un mot que s'il est possible de les faire rentrer dans une théorie. Qu'on ne s'inquiète point s'il n'est pas possible de trouver immédiatement une relation ; le tableau des

<sup>1</sup> E. B. Davenport. *Statistical methods with special reference to biological variation*. New-York. John Wiley und Sons, 1904.

Duncker Georg. *Die Methode der Variationsstatistik*. Leipzig, Engelmann. 1899.

<sup>2</sup> Les calculs sont facilités en employant les *Tables for facilitating the computation of probabl errors*, de Winifred Gibson. *Biometrika*, vol. IV, 1906, p. 385.

résultats expérimentaux demeure et servira un jour ou l'autre à vérifier des hypothèses émises en partant de bases expérimentales différentes.

J'ai cru pouvoir admettre pour résumer mes expériences, où une plante d'avoine est placée horizontalement et observée de 5 en 5 minutes, la formule

$$h = at + bt^2.$$

Pour calculer la valeur des constantes  $a$  et  $b$  j'ai utilisé la méthode des moindres carrés<sup>1</sup>; avec cette méthode, toutes les déviations moyennes de  $h$  pour tous les intervalles de temps sont utilisés. Dans mon travail de 1910, j'ai calculé  $a$  et  $b$  sans tenir compte du poids des valeurs de  $h$  moyen; or, ce poids est très différent suivant les intervalles considérés ; en général, plus les temps sont longs plus les poids sont faibles, ou, ce qui revient au même, plus les erreurs probables sont considérables. Dans ce travail, j'ai recalculé  $a$  et  $b$  en tenant compte du poids des moyennes de  $h$ ; pour cela, j'ai fait intervenir dans les calculs par la méthode des moindres carrés les valeurs de  $h$  un nombre de fois proportionnel au poids de  $h$ . Les valeurs de  $a$  et de  $b$  données plus loin sont donc *les valeurs les plus probables*.

### **La nutation comme cause d'erreurs dans les expériences sur le géotropisme.**

La coléoptile de l'avoine effectue constamment des mouvements de nutation ; ce sont des mouvements de balancement qui se font dans un plan ou presque. La coléoptile a une structure bilatérale et le plan de nutation reste sensiblement fixe. Ce phénomène se superposant au mouvement géotropique, il est indispensable de voir quelles

<sup>1</sup> Anton Steinhäuser. *Die Lehre von der Austellung empirischer Formeln mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate*. Leipzig. Teubner 1889.

Pour les calculs numériques, j'ai utilisé les *Tables de calculs* de Louis Zimmermann. Liebenwerda, R. Reiss, 1901, qui épargnent beaucoup de temps.

erreurs la nutation entraîne dans les expériences sur le géotropisme et quelle loi suivent ces erreurs.

Avant de donner le résultat des expériences que j'ai entreprises à cette fin, je crois bon de discuter la question théoriquement.

Admettons comme première base de la discussion les deux propositions suivantes : 1<sup>o</sup> La nutation se fait dans un plan ; 2<sup>o</sup> C'est un phénomène périodique.

Si toutes les plantes avaient leur plan de nutation perpendiculaire à la ligne de visée du cathétomètre, si les mensurations de la déviation de l'extrémité de la plante commençaient pour chaque individu à la même phase de la nutation et si la période et l'amplitude de la nutation étaient les mêmes pour tous les individus en expérience, la courbe représentant les valeurs de la déviation à chaque instant serait une courbe périodique et la variabilité de ces valeurs serait nulle ; c'est-à-dire que la courbe fournie par une seule expérience donnerait la vraie valeur de la déviation pour n'importe quelle autre plante.

Mais les plantes n'ont pas toutes leur plan de nutation perpendiculaire à la ligne de visée du cathétomètre. Comme les plantes sont enfermées le jour qui précède l'expérience dans des boîtes sans qu'on tienne compte de la position de leur plan de nutation et que ces boîtes sont placées dans la caisse à verres jaunes dans n'importe quelle position, il n'y a pas plus de chances pour que la nutation se fasse dans un plan plutôt que dans un autre par rapport à la ligne de visée du cathétomètre. En répétant les expériences un grand nombre de fois, on trouvera un nombre égal de plantes ayant leur plan de nutation dans les différents secteurs.

Soit OP (fig. 3) la ligne de visée du cathétomètre, P la

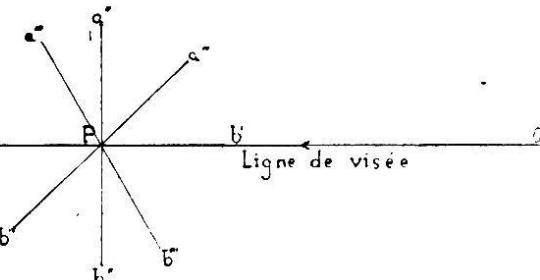


Fig. 3.

projection horizontale de l'extrémité des plantes au début de l'expérience et  $a'b'$ ,  $a''b''$ ,  $a'''b'''$ , ... les projections de l'extrémité de ces plantes pendant le mouvement de nutation ; si la nutation se fait dans le plan  $a''b''$  perpendiculaire à la ligne de visée, les déviations mesurées au cathétomètre seront maximum tandis que si le plan de nutation est  $a'b'$  parallèle à la ligne de visée, les déviations seront invisibles pour l'observateur. Dans toutes les positions, la déviation lue au cathétomètre sera à la valeur vraie de la déviation mesurée dans le plan de nutation comme le sinus de l'angle que fait le plan vertical contenant la ligne de visée avec le plan de nutation est à l'unité.

Quoique les plantes aient toutes un mouvement identique, on voit que les mesures seront différentes suivant la position du plan de nutation.

Si l'on suppose que l'on commence les mensurations à la même phase de la nutation, la courbe représentant la déviation moyenne sera périodique ; mais tel n'est pas le cas ; les lectures au cathétomètre commencent aussitôt que la plante est dans la caisse à verres jaunes, sans qu'on ait pu observer au préalable la phase de la nutation ; par conséquent, les déviations se feront tantôt à droite, tantôt à gauche avec une égale probabilité pour les deux cas.

Si, dans ces conditions, la durée des périodes de nutation était égale pour toutes les plantes, on verrait la variabilité des déviations augmenter puis redevenir nulle au bout de la période ; en effet, à ce moment, toutes les plantes seraient revenues à la position initiale ; déjà au bout d'une demi-période, les déviations à droite et à gauche étant également probables, on aurait aussi une variabilité nulle.

Mais une régularité pareille dans les périodes de la nutation n'existe pas ; la nutation est irrégulière, deux plantes n'ont pas la même période et chez la même plante les oscillations successives ne se font pas toujours dans le

même temps. Admettons que comme tous les phénomènes biologiques connus le temps employé pour une oscillation soit variable autour d'un temps moyen, c'est-à-dire que l'on trouvera un certain nombre de plantes employant un temps moyen pour une oscillation et d'autres plantes en nombre d'autant moins considérable qu'elles ont un temps d'oscillation différant davantage du temps moyen. Si la variabilité de ce temps est assez grande pour que les durées d'oscillation les plus longues soient un certain nombre de fois plus grandes que les durées les plus courtes, il pourra arriver que la périodicité de la variabilité des déviations soit si atténuée qu'elle ne dépasse pas la limite des erreurs. Disons tout de suite que les expériences montrent qu'il en est à peu près ainsi.

Si l'on admet d'autre part que l'amplitude des oscillation varie aussi autour d'une moyenne, ce qui est effectivement le cas, il pourra arriver que, toutes ses causes d'irrégularité se faisant sentir au « hasard », la variation des déviations de l'extrémité de la plante obéisse à la courbe des erreurs de Gauss.

A priori, vu les suppositions que nous avons été obligé de faire, il n'est pas possible de rien affirmer, mais il y a une forte présomption qu'il en sera bien ainsi. L'expérience nous donnera du reste la réponse.

Pour étudier la nutation de l'avoine j'ai fait 150 expériences en deux séries ; la première (n°s 351 à 400) a été faite entre le 16 et le 26 août 1910 et la seconde (n°s 501 à 600) du 20 mars au 13 avril 1911. Ces deux séries se complètent, la première comprenant des expériences faites entre les températures de 20 à 25° C, et la deuxième entre 14 et 21° C. Dans ces expériences, la plante d'avoine était placée verticalement dans la caisse à verres jaunes et restait dans cette position.

Le tableau I donne le résultat de ces expériences ; celles-ci ont été classées dans l'ordre croissant des tempéra-

TABLEAU I. — Déviations  $h$  en millimètres de l'extrémité de la coléoptile d'avoine blonde hâtive de Martinet observée en position normale (verticale) de 5 en 5 minutes.



TABLEAU I (suite)

Numéros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
550	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,05	0,0	-0,05	-0,2	-0,2
525	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
580	-0,05	-0,15	-0,2	-0,2	-0,25	-0,35	-0,4	-0,45	-0,45	-0,35	-0,3
583	0,0	-0,05	-0,1	-0,1	-0,15	-0,2	-0,2	-0,25	-0,15	-0,15	-0,1
551	0,05	0,05	0,15	0,15	0,2	0,25	0,4	0,45	0,55	0,7	0,75
518	0,0	0,05	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,15	0,1	-0,1
526	0,0	0,0	-0,05	-0,1	-0,15	-0,25	-0,4	-0,5	-0,65	-0,75	-0,75
572	-0,05	0,0	0,0	-0,1	-0,05	-0,05	0,0	-0,15	-0,2	-0,35	-0,35
574	0,1	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,45	0,5	0,5	0,55	0,6
524	0,05	0,05	0,0	0,05	0,0	0,0	0,0	-0,05	-0,05	0,0	-0,05
531	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,05	-0,1	-0,05	0,1
532	0,0	-0,1	-0,2	-0,15	-0,15	-0,15	-0,05	-0,05	-0,1	-0,05	0,15
552	0,15	0,15	0,35	0,45	0,55	0,65	0,8	0,75	0,7	0,7	0,8
534	-0,15	-0,15	-0,2	-0,25	-0,2	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,2	-0,2
589	0,05	0,0	0,0	0,05	0,05	0,05	0,1	0,15	0,15	0,05	0,05
561	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,15	0,15	0,05	0,05
537	0,05	0,15	0,0	0,2	0,2	0,2	0,15	0,0	0,05	0,05	0,05
548	0,05	0,1	0,1	0,15	0,1	0,05	0,05	0,05	-0,05	0,0	-0,15
533	0,05	-0,1	-0,2	-0,2	-0,05	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,65	-0,6
562	0,0	-0,2	-0,25	-0,35	-0,4	-0,5	-0,55	-0,55	-0,6	-0,6	-0,8
549	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,45	0,5	0,5	0,5
594	0,15	0,2	0,2	0,25	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	0,65
515	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,0
560	-0,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,05	0,0	0,05	0,15
557	-0,05	-0,05	-0,1	-0,05	0,0	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,3
558	0,05	0,25	0,4	0,45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,45	0,45
559	-0,05	-0,05	-0,1	-0,2	-0,4	-0,35	-0,35	-0,2	-0,2	-0,3	-0,25
387	0,05	0,05	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	-0,05	0,0	-0,2
538	0,05	-0,1	-0,15	-0,15	-0,2	-0,25	-0,2	-0,4	-0,45	-0,45	-0,45



TABLEAU 1 (suite).

N <sup>o</sup> numéros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
370	-0,95	0,1	0,2	0,25	0,35	0,25	0,25	0,4	0,4	0,3	0,25
351	-0,05	0,05	0,0	0,05	0,15	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,35
352	0,1	0,1	0,15	0,05	0,1	0,1	0,2	0,1	0,15	0,1	0,15
364	-0,1	-0,1	-0,15	-0,05	-0,1	-0,2	-0,1	-0,15	-0,2	-0,3	-0,3
366	-0,05	-0,1	-0,15	-0,2	-0,25	-0,2	-0,25	-0,2	-0,25	-0,1	-0,05
362	0,05	0,05	0,15	0,25	0,25	0,2	0,2	0,35	0,4	0,35	0,35
367	-0,1	-0,05	-0,1	-0,15	-0,15	-0,25	-0,25	-0,2	-0,25	-0,25	-0,25
353	0,0	-0,05	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2	-0,05
363	-0,05	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,05	0,0
368	-0,1	-0,2	-0,4	-0,4	-0,55	-0,65	-0,8	-0,85	-0,8	-0,7	-0,6
358	0,1	0,2	0,15	0,15	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
355	0,0	0,0	0,0	0,0	0,05	0,05	0,1	0,15	0,3	0,35	0,4
356	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-0,85	-0,85	-0,85	-0,9	-0,85
357	-0,1	-0,05	0,0	0,1	0,1	0,0	-0,05	-0,05	-0,2	-0,1	-0,15
369	0,0	0,0	0,05	0,05	-0,05	0,0	0,0	0,0	0,1	0,15	0,1
372	-0,05	-0,1	-0,05	-0,1	-0,2	0,0	0,0	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
376	0,05	0,2	0,2	0,1	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,5
373	-0,05	-0,15	-0,4	-0,4	-0,45	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6
377	0,0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,0	0,0	0,05	0,05	0,15	0,2
374	-0,05	-0,2	-0,3	-0,4	-0,55	-0,65	-0,7	-0,8	-0,8	-0,85	-0,9
375	0,1	0,0	0,1	0,2	0,03	0,35	0,25	0,1	-0,05	-0,1	-0,15
371	-0,1	0,05	-0,05	-0,05	0,05	0,05	0,05	0,25	0,25	0,05	-0,15

tures et dans chacune de ces catégories dans l'ordre croissant des longueurs ; les chiffres donnés dans les colonnes sont les valeurs en millimètres de la déviation  $h$  de l'extrémité de la coléoptile, par rapport à sa position au début de l'expérience, au bout de 5, 10, 15.... minutes. J'ai indiqué comme négatifs les chiffres donnant les déviations vers la gauche et comme positifs ceux vers la droite. Afin de rendre les tableaux plus clairs, les chiffres négatifs sont imprimés en caractères gras.

Groupons ces expériences en catégories comprenant les plantes ayant la même longueur et observées à la même température, et calculons dans chaque groupe la moyenne des déviations au bout de 5, 10, 15.... minutes. Comme les déviations vers la gauche sont aussi probables que celles vers la droite, nous devrions trouver cette moyenne égale à zéro ; mais comme il s'agit d'une moyenne, nous trouverons généralement une valeur différente ; en calculant l'erreur probable de cette moyenne et en la comparant avec l'erreur trouvée nous pourrons nous rendre compte si les erreurs dues à la nutation suivent la loi de Gauss ou non.

Le tableau suivant donne la valeur de  $h$  moyen, c'est-à-dire de la moyenne des déviations  $h$  observées de cinq en cinq minutes et comptées par rapport à la position de la plante au début de l'expérience, pour toutes les catégories de températures (de trois en trois degrés) et de longueurs (de cinq en cinq millimètres) où le nombre d'expériences à ma disposition dépasse sept. Au-dessous de chacune des valeurs de  $h$  moyen est indiquée l'erreur probable de cette moyenne ; cette erreur probable a été calculée suivant la méthode usitée en biométrie. Dans les trois lignes en dessous de l'erreur probable, j'ai indiqué par des croix si  $h$  moyen est : a) plus petit que l'erreur probable, b) plus grand que l'erreur probable et plus petit que le double de cette erreur, ou c) plus grand que le double de l'erreur probable. Dans la colonne des températures, j'ai indiqué

TABLEAU II

	TEMPS EN MINUTES												Température en degrés C.	Longueur en millim.	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60			
$h$ moyen	0,04	0,04	0,0	-0,02	-0,02	-0,06	0,01	-0,02	0,01	-0,01	0,01	0,01	0,01	18	15
$E_h$	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06		
$h \leq E$			×	×	×		×	×	×	×	×	×	×		
$h > E$						×									
$h \leq 2E$	×	×													n = 9
$h > 2E$															
$h$ moyen	-0,02	0,01	0,00	-0,03	-0,02	-0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,04	0,04	18	20
$E_h$	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06		
$h \leq E$		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
$h > E$				×											
$h \leq 2E$	×														
$h > 2E$															n = 17
$h$ moyen	-0,03	-0,03	-0,02	-0,03	-0,01	-0,03	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	18	25
$E_h$	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07		
$h \leq E$		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		
$h > E$			×												
$h \leq 2E$															
$h > 2E$	×														n = 22
$h$ moyen	0,01	0,03	0,04	0,07	0,08	0,12	0,13	0,13	0,16	0,22	0,23	0,28	0,28	18	30
$E_h$	0,02	0,02	0,04	0,05	0,02	0,08	0,09	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11		
$h \leq E$		×													
$h > E$				×		×	×	×	×	×	×				
$h \leq 2E$															
$h > 2E$												×	×		n = 9



le nombre  $n$  des expériences ayant servi à calculer la moyenne de chaque groupe.

Lorsque les erreurs suivent la loi de Gauss, la théorie du calcul des probalités montre qu'il y a une chance contre une que la vraie valeur d'une moyenne soit comprise entre la moyenne déterminée expérimentalement augmentée de l'erreur probable et cette moyenne diminuée de l'erreur probable.

Les chances pour que la vraie valeur soit comprise entre :

$\pm E$	sont de	1	contre	1
$\pm 2E$	"	4,5	"	1
$\pm 3E$	"	21	"	1
$\pm 4E$	"	142	"	1
$\pm 5E$	"	1310	"	1

Si nous comptons dans le tableau précédent combien de fois la valeur moyenne de  $h$  ne diffère de la valeur théorique, qui est zéro, que d'une quantité inférieure à  $\pm Eh$ , à  $\pm 2 Eh$ , etc., nous pouvons former le tableau suivant :

$h < \pm Eh$	57	cas contre	51
$h < \pm 2Eh$	85	" "	23
$h < \pm 3Eh$	103	" "	5
$h < \pm 4Eh$	108	" "	0

Etablissons le rapport entre le nombre des cas où la valeur moyenne de  $h$  est comprise entre les limites données et le nombre des cas contraires et comparons ce quotient avec les valeurs théoriques données plus haut.

$h < \pm E$	57 : 51 =	1,1	: 1 au lieu de	1 : 1
$h < \pm 2E$	85 : 23 =	3,7	: 1 " " "	4,5 : 1
$h < \pm 3E$	103 : 5 =	20,6	: 1 " " "	21 : 1
$h < \pm 4E$	108 : 0 =	? > 108 : 1	" " "	142 : 1

On voit qu'il y a une concordance remarquable entre les valeurs théoriques de la probabilité et les résultats de l'expérience. Nous pouvons en tirer la conclusion suivante :

*La nutation intervient comme une cause d'erreurs dans la détermination de la déviation du sommet d'une plante ;*

*les erreurs qui en résultent suivent la loi générale des erreurs non systématiques. Une détermination de l'erreur probable des moyennes faite par les méthodes biométriques suffira donc pour nous donner une mesure de l'exactitude des résultats.*

Ce résultat nous suffit pour l'interprétation des expériences sur le géotropisme ; mais il m'a semblé intéressant d'utiliser les nombreux chiffres qui sont à ma disposition pour étudier de plus près la nutation et son influence comme cause d'erreur.

Le problème que je me suis posé est le suivant : Nous venons de voir que l'on peut considérer le déplacement  $h$  dû à la nutation comme un caractère variable de la plante ; en biométrie, la variabilité a pour mesure l'index de variabilité  $\sigma$ . *Comment varie  $\sigma$  avec le temps écoulé depuis le début de l'expérience, avec la température et avec la longueur de la coleoptile de l'avoine ?*

Pour cela nous pourrions utiliser directement les chiffres donnés plus haut (tableau II) ; c'est ce que j'ai du reste fait pour calculer les erreurs probables de  $h$  moyen données dans le tableau ; mais nous pouvons faire mieux. Comme la plante est observée dans sa position verticale naturelle, elle ne subit aucune action, autre que la nutation, tendant à déplacer son sommet ; dans ces conditions il n'y a pas de raison pour commencer les lectures au cathétomètre à un moment plutôt qu'à un autre.

Nous pourrons donc, pour déterminer la variabilité de la déviation  $h$  pendant 5 minutes, utiliser toutes les lectures faites au cathétomètre pendant une heure ; pour cela nous noterons le déplacement de la plante pendant les intervalles de 5 minutes successifs, nous aurons ainsi 12 déterminations de cette déviation par expérience.

Nous pratiquerons de même pour les intervalles de 10, 15, 20.... minutes ; nous disposerons ainsi de 11 valeurs de  $h$  pour les intervalles de 10 minutes, de 10 pour ceux

TABLEAU III

Nombres	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.	Tempe- rature en degrés C.	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
$\sigma$	0,055	0,086	0,110	0,130	0,143	0,142	0,146	0,137	0,142	0,165	0,193	0,511	15
E $\sigma$	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011	0,011	0,013	0,014	0,015	0,020	0,029	0,108	
$h$ moyen	-0,003	-0,002	-0,002	-0,004	-0,010	-0,010	-0,025	-0,016	-0,012	-0,007	-0,010	-0,010	
E $h$	0,005	0,008	0,011	0,013	0,015	0,016	0,018	0,018	0,021	0,029	0,041	0,154	
$\sigma$	0,071	0,114	0,141	0,155	0,160	0,162	0,160	0,148	0,127	0,103	0,083	0,083	15
E $\sigma$	0,004	0,007	0,009	0,011	0,012	0,013	0,014	0,014	0,014	0,012	0,013	0,013	
$h$ moyen	0,010	0,025	0,050	0,078	0,100	0,121	0,147	0,160	0,178	0,167	0,140		
E $h$	0,006	0,010	0,013	0,015	0,017	0,018	0,020	0,020	0,020	0,020	0,018		
$\sigma$	0,095	0,138	0,185	0,219	0,257	0,289	0,309	0,315	0,286	0,295	0,278	0,238	15
E $\sigma$	0,004	0,007	0,010	0,012	0,015	0,017	0,020	0,022	0,023	0,027	0,031	0,041	
$h$ moyen	0,001	-0,004	-0,004	-0,008	-0,009	-0,007	-0,003	-0,014	-0,024	-0,022	-0,014	0,011	
E $h$	0,006	0,009	0,014	0,016	0,021	0,025	0,028	0,032	0,033	0,038	0,046	0,054	
$\sigma$	0,079	0,103	0,137	0,167	0,201	0,215	0,255	0,277	0,306	0,320	0,337	0,343	18
E $\sigma$	0,003	0,004	0,005	0,007	0,008	0,009	0,012	0,014	0,018	0,021	0,028	0,033	
$h$ moyen	0,004	0,010	0,015	0,022	0,029	0,037	0,044	0,046	0,046	0,051	0,051	0,041	
E $h$	0,004	0,005	0,007	0,009	0,012	0,013	0,017	0,020	0,025	0,030	0,039	0,056	

	$\sigma$	E5	h moyen	Eh		$\sigma$	E5	h moyen	Eh		$\sigma$	E5	h moyen	Eh		$\sigma$	E5	h moyen	Eh	
5	0,082	0,134	0,183	0,237	0,281	0,325	0,370	0,407	0,444	0,476	0,477	0,476	0,477	0,476	0,477	0,476	0,477	0,476	0,477	
E5	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010	0,012	0,015	0,019	0,023	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	
h moyen	0,005	0,008	0,011	0,022	0,025	0,031	0,042	0,038	0,047	0,050	0,050	0,047	0,050	0,047	0,050	0,047	0,050	0,047	0,050	
Eh	0,003	0,006	0,006	0,011	0,014	0,018	0,022	0,026	0,032	0,040	0,040	0,049	0,040	0,049	0,040	0,049	0,040	0,049	0,040	
5	0,086	0,128	0,189	0,225	0,273	0,314	0,363	0,406	0,426	0,450	0,462	0,468	0,468	0,462	0,468	0,462	0,468	0,462	0,468	
E5	0,004	0,006	0,010	0,012	0,015	0,019	0,025	0,029	0,034	0,041	0,052	0,074	0,074	0,052	0,074	0,074	0,052	0,074	0,074	
h moyen	0,024	0,045	0,069	0,089	0,183	0,132	0,155	0,173	0,214	0,229	0,250	0,283	0,283	0,250	0,283	0,283	0,250	0,283	0,283	
Eh	0,006	0,009	0,014	0,017	0,021	0,026	0,033	0,041	0,048	0,058	0,074	0,105	0,105	0,074	0,105	0,105	0,074	0,105	0,105	
5	0,095	0,151	0,204	0,257	0,308	0,353	0,392	0,431	0,459	0,489	0,496	0,548	0,548	0,496	0,548	0,548	0,496	0,548	0,548	
E5	0,003	0,005	0,008	0,010	0,013	0,015	0,019	0,022	0,027	0,033	0,041	0,063	0,063	0,041	0,063	0,063	0,041	0,063	0,063	
h moyen	0,002	0,005	0,009	0,009	0,011	0,011	0,011	0,016	0,019	0,026	0,027	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	
Eh	0,004	0,007	0,011	0,014	0,018	0,022	0,026	0,032	0,038	0,046	0,057	0,090	0,090	0,046	0,090	0,090	0,046	0,090	0,090	
5	0,090	0,136	0,182	0,224	0,274	0,319	0,366	0,386	0,418	0,449	0,478	0,488	0,488	0,478	0,488	0,478	0,478	0,488	0,478	
E5	0,004	0,006	0,009	0,011	0,015	0,018	0,023	0,026	0,032	0,039	0,051	0,074	0,074	0,051	0,074	0,074	0,051	0,074	0,074	
h moyen	0,017	0,034	0,046	0,058	0,072	0,084	0,096	0,115	0,140	0,153	0,180	0,210	0,210	0,180	0,210	0,210	0,180	0,210	0,210	
Eh	0,006	0,009	0,012	0,016	0,021	0,026	0,032	0,037	0,045	0,055	0,072	0,105	0,105	0,072	0,105	0,105	0,072	0,105	0,105	
5	0,078	0,105	0,121	0,130	0,154	0,160	0,174	0,202	0,202	0,218	0,253	0,266	0,266	0,253	0,266	0,266	0,253	0,266	0,266	
E5	0,004	0,005	0,006	0,007	0,009	0,010	0,011	0,014	0,016	0,020	0,028	0,042	0,042	0,028	0,042	0,042	0,028	0,042	0,042	
h moyen	0,011	0,018	0,022	0,030	0,044	0,048	0,054	0,062	0,065	0,072	0,097	0,122	0,122	0,097	0,122	0,122	0,097	0,122	0,122	
Eh	0,005	0,007	0,009	0,010	0,012	0,014	0,016	0,020	0,023	0,028	0,040	0,059	0,059	0,028	0,059	0,059	0,028	0,059	0,059	
5	0,092	0,139	0,164	0,157	0,210	0,227	0,236	0,257	0,260	0,291	0,295	0,288	0,288	0,291	0,295	0,291	0,295	0,291	0,295	
E5	0,004	0,006	0,007	0,007	0,010	0,011	0,013	0,015	0,017	0,022	0,028	0,038	0,038	0,028	0,038	0,038	0,028	0,038	0,038	
h moyen	-0,002	-0,018	-0,028	-0,040	-0,052	-0,069	-0,082	-0,091	-0,091	-0,091	-0,091	-0,119	-0,119	-0,091	-0,119	-0,091	-0,091	-0,091	-0,091	
Eh	0,005	0,008	0,010	0,010	0,014	0,016	0,018	0,022	0,024	0,031	0,039	0,054	0,054	0,031	0,054	0,031	0,039	0,031	0,039	

de 15 minutes, de 9 pour ceux de 20 minutes, etc ; l'intervalle de 60 minutes seul ne fournira qu'une valeur de  $h$ .

Le tableau III donne la valeur de  $\sigma$  (en millimètres) et son erreur probable ainsi que la moyenne de la déviation  $h$  pour tous les groupes de longueur-température pour lesquels il existe des expériences.

Les erreurs probables ont été calculées par les formules ordinaires

$$Eh = \pm 0,6745 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$E\sigma = \pm 0,6745 \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}$$

où  $\sigma$  est l'index de variabilité et  $n$  le nombre total de mesurations utilisées. Par exemple, si j'ai fait une série de dix expériences, j'ai 120 valeurs de la déviation  $h$  pendant un intervalle de 5 minutes. On peut se demander si dans ces conditions on doit prendre  $n = 120$  ou  $n = 10$ . A priori, on peut prévoir que l'erreur probable réelle sera intermédiaire entre les erreurs calculées en prenant  $n = 120$  et  $n = 10$ . En effet, en tenant compte de toutes les déviations mesurées, on diminue l'influence que pourrait avoir la phase de la nutation ; par conséquent, l'erreur probable doit donc être moindre que si l'on n'avait tenu compte que d'une mensuration par plante ; d'autre part, comme chaque plante est représentée par 12 mesures, on peut s'attendre à trouver une certaine parenté entre ces résultats, parce que chaque plante a son allure de nutation en propre ; pour cette raison, l'erreur probable sera plus forte que si l'on avait réellement affaire à 120 plantes différentes.

Il est facile de vérifier le fait en comptant dans le tableau précédent le nombre de fois où la différence entre la moyenne calculée de  $h$  et sa vraie valeur donnée par les conditions de l'expérience, c'est-à-dire zéro, est plus petite que 1 fois, 2 fois, 3 fois, 4 fois... l'erreur probable.

Le tableau IV donne pour chaque intervalle de 5 minutes le rapport du nombre des cas où la valeur absolue de  $h$  moyen est plus petite que tel multiple de l'erreur probable  $Eh$  au nombre de cas où  $h$  moyen est supérieur au même multiple. Par exemple, 7 : 3 veut dire qu'il y a 7 valeurs de  $h$  moyen inférieures à un multiple donné de  $Eh$  contre 3 qui sont supérieures à cette valeur.

TABLEAU IV

N°	TEMPS EN MINUTES										
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$h < E$	5:5	3:7	3:7	3:7	3:7	3:7	2:8	3:7	3:7	3:7	4:6
$h < 2E$	7:3	5:5	4:6	4:6	4:6	4:6	4:6	4:6	5:5	5:5	5:5
$h < 3E$	9:1	8:2	7:3	6:4	5:5	5:5	6:4	5:5	6:4	8:2	8:2
$h < 4E$	10:0	9:1	9:1	8:2	8:2	7:3	7:3	8:2	8:2	9:1	9:1
$h < 5E$	..	10:0	10:0	8:2	8:2	8:2	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1
$h < 6E$	..	..	..	10:0	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1
$h < 7E$	..	..	..	..	9:1	10:0	9:1	9:1	9:1	9:1	9:1
$h < 8E$	..	..	..	..	9:1	..	10:0	10:0	9:1	9:1	10:0
$h < 9E$	..	..	..	..	10:0	..	..	..	10:0	9:1	..
$h < 10E$	..	..	..	..	..	..	..	..	..	10:0	..

On sait qu'il y a autant de chances pour que la vraie valeur de  $h$  soit comprise entre la moyenne + l'erreur probable et la moyenne — l'erreur probable ou qu'elle soit située en dehors de ces limites ; par conséquent lorsqu'on aura une moyenne de 10 chiffres, comme c'est le cas dans le tableau ci-dessus, le rapport du nombre des cas où la valeur de la moyenne sera dans les limites de l'erreur probable à celui des cas contraires sera 5 : 5 ; dans le tableau on voit que le rapport 5 : 5 se trouve réalisé pour  $h < E$  pour les mesures faites à 5 minutes d'intervalle, pour  $h < 2E$  pour les intervalles de 10, 45, 50 et 55 minutes. Enfin pour  $h < 3E$  pour les périodes de 15, 20, 25, 30, 35 et 40 minutes.

Dans le cas des intervalles de 5 minutes, le nombre des cas (5 : 5) compris entre + et — E est celui prévu par la

théorie ; pour les intervalles suivants, on voit que l'erreur probable déduite des résultats expérimentaux augmente assez régulièrement jusqu'à atteindre 3 fois l'erreur probable calculée puis diminue de nouveau.

Théoriquement, ce résultat est assez surprenant ; on aurait pu s'attendre à voir, pour les intervalles de 5 minutes, l'erreur probable observée être beaucoup plus grande que l'erreur probable calculée ; en effet, pour les intervalles de 5 minutes, le nombre de valeurs de  $h$  servant à calculer la moyenne est 11 fois plus grand que le nombre des plantes. Pour les intervalles suivants, on aurait prévu une diminution régulière de la différence entre les erreurs probables théoriques et empiriques jusqu'à l'intervalle de 60 minutes où les deux se confondraient.

Cette discordance s'explique probablement par le fait que les intervalles de 5 minutes et un peu ceux de 10 et de 15 minutes coupent la période de nutation en petits tronçons, de sorte que la périodicité de la plante intervient moins que pour les intervalles de temps voisins de la période de nutation. Pendant ces intervalles de 5, 10 et 15 minutes, les déviations sont très faibles et voisines des erreurs de lecture au cathétomètre, de sorte que ces erreurs, qui suivent rigoureusement la loi de Gauss, en se superposant aux écarts dus à la nutation, interviennent sûrement aussi pour donner ce résultat.

Il est évident que le même phénomène se retrouvera pour l'erreur probable de l'index de variabilité ; il faudra donc tenir compte de ce fait que pour les intervalles de 10 à 55 minutes l'erreur probable de  $\sigma$  sera plus grande que l'erreur probable calculée.

Le graphique (fig. 4) donne la courbe des index de variabilité de la déviation  $h$  observée après les différents intervalles de temps, et cela pour toutes les catégories température-longueur. De part et d'autre de chacune des valeurs de  $\sigma$ , j'ai porté le double de l'erreur probable calculée ;

théoriquement, on aurait 4,5 chances contre 1 que la vraie valeur de  $\sigma$  sera bien comprise entre ces deux valeurs ; mais d'après ce que nous venons de voir, le nombre des chances favorables sera moindre en réalité. Quoique les courbes représentées présentent des irrégularités dues au petit nombre des expériences dans certains groupes (tem-

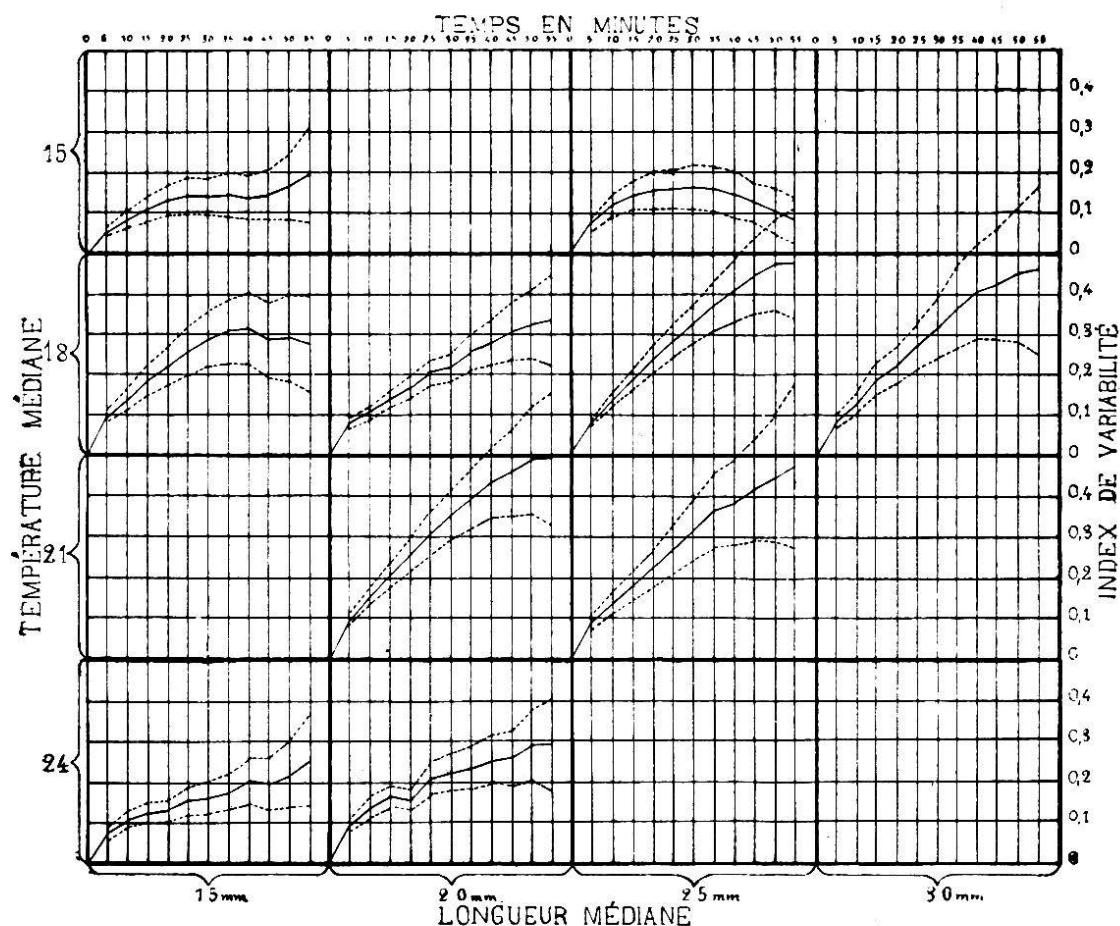


Fig. 4.

pérature-longueur), on voit cependant que toutes ces courbes se rapprochent d'un même type, qui partant de l'origine s'élève d'abord assez rapidement, puis tend de plus en plus vers l'horizontale ; on voit nettement que la courbe est asymptotique à l'axe des temps. La variabilité de  $h$  due à la nutation tend donc vers une limite. On aurait pu prévoir le fait, puisque la nutation est un phénomène périodique. Si les expériences avaient duré plus d'une heure,

TABLEAU V

N uméros	TEMPS EN MINUTES										60
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
-1,0					0,08	0,19	0,11	0,13	0,50	1,10	0,33
-0,9					0,08	0,29	0,22	0,40	0,89	1,00	1,33
-0,8					0,17	0,38	0,56	1,07	1,17	1,33	1,33
-0,7					0,29	1,14	1,67	1,87	2,00	1,56	1,00
-0,6					0,89	2,19	2,11	2,13	2,17	3,11	2,33
-0,5					1,92	2,42	2,86	3,89	5,07	5,17	4,00
-0,4					2,81	4,29	6,00	6,76	6,33	4,83	4,67
-0,3					1,47	4,29	6,00	6,76	5,33	5,56	3,33
-0,2					3,87	10,37	10,50	9,62	9,33	9,33	4,67
-0,1					7,69	8,73	16,74	14,42	14,57	14,93	8,67
0	48,56	34,67	20,60	24,96	22,58	20,29	17,89	17,20	16,67	16,44	14,67
0,1	22,56	20,79	17,33	15,79	15,17	12,95	13,44	12,00	11,33	10,89	11,67
0,2	4,33	9,94	10,80	10,29	9,17	9,62	9,11	8,80	9,50	10,22	10,00
0,3	0,50	2,61	5,93	6,37	7,17	7,81	6,22	6,40	5,87	4,89	7,00
0,4	0,11	0,79	2,13	3,56	3,42	4,24	5,22	4,53	5,17	4,44	4,67
0,5	0,06	0,36	0,73	1,56	2,42	2,29	1,89	2,93	2,33	4,22	2,33
0,6			0,40	1,11	1,67	2,01	1,89	2,40	4,83	1,56	2,67
0,7				0,20	0,59	0,91	1,52	2,56	1,60	1,83	2,00
0,8				0,07	0,15	0,91	0,76	0,78	1,87	1,50	1,33
0,9				0,07	0,33	0,76	0,78	0,80	1,17	1,10	1,33
1,0						0,29	0,67	0,40	0,50	1,10	0,67
1,1						0,19	0,33	0,67	0,33	0,44	1,00
1,2							0,11	0,27	0,17	0,22	0,67
1,3							0,11	0,17	0,44	0,67	
1,4							0,27	0,33	0,22	0,22	
1,5							0,13	0,17	0,17	0,22	
1,6								0,17	0,17	0,67	
1,7									0,22	0,22	

on verrait probablement se produire une inflexion de la courbe vers l'axe des temps au bout de 100 minutes environ, puis on verrait la courbe remonter et s'abaisser toutes les 100 minutes ; en effet, la demi-période moyenne de la nutation de l'avoine est d'environ 100 minutes.

Le graphique (fig. 4) montre que la variabilité de  $h$ , mesure de la nutation, croît avec la température et avec la longueur de la plante.

Pour avoir une idée plus nette de l'allure de la courbe de variabilité de  $h$  en fonction du temps, j'ai réuni toutes les mensurations effectuées (150) avec la plante observée verticalement, en utilisant les déviations  $h$  pendant tous les intervalles de temps.

Le tableau V donne la fréquence des différentes déviations observées en pour cent de la fréquence totale pour tous les intervalles de temps, de cinq en cinq minutes, de 5 à 60.

Le stéréogramme (fig. 5) donne une idée nette de la variation de la variabilité de  $h$  en fonction du temps. Sur trois axes de coordonnées perpendiculaires les uns aux autres et représentés en perspective cavalière, j'ai porté respectivement les temps en minutes (axe des  $x$ ), les déviations  $h$  (axe des  $y$ ) et les fréquences (axe des  $z$ ). Je peux ainsi représenter les polygones de variation de la déviation  $h$  après les intervalles de temps de 5 en 5 minutes. Tous ces polygones ont la même surface ; on voit que plus les intervalles de temps croissent plus la courbe s'affaisse. Si l'on considère les ordonnées maxima de chacun de ces polygones, on constate qu'elles sont toutes placées sur la déviation  $h = 0$ , et qu'elles s'abaissent au fur et à mesure que les intervalles de temps sont plus longs ; la courbe passant par les ordonnées maxima se rapproche asymptotiquement d'une droite parallèle à l'axe des temps. On voit également que les polygones sont symétriques par rapport à l'ordonnée maximum, et cela doit bien être puis-

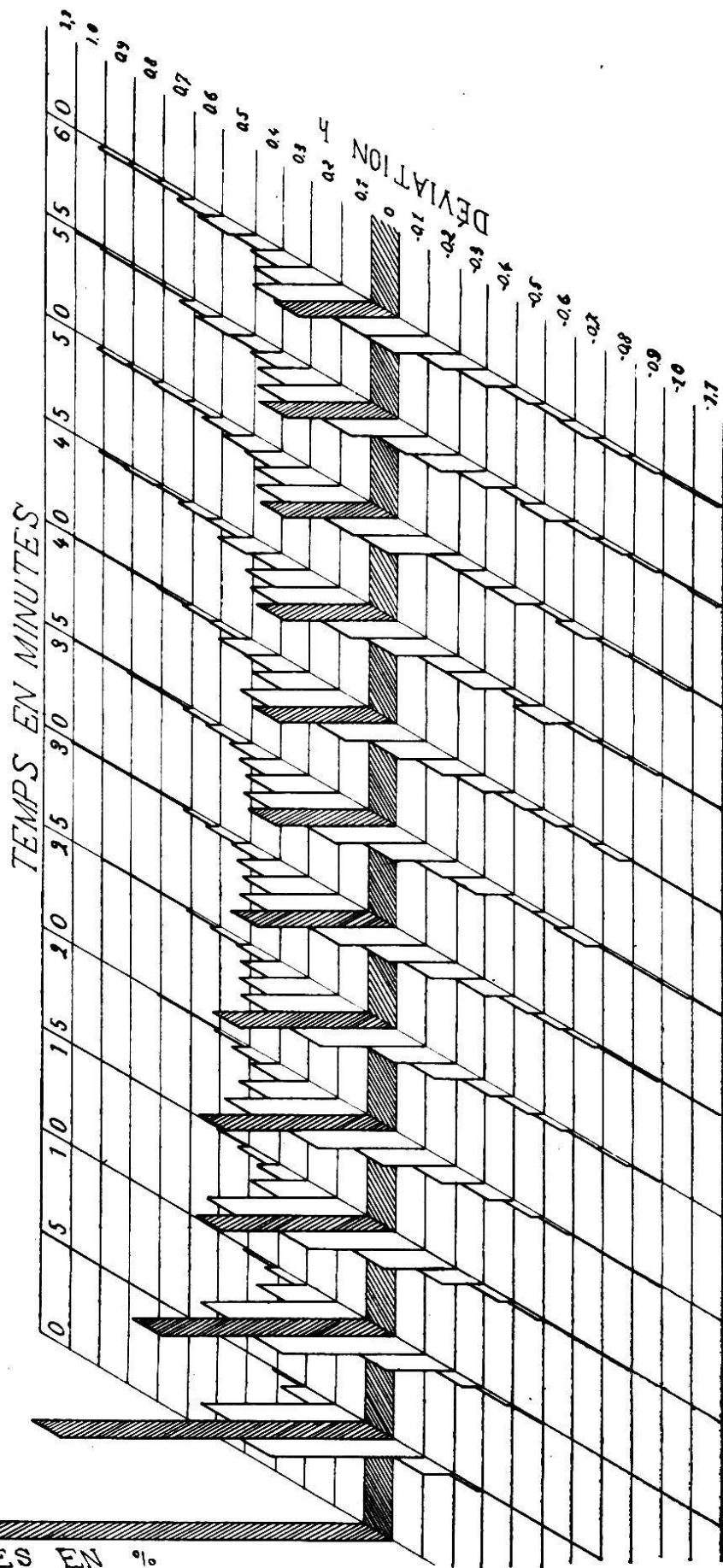


Fig. 5.

qu'il n'y a pas plus de raison pour qu'une plante se courbe à gauche plutôt qu'à droite ; cette symétrie montre que les expériences ont été correctement faites et qu'il n'y a pas eu intervention de cause d'erreurs systématiques. On pourra donc avoir confiance dans les expériences géotropiques effectuées avec le même appareil.

On peut remplacer les polygones de variation qui expriment les résultats bruts de l'expérience par les courbes de variation en utilisant les méthodes biométriques. Ces courbes sont complètement déterminées si l'on connaît l'index de variabilité  $\sigma$  et leur surface (fréquence totale). Lorsqu'on connaît  $\sigma$ , on peut calculer les ordonnées (fréquences) correspondant à chacune des déviations  $h$ , en particulier l'ordonnée maximum qui est donnée par

$$h_0 = \frac{n}{\sigma \sqrt{2 \pi}}$$

où  $n$  est le nombre total des cas envisagés (pour nous  $n = 100$ ).

Le tableau VI donne la valeur de  $\sigma$  et de  $h_0$  pour tous les intervalles de temps de 0 à 60 minutes. Remarquons que dans le polygone nous avons 100 % des individus ayant une déviation nulle au temps 0 ; la hauteur du rectangle était donc de 100 ; si nous calculons la courbe théorique correspondant au temps zéro par la formule ci-dessus, comme les déviations sont toutes nulles par définition, il n'y a pas de variabilité, l'index  $\sigma$  est donc nul et  $h_0 = \infty$  ; la surface de variabilité se réduit à une droite de longueur infinie.

TABLEAU VI

	TEMPS EN MINUTES												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\sigma$	0	0,09	0,14	0,18	0,22	0,25	0,29	0,32	0,36	0,39	0,40	0,42	0,43
$h$	$\infty$	42,4	29,1	22,3	18,4	16,2	13,7	12,4	11,1	10,2	9,9	9,5	9,2

La figure 6 montre d'une manière plus parlante l'allure de la courbe des ordonnées maxima.

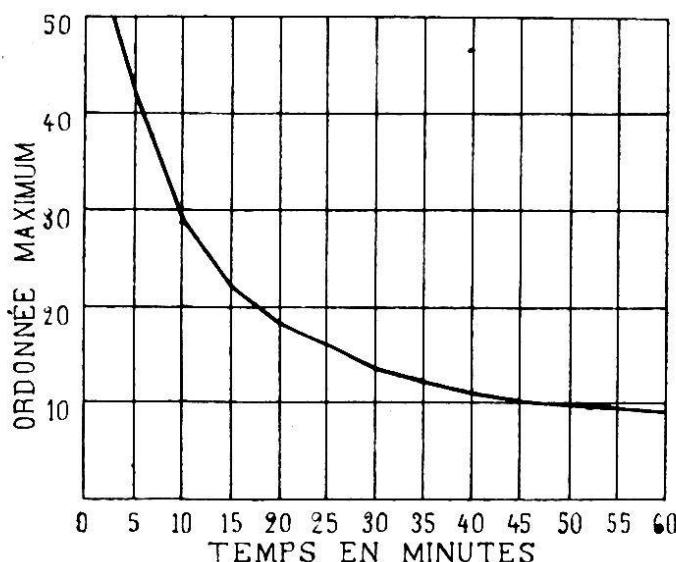


Fig. 6.

Cette courbe ressemble à une hyperbole équilatère rapportée à ses asymptotes et dont l'axe des  $x$  serait parallèle à l'axe des temps ; en appliquant la méthode des moindres carrés, en partant de la supposition que c'est bien une hyperbole équilatère, nous arrivons à une courbe qui diffère sensiblement de la courbe empirique. Ce fait est dû très certainement à la périodicité de la nutation qui intervient. La demi-période de nutation de l'avoine est d'environ 100 minutes ; si nos expériences avaient duré plus d'une heure nous verrions probablement la courbe des ordonnées maxima s'infléchir vers l'axe des temps dans le voisinage de 100 minutes pour s'en éloigner de nouveau et recommencer toutes les 100 minutes environ. La courbe sera très probablement une combinaison d'une hyperbole équilatère et d'une courbe périodique. On peut prévoir également que les ondulations de la courbe iront en s'atténuant avec les temps croissant. Des expériences pour déterminer la période de nutation sont en cours à l'heure actuelle (août-septembre 1912).

Ce que nous venons de dire s'applique au cas où la plante

est observée dans sa position verticale normale ; voyons maintenant ce qui se passe quand la plante est soumise à l'influence du géotropisme.

Si nous plaçons une série de plantes d'avoine horizontalement et si nous mesurons les déviations  $h$  de son extrémité, de 5 en 5 minutes, nous pourrons, en groupant les déviations  $h$  au bout de chaque intervalle de temps dessiner les polygones de variation correspondants et calculer l'index de variabilité  $\sigma$  de  $h$ . Si les seules causes d'erreurs étaient la nutation et les erreurs de lectures, les valeurs de  $\sigma$  seraient les mêmes, dans les limites de l'erreur probable de  $\sigma$ , pour les catégories température-longueur correspondantes que lorsque les plantes ont été observées verticalement.

En examinant le tableau VII (page 447), donnant les valeurs de  $\sigma$ , pour les plantes placées horizontalement pendant toute la durée de l'expérience ainsi que le graphique fig. 7 (page 455) et le stéréogramme fig. 8 (page 457), on voit immédiatement que la variabilité est beaucoup plus grande que lorsque les plantes sont observées verticalement.

Une nouvelle cause de variabilité intervient donc, c'est la variabilité géotropique. En effet, toutes les plantes en expérience ne sont pas également sensibles et aptes à réagir ; l'allure du mouvement de l'extrémité due au géotropisme de la plante sera donc variable.

On peut s'attendre à ce que le plus grand nombre des plantes aient une sensibilité et une capacité de réaction moyennes et que plus les plantes s'écartent de cette moyenne, moins elles seront nombreuses ; autrement dit, il est très probable que la sensibilité et la capacité de réaction suivront la loi de Gauss.

Si c'est bien le cas, les courbes de variation des déviations des plantes observées horizontalement seront des courbes normales. Il en est bien réellement ainsi, au

moins pendant la première demi-heure d'expérience ; plus tard interviennent d'autres causes d'erreur (voir le stéréogramme fig. 8, page 457).

La variabilité de  $h$  due au géotropisme vient se superposer à la variabilité due à la nutation et contribuer à augmenter les erreurs probables ; celles-ci malgré tout obéissent à la loi de Gauss.

Quoique cette étude de la nutation et de son influence sur l'interprétation des expériences sur le géotropisme soit loin d'être complète, elle a cependant donné un résultat, en démontrant que dans les conditions de mes expériences sur le géotropisme, les erreurs dues à la nutation se laissent traiter comme les erreurs fortuites et non systématiques.

### **Réaction géotropique des plantes d'avoine placées horizontalement pendant toute la durée de l'expérience.**

Dans mon travail de 1910<sup>1</sup>, j'ai montré qu'une plante d'avoine placée horizontalement effectue une courbure vers le bas d'abord, puis vers le haut, que la courbe représentant ce phénomène est assez exactement une parabole de la forme

$$h = at + bt^2$$

où  $h$  est le déplacement de l'extrémité de la plante et  $a$  et  $b$  sont des quantités variables avec la température de l'expérience et la longueur de la plante; j'ai montré que  $a$  est une mesure de la courbure vers le bas et que  $b$  est de la nature d'une accélération qui mesure la capacité géotropique de la plante, j'ai énoncé la loi : La vitesse de la courbure géotropique est proportionnelle au temps pendant lequel la pesanteur a agi sur la plante.

Dans le calcul de  $a$  et de  $b$ , je n'avais pas tenu compte du poids<sup>2</sup> des valeurs de  $h$  moyen; c'est pourquoi j'ai

<sup>1</sup> Bull. Soc. vaud. Sc. nat. p. 235 et 415.

<sup>2</sup> Voir page 419.

TABLEAU VII. — Déviation *h* de l'extrémité d'une plante d'avoine placée à 90° de sa position normale et observée au cathétomètre dans cette position.

N	Numéros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.	
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50		
604	0,0	-0,1	-0,1	-0,05	0,0	0,1	0,25	0,4	0,55	0,75	0,95	1,1	24
606	-0,1	-0,2	0,05	0,0	0,2	0,3	0,45	0,5	0,6	0,9	1,2	24	16
607	0,05	0,0	-0,1	0,0	0,15	0,3	0,5	0,6	0,8	0,95	1,1,5	24	17
605	-0,1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,3	-0,15	0,0	0,2	0,45	0,65	0,9	24	22
623	0,0	0,05	0,05	0,15	0,15	0,25	0,25	0,35	0,55	0,85	1,1,5	24	22
625	0,0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,3	0,35	0,55	0,5	0,7	24	26
611	-0,6	-1,55	-2,1	-2,6	-2,8	-2,65	-2,4	-2,3	-2,2	-2,1	-1,95	-1,8	27
626	-0,2	-0,3	-0,2	0,0	0,25	0,45	0,9	1,15	1,4	1,9	2,4	2,9	29
612	0,1	0,1	0,0	0,05	0,4	1,4	1,8	2,5	3,35	4,3	5,15	5,8	30
622	0,0	0,2	0,25	0,4	0,7	0,9	1,0	1,2	1,7	2,0	2,3	2,7	32
624	-0,4	-0,45	-0,5	-0,45	-0,45	-0,3	-0,25	0,1	0,3	0,55	0,85	1,25	24
614	-0,3	-0,4	-0,55	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,5	-0,15	0,4	1,1	2,5
619	-0,6	-0,55	-0,45	-0,45	-0,55	-0,55	-0,35	-0,35	0,65	0,7	0,9	1,1,3	24
621	-0,05	-0,1	0,0	-0,05	0,05	0,05	0,25	0,5	0,7	0,9	1,1	1,25	34
610	0,1	0,1	0,05	0,05	0,15	0,3	0,6	1,0	1,35	1,85	2,35	2,75	38
616	0,0	0,0	0,0	-0,05	0,15	0,35	0,65	1,0	1,35	1,8	2,25	2,65	43
601	0,05	-0,05	-0,15	-0,15	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,2	0,45	0,75	1,2	25
602	0,05	0,1	0,2	0,25	0,35	0,45	0,6	0,7	0,85	1,1	1,35	2,75	25
620	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,4	25
635	-0,05	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,75	1,05	1,3	1,8	2,05
603	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,35	0,6	1,0	1,35	1,85	2,25	2,6	25
627	-0,15	-0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,45	0,9	1,1	1,4	1,8	25
629	-0,1	-0,2	-0,15	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,5	1,8	2,3	25
632	0,0	-0,05	-0,15	-0,15	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	2,05
636	-0,1	-0,1	0,005	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,3	1,6	1,8	2,25	25
628	-0,1	-0,2	-0,2	-0,05	0,1	0,2	0,45	0,9	1,3	1,8	2,2	2,6	25
638	-0,1	-0,1	-0,1	0,05	0,15	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6	2,05	2,5	25
649	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,65	1,0	1,4	1,7	2,1	2,4	2,8	25
608	0,1	-0,05	-0,05	-0,1	-1,25	-1,4	-1,45	-1,3	0,4	0,75	1,1	2,15	27
648	-0,4	-0,8	-1,1	-1,25	-1,4	-1,45	-1,0	0,1	0,5	-0,3	-0,2	-0,1	25
609	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,25	0,5	0,75	1,1	1,6	2,3	3,0	25

TABLEAU VII (*suite*).

N uméros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
613	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,5	-0,5	0,95	1,45	2,2	2,8
637	0,0	0,05	0,1	0,1	0,3	0,5	0,95	1,35	1,75	2,3	2,7	3,1
618	-0,05	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,35	0,6	0,8	1,2	1,4
633	0,0	-0,05	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,15	0,0	0,2	0,4	0,7
630	0,05	0,1	0,2	0,3	0,6	1,0	1,5	1,85	2,3	2,75	3,2	3,8
634	-0,3	-0,2	-0,25	-0,3	-0,2	0,05	0,3	0,5	0,85	1,2	1,5	2,1
615	-0,2	0,15	0,5	0,8	1,1	1,7	2,15	2,5	3,1	3,6	3,9	4,4
617	-0,25	-0,05	0,1	0,1	0,05	0,2	0,45	0,6	0,65	0,95	1,25	1,65
631	-1,0	-1,1	-1,1	-1,15	-0,9	-0,5	-0,2	0,35	0,8	1,4	1,7	1,9
680	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	0,1	0,3	0,8	1,1	1,5	1,95	2,4	2,75
641	0,05	0,1	0,15	0,25	0,25	0,35	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,95
640	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,05	0,05	0,1	0,2	0,35	0,5	0,6
642	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,55	0,8	1,0	1,35
639	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,9	1,2	1,65	2,15	2,8	3,15
679	0,0	0,0	0,0	0,05	0,2	0,25	0,5	0,8	1,1	1,45	1,8	2,2
657	0,0	0,0	0,05	0,1	0,1	0,1	0,25	0,5	0,5	1,2	1,7	2,4
662	0,05	-0,05	-0,15	-0,2	-0,25	-0,15	0,1	0,15	0,35	0,55	0,95	1,45
656	-0,1	0,0	-0,25	-0,2	0,0	0,3	0,75	1,15	1,55	2,15	2,7	3,35
664	-0,1	0,1	0,15	0,1	0,1	0,1	0,35	0,6	0,8	1,15	1,5	2,1
663	-0,1	0,0	0,1	0,05	0,15	0,4	0,8	1,1	1,35	1,7	2,1	2,4
647	-0,8	-0,7	-0,6	-0,9	-0,8	-0,5	-0,3	-0,2	0,2	0,55	1,0	1,45
684	0,05	0,0	-0,05	0,05	0,35	0,6	0,8	1,15	1,3	1,6	1,9	2,3
696	0,0	-0,1	-0,15	0,0	0,1	0,3	0,5	0,65	0,9	1,3	1,5	1,9
697	0,0	0,05	0,1	0,2	0,2	0,25	0,35	0,5	0,65	0,8	1,1	1,3
698	0,0	0,2	0,1	0,2	0,5	0,7	0,95	1,3	1,7	2,15	2,45	2,8
688	0,05	0,05	0,05	0,15	0,25	0,5	0,75	1,0	1,2	1,45	1,8	2,1
653	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,25	1,4	1,7	2,0	2,5
654	-0,05	-0,05	-0,2	-0,25	-0,3	-0,4	-0,35	-0,3	-0,35	-0,25	-0,1	-0,05
644	0,0	-0,2	-0,45	-0,6	-0,7	-0,65	-0,7	-0,65	-0,45	0,0	0,4	1,7
650	0,0	-0,05	0,0	0,05	0,35	0,55	0,95	1,55	2,0	2,35	2,65	3,1
659	-0,1	-0,1	-0,15	-0,1	0,1	0,35	0,55	0,9	1,2	1,5	1,7	2,0



repris les calculs des résultats d'expériences afin d'obtenir les valeurs de  $a$  et de  $b$  les plus probables.

Afin de voir si, avec mon appareil modifié, j'obtenais des résultats analogues à ceux de 1910, j'ai fait une nouvelle série de 100 expériences dont je donne les protocoles ci-dessous (tableau VII). Ces expériences viennent compléter heureusement la première série en ce sens qu'elles ont été faites à des températures comprises entre 24° et 28° C, tandis que les précédentes avaient été faites entre 15° et 24°. Cette série, portant les n°s 601 à 700, a été commencée le 11 juillet 1911 et terminée le 1<sup>er</sup> août.

L'arrangement du tableau VII est un peu différent de celui de mon précédent travail; j'ai donné toutes les expériences à la suite les unes des autres en les classant d'après la température et dans chacune des températures d'après la longueur de la plante.

Les températures ont été lues toutes les 5 minutes au  $\frac{1}{10}$  de degré près; puis la température moyenne a été calculée; la température donnée dans le tableau est exprimée par le nombre entier de degrés le plus voisin de cette moyenne; par exemple, 17° signifie que la moyenne est comprise entre 16°,5 et 17°,5.

Dans mon *Etude sur la réaction géotropique*, les tableaux donnaient la valeur

$$x = \frac{10 h}{l}$$

où  $l$  est la longueur de la plante en millimètres;  $x$  est donc la déviation de l'extrémité de la plante ramenée à ce qu'elle serait si la plante avait 10 mm. J'ai trouvé plus simple de donner directement la déviation  $h$  observée et d'effectuer les calculs sur ces chiffres et de transformer les résultats seuls.

Les expériences ont été groupées pour les calculs en comprenant dans une catégorie toutes celles faites à la même température avec des plantes de même longueur; pour

TABLEAU VIII

TEMPS EN MINUTES											Tempera- ture en degrés C. en millim.	Longeur en mm.	
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
$\sigma$	0,033	0,064	0,086	0,092	0,125	0,153	0,173	0,183	0,246	0,303	0,342	0,399	15
E $\sigma$	$\pm 0,004$	$\pm 0,008$	$\pm 0,011$	$\pm 0,011$	$\pm 0,015$	$\pm 0,018$	$\pm 0,021$	$\pm 0,022$	$\pm 0,031$	$\pm 0,037$	$\pm 0,042$	$\pm 0,049$	15
$h$ moyen	-0,010	-0,022	-0,010	0,005	0,015	0,016	0,022	0,034	0,105	0,185	0,306	0,427	15
E $h$	$\pm 0,006$	$\pm 0,011$	$\pm 0,015$	$\pm 0,016$	$\pm 0,022$	$\pm 0,027$	$\pm 0,030$	$\pm 0,031$	$\pm 0,043$	$\pm 0,052$	$\pm 0,059$	$\pm 0,069$	n = 15
$\sigma$	0,124	0,130	0,164	0,180	0,212	0,230	0,250	0,250	0,244	0,258	0,336	0,414	20
E $\sigma$	$\pm 0,014$	$\pm 0,015$	$\pm 0,019$	$\pm 0,021$	$\pm 0,025$	$\pm 0,027$	$\pm 0,030$	$\pm 0,030$	$\pm 0,029$	$\pm 0,031$	$\pm 0,040$	$\pm 0,049$	20
$h$ moyen	0,000	0,026	0,032	0,056	0,070	0,086	0,086	0,134	0,179	0,278	0,404	0,472	20
E $h$	$\pm 0,021$	$\pm 0,023$	$\pm 0,027$	$\pm 0,030$	$\pm 0,035$	$\pm 0,039$	$\pm 0,042$	$\pm 0,042$	$\pm 0,041$	$\pm 0,044$	$\pm 0,057$	$\pm 0,069$	n = 16
$\sigma$	0,133	0,233	0,223	0,277	0,325	0,393	0,503	0,503	0,570	0,588	0,688	0,733	25
E $\sigma$	$\pm 0,018$	$\pm 0,032$	$\pm 0,030$	$\pm 0,038$	$\pm 0,044$	$\pm 0,054$	$\pm 0,069$	$\pm 0,069$	$\pm 0,078$	$\pm 0,081$	$\pm 0,095$	$\pm 0,101$	25
$h$ moyen	-0,100	-0,123	-0,154	-0,160	-0,170	-0,156	-0,122	-0,108	-0,071	0,017	0,129	0,269	25
E $h$	$\pm 0,025$	$\pm 0,045$	$\pm 0,043$	$\pm 0,054$	$\pm 0,062$	$\pm 0,076$	$\pm 0,098$	$\pm 0,098$	$\pm 0,111$	$\pm 0,115$	$\pm 0,134$	$\pm 0,142$	n = 12
$\sigma$	0,124	0,192	0,180	0,215	0,242	0,243	0,299	0,338	0,374	0,428	0,464	0,518	15
E $\sigma$	$\pm 0,008$	$\pm 0,015$	$\pm 0,014$	$\pm 0,017$	$\pm 0,019$	$\pm 0,019$	$\pm 0,023$	$\pm 0,028$	$\pm 0,030$	$\pm 0,035$	$\pm 0,037$	$\pm 0,041$	15
$h$ moyen	-0,027	-0,030	-0,029	-0,029	-0,006	0,012	0,051	0,119	0,203	0,335	0,480	0,668	15
E $h$	$\pm 0,013$	$\pm 0,022$	$\pm 0,021$	$\pm 0,024$	$\pm 0,027$	$\pm 0,027$	$\pm 0,034$	$\pm 0,038$	$\pm 0,042$	$\pm 0,049$	$\pm 0,052$	$\pm 0,059$	n = 35
$\sigma$	0,092	0,126	0,158	0,218	0,256	0,312	0,334	0,412	0,492	0,560	0,608	0,668	20
E $\sigma$	$\pm 0,008$	$\pm 0,010$	$\pm 0,014$	$\pm 0,019$	$\pm 0,022$	$\pm 0,027$	$\pm 0,029$	$\pm 0,030$	$\pm 0,036$	$\pm 0,043$	$\pm 0,049$	$\pm 0,053$	20
$h$ moyen	-0,060	-0,065	-0,080	-0,073	-0,029	-0,069	-0,033	0,087	0,215	0,389	0,567	0,771	20
E $h$	$\pm 0,011$	$\pm 0,015$	$\pm 0,019$	$\pm 0,027$	$\pm 0,031$	$\pm 0,038$	$\pm 0,041$	$\pm 0,043$	$\pm 0,050$	$\pm 0,060$	$\pm 0,069$	$\pm 0,075$	n = 30

Tableau VIII (suite).

	TEMPS EN MINUTES												
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	Tempera-ture en degrés C. en millim.
$\sigma$	0,075	0,120	0,170	0,193	0,250	0,288	0,335	0,358	0,410	0,430	0,483	0,583	18
$E\sigma$	$\pm 0,009$	$\pm 0,013$	$\pm 0,021$	$\pm 0,024$	$\pm 0,031$	$\pm 0,036$	$\pm 0,041$	$\pm 0,044$	$\pm 0,050$	$\pm 0,053$	$\pm 0,059$	$\pm 0,071$	25
$h$ moyen	-0,052	-0,058	-0,070	-0,082	-0,088	-0,093	-0,095	-0,095	0,065	0,217	0,458	0,757	1,105
$Eh$	$\pm 0,013$	$\pm 0,021$	$\pm 0,030$	$\pm 0,033$	$\pm 0,044$	$\pm 0,050$	$\pm 0,058$	$\pm 0,062$	$\pm 0,071$	$\pm 0,075$	$\pm 0,084$	$\pm 0,101$	n = 15
$\sigma$	0,077	0,096	0,150	0,155	0,150	0,144	0,117	0,156	0,186	0,203	0,231	0,243	21
$E\sigma$	$\pm 0,011$	$\pm 0,013$	$\pm 0,021$	$\pm 0,022$	$\pm 0,021$	$\pm 0,020$	$\pm 0,016$	$\pm 0,022$	$\pm 0,026$	$\pm 0,028$	$\pm 0,032$	$\pm 0,033$	15
$h$ moyen	-0,056	-0,084	-0,141	-0,138	-0,130	-0,101	-0,035	0,095	0,262	0,449	0,655	0,897	
$Eh$	$\pm 0,015$	$\pm 0,019$	$\pm 0,029$	$\pm 0,030$	$\pm 0,029$	$\pm 0,027$	$\pm 0,023$	$\pm 0,031$	$\pm 0,035$	$\pm 0,039$	$\pm 0,045$	$\pm 0,047$	n = 12
$\sigma$	0,060	0,072	0,128	0,160	0,178	0,216	0,272	0,358	0,456	0,544	0,586	0,770	21
$E\sigma$	$\pm 0,006$	$\pm 0,010$	$\pm 0,017$	$\pm 0,021$	$\pm 0,024$	$\pm 0,029$	$\pm 0,036$	$\pm 0,048$	$\pm 0,060$	$\pm 0,072$	$\pm 0,077$	$\pm 0,102$	.20
$h$ moyen	-0,035	-0,062	-0,045	-0,014	0,034	0,103	0,238	0,437	0,694	0,938	1,223	1,548	
$Eh$	$\pm 0,011$	$\pm 0,014$	$\pm 0,024$	$\pm 0,030$	$\pm 0,034$	$\pm 0,041$	$\pm 0,051$	$\pm 0,067$	$\pm 0,086$	$\pm 0,101$	$\pm 0,110$	$\pm 0,144$	n = 13
$\sigma$	0,115	0,150	0,198	0,268	0,303	0,353	0,425	0,530	0,705	0,815	0,993	1,118	21
$E\sigma$	$\pm 0,012$	$\pm 0,015$	$\pm 0,019$	$\pm 0,026$	$\pm 0,029$	$\pm 0,034$	$\pm 0,041$	$\pm 0,052$	$\pm 0,068$	$\pm 0,079$	$\pm 0,096$	$\pm 0,109$	25
$h$ moyen	-0,099	-0,126	-0,141	-0,135	-0,123	-0,054	0,098	0,338	0,643	1,048	1,456	1,840	
$Eh$	$\pm 0,015$	$\pm 0,021$	$\pm 0,028$	$\pm 0,037$	$\pm 0,041$	$\pm 0,048$	$\pm 0,058$	$\pm 0,073$	$\pm 0,096$	$\pm 0,112$	$\pm 0,136$	$\pm 0,153$	n = 24
$\sigma$	0,077	0,110	0,098	0,116	0,134	0,146	0,205	0,236	0,381	0,415	0,502	0,570	24
$E\sigma$	$\pm 0,011$	$\pm 0,015$	$\pm 0,013$	$\pm 0,016$	$\pm 0,018$	$\pm 0,020$	$\pm 0,028$	$\pm 0,032$	$\pm 0,044$	$\pm 0,057$	$\pm 0,069$	$\pm 0,078$	15
$h$ moyen	-0,004	-0,037	-0,017	0,004	0,087	0,217	0,396	0,633	0,088	1,217	1,542	1,858	
$Eh$	$\pm 0,015$	$\pm 0,023$	$\pm 0,019$	$\pm 0,023$	$\pm 0,026$	$\pm 0,028$	$\pm 0,040$	$\pm 0,046$	$\pm 0,062$	$\pm 0,081$	$\pm 0,098$	$\pm 0,111$	n = 12
$\sigma$	0,082	0,148	0,162	0,182	0,252	0,306	0,366	0,440	0,472	0,508	0,566	0,598	24
$E\sigma$	$\pm 0,009$	$\pm 0,016$	$\pm 0,018$	$\pm 0,020$	$\pm 0,028$	$\pm 0,035$	$\pm 0,041$	$\pm 0,049$	$\pm 0,053$	$\pm 0,057$	$\pm 0,063$	$\pm 0,067$	20
$h$ moyen	-0,127	-0,193	-0,200	-0,186	-0,114	0,033	0,282	0,603	0,933	1,331	1,730	2,059	Exp. 1-300
$Eh$	$\pm 0,013$	$\pm 0,024$	$\pm 0,025$	$\pm 0,029$	$\pm 0,040$	$\pm 0,049$	$\pm 0,059$	$\pm 0,070$	$\pm 0,075$	$\pm 0,081$	$\pm 0,091$	$\pm 0,095$	n = 18

	$\sigma$	0,122	0,210	0,295	0,352	0,428	0,508	0,577	0,626	0,687	0,768	0,866	1,004	24	20
E $\sigma$	$\pm 0,016$	<b>0,068</b>	<b>-0,135</b>	<b>-0,111</b>	<b>-0,064</b>	<b>-0,045</b>	<b>0,057</b>	<b>0,055</b>	<b>0,065</b>	<b>0,073</b>	<b>0,080</b>	<b>0,098</b>	<b>0,110</b>	<b>0,128</b>	Exp. 601-700.
$h$ moyen	$\pm 0,022$	$\pm 0,038$	$\pm 0,053$	$\pm 0,064$	$\pm 0,077$	$\pm 0,092$	$\pm 0,104$	$\pm 0,113$	$\pm 0,113$	$\pm 0,124$	$\pm 0,138$	$\pm 0,156$	$\pm 0,181$	n = 14	
E $h$	$\pm 0,021$	$\pm 0,033$	$\pm 0,047$	$\pm 0,052$	$\pm 0,061$	$\pm 0,074$	$\pm 0,087$	$\pm 0,105$	$\pm 0,113$	$\pm 0,123$	$\pm 0,123$	$\pm 0,141$	n = 17		
	$\sigma$	0,130	0,200	0,233	0,293	0,320	0,375	0,450	0,528	0,640	0,690	0,747	0,862	24	25
E $\sigma$	$\pm 0,015$	$\pm 0,023$	$\pm 0,027$	$\pm 0,037$	$\pm 0,042$	$\pm 0,044$	$\pm 0,052$	$\pm 0,061$	$\pm 0,074$	$\pm 0,080$	$\pm 0,087$	$\pm 0,100$			
$h$ moyen	$\pm 0,098$	$\pm 0,118$	$\pm 0,106$	<b>-0,099</b>	$0,010$	$0,057$	$0,253$	$0,537$	$0,893$	$1,309$	$1,703$	$2,129$	$2,529$		
E $h$	$\pm 0,021$	$\pm 0,033$	$\pm 0,038$	$\pm 0,047$	$\pm 0,052$	$\pm 0,061$	$\pm 0,074$	$\pm 0,087$	$\pm 0,105$	$\pm 0,113$	$\pm 0,123$	$\pm 0,141$	n = 17		
	$\sigma$	0,072	0,093	0,234	0,297	0,366	0,576	0,717	0,960	1,137	1,323	1,518	1,647	24	30
E $\sigma$	$\pm 0,010$	$\pm 0,012$	$\pm 0,031$	$\pm 0,039$	$\pm 0,049$	$\pm 0,077$	$\pm 0,096$	$\pm 0,127$	$\pm 0,150$	$\pm 0,175$	$\pm 0,201$	$\pm 0,218$			
$h$ moyen	$\pm 0,143$	$\pm 0,185$	$\pm 0,196$	$\pm 0,175$	<b>-0,134</b>	$0,025$	$0,248$	$0,504$	$0,785$	$1,073$	$1,391$	$1,645$			
E $h$	$\pm 0,013$	$\pm 0,017$	$\pm 0,043$	$\pm 0,056$	$\pm 0,069$	$\pm 0,108$	$\pm 0,135$	$\pm 0,180$	$\pm 0,213$	$\pm 0,248$	$\pm 0,284$	$\pm 0,308$	n = 13		
	$\sigma$	0,061	0,126	0,185	0,245	0,328	0,398	0,458	0,533	0,604	0,704	0,774	0,861	27	15
E $\sigma$	$\pm 0,008$	$\pm 0,017$	$\pm 0,024$	$\pm 0,032$	$\pm 0,043$	$\pm 0,053$	$\pm 0,061$	$\pm 0,071$	$\pm 0,080$	$\pm 0,093$	$\pm 0,102$	$\pm 0,114$			
$h$ moyen	$\pm 0,007$	$\pm 0,015$	$\pm 0,046$	$0,012$	$0,135$	$0,285$	$0,485$	$0,750$	$0,992$	$1,281$	$1,550$	$1,835$			
E $h$	$\pm 0,011$	$\pm 0,024$	$\pm 0,035$	$\pm 0,046$	$\pm 0,061$	$\pm 0,074$	$\pm 0,086$	$\pm 0,100$	$\pm 0,113$	$\pm 0,132$	$\pm 0,145$	$\pm 0,161$	n = 13		
	$\sigma$	0,090	0,122	0,167	0,245	0,339	0,370	0,452	0,551	0,633	0,701	0,786	0,841	27	20
E $\sigma$	$\pm 0,011$	$\pm 0,015$	$\pm 0,020$	$\pm 0,029$	$\pm 0,040$	$\pm 0,044$	$\pm 0,054$	$\pm 0,066$	$\pm 0,075$	$\pm 0,084$	$\pm 0,094$	$\pm 0,100$			
$h$ moyen	$\pm 0,025$	$0,028$	$0,075$	$0,125$	$0,216$	$0,387$	$0,603$	$0,862$	$1,166$	$1,509$	$1,831$	$2,206$			
E $h$	$\pm 0,015$	$\pm 0,021$	$\pm 0,028$	$\pm 0,041$	$\pm 0,057$	$\pm 0,062$	$\pm 0,076$	$\pm 0,093$	$\pm 0,107$	$\pm 0,118$	$\pm 0,133$	$\pm 0,142$	n = 16		
	$\sigma$	0,096	0,155	0,186	0,222	0,232	0,305	0,379	0,440	0,516	0,633	0,752	0,822	27	25
E $\sigma$	$\pm 0,010$	$\pm 0,017$	$\pm 0,028$	$\pm 0,024$	$\pm 0,047$	$\pm 0,055$	$\pm 0,068$	$\pm 0,080$	$\pm 0,094$	$\pm 0,105$	$1,487$	$1,902$	$2,305$		
$h$ moyen	$\pm 0,112$	$\pm 0,097$	$\pm 0,072$	<b>-0,035</b>	$0,047$	$0,212$	$0,470$	$0,770$	$1,105$	$1,487$	$1,902$	$2,305$			
E $h$	$\pm 0,014$	$\pm 0,023$	$\pm 0,020$	$\pm 0,035$	$\pm 0,033$	$\pm 0,057$	$\pm 0,066$	$\pm 0,078$	$\pm 0,095$	$\pm 0,113$	$\pm 0,124$	$\pm 0,124$	n = 20		

avoir des moyennes d'un nombre un peu grand d'expériences, les groupes de températures vont de 3 en 3 degrés et ceux de longueurs de 5 en 5 millimètres. Par exemple, la catégorie 24°, 25 mm. comprend toutes les expériences faites entre 22°,5 et 25°,5 avec des plantes de 22,5 mm. à 27,5 mm. de longueur.

Dans chacune de ces catégories température-longueur, j'ai calculé la déviation moyenne  $h$  et l'index de variabilité  $\sigma$  des valeurs de  $h$  ainsi que les erreurs probables de  $h$  et de  $\sigma$ . Les résultats de ces calculs sont consignés dans le tableau VIII; j'ai indiqué dans la colonne des températures le nombre  $n$  d'expériences comprises dans la catégorie. Je n'ai effectué les calculs que pour les catégories comprenant au moins 10 expériences ; les valeurs négatives de  $h$  moyen sont imprimées en caractères gras.

Dans le graphique suivant (fig. 7), j'ai porté en ordonnées, pour chacun des intervalles de temps les index de variabilité  $\sigma$ ; de part et d'autre de la courbe des  $\sigma$ , j'ai dessiné une ligne distante, en chaque point, du double de l'erreur probable de  $\sigma$ , ce qui permet d'apprecier le degré d'exactitude. Je rappelle qu'il y a 4,5 chances contre 1 que la vraie valeur de  $\sigma$  est bien comprise entre  $+ 2E$  et  $- 2E$ .

On voit nettement l'augmentation de la variabilité avec la température ainsi qu'avec la longueur de la plante.

En comparant ces courbes avec celles des mêmes catégories température-longueur lorsque la plante était observée en position verticale (fig. 4), c'est-à-dire sans être soumise au géotropisme, on voit que les index de variabilité sont beaucoup plus grands, ce qui indique qu'en plus de la variabilité due à la nutation et aux erreurs accidentelles, intervient la variabilité de la sensibilité géotropique et de la faculté de réagir.

Pour rendre plus apparente cette augmentation de la variabilité et pour permettre de comparer la variabilité de

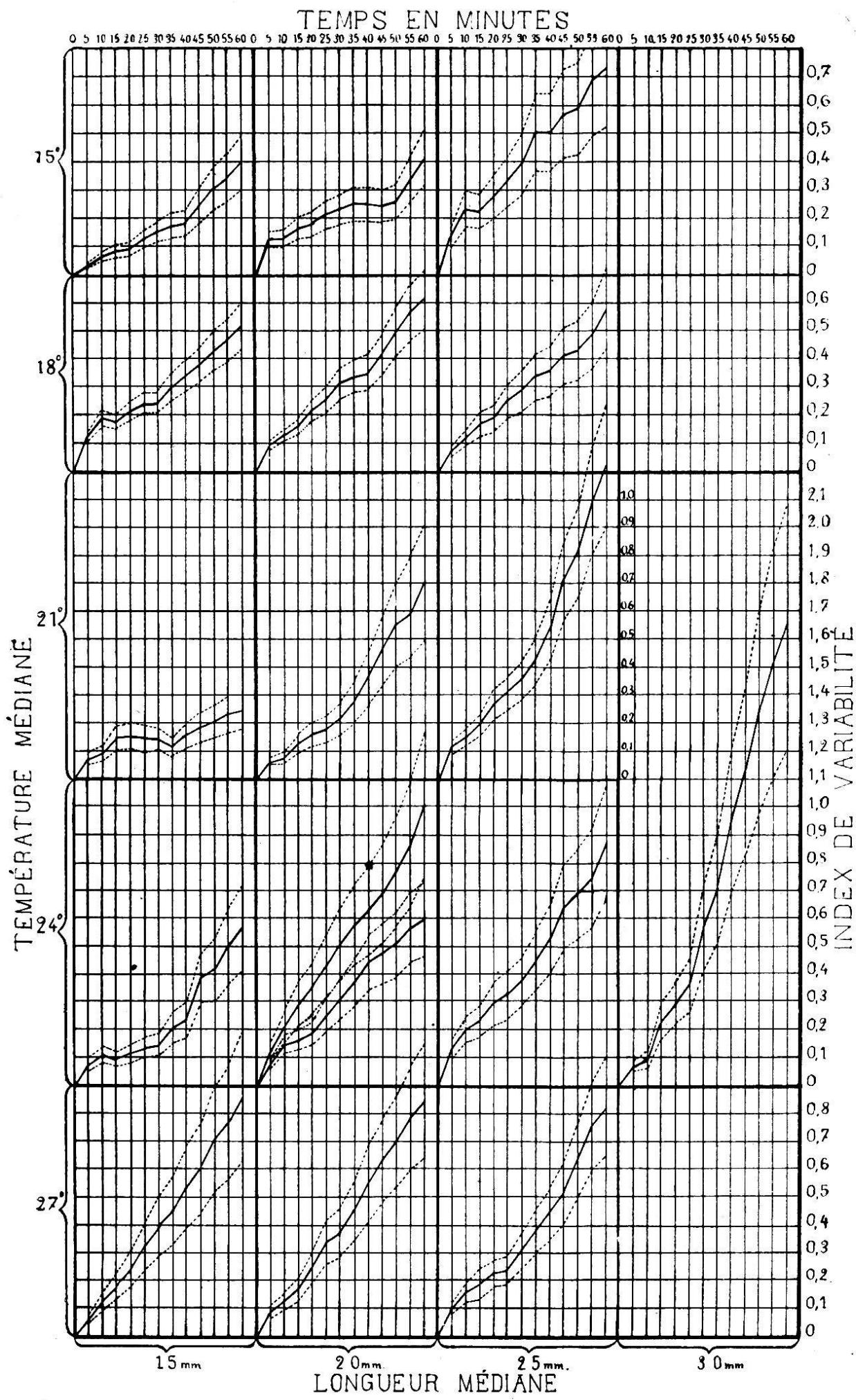


Fig. 7.

$h$  des plantes observées en position horizontale avec celle des plantes verticales, j'ai établi le tableau IX des fréquences des déviations en réunissant les 400 expériences ; dans le tableau IX les fréquences sont rapportées à 400 expériences tandis que le tableau V donne les fréquences en % ; ceci pour gagner de la place en évitant les décimales ; pour comparer les deux séries, il suffit de diviser les chiffres du tableau IX par 4.

Le stéréogramme (fig. 8) représente la répartition des déviations aux différents moments. On voit à première vue que les polygones de variation sont tous plus étalés que leurs homologues de la figure 5, preuve de la plus grande variabilité des déviations.

Ce stéréogramme montre en outre d'une façon très nette que les plantes commencent par se courber vers le bas puis qu'au bout d'un certain temps elles se redressent et se courbent vers le haut ; en effet, le polygone correspondant à 5 minutes, s'il a son sommet sur la déviation zéro, est cependant fortement asymétrique vers les déviations négatives ; ce qui indique que  $h$  moyen est négatif ; l'asymétrie vers les déviations négatives se remarque pour les temps 5, 10, 15 et 20 minutes ; les polygones suivants sont asymétriques du côté des déviations positives ; ce qui indique que la courbure se fait vers le haut.

On voit également qu'un certain nombre de plantes, au bout de 5 minutes, se sont courbées vers le haut ; d'autres n'ont effectué aucun mouvement ; ces faits s'expliquent tout simplement parce que pour ces plantes la nutation se faisait en sens inverse de la courbure vers le bas ; pour les fortes déviations vers le bas, la nutation se faisait probablement dans le même sens que la courbure due à la pesanteur.

Même remarque, si l'on examine le polygone de variation au bout de 60 minutes ; un certain nombre de plantes sont encore courbées vers le bas ou bien, après s'être cour-

**TABLEAU IX**

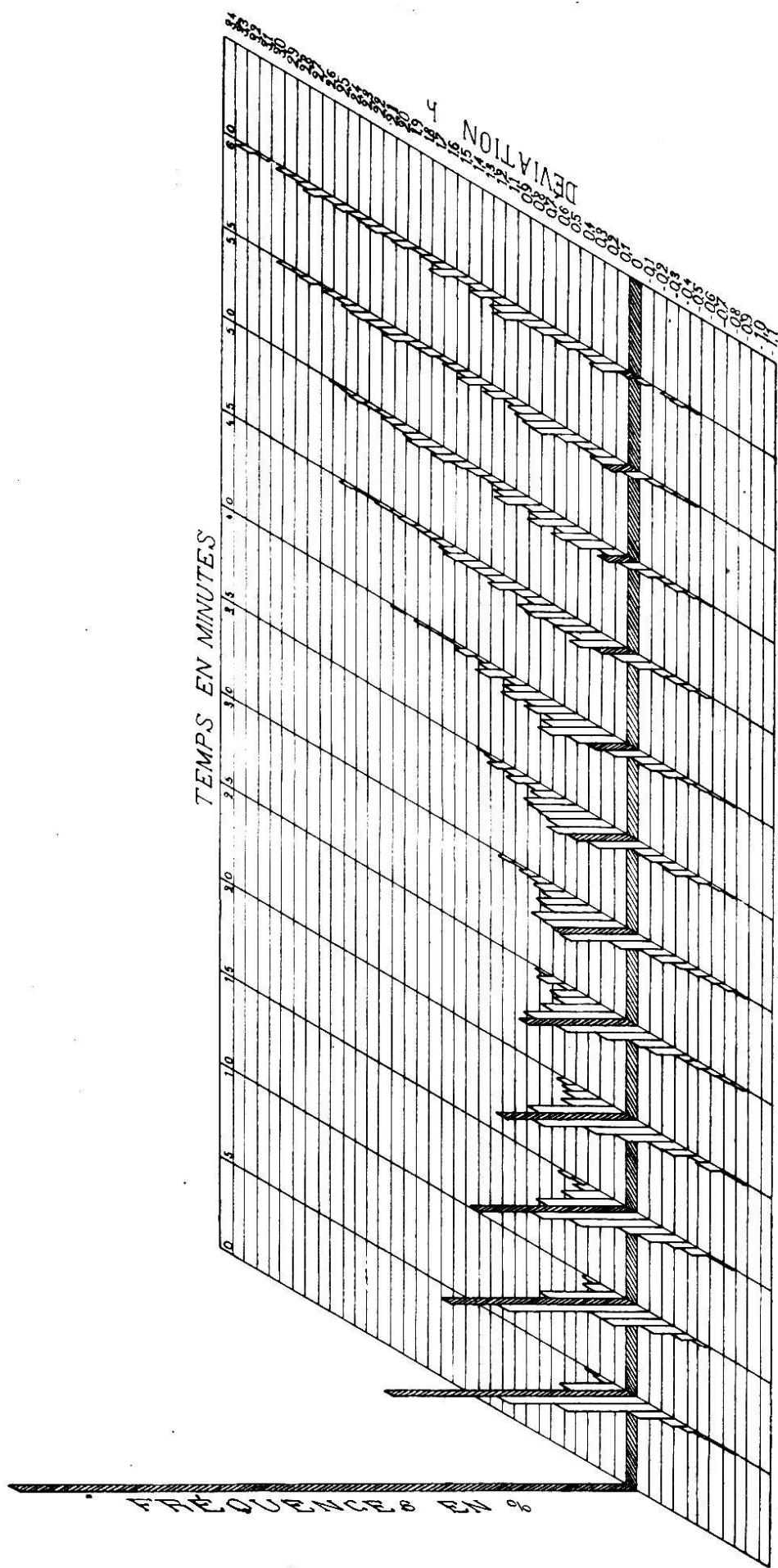


Fig. 8.

bées vers le haut, se sont dirigées ensuite en sens inverse, parce que le mouvement de nutation contrariait le mouvement géotropique.

Le même stéréogramme montre pourquoi je n'ai pas fait mes expériences durant plus d'une heure; la variabilité au bout de ce temps est si grande qu'à moins de faire des milliers d'expériences, l'erreur probable est trop grande pour que les valeurs moyennes aient encore une signification. L'irrégularité des derniers polygones est déjà un indice qu'il est inutile de poursuivre plus loin. Du reste, au bout d'une heure, la courbure est déjà trop forte pour qu'on ait le droit de considérer la plante comme placée horizontalement; l'effet de la pesanteur tend donc à diminuer, et, par suite du peu de certitude qui règne sur la question de savoir quelle région est surtout le siège de la sensibilité géotropique et des différences qui existent entre les positions des différentes plantes, il n'est pas possible de faire une correction tenant compte de la diminution de l'action du géotropisme. Au reste, vu l'erreur probable considérable, le poids de la moyenne de  $h$  au bout d'une heure est de 7 à 150 fois plus petite que le poids de la moyenne de  $h$  au bout de 60 minutes; (plus la température et par conséquent la vitesse de courbure sont grandes, plus il y a de différence entre le poids des valeurs moyennes de  $h$ ) si bien que lorsque la température permet une courbure rapide, les moyennes de  $h$  au bout de 45, 50, 55 et 60 minutes ne jouent qu'un rôle très minime dans le calcul des constantes  $a$  et  $b$ .

Reportons-nous au tableau VIII; nous y voyons que la valeur de  $h$  moyen commence dans toutes les catégories sauf une ( $15^\circ C$ , 20 mm.) par être négative; au bout de 5 minutes, par exemple, la valeur de  $h$  moyen est

1 fois nulle;

2 fois négative et plus petite que l'erreur probable;

14 fois négative et plus grande que l'erreur probable;

par conséquent, il n'y a pas de doute possible ; les plantes effectuent un mouvement vers le bas ; le déplacement de l'extrémité varie entre 0 mm. et 0,2 mm. ; c'est donc un déplacement faible, mais certain. La figure 9 où j'ai représenté les courbes de la déviation moyenne de toutes les catégories comprenant au moins 10 expériences montre nettement la courbure vers le bas.

Examinons maintenant la courbure des plantes vers le haut ; on peut constater (fig. 9) que toutes les courbes sont nettement concaves du côté de l'axe des  $y$  (ou des déviations) ; par conséquent, il n'y a pas de doute possible, la courbure va en s'accélérant ; aucune de ces courbes ne présentant de point particulier (brisure), il n'y a aucune raison pour admettre que la courbure ne commence qu'au bout d'un certain temps (temps de réaction) ; il est donc logique d'admettre que la courbure vers le haut commence immédiatement mais que ce phénomène est superposé à un autre qui tend à produire une courbure vers le bas ; l'équation qui semble le mieux convenir à ces courbes de la déviation moyenne  $h$  est

$$h = at + bt^2$$

c'est-à-dire l'équation d'une parabole<sup>1</sup>.

J'ai calculé les valeurs de  $a$  et de  $b$  pour toutes les catégories température-longueur en tenant compte du poids des valeurs moyennes de  $h$ . Les deux tableaux X et XI, donnent les valeurs de  $a$  et de  $b$  ; dans chaque catégorie de longueur, j'ai placé sur la ligne supérieure les chiffres fournis par les expériences n°s 1 à 300 et sur la ligne inférieure ceux des n°s 601 à 700.

<sup>1</sup> Voir dans *Etude sur la réaction géotropique* les paragraphes suivants : *Signification géométrique et physiologique des valeurs  $a$  et  $b$* , (page 245) ; *Conséquences mathématiques de l'équation  $h = at + bt^2$* , (page 253).

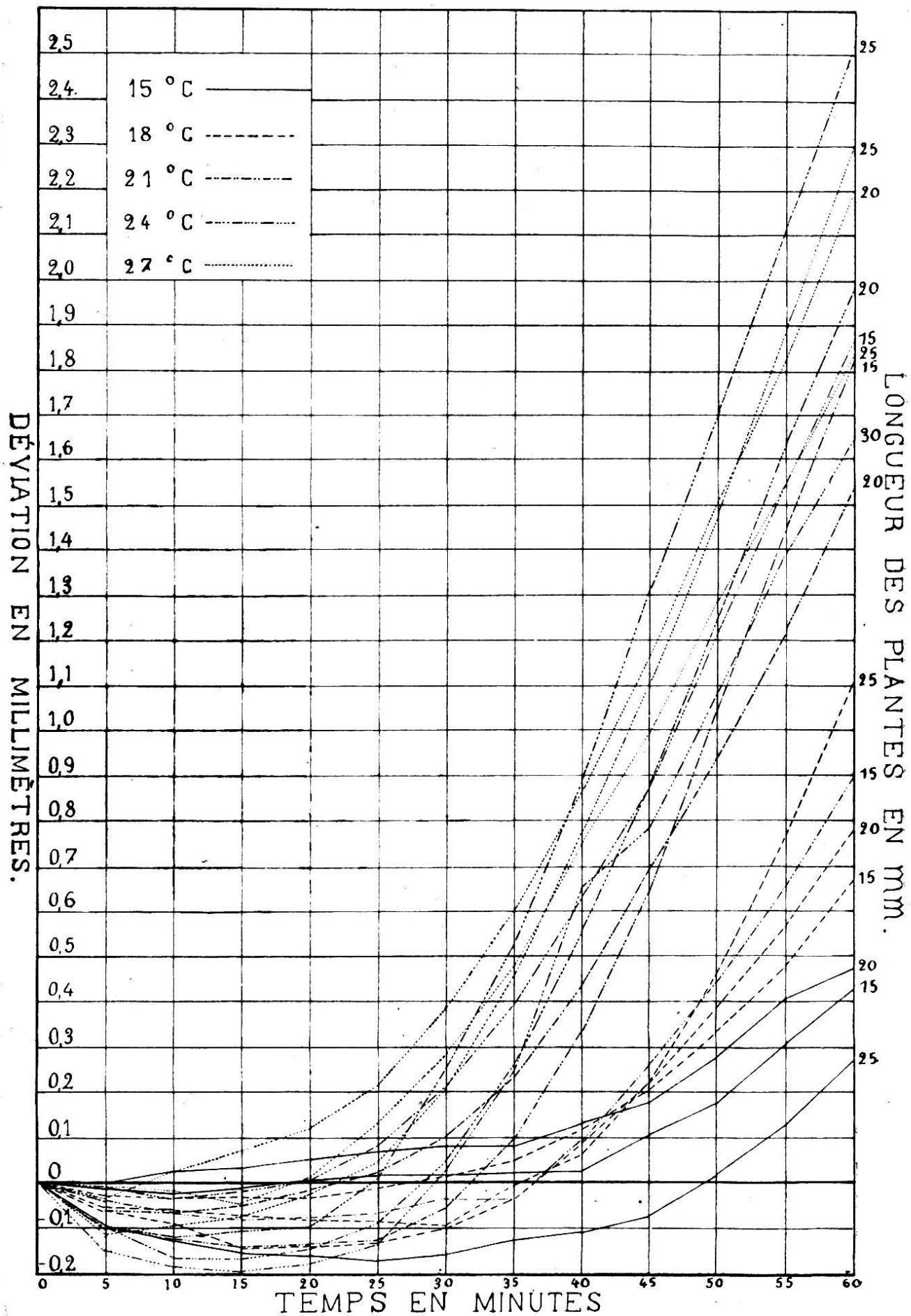


Fig. 9.

**TABLEAU X.** — Valeur de la constante  $a$  en tenant compte du poids des déviations moyennes.

LONGUEUR médiane en millimètres	TEMPÉRATURE MÉDIANE				
	15 degrés	18 degrés	21 degrés	24 degrés	27 degrés
15	-0,0030	-0,0078	-0,0194	-0,0138	-0,0093
20	-0,0003	-0,0127	-0,0130	-0,0314 -0,0233	-0,0069
25	-0,0153	-0,0157	-0,0242	-0,0266	-0,0225
30				-0,0308	

**TABLEAU XI.** — Valeur de la constante  $b$  en tenant compte du poids des déviations moyennes.

LONGUEUR médiane en millimètres	TEMPÉRATURE MÉDIANE				
	15 degrés	18 degrés	21 degrés	24 degrés	27 degrés
15	0,00012	0,00029	0,00055	0,00073	0,00067
20	0,00011	0,00040	0,00062	0,00114 0,00091	0,00072
25	0,00031	0,00051	0,00085	0,00116	0,00103
30				0,00104	

On remarquera que ces tableaux comprennent un nombre plus petit de catégories température-longueur que ceux de 1910 ; cela tient à ce que je n'ai calculé  $a$  et  $b$  que pour les seules catégories comprenant au moins 10 expériences, tandis que dans mon *Etude sur la réaction géotropique* je l'avais fait pour toutes les catégories où j'avais une expérience. Je crois qu'il vaut mieux se restreindre aux valeurs les plus probables ; les déductions qu'on pourra tirer des chiffres seront plus sûres.

On constate que  $a$  est toujours négatif, ce qui confirme

ce que j'ai dit plus haut de la certitude de la courbure vers le bas ;  $a$  est en effet égal à la tangente trigonométrique de l'angle que fait la tangente à la courbe passant par l'origine ;  $a$  négatif indique que la courbe descend puisqu'on ne considère que les temps positifs ; plus  $a$  est grand en valeur absolue plus la courbe descendra rapidement.

La quantité  $b$  est toujours positive ; elle représente l'accélération de la courbure vers le haut.

Pour pouvoir comparer les valeurs de  $a$  et de  $b$  des différentes catégories entre elles, il faut les rapporter à des plantes de même longueur ; comme dans mon *Etude sur la réaction géotropique* j'ai effectué la correction en ramenant  $a$  et  $b$  à la longueur de 10 mm. par les formules

$$a' = \frac{100}{l^2} a \quad b' = \frac{100}{l^2} b$$

où  $l$  est la longueur.

TABLEAU XIII. — Valeur de  $a' = \frac{100}{l^2} a$

LONGUEUR médiane en millimètres	TEMPÉRATURE MÉDIANE				
	15 degrés	18 degrés	21 degrés	24 degrés	27 degrés
15	-0,0013	-0,0035	-0,0086	-0,0061	-0,0041
20	-0,0001	-0,0032	-0,0033	-0,0079 -0,0058	-0,0017
25	-0,0024	-0,0025	-0,0039	-0,0043	-0,0036
30			-0,0034		

On voit les valeurs de  $a'$  augmenter, dans chaque catégorie de longueur, avec la température jusqu'à 24°, puis diminuer nettement ; on pourrait croire qu'il y a une température optimum entre 24° et 27° ; mais remarquons que les expériences à 27° font toutes parties de la seconde sé-

rie d'expériences (n°s 601 à 700), que dans la catégorie 24° 20 mm., le chiffre fourni par la seconde série est plus petit que celui de la première série; il semble donc que la série donne des chiffres plus faibles que la première; j'attribue ce fait à la sécheresse de l'air; en effet les expériences n°s 601 à 700 ont été faites entre le 11 juillet et le 1<sup>er</sup> août 1911, époque mémorable pour sa sécheresse et sa chaleur.  $a'$  ne montre pas de tendance régulière à varier avec la longueur de la plante.

TABLEAU XIII. — Valeur de  $b' = \frac{100}{l^2} b$

LONGUEUR médiane en millimètres	TEMPÉRATURE MÉDIANE				
	15 degrés	18 degrés	21 degrés	24 degrés	27 degrés
15	0,00004	0,00013	0,00018	0,00031	0,00031
20	0,00003	0,00010	0,00015	0,00027 0,00022	0,00017
25	0,00005	0,00006	0,00013	0,00018	0,00016
30				0,00011	

Pour  $b'$ , on constate également une augmentation de sa valeur avec la température et une légère chute à 27°; ic encore, j'attribue le fait à la sécheresse. Dans la figure 9, où j'ai eu soin de représenter les courbes de la déviation moyenne de  $h$  pour chaque température par un trait différent, on voit nettement l'influence de la température sur la courbure et par conséquent sur  $b$  et  $b'$ . Dans le tableau XIII, on constate une assez notable diminution de  $b'$  avec la longueur des plantes; cela tient soit à ce que les coléoptiles en s'allongeant deviennent moins sensibles, soit à ce que les feuilles qui s'allongent dans la coléoptile retardent la courbure, soit à ce qu'une partie seule de la plante est en état de croissance et qu'en faisant la correc-

tion de  $b$  nous avons admis implicitement que toute la plante se courbait également.

On peut se demander si la variation de  $h$  en fonction du temps se fait bien suivant l'équation  $h = -at + bt^2$ ; il est naturellement impossible de démontrer que c'est bien cette parabole qui est la *vraie* courbe; mais on peut démontrer que les écarts entre les valeurs observées et calculées de  $h$  ne dépassent pas les limites permises par la théorie des erreurs.

Pour effectuer cette démonstration, j'ai calculé les valeurs de  $h$  à l'aide de l'équation  $h = -at + bt^2$  et fait la différence entre les valeurs observées et calculées de  $h$ ; la comparaison de cette différence avec l'erreur probable correspondante de  $h$  nous permettra de voir si une parabole de l'équation donnée est adéquate ou si nous aurions mieux fait de choisir un autre type de courbe.

Le tableau XIV donne les résultats de ces calculs; les valeurs négatives de  $\delta = h_{\text{calculé}} - h_{\text{observé}}$  ont été imprimées en caractères gras afin qu'on puisse voir au premier coup d'œil sur le tableau la manière selon laquelle les différences  $\delta$  positives et négatives se répartissent :

Si nous comptons dans le tableau XIV le nombre de fois où la différence  $\delta$  entre les valeurs observées et calculées de  $h$  est plus petite en valeur absolue que l'erreur probable  $E_h$ , nous arrivons au chiffre de 164 contre 40 où  $\delta$  est plus grand que  $E_h$ ; il y a 201 cas contre 3 où  $\delta$  est plus petit que  $2E_h$  et 204 cas contre 0 où  $\delta$  est plus petit que  $3E_h$ , où, en exprimant ces résultats autrement, il y a

4 cas contre 1 où  $\delta < E_h$ .

67 » » 1 »  $\delta < 2 E_h$ .

∞ » » 1 »  $\delta < 3 E_h$ .

alors qu'il n'y a que

1 chance contre 1 que  $h$  soit compris entre  $\pm E_h$ .

4,5 » » 1 »  $h$  » »  $\pm 2 E_h$ .

21 » » 1 »  $h$  » »  $\pm 3 E_h$ .

TABLEAU XIV

	TEMPS EN MINUTES												
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	Temperatur en degrés C.
													Longueur en millim.
$h$ obs.	-0,01	-0,02	-0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,11	0,19	0,31	0,43	15	15
$h$ calc.	-0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,02	0,05	0,12	0,16	0,22	0,27		
$\delta$	0,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,02	0,00	0,03	0,05	0,01	-0,03	-0,09	-0,16	
$E_h$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	
$h$ obs.	0,00	0,03	0,03	0,06	0,07	0,09	0,13	0,18	0,28	0,40	0,47	15	20
$h$ calc.	0,00	0,01	0,02	0,04	0,06	0,10	0,13	0,17	0,24	0,28	0,34	0,40	
$\delta$	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	-0,01	0,01	0,04	0,04	0,06	0,00	-0,06	-0,07	
$E_h$	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,07	
$h$ obs.	-0,10	-0,12	-0,15	-0,16	-0,17	-0,16	-0,12	-0,11	-0,07	0,02	0,13	0,27	15
$h$ calc.	-0,07	-0,12	-0,16	-0,18	-0,19	-0,20	-0,15	-0,11	-0,06	0,01	0,10	0,20	
$\delta$	0,03	0,00	-0,01	-0,02	-0,02	-0,04	-0,03	0,00	0,01	-0,01	-0,03	-0,07	
$E_h$	0,03	0,05	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	
$h$ obs.	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,01	0,01	0,05	0,12	0,20	0,34	0,48	0,67	15
$h$ calc.	-0,03	-0,05	-0,05	-0,04	-0,01	0,03	0,09	0,16	0,24	0,34	0,46	0,58	
$\delta$	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,02	0,04	0,04	0,04	0,00	-0,02	-0,09	
$E_h$	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	
$h$ obs.	-0,06	-0,07	-0,08	-0,08	-0,07	-0,03	-0,03	0,09	0,22	0,39	0,57	0,77	18
$h$ calc.	-0,05	-0,09	-0,10	-0,09	-0,07	-0,02	0,04	0,13	0,24	0,36	0,51	0,68	
$\delta$	0,01	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,04	0,02	-0,03	-0,06	-0,09	
$E_h$	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	

TABLEAU XIV (*suite*)

TEMPS EN MINUTES											Temps en millim. dure en degrés C.	
5	10	15	20	25,	30	35	40	45	50	55		
<i>h</i> obs.	-0,05	-0,06	-0,07	-0,08	-0,09	-0,09	-0,05	0,07	0,22	0,46	0,76	1,11
<i>h</i> calc.	-0,07	-0,11	-0,12	-0,11	-0,07	-0,01	0,07	0,19	0,32	0,49	0,67	0,89
$\delta$	<b>-0,02</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,09</b>	<b>-0,22</b>	
$E_h$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,10	
<i>h</i> obs.	-0,06	-0,08	-0,14	-0,14	-0,13	-0,10	-0,04	0,10	0,26	0,45	0,66	0,90
<i>h</i> calc.	-0,08	-0,14	-0,17	-0,17	-0,14	-0,09	0,00	0,12	0,24	0,42	0,61	0,83
$\delta$	<b>-0,02</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,07</b>	
$E_h$	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	
<i>h</i> obs.	-0,04	-0,06	-0,05	-0,01	0,03	0,10	0,24	0,44	0,69	0,94	1,22	1,55
<i>h</i> calc.	-0,05	-0,07	-0,06	-0,01	0,06	0,16	0,30	0,47	0,66	0,89	1,15	1,44
$\delta$	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,11</b>
$E_h$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,10	0,14
<i>h</i> obs.	-0,10	-0,13	-0,14	-0,13	-0,12	-0,05	0,10	0,34	0,64	1,05	1,46	1,84
<i>h</i> calc.	-0,10	-0,16	-0,17	-0,14	-0,08	0,04	0,19	0,39	0,63	0,91	1,24	1,60
$\delta$	<b>0,00</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,09</b>	<b>0,09</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,14</b>	<b>-0,22</b>	<b>-0,24</b>
$E_h$	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,10	0,11	0,14	0,15
<i>h</i> obs.	0,00	-0,04	-0,02	0,00	0,09	0,22	0,40	0,63	0,89	1,22	1,54	1,86
<i>h</i> calc.	-0,05	-0,06	-0,03	0,02	0,12	0,25	0,43	0,63	0,88	1,16	1,47	1,83
$\delta$	<b>-0,05</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,03</b>
$E_h$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,11
<i>h</i> obs.	-0,07	-0,14	-0,13	-0,11	-0,06	0,06	0,24	0,51	0,81	1,16	1,54	1,92
<i>h</i> calc.	-0,09	-0,14	-0,14	-0,10	-0,01	0,02	0,30	0,53	0,80	1,11	1,48	1,89
$\delta$	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,03</b>
$E_h$	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,16	0,18

Expériences  
n° 601-700

20

										20 Expériences			
										n° 1-300			
<i>h</i>	obs.	-0,13	-0,19	-0,20	-0,19	-0,11	0,13	0,28	0,60	0,93	1,33	1,73	2,06
<i>h</i>	calc.	-0,13	-0,20	-0,22	-0,17	-0,08	0,08	0,29	0,56	0,89	1,27	1,71	2,21
$\delta$		0,00	-0,01	-0,02	0,02	0,03	-0,05	0,01	-0,04	-0,06	-0,02	-0,15	-0,10
Eh		0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
<i>h</i>	obs.	-0,10	-0,12	-0,11	-0,10	0,01	0,25	0,54	0,89	1,31	1,70	2,13	2,53
<i>h</i>	calc.	-0,10	-0,15	-0,14	-0,07	0,06	0,25	0,49	0,79	1,15	1,57	2,04	2,58
$\delta$		0,00	-0,03	-0,03	0,03	0,05	0,00	-0,05	-0,10	-0,16	-0,13	-0,09	0,05
Eh		0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,12	0,14
<i>h</i>	obs.	-0,14	-0,19	-0,20	-0,18	-0,13	0,03	0,25	0,50	0,79	1,07	1,39	1,65
<i>h</i>	calc.	-0,13	-0,20	-0,23	-0,20	-0,12	-0,01	0,20	0,43	0,72	1,06	1,46	1,90
$\delta$		0,01	-0,01	-0,03	-0,02	0,01	-0,04	-0,05	-0,07	-0,07	-0,01	0,07	0,25
Eh		0,01	0,02	0,02	0,04	0,06	0,07	0,11	0,14	0,18	0,21	0,25	0,31
<i>h</i>	obs.	-0,01	-0,02	-0,05	0,01	0,14	0,29	0,49	0,75	0,99	1,28	1,55	1,84
<i>h</i>	calc.	-0,03	-0,03	0,01	0,08	0,18	0,33	0,50	0,70	0,94	1,21	1,52	1,86
$\delta$		-0,02	-0,01	0,06	0,07	0,04	0,04	0,06	0,05	-0,05	-0,07	-0,03	0,02
Eh		0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09	0,10	0,11	0,13	0,14	0,16
<i>h</i>	obs.	-0,02	0,03	0,08	0,13	0,22	0,39	0,60	0,86	1,17	1,51	1,83	2,21
<i>h</i>	calc.	-0,02	0,00	0,06	0,15	0,28	0,44	0,63	0,87	1,14	1,45	1,79	2,16
$\delta$		0,00	-0,03	-0,02	0,02	0,06	0,05	0,03	0,01	-0,03	-0,06	-0,04	-0,05
Eh		0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,06	0,08	0,09	0,11	0,12	0,13	0,14
<i>h</i>	obs.	-0,11	-0,10	-0,07	-0,03	0,05	0,21	0,47	0,77	1,10	1,49	1,90	2,31
<i>h</i>	calc.	-0,09	-0,11	-0,11	-0,04	0,08	0,25	0,48	0,75	1,07	1,45	1,88	2,27
$\delta$		0,02	-0,01	-0,04	-0,04	0,03	0,04	0,04	0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04
Eh		0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,12

La concordance entre les courbes théoriques et les courbes expérimentales est donc remarquable ; mais il nous reste à étudier la répartition des valeurs positives et négatives de  $\delta$  afin de voir si ces différences sont peut-être systématiquement à la même place dans toutes les catégories température-longueur ; en examinant le tableau XIV on voit que les valeurs négatives de  $\delta$  (imprimées en caractères gras) semblent bien être placées surtout aux deux bords du tableau et être plus rares dans la partie centrale.

Pour élucider la question j'ai fait pour chaque intervalle de temps la somme  $\Sigma \delta$  des différences  $\delta$  de chacune des catégories température-longueur. Les valeurs de  $\Sigma \delta$  sont données par le tableau XV ; les chiffres de la seconde ligne expriment la valeur  $\Sigma \delta$  divisée par le nombre des catégories (17) autrement dit la valeur moyenne de  $\delta$ .

TABLEAU XV

	TEMPS EN MINUTES					
	5	10	15	20	25	30
$\Sigma \delta$	-0,07	-0,33	-0,29	-0,05	0,33	0,27
$\frac{\Sigma \delta}{n}$	-0,004	-0,019	-0,017	-0,003	0,019	0,016
	TEMPS EN MINUTES					
	35	40	45	50	55	60
$\delta$	0,45	0,15	-0,22	-0,64	-0,95	-0,80
$\frac{\Sigma \delta}{n}$	0,026	0,009	-0,013	-0,038	-0,056	-0,047

On voit que  $\delta$ , qui est théoriquement nul au temps zéro, diminue jusqu'à 10 minutes, puis augmente jusqu'à 35 min., où il est positif, pour diminuer ensuite jusqu'à 55 min. et augmenter de nouveau. Les variations de  $\delta$  sont graduelles et semblent indiquer qu'un mouvement d'oscillation, peut être dû au choc qui se produit lorsqu'on place

la plante dans l'appareil, se superpose aux courbures dues à la pesanteur. Cette oscillation est du reste très faible (voir les valeurs de  $\frac{\Sigma \delta}{n}$ ) et les écarts entre les valeurs observées de  $h$  et les valeurs calculées sont bien plus petits que l'erreur probable.

Nous pouvons donc conclure que la variation en fonction du temps de la déviation  $h$  de l'extrémité d'une plante d'avoine exposée horizontalement pendant toute la durée de l'expérience est *très bien* représentée par une parabole de la forme.

$$h = -at + bt^2$$

### Le « temps de réaction ».

Lors de mes premières expériences sur la réaction géotropique, j'avais pris soin de noter le moment où la plante d'avoine placée horizontalement commençait à présenter une courbure visible à l'œil nu. Je faisais cet examen immédiatement après la visée au cathétomètre, c'est-à-dire toutes les 5 minutes. Le « temps de réaction » était ainsi déterminé à 5 minutes près.

Dans le tableau XVI, les colonnes donnent : la 1<sup>re</sup> le numéro de l'expérience, ce qui permettra au lecteur de se reporter au protocole<sup>1</sup>; la 2<sup>me</sup>, intitulée R, le « temps de réaction » en minutes ; la 3<sup>me</sup>,  $h_R$  la déviation du sommet de la plante, par rapport à sa position au début de l'expérience, au bout du temps R; la 4<sup>me</sup>  $h_{\min}$ . indique la déviation au point le plus bas atteint par la plante; la 5<sup>me</sup>  $h_R - h_{\min}$ , la différence entre les chiffres des deux colonnes précédentes ; on verra plus loin l'intérêt de ces valeurs. Enfin les deux dernières colonnes donnent les températures en degrés C et la longueur des plantes en mm.

<sup>1</sup> Bull. Soc. vaud. Sc. nat., vol. XLVI, 1940, p. 416 et suiv.

TABLEAU XVI

N°	Temps de réaction	$h_R$	$h$ min.	$h_R - 2h$ min.	Température	Long.
1	50	1,0	0,0	1,0	17	15
2	60	1,1	0,0	1,1	17	24
3	65	0,8	0,0	0,8	17	15
4	55	0,3	-0,1	0,5	16	25
5	70	1,5	0,0	1,5	16	18
6	55	0,3	-0,4	1,1	17	22
7	85	1,4	-0,1	1,6	16	24
8	95	0,7	-0,3	1,3	15	18
9	55	1,2	0,0	1,2	14	23
10	105	1,2	-1,4	4,2	18	55
11	55	0,7	0,0	0,7	17	30
12	55	0,9	-0,2	1,3	17	18
13	65	0,9	0,0	0,9	18	12
14	60	0,9	0,0	0,9	18	22
15	35	0,5	-0,1	0,7	18	10
16	65	0,3	-0,6	1,5	17	42
17	45	0,5	-0,8	2,1	19	50
18	35	0,7	0,0	0,7	19	18
19	60	2,7	-0,6	3,9	19	50
20	50	-0,1	-0,6	1,1	19	29
21	55	0,8	0,0	0,8	19	32
23	50	0,9	-0,1	1,1	17	20
24	70	0,9	-0,5	1,9	19	17
25	55	1,7	0,0	1,7	19	25
26	50	0,9	-0,1	1,1	18	15
27	45	1,5	0,0	1,5	19	17
28	60	0,2	-0,3	0,8	19	18
29	40	1,7	-0,35	2,4	22	30
30	40	0,0	-0,5	1,0	19	30
31	50	0,15	0,0	0,1	19	14
32	50	1,35	0,15	1,7	19	29
33	50	0,55	-0,35	1,2	20	24
34	55	2,1	0,0	2,1	21	31
35	40	0,4	-0,4	1,2	20	30
36	55	0,6	-0,5	1,6	19	24
37	55	1,3	0,0	1,3	21	12
38	50	1,0	0,0	1,0	18	22
39	45	0,9	0,0	0,9	19	25
40	70	0,2	-0,5	1,2	16	40
41	75	1,3	0,0	1,3	17	13
42	75	1,0	-0,2	1,4	15	23
44	75	0,85	0,0	0,8	15	20
45	65	0,95	-0,15	1,3	17	16
46	65	1,2	0,0	1,2	18	15
47	55	0,55	-0,05	0,7	18	12
48	60	0,35	0,0	0,3	17	13
49	65	0,6	0,0	0,6	15	17
50	55	0,85	0,0	0,8	15	21

N°	Temps de réaction	$h_R$	$h$ min.	$h_R - 2h$ min.	Température	Long.
51	55	0,5	0,0	0,5	16	18
52	55	-0,1	-0,4	0,7	16	19
53	55	0,25	0,0	0,3	18	14
54	65	1,75	0,0	1,7	17	19
55	50	0,35	0,0	0,3	17	24
56	110	1,4	-0,15	1,7	17	20
58	40	0,2	0,0	0,2	19	15
59	45	-0,15	-0,4	0,7	19	21
60	45	0,9	0,0	0,9	22	37
61	40	0,3	0,0	0,3	22	15
62	35	0,15	-0,1	0,4	22	19
63	35	0,45	-0,15	0,7	21	25
64	40	1,05	0,0	1,1	22	30
66	35	0,95	0,0	0,9	23	23
67	40	0,05	-0,5	0,7	22	16
68	40	0,15	-0,15	0,4	22	18
69	60	0,85	-0,25	1,4	22	17
70	50	-0,25	-0,75	1,8	20	34
71	35	0,75	-0,1	1,0	20	21
72	30	-0,2	-0,45	0,7	20	23
73	40	-0,2	-0,6	1,0	20	27
74	30	-0,2	-0,25	0,3	25	27
75	40	0,8	-0,15	1,1	26	20
76	40	0,65	-0,05	0,8	26	27
77	40	0,1	-0,25	0,6	23	28
78	30	0,0	-0,25	0,5	24	28
79	40	0,4	0,0	0,4	25	25
80	45	-1,3	-1,3	1,3	25	29
81	30	0,6	0,0	0,6	25	25
82	30	0,0	-0,25	0,5	24	29
83	40	0,2	-0,1	0,4	22	24
84	35	0,7	0,0	0,7	22	25
86	25	0,65	-0,05	0,8	24	25
87	30	1,0	0,0	1,0	24	26
88	35	0,5	-0,4	1,3	24	35
89	45	1,35	0,0	1,4	26	19
90	20	-0,25	-0,3	0,3	26	21
91	30	0,8	-0,1	1,0	25	22
93	30	0,4	0,0	0,4	25	19
94	25	-0,45	-0,5	0,6	26	19
95	25	-0,15	-0,4	0,6	27	29
96	20	0,3	0,0	0,3	25	19
97	40	-0,3	-0,6	0,9	26	33
98	50	-0,35	-0,45	0,5	26	28
99	35	0,0	-0,45	0,9	25	44
100	50	-0,35	-1,25	2,1	25	37
101	50	0,85	-0,1	1,1	26	17
102	35	0,2	-0,1	0,4	23	17
103	60	0,65	0,0	0,7	23	15
104	60	0,3	-0,15	0,6	23	30

N°	Temps de réaction	$h_R$	$h \text{ min.}$	$h_R - 2h \text{ min.}$	Température	Long.
105	30	0,05	-0,25	0,6	23	26
106	35	0,8	0,0	0,8	21	31
107	50	1,15	0,0	1,2	21	12
108	40	0,6	-0,1	0,8	22	18
109	45	0,65	-0,15	0,9	25	14
110	35	-0,5	-0,55	0,6	25	19
111	30	-0,7	-0,75	0,8	23	22
112	35	0,55	-0,1	0,8	23	22
113	40	0,25	0,0	0,2	23	17
114	45	0,9	-0,3	1,5	23	20
115	60	0,95	-0,85	2,7	23	37
116	30	0,5	-0,15	0,8	22	27
117	40	0,2	-0,50	1,2	23	33
118	30	-1,1	-1,35	1,6	23	42
119	55	0,15	-0,25	0,6	24	30
120	35	0,0	-0,2	0,4	22	33
121	35	-0,1	-0,25	0,4	22	26
122	45	-0,65	-0,7	0,8	22	33
123	25	0,45	-0,05	0,5	21	34
124	35	-0,15	-0,2	0,3	24	22
125	25	0,15	-0,2	0,5	24	29
126	55	0,0	-0,45	0,9	21	31
127	40	0,3	-0,05	0,4	21	23
129	20	0,1	0,0	0,1	21	16
131	50	0,0	-0,45	0,9	19	23
133	45	1,05	-0,05	1,1	21	23
134	20	-0,15	-0,25	0,4	23	21
135	20	-0,45	-0,45	0,5	23	32
136	30	0,2	-0,1	0,4	23	21
137	30	-0,75	-0,85	0,9	23	42
138	30	0,2	-0,1	0,4	23	31
140	30	0,1	-0,2	0,5	22	22
141	30	0,05	-0,2	0,5	22	21
142	35	0,35	-0,15	0,6	22	25
143	35	0,8	0,0	0,8	22	23
145	35	0,3	-0,05	0,4	23	18
146	35	0,3	-0,1	0,5	23	18
147	35	0,35	0,0	0,4	23	23
149	35	0,05	-0,3	0,6	25	20
150	35	0,25	-0,25	0,8	24	19
151	40	0,5	-0,3	1,1	24	19
152	30	0,45	-0,1	0,6	24	26
154	35	0,35	-0,55	1,5	25	22
156	30	-2,2	-2,4	2,6	26	42
157	45	0,7	-0,5	1,7	26	35
158	20	0,2	-0,1	0,4	26	22
159	40	0,15	-0,1	0,4	26	14
160	40	0,4	0,0	0,4	27	11
161	25	0,05	-0,25	0,5	27	28
162	25	-0,35	-0,4	0,5	26	42

N°	Temps de réaction	$h_R$	$h \text{ min.}$	$h_R - 2h \text{ min.}$	Température	Long.
163	30	0,6	-0,1	0,8	24	21
164	30	-0,1	-0,45	0,8	25	26
165	60	1,55	-0,2	1,9	25	18
166	40	0,8	-0,3	1,4	25	23
167	35	0,2	-0,1	0,4	24	28
168	25	0,0	-0,05	0,1	23	25
169	35	0,5	-0,05	0,6	23	22
170	25	0,25	0,0	0,3	25	21
171	15	0,15	-0,15	0,4	24	31
172	35	0,0	-0,45	0,9	24	24
173	30	0,1	-0,1	0,3	19	23
174	35	0,5	0,0	0,5	20	18
175	25	0,1	-0,4	0,9	22	28
176	35	-0,25	-0,4	0,5	22	27
177	35	-0,5	-0,5	0,5	23	16
178	30	0,3	-0,1	0,5	24	17
179	25	-0,15	-0,2	0,3	23	15
180	35	0,1	-0,1	0,3	21	20
181	55	0,4	-0,15	0,7	21	20
183	35	-0,55	-0,55	0,5	20	24
184	35	0,35	-0,05	0,5	21	26
185	30	0,0	-0,1	0,2	21	27
186	40	0,15	-0,3	0,7	21	21
187	35	0,75	0,0	0,8	21	20
189	45	0,3	0,0	0,3	20	16
190	30	0,2	-0,15	0,5	22	23
192	45	0,8	-0,1	1,0	20	23
193	40	0,4	0,0	0,4	20	23
194	40	0,25	-0,1	0,5	20	19
196	25	-0,2	-0,3	0,4	19	17
197	50	0,5	0,0	0,5	19	15
198	35	0,0	-0,15	0,3	19	23
200	45	0,2	-0,15	0,5	20	13
202	55	0,75	-0,1	0,8	20	23
203	35	-0,6	-0,7	0,8	21	30
204	40	-0,35	-0,5	0,7	20	27
205	45	0,0	-0,05	0,1	21	21
207	45	0,05	-0,35	0,7	19	19
210	50	0,0	-0,05	0,1	18	16
212	40	0,2	0,0	0,2	18	15
214	40	0,5	-0,05	0,6	19	22
215	50	0,05	0,0	0,1	16	16
216	50	0,15	-0,2	0,5	16	15
217	45	0,2	-0,2	0,6	18	21
219	45	0,1	-0,15	0,4	18	13
220	35	0,1	-0,15	0,4	19	21
222	55	1,15	-0,1	1,4	19	22
224	55	0,45	0,0	0,4	17	17
225	55	0,2	-0,7	1,6	17	32

Pour étudier la variation du « temps de réaction » avec la longueur des plantes et avec la température, j'aurais pu pratiquer comme je l'ai fait pour l'étude des déviations, c'est-à-dire, former des catégories température-longueur. Mais cette méthode aurait entraîné de longs calculs, et comme la question du temps de réaction n'est pour moi qu'accessoire, je me suis contenté de réunir d'abord les expériences en catégories de température sans m'inquiéter de la longueur des plantes, je ferai ensuite la même opération pour les longueurs. Cette manière de faire suppose implicitement que la longueur des plantes varie au hasard et n'est pas en corrélation avec la température. Un tableau de corrélation que je ne donne pas ici m'a montré que c'était approximativement le cas.

Le tableau XVII est à double entrée, une pour la température, l'autre pour le temps de réaction ; les chiffres des colonnes indiquent la fréquence des temps de réaction, c'est-à-dire le nombre de fois qu'un temps de réaction afférent à telle ou telle catégorie a été observé.

TABLEAU XVII

Tempéra-ture en degrés C.	TEMPS DE RÉACTION EN MINUTES									
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
14	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—
15	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—
16	—	—	—	—	—	—	—	2	3	—
17	—	—	—	—	—	—	—	3	5	2
18	—	—	—	—	1	1	2	3	2	1
19	—	—	1	1	3	3	5	5	4	2
20	—	—	—	1	3	5	3	2	1	—
21	—	1	1	1	6	2	2	1	4	—
22	—	—	1	4	7	7	2	—	—	1
23	—	2	2	6	8	3	1	—	—	3
24	1	—	2	6	5	1	—	—	1	—
25	—	1	1	6	4	2	2	1	—	1
26	—	2	2	1	—	4	2	2	—	—
27	—	—	2	—	—	1	—	—	—	—

Un petit nombre de plantes présentaient un temps de

réaction plus grand que 60 minutes, je ne les ai pas fait figurer dans ce tableau ; mais j'en ai tenu compte pour le calcul des temps moyens de réaction.

Pour chaque température, j'ai calculé le temps moyen de réaction, l'index de variabilité et l'erreur probable du temps de réaction. Les résultats de ces calculs sont donnés dans le tableau XVIII.

TABLEAU XVIII

Température en degrés C.	Temps de réaction en minutes	Index de variabilité en minutes	Erreur probable en minutes	Nombre d'expériences
14	55	indéterminable.	indéterminable.	1
15	72,5	14,8	5	4
16	61,2	11,6	2,8	8
17	58,3	6,2	1,1	15
18	51,3	8,9	1,7	12
19	46,6	10,1	1,3	25
20	41,7	6,5	1,1	15
21	40,3	10,3	1,6	18
22	37,5	7,4	1,1	22
23	35,8	10,5	1,4	25
24	30,2	8,1	1,3	16
25	35,8	9,3	1,5	18
26	36,2	10,4	1,9	13
27	30,0	7,1	2,8	3

Dans le graphique de la fig. 10, j'ai porté en abscisses les températures et en ordonnées les temps de réaction moyens correspondants ; ces points sont joints par une ligne pleine ; de part et d'autre de ces valeurs, j'ai porté le double de leur erreur probable et joint les points ainsi obtenus par un trait pointillé. Il y aura 4,5 chances contre une que la courbe représentant réellement la variation du temps de réaction en fonction de la température passera entre les deux traits pointillés. Sur le même graphique j'ai porté pour chaque température l'index de variabilité du temps de réaction.

On voit que le temps de réaction diminue avec l'aug-

mentation de la température du moins dans les limites des expériences ( $14^{\circ}$  à  $27^{\circ}$ ) ; la diminution se ralentit au fur et à mesure que la température augmente et tout fait prévoir qu'on se rapproche d'une température optimum.

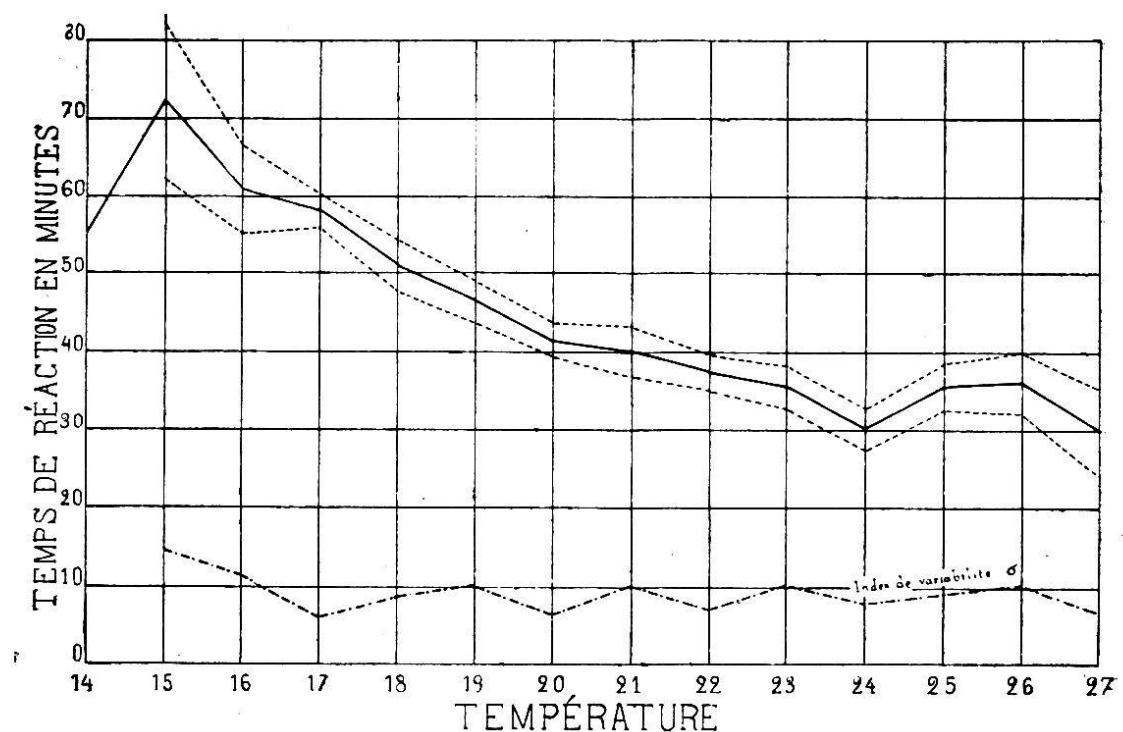


Fig. 10.

L'index de variabilité du temps de réaction ne semble présenter que des variations irrégulières, par conséquent l'on peut dire qu'entre  $14^{\circ}$  et  $27^{\circ}$ , la détermination du temps de réaction se fait avec la même précision à toutes les températures.

En effectuant 25 expériences à une même température, on aura une erreur probable comprise entre 1 et 2 minutes, erreur remarquablement faible puisqu'on ne peut raisonnablement déterminer le temps de réaction individuel de chaque plante que par intervalle de 5 minutes.

Calculons maintenant les temps de réaction moyens en groupant les plantes d'après leur longueur. Les résultats sont réunis dans le tableau XIX.

TABLEAU XIX

Longueur médiane en millimètres	Temps de réaction en minutes	Index de variabilité en minutes	Erreur probable en minutes	Nombre d'expériences
10	45,7	14,0	3,6	7
15	47,5	10,4	1,1	42
20	43,4	16,3	1,4	59
25	40,9	12,2	1,2	51
30	39,5	12,3	1,6	28
35	44,1	8,5	1,7	11
40	41,7	18,4	5,1	6
45	35,0	indéterminable.	indéterminable.	1
50	52,5	7,5	3,6	2
55	105,0	indéterminable.	indéterminable.	1

Dans le graphique de la figure 11, les longueurs des plantes ont été portées en abscisses et le temps de réaction moyen correspondant en ordonnées. De part et d'autre de la ligne des temps de réaction j'ai dessiné la ligne placée à une distance égale au double de l'erreur probable.

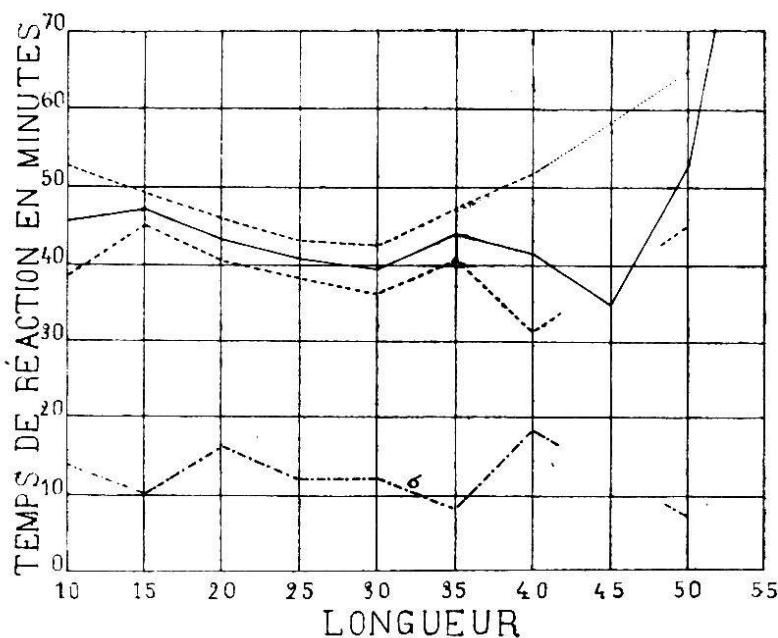


Fig. 11.

Le temps de réaction diminue d'abord légèrement quand la longueur de la plante augmente, puis à partir d'une certaine longueur (45 mm.) le temps de réaction semble croître.

tre de nouveau ; cette seconde phase ne ressort nettement ni dans le tableau XIX ni dans le graphique (fig. 11) ; mais cela est dû au peu d'expériences effectuées avec des plantes de plus de 35 mm. Si l'on réfléchit que dès que les plantes d'avoine ont atteint une certaine longueur et que la coléoptile est percée, elles ne se courbent plus du tout, on peut s'attendre à voir augmenter le temps de réaction avec la longueur, jusqu'à devenir théoriquement infiniment grand.

La légère diminution du temps de réaction avec la longueur entre 10 et 45 mm. s'explique probablement par un phénomène psychologique que nous étudierons plus loin ; c'est que l'œil aperçoit une courbure plus faible chez les plantes longues que chez les plantes courtes.

La courbe représentant la variation du temps de réaction avec la longueur de la plante sera probablement parallèle à l'axe des longueurs ou plutôt légèrement ascendante au début puis montera très rapidement jusqu'à devenir infinie.

Comme il n'y a que 4 expériences avec des plantes de plus de 45 mm. et qu'entre 10 et 45 mm. la courbe est presque une droite, la courbe de la fig. 10 représentant la variation du temps de réaction en fonction de la température peut être considérée comme non entachée d'erreurs systématiques du fait que nous n'avons pas tenu compte de la longueur de la plante.

Il est un côté intéressant de la question, c'est de déterminer à quel moment de la réaction géotropique on commence à apercevoir la courbure ; en d'autres termes, quel est le déplacement  $h$  de l'extrémité de la plante au moment où l'œil perçoit la courbure (temps de réaction) ?

Dans le tableau XVI, les chiffres de la colonne intitulée  $h_r$  donnent la valeur du déplacement au moment où la plante commence à présenter une courbure visible à l'œil nu.

Comme on peut voir,  $h_r$  varie beaucoup ; il présente des

valeurs positives et négatives. J'ai classé toutes les expériences en différents groupes d'après la longueur des plantes (de 5 en 5 millimètres), et calculé la moyenne de  $h_R$  ainsi que l'index de variabilité et l'erreur probable de la moyenne.

TABLEAU XX

Longueur médiane en millimètres	$h_R$ moyen ± erreur prob.	Index de variabilité	Longueur médiane en millimètres	$h_R$ moyen ± erreur prob.	Index de variabilité
10	0,68 ± 0,08	0,27	30	0,26 ± 0,09	0,67
15	0,43 ± 0,05	0,45	35	0,31 ± 0,09	0,44
20	0,44 ± 0,04	0,50	40	0,63 ± 0,23	0,85
25	0,41 ± 0,05	0,48	45	0,06 ± 0,26	0,13

La valeur de  $h$  au temps R semble diminuer avec la longueur des plantes ; ce résultat est assez inattendu ; les plantes les plus longues devraient au contraire montrer une déviation  $h_R$  plus grande que les petites. Soupçonnant que ce fait est dû à la flexion vers le bas qui se produit au début de l'expérience, j'ai essayé d'apporter une correction aux chiffres ci-dessus.

Quand on examine des plantes d'avoine assez longues placées horizontalement, quelques-unes présentent une flexion vers le bas assez considérable pour qu'on puisse observer une courbure ; celle-ci se fait surtout vers la base de la plante exactement comme une flexion purement mécanique mais cette flexion se fait beaucoup plus lentement que celle d'un corps rigide. Tout se passe comme si un frein venait ralentir le mouvement ; très probablement, la flexion provoque un déplacement d'eau qui doit sortir des cellules comprimées et peut-être entrer dans les cellules du côté distendu de la plante ; le freinage serait dû à la résistance opposée à la filtration de cette eau par les membranes protoplasmiques et cellulaires. Il serait possible du reste de trouver d'autres causes à ce freinage du mouvement de flexion.

J'ai montré plus haut que l'on peut représenter la marche de la courbure géotropique par l'équation

$$h = at + bt^2$$

où  $a$  est négatif; nous pouvons poser

$$a = -\alpha, \text{ nous aurons } h = -\alpha t + bt^2$$

Nous pouvons supposer que la déviation  $h$  est la somme de deux déplacements opposés, l'un

$$y_1 = -\alpha t$$

représenterait la flexion vers le bas; cette flexion se ferait avec un mouvement uniforme par suite du freinage, l'autre

$$y_2 = bt^2$$

serait la déviation vers le haut dû au géotropisme. La déviation mesurée étant

$$h = y_1 + y_2 = -\alpha t + bt^2$$

pour passer à la déviation  $y_2$  due vraiment au géotropisme, il faudrait retrancher de  $h$  la quantité

$$y = -\alpha t$$

Mais pour effectuer une correction de cette nature à nos valeurs de  $h$  au temps  $R$ , il faudrait calculer les valeurs de  $a$  et de  $b$  pour les 400 courbes déterminées expérimentalement par la méthode des moindres carrés; cela prendrait un temps considérable; du reste ce serait impossible, la nutation introduisant des causes d'erreurs qui ne

disparaissent qu'en tenant compte de la moyenne d'une série d'expériences.

Soit OAB (fig. 12), la parabole représentant la variation de la déviation  $h$  en fonction du temps  $t$  et

OD une droite tangente à la parabole au point O; l'équation de cette droite est  $y^2 = -\alpha t$ ; elle représente la

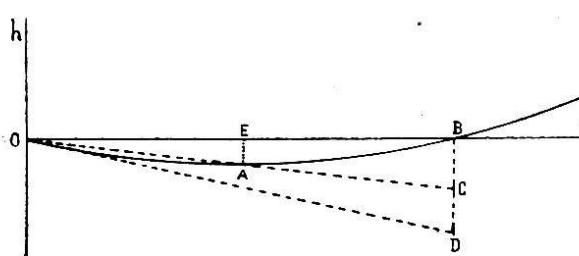


Fig. 12.

part due dans la déviation observée aux déviations vers le bas.

Si nous admettons que le point B où la courbe coupe l'axe des temps est aussi le point où la courbure commence à être visible à l'œil nu, il faudrait ajouter à  $h_R$  la quantité négative mesurée par BD; la courbure étant en général faible, on peut remplacer la tangente OD par la droite OC passant par A, point où la courbe présente la déviation la plus forte vers le bas ( $AE = h$  min.); la correction consisterait à retrancher de  $h_R$  la quantité  $BC = 2 h$  min. Cette correction serait trop faible; mais en général la différence entre BC et BD ne sera pas aussi forte qu'elle ne le paraît sur la figure 12.

Dans le tableau XVI (page 470), la 4<sup>me</sup> colonne donne la valeur de  $h$  min. et la 5<sup>me</sup> celle de  $h_R - 2 h$  min.; cette dernière quantité serait en quelque sorte la mesure approchée de la courbure due au géotropisme seul.

En classant les valeurs de  $h_R - 2 h$  min. d'après la longueur des plantes et en prenant les moyennes, on obtient les résultats suivants (Tableau XXI).

TABLEAU XXI

Longueur médiane en millimètres	$h_R - 2 h$ min. ± erreur probable	Longueur médiane en millimètres	$h - 2h$ min. ± erreur probable
10	0,87 ± 0,08	30	0,89 ± 0,07
15	0,62 ± 0,05	35	1,30 ± 0,14
20	0,79 ± 0,04	45	1,94 ± 0,27
25	0,75 ± 0,07		

Remarquons que les erreurs probables données dans le tableau sont celles de la moyenne de  $h_R - e h$  min. et que l'erreur probable de la déviation moyenne due au seul géotropisme sera forcément plus grande puisque la correction n'est qu'approchée.

Le tableau XXI montre qu'à partir de 15 mm. la quan-

tité  $h_r - 2 h$  min. augmente avec la longueur de la plante ; ce qui est naturel, la coléoptile fonctionnant comme un index, plus elle sera longue plus le déplacement de l'extrémité sera considérable. Il nous faut faire subir à nos résultats une correction en considérant non pas la déviation de l'extrémité de la plante mais sa courbure.

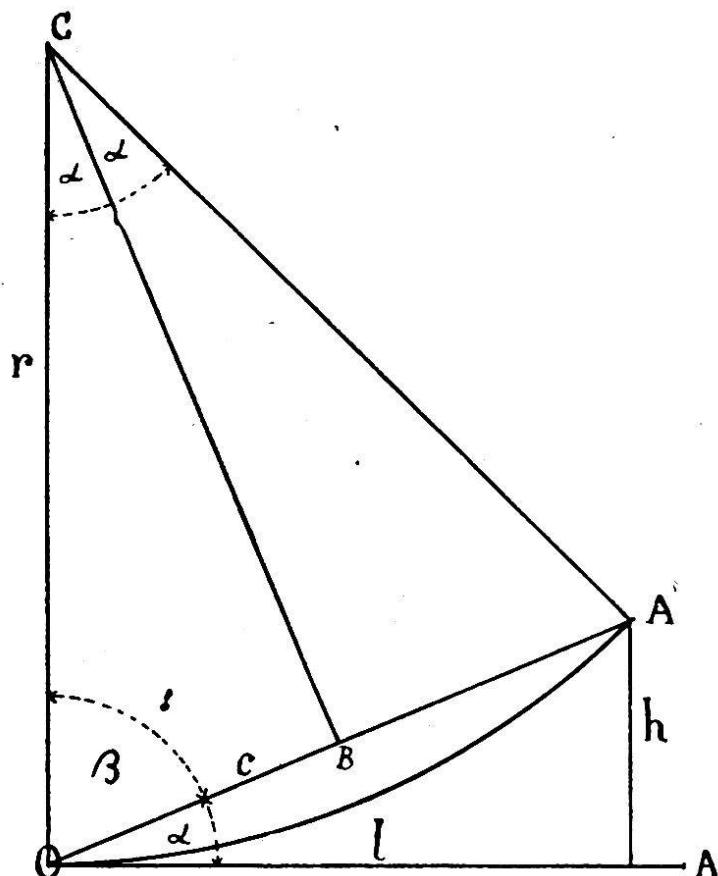


Fig. 13.

Soit  $OA$  (fig. 13) la plante dans sa position initiale et  $OA'$  la même plante après courbure ; soit  $C$  le centre de la courbe  $OA'$  ;  $CO$  est le rayon de courbure ; nous le désignons par  $r$ . Posons en outre  $OA' = 2c$  et  $OA = l =$  longueur de la plante.

Dans le triangle  $OCB$  on a

$$\sin \alpha = \frac{c}{2r} ; \quad 1)$$

dans le triangle  $AOA'$ ,

$$h = c \sin \alpha \quad 2)$$

Pendant une expérience qui ne dure qu'une heure, la courbure est encore assez faible pour qu'on puisse poser  
 $c = l$

En combinant les équations 1 et 2, il vient

$$r = \frac{l^2}{2h} = \text{rayon de courbure}$$

$$\text{Posons } C = \frac{1}{r}; \quad C \text{ sera la courbure}$$

de la plante ; par conséquent

$$C = \frac{2h}{l^2}$$

En calculant à l'aide de cette formule la valeur de la courbure des plantes des diverses longueurs au moment où l'on commence à voir qu'elles sont courbes, on obtient les résultats suivants (Tableau XXII).

TABLEAU XXII

Longueur médiane en millimètres	Courbure $\pm$ erreur probable	Longueur médiane en millimètres	Courbure $\pm$ erreur probable
10	0,0175 $\pm$ 0,0016	30	0,0020 $\pm$ 0,0001
15	0,0055 $\pm$ 0,0004	35	0,0021 $\pm$ 0,0002
20	0,0039 $\pm$ 0,0002	45	0,0021 $\pm$ 0,0003
25	0,0024 $\pm$ 0,0002		

Dans la figure 14, j'ai représenté graphiquement ces résultats ; on voit que la valeur de la courbure (définie comme l'inverse du rayon de courbure exprimé en millimètres), au moment où elle devient visible à l'œil nu, est sensiblement constante pour les plantes de plus de 25 mm. de longueur, mais que, lorsque les plantes sont plus courtes, la courbure doit être beaucoup plus prononcée pour être visible.

En calculant le rayon de courbure que les plantes présentent au moment de la réaction visible, on constate que pour une plante de 10 mm., le rayon de courbure doit

être de 60 mm., tandis que pour les plantes de plus de 25 mm. ce rayon atteint 500 mm.

Dans la figure 15, j'ai dessiné 3 fragments de circonférence ; le 1<sup>er</sup> d'un rayon de 50 cm. et d'une longueur de 30 mm. ; la courbure est très visible ; le deuxième de même rayon mais long seulement de 10 mm. semble par-

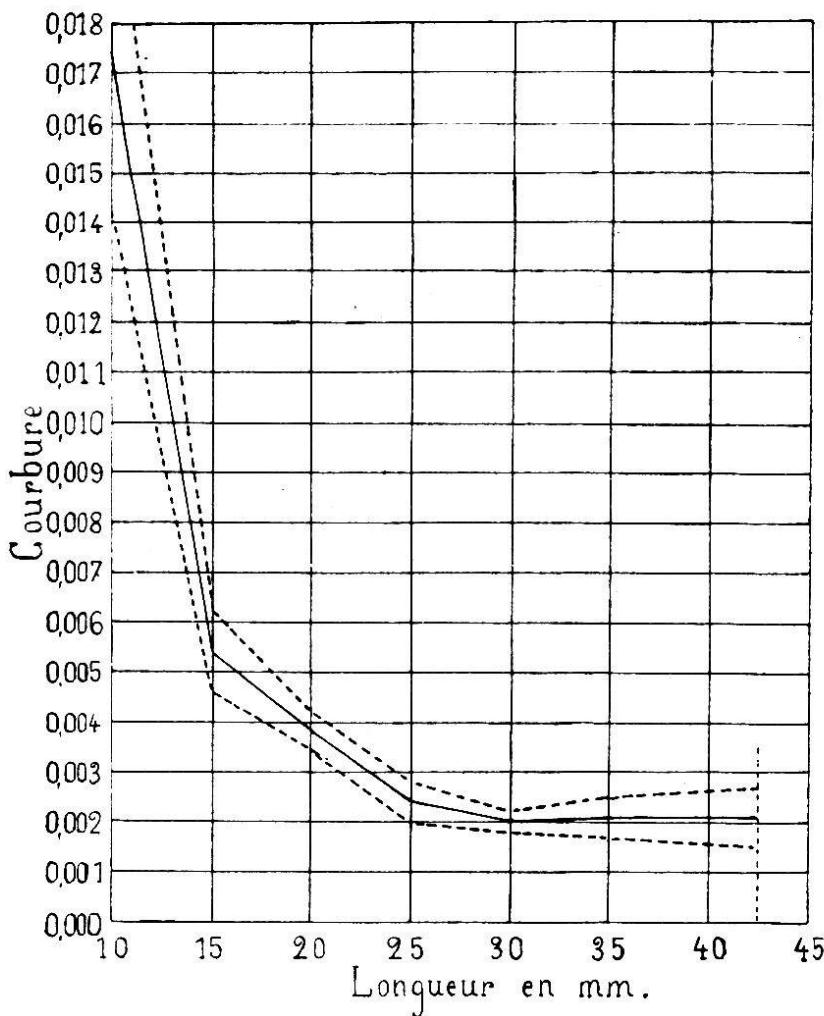


Fig. 14.

faitement droit ; le 3<sup>me</sup> fragment de circonférence, d'un rayon de 6 cm. et d'une longueur de 10 mm., représente la courbure qu'une plante de 10 mm. doit présenter pour qu'on la voie courbe ; sur le dessin elle paraît plus courbe que la première ; cela tient à ce que la plante a une épaisseur et une forme ogivale au sommet ce qui augmente la difficulté de voir la courbure.

La figure 14, au lieu de donner une représentation gra-

phique de la sensibilité géotropique des plantes d'avoine en fonction de leur longueur, est donc une représentation de la variation de la faculté qu'a l'œil humain de distinguer la courbure d'objets linéaires en fonction de la longueur de ces objets.

$$R = 50 \text{ cm} ; l = 30 \text{ mm}$$

$$R = 50 \text{ cm} ; l = 10 \text{ mm}$$

$$R = 6 \text{ cm} ; l = 10 \text{ mm}$$

Fig. 15.

Il est évident que si l'on a affaire à des observateurs différents, ils auront un œil plus ou moins apte à saisir le commencement de la courbure et par conséquent ils obtiendront des résultats différents. La vitesse plus ou moins grande avec laquelle la courbure s'effectue doit sûrement intervenir pour fausser encore les résultats. On voit par cela combien sont précaires les conclusions que l'on tire des déterminations du temps de réaction.

La courbure minimum qu'on aperçoit à l'œil nu, pour les plantes de plus de 25 mm. de longueur, a un rayon d'environ 500 mm. correspondant à une valeur de la déviation de

$$h_R = \frac{l^2}{2r} = \frac{l^2}{1000}$$

TABLEAU XXIII. — Déviation *h* de l'extrémité de plantes d'avoine placées à 45° de leur position normale et observées dans cette position de 5 en 5 minutes avec le cathétomètre.

N <sup>o</sup> numéro	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
484	-0,1	-0,05	-0,05	-0,05	-0,15	-0,2	-0,2	-0,25	-0,25	-0,3	-0,25	-0,15
491	-0,1	-0,05	0,05	0,0	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,35	0,25	0,3
498	0,05	0,05	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,15	-0,1	0,05	0,05
490	-0,05	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,25	0,0	0,0	0,0
485	0,0	0,15	0,2	0,2	0,25	0,25	0,4	0,45	0,5	0,6	0,6	0,65
496	-0,1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,15	-0,05	0,0	0,1	0,15	0,3	0,6
497	-0,15	-0,25	-0,35	-0,4	-0,55	-0,6	-0,7	-0,75	-0,9	-0,9	-1,0	-0,95
499	0,05	0,1	0,3	0,4	0,3	0,45	0,5	0,5	0,65	0,8	0,9	1,2
492	0,0	0,1	0,0	0,0	0,05	0,0	0,0	0,0	0,15	0,2	0,35	0,5
480	-0,05	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,35	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,15
493	-0,05	-0,1	-0,05	0,0	0,0	0,0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,25
500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,05	0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,35	0,5
489	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,25	-0,35	-0,3	-0,35	-0,3	-0,25
486	-0,1	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	0,0	0,0	0,0	0,05	0,1	0,15	0,2
494	0,05	0,0	0,0	0,0	0,05	0,0	0,0	0,05	0,1	0,2	0,25	0,35
478	0,0	0,05	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,6	0,65
479	0,05	0,0	0,0	-0,05	0,0	-0,1	0,0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,45
487	-0,1	-0,1	-0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	1,05
477	0,1	0,0	0,1	0,25	0,45	0,65	0,85	0,95	1,15	1,2	1,15	1,15
495	0,0	0,1	0,15	0,3	0,35	0,4	0,4	0,45	0,5	0,65	0,9	1,1
488	-0,1	-0,15	-0,25	-0,3	-0,35	-0,4	-0,4	-0,3	-0,15	-0,1	0,0	0,15
482	-0,1	-0,15	-0,2	-0,3	-0,35	-0,5	-0,55	-0,65	-0,55	-0,55	-0,55	-0,4
476	0,25	0,55	0,75	0,9	1,0	1,15	1,0	0,9	0,7	0,5	0,35	0,3
481	-0,1	-0,05	-0,15	-0,25	-0,25	-0,3	-0,2	-0,2	-0,15	0,0	0,1	0,15
483	0,0	-0,1	-0,15	-0,1	-0,05	-0,05	-0,1	-0,1	-0,05	0,0	0,05	0,1
475	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,05	0,05	-0,15	-0,15	-0,25	-0,35	-0,5	-0,7
474	0,0	0,1	0,0	0,0	0,05	0,0	-0,05	0,05	0,05	0,1	0,15	0,2
467	0,1	0,15	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	0,1	0,25	0,45	0,8
473	0,05	0,0	-0,1	-0,05	0,2	0,05	0,2	0,3	0,35	0,05	0,75	0,7
465	-0,05	0,0	-0,05	-0,15	-0,25	-0,45	-0,6	-0,5	-0,25	-0,2	0,1	0,55
466	-0,1	-0,1	0,4	0,6	0,8	0,9	1,05	1,1	1,3	1,5	1,5	1,7



TABLEAU XXIII (*suite*)

N <sup>o</sup>	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
330	-0,1	0,0	0,05	-0,05	0,1	-0,1	0,15	0,3	0,4	0,45	0,7
309	-0,3	-0,45	-0,5	-0,45	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,05	0,9
303	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,1	0,6
308	0,0	0,1	0,05	0,0	-0,05	0,05	0,2	0,6	0,7	0,3	0,5
306	0,1	-0,15	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,25	0,4	0,4	0,45	1,1
335	-0,05	-0,05	-0,1	-0,1	-0,1	0,15	0,4	0,55	0,65	0,9	1,4
324	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	1,45
336	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,9	1,0
332	0,0	-0,3	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,25	-0,3	-0,3	-0,2	1,0
301	0,0	0,1	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,7	1,1
331	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,8	0,85	1,0	1,1
302	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,4	1,1
315	0,0	-0,1	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
333	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,75	1,0	1,25
314	-0,2	-0,4	-0,3	-0,25	-0,2	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	0,2	0,7
337	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,15	0,1	0,3	0,5	0,8	1,1
340	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0
338	0,0	0,1	0,1	0,1	0,25	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9	1,3
339	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3
347	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,1	1,4	1,9
348	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,2	0,45	1,0
343	-0,3	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2
349	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,05	0,2	0,2	0,4	0,7
341	0,0	-0,05	0,1	0,05	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8
346	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7
345	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,7	1,1	1,3
344	0,1	0,0	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6	0,9	1,3	1,9	2,4
350	0,1	-0,1	-0,2	0,2	-0,1	0,0	0,2	0,4	0,4	0,7	1,1
342	0,1	0,0	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,8	1,3

Pour une plante de 30 mm. on aurait

$$h = \frac{900}{1000} = 0,9 \text{ mm.}$$

Pour une plante de 40 mm.

$$h = \frac{1600}{1000} = 1,6 \text{ mm.}$$

On voit donc que le temps de réaction ne peut être défini comme le temps au bout duquel la réaction commence, mais bien celle où la courbure a atteint une valeur suffisante pour être visible à l'œil, nu ou armé du microscope, du cathétomètre ou de tel instrument qu'on voudra.

Cette conclusion nous servira lors de l'élaboration d'un essai de théorie mathématique du géotropisme.

### Réaction géotropique de plantes d'avoine placées de manière à faire un angle de 45° avec leur position verticale normale.

Mon intention primitive en faisant construire mon appareil était de comparer la réaction géotropique de plantes placées de manière à faire différents angles avec la verticale ; d'autres études qui m'ont semblé plus intéressantes m'ont empêché jusqu'à présent de faire ces expériences. Toutefois comme j'avais besoin d'une vérification pour certaine conclusion de ma théorie mathématique du géotropisme, j'ai effectué deux séries d'expériences (n°s 301-350 et n°s 450-500) avec des plantes d'avoine placées de manière à faire un angle de 45° avec leur position normale. La colonne graduée du cathétomètre était inclinée à 45° en sens inverse de façon à être perpendiculaire à l'axe de la plante et parallèle au plan vertical contenant la plante. Les résultats des deux séries d'expériences ont été réunis et classés dans le tableau XXIII d'après la température d'expérience et la longueur des plantes. Les déviations

négatives (vers le bas) ont été imprimées en caractères gras.

Le tableau XXIV donne les valeurs de la déviation moyenne  $h$ , son index de variabilité  $\sigma$  et l'erreur probable de ces deux quantités.

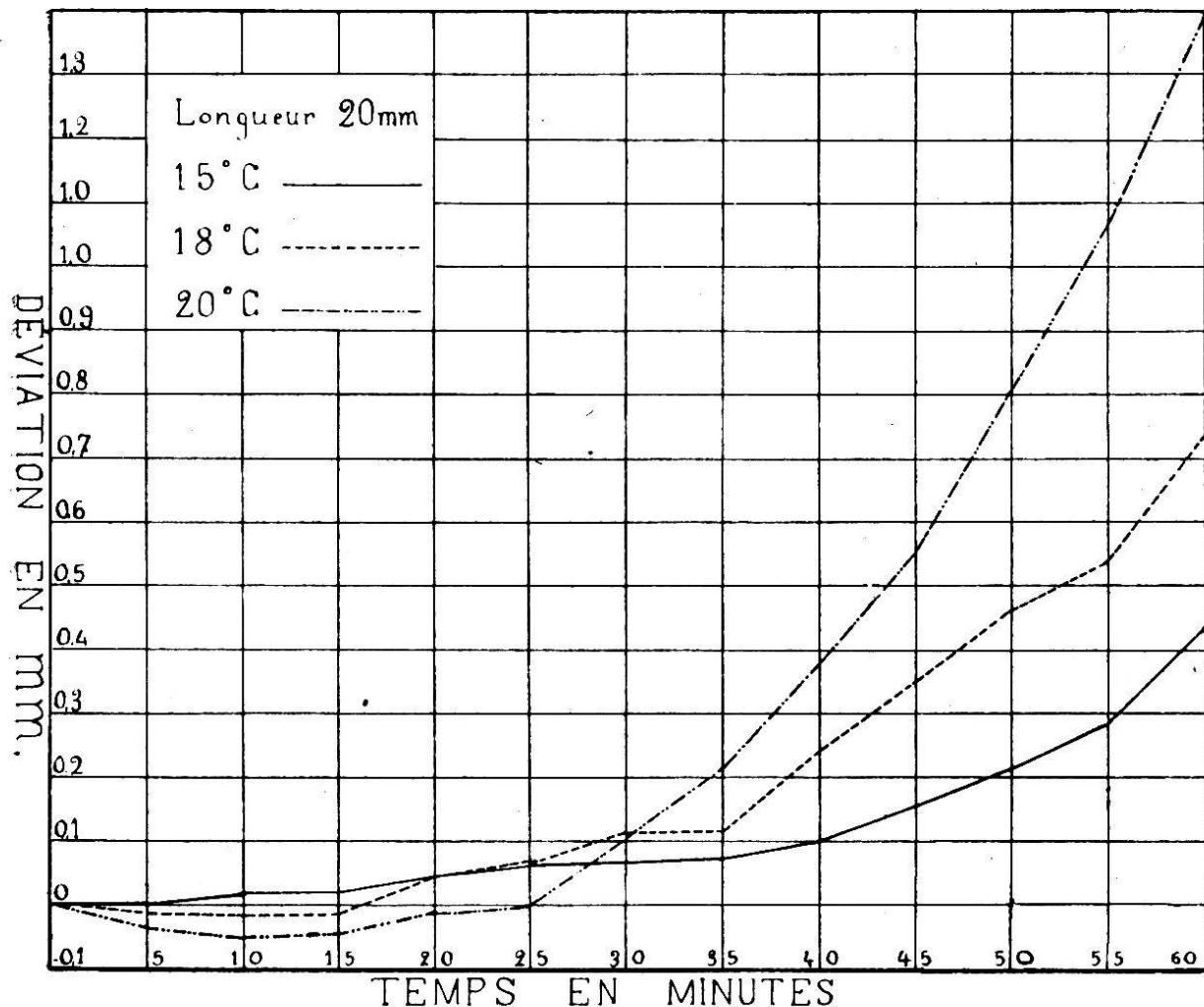


Fig. 16.

J'ai formé des catégories de températures (de 3 en 3 degrés) et de longueur (de 5 en 5 mm.) et j'ai calculé la déviation moyenne de  $h$ , l'index de variabilité et leur erreur probable, pour les 3 catégories où j'avais assez d'expériences pour pouvoir compter sur une exactitude suffisante des résultats.

Les résultats de ces calculs sont donnés dans le tableau XXIV. Le dernier cadre du tableau donne les moyennes des 100 expériences effectuées.

Dans le graphique (fig. 16) j'ai représenté la variation

TABLEAU XXIV

	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.		
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
$h$ moyen	0,000	0,019	0,019	0,046	0,062	0,069	0,073	0,100	0,154	0,212	0,285	0,435	20
$E_h$	0,018	0,033	0,042	0,050	0,064	0,054	0,058	0,055	0,049	0,043	0,045	0,059	
$\sigma$	0,096	0,177	0,225	0,267	0,342	0,290	0,312	0,295	0,262	0,229	0,242	0,318	
$E\sigma$	0,013	0,023	0,030	0,035	0,045	0,038	0,041	0,039	0,035	0,030	0,032	0,042	
$n = 13$													
$h$ moyen	-0,017	-0,018	-0,011	0,044	0,067	0,111	0,113	0,244	0,350	0,467	0,639	0,833	20
$E_h$	0,017	0,018	0,031	0,046	0,066	0,090	0,103	0,114	0,120	0,131	0,143	0,160	
$\sigma$	0,075	0,079	0,139	0,203	0,292	0,400	0,459	0,506	0,535	0,585	0,635	0,714	
$E\sigma$	0,012	0,013	0,022	0,032	0,046	0,064	0,073	0,080	0,085	0,093	0,101	0,112	
$n = 9$													
$h$ moyen	-0,031	-0,050	-0,042	-0,011	0,000	0,103	0,214	0,381	0,553	0,806	1,072	1,389	21
$E_h$	0,019	0,027	0,033	0,033	0,031	0,036	0,040	0,061	0,055	0,070	0,078	0,087	
$\sigma$	0,120	0,173	0,207	0,209	0,198	0,229	0,255	0,341	0,347	0,441	0,493	0,547	
$E\sigma$	0,013	0,019	0,023	0,023	0,022	0,026	0,029	0,043	0,039	0,050	0,055	0,061	
$n = 18$													
$h$ moyen	-0,018	-0,048	-0,043	-0,031	-0,010	-0,039	0,101	0,217	0,359	0,533	0,735	0,973	20,9
$E_h$	0,013	0,019	0,025	0,030	0,035	0,040	0,044	0,052	0,066	0,065	0,073	0,084	
$\sigma$	0,135	0,195	0,265	0,317	0,370	0,420	0,465	0,536	0,691	0,687	0,772	0,881	
$E\sigma$	0,009	0,013	0,018	0,021	0,025	0,028	0,031	0,036	0,047	0,046	0,052	0,059	
$n = 100$													

de  $h$  moyen en fonction du temps; on voit que la forme de la courbe est la même que celle fournie par les plantes exposées horizontalement; en comparant ce graphique avec celui de la figure 9, on voit que les courbes correspondantes sont plus rapidement ascendantes pour les plantes exposées horizontalement; de même la flexion vers le bas est plus accentuée. Ces faits se traduiront dans les valeurs de  $a$  et  $b$  dans l'équation  $h = at + bt^2$ .

Les valeurs de  $a$  et de  $b$  ont été calculées par la méthode des moindres carrés en tenant compte du poids des valeurs moyennes de  $h$  (voir le tableau XXV).

TABLEAU XXV

	15° C.	18° C.	21° C.	Longueur
$a =$	- 0,00139	- 0,00519	- 0,01335	20 millim.
$b =$	0,00012	0,00160	0,00058	20 millim.

En calculant les valeurs de  $h$  moyen, en introduisant dans l'équation de la parabole les valeurs de  $a$  et de  $b$ , et en comparant ces valeurs avec celles trouvées expérimentalement, on est amené aux mêmes constatations que pour les plantes exposées horizontalement, soit : 1<sup>o</sup> dans la limite des erreurs probables la variation de  $h$  en fonction du temps est bien représentée par une parabole de la forme  $h = at + bt^2$ ; 2<sup>o</sup> les différences  $\delta = h$  calculé —  $h$ . observé varient systématiquement de la même manière que pour les plantes observées horizontalement; c'est-à-dire sont négatives au début, puis deviennent positives pour redevenir négatives à la fin de l'expérience. Le tableau XXVI donne les valeurs de  $h$  observé (moyenne des déviations mesurées au cathétomètre),  $h$  calculé,  $\delta$  et l'erreur probable de  $h$ , Eh.

La discussion des résultats de ces expériences sera faite dans la partie théorique de ce travail (p. 530).

TABLEAU XXXVI

	TEMPS EN MINUTES							Longueur en millim.	Tempe- rature en degrés C.
	5	10	15	20	25	30	35		
<i>h</i> obs.	0,000	0,019	0,046	0,062	0,069	0,073	0,100	0,154	0,285
<i>h</i> calc.	-0,004	-0,002	0,007	0,021	0,042	0,068	0,101	0,139	0,235
$\delta$	<b>-0,004</b>	<b>-0,021</b>	<b>-0,012</b>	<b>-0,025</b>	<b>-0,020</b>	<b>-0,001</b>	<b>0,038</b>	<b>0,039</b>	<b>0,023</b>
$E_h$	0,018	0,033	0,042	0,050	0,064	0,054	0,058	0,055	0,049
<i>h</i> obs.	-0,017	-0,018	-0,011	0,044	0,067	0,111	0,113	0,244	0,350
<i>h</i> calc.	-0,018	-0,021	-0,010	0,016	0,058	0,114	0,185	0,272	0,374
$\delta$	<b>-0,001</b>	<b>-0,003</b>	<b>-0,001</b>	<b>-0,028</b>	<b>-0,023</b>	<b>-0,009</b>	<b>0,003</b>	<b>0,072</b>	<b>0,028</b>
$E_h$	0,012	0,013	0,022	0,032	0,046	0,064	0,073	0,080	0,085
<i>h</i> obs.	-0,031	-0,050	-0,042	-0,011	0,000	0,103	0,214	0,381	0,553
<i>h</i> calc.	-0,052	-0,075	-0,069	-0,033	0,031	0,125	0,248	0,401	0,582
$\delta$	<b>-0,021</b>	<b>-0,025</b>	<b>-0,027</b>	<b>-0,022</b>	<b>-0,031</b>	<b>0,022</b>	<b>0,034</b>	<b>0,020</b>	<b>0,029</b>
$E_h$	0,019	0,027	0,033	0,033	0,031	0,036	0,040	0,061	0,055
<i>h</i> obs.	-0,018	-0,048	-0,043	-0,031	-0,010	0,039	0,101	0,217	0,359
<i>h</i> calc.	-0,039	-0,058	-0,057	-0,035	-0,007	0,069	0,152	0,255	0,378
$\delta$	<b>-0,021</b>	<b>-0,010</b>	<b>-0,014</b>	<b>-0,004</b>	<b>0,017</b>	<b>0,030</b>	<b>0,051</b>	<b>0,038</b>	<b>0,019</b>
$E_h$	0,013	0,019	0,025	0,030	0,035	0,040	0,044	0,052	0,066

TABLEAU XXVII. — Déviation  $h$  de l'extrémité de plantes d'avoine placées à  $15^\circ$  de leur position normale et observées, dans cette position, de 5 en 5 minutes avec le cathétomètre.

N <sup>o</sup>	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
442	0,1	-0,3	0,35	0,5	0,65	0,75	0,8	0,8	0,75	0,75	0,55
443	-0,05	-0,1	-0,15	-0,25	-0,3	-0,35	-0,45	-0,4	-0,45	-0,45	-0,4
446	-0,05	-0,05	-0,1	-0,1	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	0,0	0,0	0,05
444	-0,05	-0,1	-0,05	0,0	0,0	0,05	0,05	0,05	0,1	0,2	0,35
445	-0,05	-0,05	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,1	-0,1	0,05
448	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,05	0,0	0,0	0,0	0,05	0,05	0,15
441	-0,1	0,0	0,1	0,15	0,05	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,25
440	-0,05	-0,15	-0,2	-0,2	-0,15	-0,1	-0,1	-0,1	-0,05	0,0	0,05
450	0,0	0,0	-0,05	-0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,2	0,4	0,45
447	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,45	0,45	0,45	0,45
428	0,0	0,05	0,05	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7	0,95	1,15	1,6
437	-0,05	0,1	0,2	0,25	0,25	0,25	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0
436	-0,1	-0,1	-0,3	-0,25	-0,15	-0,2	-0,25	-0,25	-0,3	-0,2	-0,25
449	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,2	0,25	0,25	0,3	0,4	0,55
432	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,05	-0,05	0,05	0,15	0,4	0,6
433	0,0	-0,1	-0,2	-0,25	-0,35	-0,45	-0,5	-0,5	-0,3	-0,2	-0,25
434	0,0	-0,1	-0,15	-0,2	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,15	0,05	0,15
435	0,1	0,2	0,05	0,05	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9
430	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,05	-0,05	0,0	0,0	0,1	0,15	0,2
429	-0,05	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,35	0,4
438	0,0	-0,05	-0,05	0,0	0,05	0,0	0,1	0,15	0,15	0,35	0,5



**Réaction géotropique de plantes d'avoine  
placées de manière à faire un angle de 15° avec  
leur position verticale normale.**

Je donne ici une petite série de cinquante expériences (n<sup>o</sup>s 401-450) où une plante d'avoine était placée de manière à faire un angle de 15° avec sa position verticale normale ; ces expériences ont été faites entre le 26 août et le 27 septembre 1910, époque où la température du laboratoire a varié entre 13° et 23° C; il ne m'est par conséquent pas possible de former des catégories température-longueur contenant un nombre suffisant d'expériences ; aussi n'ai-je fait qu'une seule catégorie du tout et calculé la température moyenne et la longueur moyenne.

Les résultats des expériences sont donnés dans le tableau XXVII.

Le tableau XXVIII donne la moyenne de *h* au bout de chaque intervalle de 5 minutes et l'index de variabilité  $\sigma$  ainsi que l'erreur probable de ces quantités. Les valeurs négatives de *h* moyen sont imprimées en caractères gras.

**TABLEAU XXVIII**

	TEMPS EN MINUTES						Tempér. moy. °C.	Longueur moyenne en millim.	
	5	10	15	20	25	30			
<i>h</i> moyen.	- <b>0,009</b>	- <b>0,020</b>	- <b>0,027</b>	- <b>0,004</b>	0,012	0,030	19,3	21,8	
$E_h$	0,008	0,011	0,015	0,021	0,025	0,029			
$\sigma$	0,084	0,115	0,158	0,225	0,264	0,297			
$E\sigma$	0,006	0,008	0,011	0,015	0,018	0,020			
TEMPS EN MINUTES									
	35	40	45	50	55	60	Tempér. moy. °C.	Longueur moyenne en millim.	
<i>h</i> moyen.	0,070	0,148	0,230	0,398	0,446	0,576	19,3	21,8	
$E_h$	0,035	0,037	0,042	0,041	0,051	0,053			
$\sigma$	0,375	0,392	0,443	0,435	0,531	0,559			
$E\sigma$	0,025	0,026	0,030	0,029	0,036	0,038			

Le graphique (fig. 17) montre nettement qu'ici encore nous avons une courbe ressemblant beaucoup à une parabole de la forme  $h = at + bt^2$  où  $a$  est négatif. En calculant  $a$  et  $b$  par la méthode des moindres carrés nous trouvons

$$a = -0,00529 \quad b = 0,000242$$

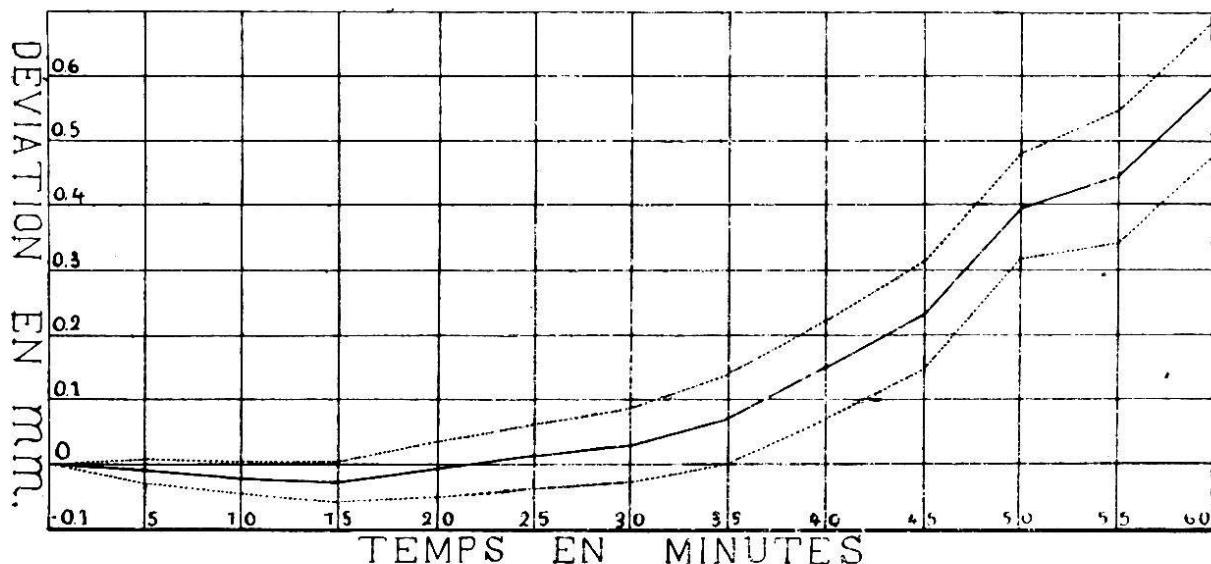


Fig. 17.

Le tableau XXIX donne la valeur observée de  $h$  comparée avec sa valeur calculée par la formule  $h = -0,00529t + 0,000242t^2$ , la différence  $\delta$  entre  $h$ . calc. et  $h$ . obs. ainsi que l'erreur probable de  $h$ . obs.

TABLEAU XXIX

	TEMPS EN MINUTES					
	5	10	15	20	25	30
$h$ obs.	-0,009	-0,020	-0,027	-0,004	0,012	0,030
$h$ calc.	-0,020	-0,029	-0,025	-0,009	0,019	0,059
$\delta$	<b>-0,011</b>	<b>-0,009</b>	0,002	<b>-0,005</b>	0,007	0,029
$E_h$	0,008	0,011	0,015	0,021	0,025	0,029
TEMPS EN MINUTES						
	35	40	45	50	55	60
$h$ obs.	0,070	0,148	0,230	0,398	0,446	0,576
$h$ calc.	0,111	0,176	0,252	0,341	0,441	0,554
$\delta$	0,041	0,028	0,022	<b>-0,057</b>	<b>-0,005</b>	<b>-0,022</b>
$E_h$	0,035	0,037	0,042	0,041	0,051	0,053

TABLEAU XXX. — Déviation *h* de l'extrémité d'une tigelette (coléoptile) d'avoine exposée horizontalement pendant 5 minutes, puis observée au cathétomètre une fois replacée verticalement.

N <sup>o</sup> numéros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
755	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	-0,1	14
795	0,2	0,0	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	14
723	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	15
711	-0,4	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,3	0,4	0,6	0,4	0,2	0,2	16
713	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	0,3	0,5	0,5	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	16
712	0,0	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	17
717	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	16
735	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2	16
724	0,2	0,0	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	19
797	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,0	26
734	0,3	0,2	0,6	0,5	0,6	0,9	1,0	1,3	1,6	1,8	1,8	20
714	0,1	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	0,6	0,6	0,8	21
722	0,1	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4	21
703	0,0	0,1	0,2	0,5	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	22
716	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	0,3	0,0	-0,1	22
715	0,2	0,5	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	0,7	0,4	0,3	23
782	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0	24
788	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	24
798	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	24
720	0,0	-0,1	-0,2	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,5	0,7	25
787	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	25
799	0,1	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	26
800	0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	27
794	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,8	0,9	1,0	32
793	1,0	1,4	1,7	2,0	2,4	2,5	2,5	2,5	2,7	2,7	2,4	40
762	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,6	14
728	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	27
768	-0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	15
738	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,7	0,8	0,4	16
769	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	16
730	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	17

706	<b>-0,2</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,3</b>	0,0	0,0	0,0	<b>-0,1</b>	0,1	0,2	27	18	
732	0,0	0,0	0,0	<b>-0,1</b>	0,0	0,1	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,3</b>	27	18	
742	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,6	1,0	1,1	1,1	27	18	
754	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	27	18	
761	0,0	0,0	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	0,0	<b>-0,1</b>	0,1	0,1	0,2	27	18	
784	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,0	1,2	1,3	1,3	27	18	
746	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	0,0	0,0	0,3	0,4	0,7	0,9	0,8	27	19	
770	0,1	0,2	0,3	0,6	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	27	19	
718	<b>-0,2</b>	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,7	0,5	0,7	27	20	
725	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,4	0,1	0,1	<b>-0,1</b>	27	20	
737	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,6	0,6	0,4	27	20	
785	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,6	0,5	27	20	
744	0,0	0,0	0,3	0,1	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,7	27	21	
783	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	27	21	
789	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	27	21	
710	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,4	0,4	0,3	27	22	
719	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	0,0	0,1	0,3	0,4	0,4	0,5	27	22	
736	0,0	<b>-0,1</b>	0,0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	27	22	
753	0,1	<b>-0,1</b>	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	0,0	0,2	0,3	0,6	1,0	1,1	22	
760	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	27	22	
792	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,0	0,0	0,0	27	22	
702	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	27	23	
721	0,1	0,2	0,3	0,7	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	27	23	
726	0,1	0,0	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	27	23	
763	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,2	1,5	1,6	1,4	27	23	
791	0,4	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,0	0,8	27	23	
796	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	0,0	0,1	0,0	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,4</b>	27	23
739	0,5	0,5	0,6	0,7	0,9	1,3	1,5	1,6	1,7	1,7	27	24	
786	0,0	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,7</b>	27	24	
731	0,4	0,5	0,8	0,7	1,0	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	27	25	
748	<b>-0,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,1</b>	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,8	0,8	27	25	
757	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	27	26	
705	0,0	<b>-0,1</b>	<b>-0,1</b>	<b>-0,3</b>	<b>-0,1</b>	0,2	0,0	0,1	0,1	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	26	
727	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	27	26	
743	0,0	0,0	<b>-0,1</b>	0,0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,2	0,0	<b>-0,3</b>	27	26
740	0,3	0,3	0,7	0,9	0,9	1,1	1,2	1,0	0,9	0,5	0,1	27	27
709	<b>-0,2</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,8</b>	<b>-0,6</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,3</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,4</b>	<b>-0,2</b>	<b>-0,2</b>	27	28
701	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,1	27	29
707	0,1	0,3	0,3	0,5	0,7	1,0	1,3	1,4	1,4	1,3	1,5	27	29
741	0,2	0,2	0,1	0,1	<b>-0,1</b>	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,9	27	29

TABLEAU XXX (suite)

Nombres	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
733	0,0	-0,1	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,0	0,1
747	0,3	0,5	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6	2,0	2,0	1,8	27
790	0,2	0,3	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,2	31
776	0,1	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,0	27
781	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	1,0	1,3	1,5	1,6	32
704	-0,2	0,0	0,2	0,1	0,4	0,4	0,3	-0,1	0,2	0,1	27
745	-0,5	0,4	0,5	0,6	0,8	1,1	1,1	1,3	1,2	1,0	27
749	0,3	0,6	0,6	0,8	1,1	2,0	2,3	2,4	2,4	2,5	32
729	0,9	1,0	1,1	1,5	1,9	2,0	2,3	2,4	2,4	2,3	33
708	0,3	0,5	0,4	0,4	0,7	1,2	1,3	1,1	1,0	1,3	33
767	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	27
751	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	-0,3	-0,1	-0,3	-0,4	27
765	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	0,7	34
774	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,5	0,7	0,7	0,7	0,6	40
752	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5	0,5	0,2	34
772	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,0	40
773	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	33
759	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,0	1,0	0,9	33
766	0,3	0,3	0,4	0,5	0,8	0,9	1,0	0,6	0,4	0,2	33
756	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,4	33
771	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,3	33
758	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	1,1	1,1	0,9	0,9	33
764	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	33
780	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	33
750	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	0,9	1,0	1,3	1,2	1,2	33
777	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,9	25
775	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	25
778	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,0	25
779	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	27

On peut voir ici encore l'accord, dans les limites des erreurs probables, entre les valeurs expérimentales et calculées de  $h$ ; de nouveau, la valeur de  $\delta$  commence par être négative, puis devient positive pour redevenir négative vers la fin de l'expérience.

**Réaction géotropique de coléoptiles d'avoine  
placées horizontalement pendant  
un certain temps puis replacées verticalement et  
observées dans cette position.**

Les expériences précédentes nous ont permis de conclure qu'une plante d'avoine déplacée de sa position verticale commence immédiatement à se courber géotropiquement vers le haut, mais que cette courbure est masquée au début par une flexion d'ordre mécanique vers le bas.

Si nous supprimons l'action mécanique de la pesanteur en replaçant la plante verticalement après l'avoir soumise à l'action géotropique en position horizontale, nous devons nous attendre à voir, quelque court que soit le temps pendant lequel la plante a été déplacée, se manifester une courbure dans le sens positif, c'est-à-dire vers le côté de la plante qui était en haut au moment de l'exposition en position horizontale.

J'ai fait trois séries d'expériences afin de vérifier si ces présomptions étaient exactes; pour la première série, j'ai laissé la plante cinq minutes horizontalement; pour la seconde, deux minutes; pour la troisième, quinze secondes; puis la plante a été remise verticalement et observée avec le cathétomètre dont la colonne graduée était placée horizontalement et dans un plan parallèle à celui dans lequel la plante avait été déplacée.

**PREMIÈRE SÉRIE — Cinq minutes d'exposition  
horizontale.**

Les expériences de cette série portent les n°s 701 à 800; elles ont été faites du 1<sup>er</sup> au 18 août 1911; la chaleur

exceptionnellement continue de l'été 1911 explique comment toutes ces expériences ont pu être faites à des températures de 26 à 28° C; si nous classons les expériences comme dans les autres séries, elles rentrent toutes dans la catégorie à température médiane égale à 27°.

Le tableau XXX donne le résultat des expériences classées comme d'habitude d'après les températures croissantes et dans chaque température d'après les longueurs; les valeurs négatives de la déviation  $h$  sont imprimées en caractères gras.

Pour les calculs, j'ai groupé les plantes par catégories de longueurs, les coupes étant faites de 5 en 5 mm., j'ai calculé la déviation moyenne ( $h$  moyen) et son erreur probable ( $Eh$ ) ainsi que l'index de variabilité ( $\sigma$ ) et son erreur probable ( $E\sigma$ ). Les résultats sont donnés par le tableau XXXI. Le dernier cadre de ce tableau donne  $h$  moyen,  $Eh$ ,  $\sigma$  et  $E\sigma$  pour l'ensemble des 100 expériences, la série étant assez homogène pour permettre cette opération.

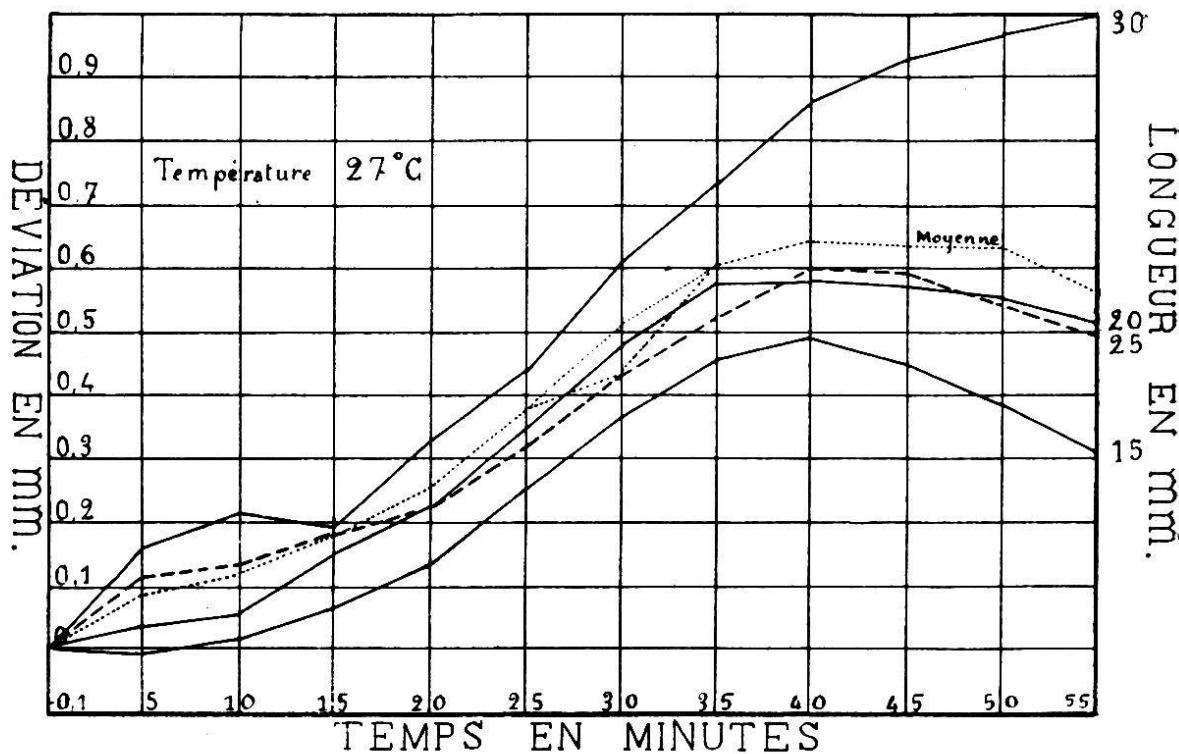


Fig. 18.

Le graphique (fig. 18) représente la variation de la dé-

TABLEAU XXXI

TEMPS EN MINUTES										Tempe- ra-ture me- diâne °C.	Longeur en millim. me diâne		
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55		
<i>h</i> moyen	-0,005	0,014	0,064	0,136	0,250	0,368	0,459	0,492	0,450	0,392	0,314	27	15
<i>Eh</i>	0,020	0,015	0,017	0,023	0,022	0,025	0,036	0,039	0,053	0,056	0,058		
$\sigma$	0,141	0,101	0,115	0,161	0,150	0,174	0,252	0,274	0,372	0,387	0,406		
$E\sigma$	0,014	0,010	0,012	0,016	0,015	0,018	0,026	0,028	0,038	0,037	0,041	n = 22	
<i>h</i> moyen	0,041	0,059	0,150	0,221	0,350	0,482	0,579	0,582	0,571	0,559	0,515	27	20
<i>Eh</i>	0,014	0,017	0,020	0,026	0,032	0,034	0,036	0,040	0,048	0,053	0,057		
$\sigma$	0,119	0,150	0,174	0,226	0,278	0,294	0,314	0,347	0,411	0,460	0,491		
$E\sigma$	0,010	0,012	0,014	0,018	0,023	0,024	0,026	0,028	0,024	0,038	0,040	n = 34	
<i>h</i> moyen	0,118	0,132	0,182	0,222	0,318	0,430	0,521	0,600	0,593	0,543	0,496	27	25
<i>Eh</i>	0,018	0,028	0,036	0,051	0,047	0,057	0,061	0,062	0,064	0,066	0,073		
$\sigma$	0,144	0,217	0,280	0,322	0,366	0,446	0,478	0,489	0,501	0,518	0,576		
$E\sigma$	0,013	0,020	0,025	0,029	0,033	0,040	0,043	0,044	0,045	0,047	0,052	n = 28	
<i>h</i> moyen	0,160	0,210	0,190	0,330	0,440	0,610	0,730	0,860	0,930	0,970	1,000	27	30
<i>Eh</i>	0,047	0,077	0,081	0,078	0,088	0,096	0,118	0,135	0,141	0,137	0,127		
$\sigma$	0,220	0,362	0,381	0,366	0,415	0,450	0,555	0,633	0,660	0,642	0,597		
$E\sigma$	0,033	0,055	0,057	0,055	0,063	0,068	0,084	0,095	0,100	0,096	0,090	n = 10	
<i>h</i> moyen	0,090	0,120	0,180	0,254	0,379	0,507	0,603	0,645	0,639	0,631	0,561	Moyennes de toutes les expériences n = 100	
<i>Eh</i>	0,014	0,018	0,020	0,023	0,027	0,021	0,032	0,035	0,038	0,036	0,039		
$\sigma$	0,204	0,264	0,296	0,347	0,406	0,507	0,476	0,515	0,547	0,541	0,575		
$E\sigma$	0,010	0,013	0,014	0,017	0,019	0,030	0,023	0,025	0,026	0,026	0,027		

viation moyenne en fonction du temps. La ligne pointillée, désignée par *moyenne*, donne  $h$  moyen pour l'ensemble des 100 expériences.

Ces tracés montrent que *les déviations sont positives dès le début*; une seule valeur de  $h$  moyen est négative, celle qui correspond à 5 minutes dans la catégorie 27°, 15 mm.; mais la déviation moyenne est de —0,005 mm. alors que son erreur probable est 0,020 mm.; on voit qu'on ne peut attacher de signification à cette valeur négative.

Les plantes courtes semblent se comporter autrement que les longues; l'extrémité de celles de 15 et 20 mm. commence à se déplacer dans le sens positif, mais d'abord très lentement puis de plus en plus vite; la vitesse de courbure décroît ensuite; la déviation moyenne atteint un maximum vers 40 minutes puis décroît régulièrement.

Les plantes de 25 et 30 mm. de longueur semblent se courber très vite vers le haut pendant les premières 10 minutes; puis la courbure se ralentit, semble même régresser pour les plantes de 30 mm., pour augmenter de nouveau; la vitesse de courbure va sans cesse en diminuant jusqu'au maximum de la déviation; il n'y-a pas de phase où la courbure semble s'accélérer.

TABLEAU XXXII

Déplacement $h_1$ en position horizontale	Déplacement $h_2$ en position verticale	$h_2 - h_1$
-0,007 ± 0,011	-0,005 ± 0,020	0,002
-0,025 ± 0,015	0,041 ± 0,014	0,016
-0,112 ± 0,014	0,118 ± 0,018	0,006
-0,143 ± 0,013	0,160 ± 0,047	0,017

Comparons (tableau XXXII) le déplacement pendant les 5 premières minutes, où la plante est de nouveau dans la station verticale, avec le déplacement pendant la position

horizontale ; pour cela nous n'avons qu'à prendre dans le tableau VIII les chiffres des mêmes catégories température-longueur.

On voit que pendant les 5 premières minutes où la plante est replacée verticalement, il se produit un déplacement  $h_2$  en sens inverse de celui  $h_1$  qu'on a constaté pendant les 5 minutes d'exposition horizontale ; ce déplacement dans le sens positif est légèrement plus grand que le déplacement vers le bas, ce qu'indique le fait que  $h_2 - h_1$  est toujours positif ; mais  $h_2 - h_1$  est toujours plus petit que l'erreur probable de  $h_2$  de sorte qu'on ne peut pas affirmer que le déplacement  $h_2$  est réellement plus fort que  $h_1$ .

### DEUXIÈME SÉRIE. — 2 minutes d'exposition horizontale.

Les expériences de cette série portent les n°s 801 à 900 et ont été faites du 18 août au 1<sup>er</sup> septembre 1911 ; la température s'est maintenue assez élevée pendant toute cette période pour que toutes les expériences rentrent dans les catégories à température médiane de 24° C et 27° C. Les résultats sont donnés dans le tableau XXXIII, classés de la même manière que dans les tableaux précédents. Les valeurs négatives de la déviation  $h$  sont imprimées en caractères gras.

Le tableau XXXIV donne pour toutes les catégories de température-longueur où le nombre des expériences était d'au moins sept les valeurs de  $h$  moyen et de l'index de variabilité  $\sigma$  de  $h$  ainsi que les erreurs probables ; les valeurs négatives de  $h$  moyen ont été imprimées en caractères gras.

Dans la figure 19 j'ai représenté la variation de la déviation  $h$  en fonction du temps. En comparant ces courbes avec celles de la figure 18, représentant les déviations des

TABLEAU XXXIII. — Déviation *h* en millimètres de l'extrémité de la coleoptile de plantes d'avoine placées horizontalement pendant 2 minutes et observées ensuite verticalement.

N <sup>o</sup> numéros	TEMPS EN MINUTES							Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	
893	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	23
836	0,1	0,3	0,3	0,4	0,6	0,7	0,6	23
829	0,2	0,5	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	26
862	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,4	31
828	0,4	0,4	0,0	0,0	0,3	0,6	0,7	33
834	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	37
837	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	16
843	0,4	0,4	0,6	0,9	1,0	1,2	1,2	17
894	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	19
839	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	21
840	-0,1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,5	21
842	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,7	0,8	22
820	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22
838	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	23
835	0,0	-0,4	-0,3	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	23
831	0,1	0,1	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	25
841	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	25
863	0,0	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	25
833	0,3	0,6	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	26
832	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	26
830	0,2	0,1	-0,2	-0,3	-0,1	0,0	-0,4	26
861	0,3	0,5	0,6	0,4	0,3	0,5	-0,7	27
844	0,5	0,8	1,0	1,2	1,2	1,2	1,0	27
823	0,1	0,2	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	27
854	0,0	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2	-0,3	-0,5	28
852	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,7	28
892	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	29
857	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	33
856	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	34
859	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	34
868	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,3	0,2	34

869	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	25	18
888	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	25	18
900	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25	18
873	0,1	0,3	0,3	0,1	-0,2	-0,4	-0,7	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	25	19
895	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,4	-0,6	25	19
821	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	25	20
825	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	25	20
826	0,0	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,2	-0,3	25	20
827	0,1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	25	20
845	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	25	20
851	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	25	20
897	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	25	20
849	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	25	21
855	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	25	21
867	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	25	21
822	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	25	22
846	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,2	25	22
858	0,2	0,3	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	25	22
899	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	1,1	1,2	1,4	25	22
850	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,6	25	24
885	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	25	24
898	0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,9	-1,0	25	24
824	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,3	-0,4	25	25
848	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,3	25	27
864	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,5	0,7	0,9	0,9	1,0	1,1	25	30
891	-0,1	-0,2	-0,4	-0,3	-0,9	-1,1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,4	-1,0	25	33
847	0,4	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,6	0,3	0,4	0,2	0,0	25	34
890	0,5	0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,7	-0,5	-0,3	-0,5	25	35
866	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	25	36
853	0,3	0,5	0,5	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,3	1,5	25	37
865	0,3	1,0	1,3	1,5	1,7	2,0	2,5	2,8	2,7	2,8	2,8	25	37
889	0,4	0,7	0,8	1,0	1,4	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8	25	37
810	0,1	0,1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4	26	13
876	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,2	26	14
808	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	26	15
818	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	26	15
809	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	26	16
872	0,1	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6	1,6	1,6	26	17
877	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	0,3	0,3	0,3	26	17
801	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	26	18

TABLEAU XXXIII (*suite*).

Numéros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
802	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	18
819	0,2	0,1	0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	19
860	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4	-0,4	-0,1	19
871	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	19
875	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	19
870	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	19
874	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5	0,4	0,3	20
880	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	0,5	20
804	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	0,0	0,1	0,2	0,2	21
807	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	0,0	-0,1	-0,1	0,0	21
896	0,0	-0,1	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	-0,2	22
878	0,3	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,4	0,3	0,5	22
884	0,0	0,1	0,2	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	24
817	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	25
887	0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,0	0,0	26
883	0,1	0,4	0,3	0,6	0,6	0,6	0,8	1,1	1,1	1,4	26
806	0,4	0,3	0,3	0,6	0,9	1,0	0,9	1,1	1,5	1,9	26
881	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	1,0	26
886	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3	26
882	-0,1	-0,4	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,2	26
879	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	1,0	1,3	29
803	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	29
805	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7	31
815	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,3	35
811	-0,1	-0,2	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,1	27
813	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	-0,9	27
816	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	0,2	28
814	0,6	1,3	1,1	0,6	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	1,5	31
812	0,1	0,2	0,0	0,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	-0,2	37

TEMPS EN MINUTES												Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
<i>h moyen</i>	0,060	0,090	0,070	0,160	0,200	0,280	0,320	0,310	0,230	0,170	0,084	15
E <sub>h</sub>	0,014	0,026	0,025	0,043	0,044	0,059	0,064	0,083	0,079	0,078	0,093	24
$\sigma$												20
E $\sigma$	0,010	0,018	0,018	0,020	0,021	0,031	0,042	0,045	0,058	0,056	0,055	n = 10
<i>h moyen</i>	0,095	0,109	0,141	0,186	0,191	0,245	0,264	0,268	0,273	0,264	0,084	15
E <sub>h</sub>	0,019	0,022	0,028	0,040	0,049	0,056	0,064	0,074	0,078	0,084	0,093	24
$\sigma$	0,133	0,156	0,197	0,280	0,341	0,387	0,443	0,513	0,544	0,581	0,644	20
E $\sigma$	0,014	0,016	0,020	0,028	0,035	0,039	0,045	0,052	0,055	0,059	0,065	n = 22
<i>h moyen</i>	0,067	0,093	0,113	0,127	0,153	0,173	0,193	0,153	0,100	0,080	-0,007	25
E <sub>h</sub>	0,016	0,037	0,053	0,069	0,076	0,079	0,089	0,089	0,090	0,087	0,092	24
$\sigma$	0,094	0,214	0,305	0,396	0,438	0,455	0,508	0,507	0,519	0,498	0,529	20
E $\sigma$	0,012	0,026	0,038	0,049	0,054	0,056	0,063	0,063	0,064	0,061	0,065	n = 15
<i>h moyen</i>	0,267	0,400	0,325	0,391	0,425	0,508	0,550	0,533	0,583	0,617	0,650	35
E <sub>h</sub>	0,038	0,064	0,104	0,117	0,141	0,159	0,184	0,200	0,201	0,206	0,203	35
$\sigma$	0,193	0,327	0,533	0,602	0,725	0,817	0,947	1,026	1,030	1,057	1,044	35
E $\sigma$	0,027	0,045	0,073	0,083	0,100	0,112	0,130	0,141	0,142	0,146	0,144	n = 12
<i>h moyen</i>	0,014	0,057	0,114	0,214	0,286	0,371	0,400	0,414	0,357	0,329	0,343	15
E <sub>h</sub>	0,021	0,030	0,044	0,064	0,077	0,090	0,096	0,118	0,134	0,136	0,139	27
$\sigma$	0,083	0,118	0,173	0,253	0,304	0,353	0,378	0,464	0,526	0,534	0,545	27
E $\sigma$	0,015	0,021	0,031	0,046	0,055	0,064	0,068	0,084	0,095	0,096	0,098	n = 7
<i>h moyen</i>	0,042	0,017	-0,025	-0,008	0,017	0,058	0,117	0,092	0,058	0,050	0,042	20
E <sub>h</sub>	0,017	0,021	0,031	0,032	0,039	0,046	0,053	0,058	0,054	0,059	0,058	20
$\sigma$	0,086	0,107	0,159	0,166	0,199	0,236	0,273	0,296	0,275	0,301	0,299	20
E $\sigma$	0,012	0,015	0,022	0,023	0,027	0,032	0,038	0,041	0,038	0,041	0,041	n = 12
<i>h moyen</i>	0,088	0,075	0,050	0,086	0,075	0,088	0,137	0,100	0,137	0,250	0,175	25
E <sub>h</sub>	0,028	0,052	0,066	0,086	0,102	0,103	0,115	0,114	0,114	0,117	0,128	27
$\sigma$	0,116	0,222	0,278	0,359	0,426	0,431	0,482	0,477	0,477	0,492	0,538	27
E $\sigma$	0,020	0,037	0,047	0,061	0,072	0,073	0,081	0,080	0,080	0,083	0,091	n = 8
<i>h moyen</i>	0,200	0,225	0,262	0,312	0,425	0,462	0,550	0,687	0,800	0,875	0,900	30
E <sub>h</sub>	0,041	0,059	0,075	0,088	0,096	0,114	0,115	0,128	0,153	0,156	0,157	30
$\sigma$	0,173	0,249	0,316	0,369	0,402	0,479	0,482	0,537	0,640	0,655	0,658	30
E $\sigma$	0,027	0,042	0,053	0,062	0,068	0,081	0,091	0,108	0,110	0,111	0,111	n = 8

plantes exposées horizontalement pendant 5 minutes, on voit que les courbes ont absolument la même allure. Les plantes longues présentent aussi au début une déviation positive brusque, puis la vitesse de courbure diminue pour augmenter ensuite puis décroître régulièrement jusqu'à ce que la déviation atteigne un maximum ; celui-ci est atteint au bout d'un temps qui varie entre 40 et plus de 55 minutes. Les plantes de 15 mm., mises en expérience à 27°, présentent une courbure allant en s'accélérant au début et se comportent comme les plantes courtes exposées horizontalement pendant 5 minutes.

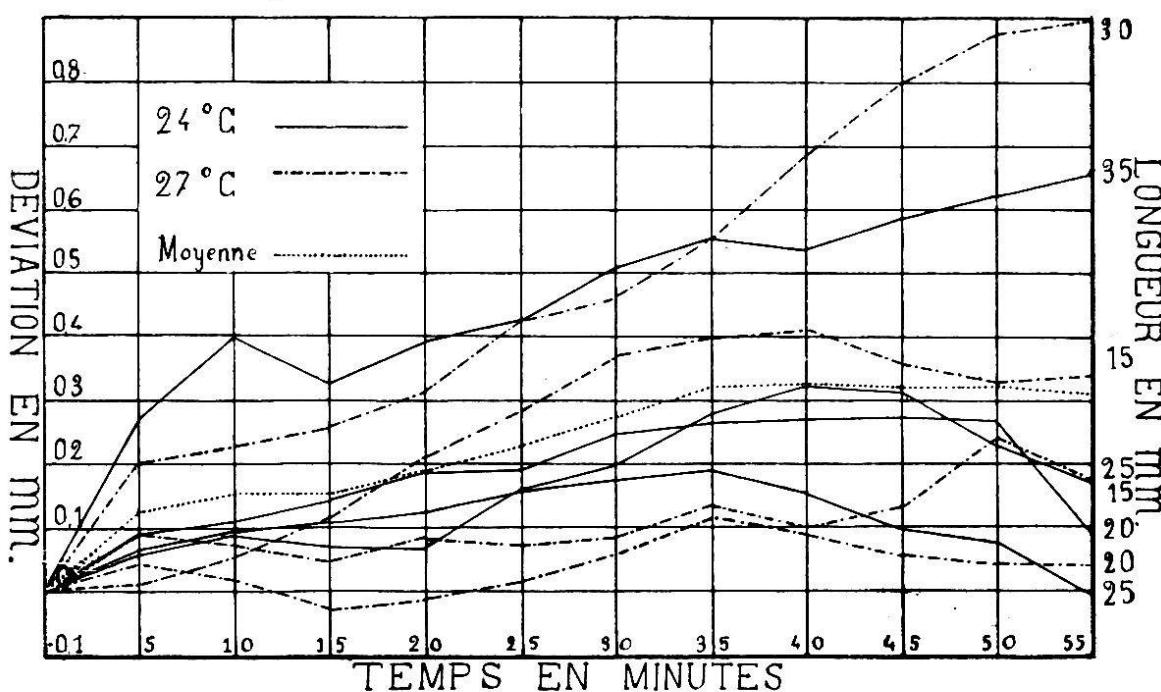


Fig. 19.

Comme ces 100 expériences se répartissent en un plus grand nombre de catégories de température-longueur que les 100 expériences avec exposition horizontale pendant 5 minutes, les diverses courbes sont plus irrégulières vu le faible nombre de cas pour chaque catégorie.

La courbe (en pointillé, fig. 19) représentant la variation de la déviation moyenne pour les 100 expériences a absolument la même allure que celle de  $h$  moyen des plantes exposées horizontalement avec la seule différence que les ordonnées sont constamment plus faibles.

### TROISIÈME SÉRIE. — Quinze secondes d'exposition horizontale.

Les expériences de cette série portent les n°s 901 à 987 et ont été faites du 2 au 22 septembre 1911 ; la température a varié entre 23 et 28° C ; toutes les expériences rentrent donc dans les catégories à température médiane de 24° et 27°. Les résultats sont donnés dans le tableau XXXV, classés comme de coutume ; les valeurs négatives de la déviation  $h$  sont imprimées en caractères gras.

Le tableau XXXVI donne pour les deux catégories de température-longueur comprenant un nombre suffisant d'expériences la valeur de  $h$  moyen, de l'index de variabilité  $\sigma$  de  $h$  ainsi que les erreurs probables. Les valeurs négatives de  $h$  moyen ont été imprimées en caractères gras. La dernière case du tableau donne les mêmes valeurs pour l'ensemble des 87 expériences effectuées.

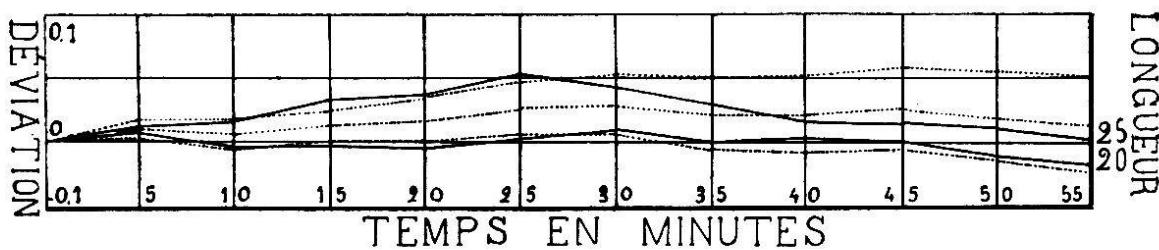


Fig. 20.

Dans la figure 20, j'ai représenté graphiquement la variation de  $h$  moyen en fonction du temps ; les deux courbes en traits pleins donnent les valeurs de  $h$  moyen pour les catégories 24°, 20 mm., et 24°, 25 mm ; la ligne pointillée centrale donne la variation de  $h$  moyen pour l'ensemble des 87 expériences effectuées. Les deux autres lignes pointillées sont placées à la distance du double de l'erreur probable de  $h$  moyen. On voit que malgré un temps d'exposition aussi court (15 sec.) la déviation est encore franchement positive ; l'allure de la courbe des 87 expériences est la même que celle des 100 expériences où l'exposition était

TABLEAU XXXV. — Déviations *h* mesurées en millimètres de l'extrémité de la coléoptile de plantes d'avoine placées pendant 15 secondes horizontalement, puis observées au cathétomètre une fois replacées verticalement.

N <sup>o</sup> Numéros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim. Température en degrés C.	
	5.	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
959	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	13
901	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	23	18
979	0,0	0,2	0,2	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1	23	20
957	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	23	21
982	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	23	21
980	0,0	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,5	23	22
984	0,1	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,4	23	22
981	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	23	23
987	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	23	24
986	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	23	26
958	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3	0,4	23	28
985	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	23	30
976	-0,4	-0,8	-0,9	-1,2	-1,2	-1,5	-1,7	-1,7	-1,5	-1,3	-1,2	31
972	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	24
955	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	24
951	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	24
954	-0,2	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	24
956	0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	0,0	20
966	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,6	-0,6	-0,6	20
975	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,6	-0,6	-0,3	20
965	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	21
950	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	24
969	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,4	-0,4	-0,4	-0,6	-0,5	-0,6	-0,7	24
960	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	24
973	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-0,9	23
977	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	23
968	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,5	-0,5	-0,5	24
978	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,3	24



TABLEAU XXXXV (*suite*)

Numéros	TEMPS EN MINUTES										Longueur en millim.	
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
907	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,1	0,3	18
923	0,0	-0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	19
903	0,1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	20
927	0,0	0,0	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	20
905	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8	21
904	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21
914	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	0,0	0,1	22
932	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	22
945	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	22
926	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	23
938	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	23
913	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,3	-0,3	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-1,0	24
924	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	25
934	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	25
940	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	26
915	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,7	-0,9	-1,0	27
939	0,0	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	27
923	0,1	0,2	0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	28
925	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	28
937	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	29
936	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	30
912	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,1	0,0	31

TABLEAU XXXVI

	TEMPS EN MINUTES											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
<i>h</i> moyen	0,017	-0,008	-0,004	-0,008	0,004	0,021	0,000	0,004	0,000	-0,021	-0,033	24
<i>E<sub>h</sub></i>	0,010	0,016	0,019	0,027	0,031	0,038	0,043	0,047	0,050	0,051	0,057	20
$\sigma$	0,075	0,119	0,137	0,193	0,228	0,277	0,314	0,341	0,363	0,371	0,415	
<i>E<sub>σ</sub></i>	0,007	0,012	0,013	0,019	0,022	0,027	0,031	0,033	0,035	0,036	0,040	n = 24
<i>h</i> moyen	0,028	0,032	0,068	0,076	0,104	0,088	0,060	0,032	0,032	0,024	0,044	25
<i>E<sub>h</sub></i>	0,018	0,025	0,027	0,028	0,037	0,046	0,050	0,056	0,061	0,068	0,075	
$\sigma$	0,131	0,182	0,201	0,210	0,276	0,339	0,373	0,413	0,451	0,503	0,557	
<i>E<sub>σ</sub></i>	0,012	0,017	0,019	0,020	0,026	0,032	0,036	0,040	0,043	0,048	0,053	n = 25
<i>h</i> moyen	0,021	0,014	0,029	0,033	0,056	0,060	0,044	0,041	0,051	0,039	0,028	Ensemble
<i>E<sub>h</sub></i>	0,008	0,011	0,013	0,016	0,020	0,024	0,027	0,030	0,032	0,035	0,038	des
$\sigma$	0,107	0,150	0,173	0,218	0,267	0,318	0,361	0,400	0,426	0,461	0,507	87 expériences
<i>E<sub>σ</sub></i>	0,006	0,008	0,009	0,012	0,014	0,017	0,019	0,021	0,023	0,025	0,027	effectuées.

5 et 2 minutes ; c'est à dire que pendant les premières minutes où la plante est replacée dans la position verticale il se produit une courbure relativement rapide dans le sens positif puis la vitesse diminue pour augmenter de nouveau ; au bout d'un certain temps la courbure qui a atteint un maximum régresse.

### Interprétation des résultats des trois séries d'expérience.

Comparons les courbes de  $h$  moyen de toutes les expériences faites en exposant les plantes respectivement pendant 5 min., 2 min. et 15 sec. horizontalement (fig. 18, 19 et 20.)

L'allure de ces trois courbes (représentées en pointillé) est analogue. On peut se représenter ces courbes comme formées par la superposition de deux courbes correspondant à deux phénomènes différents.

Si le géotropisme agissait seul, nous verrions probablement la courbure commencer immédiatement avec une certaine vitesse qui irait en diminuant graduellement jusqu'au moment où devenant nulle, la courbure atteindrait un maximum ; puis la courbure décroîtrait de nouveau sous l'influence de l'autotropisme. Si l'autotropisme agissait d'une manière toujours égale, la courbe serait une parabole de la forme

$$h = vt - \beta t^2$$

où  $v$  serait la vitesse de courbure au début et  $\beta$  l'accélération due à l'autotropisme.

Supposons maintenant que le géotropisme n'intervienne pas. Pendant que la plante est placée horizontalement, elle se courbe lentement vers le bas sous l'influence du poids de la plante ; cette courbure se fait lentement, freinée qu'elle est probablement par la résistance que les membranes protoplasmiques et cellulaires opposent à la fil-

tration de l'eau qui doit se déplacer de cellule à cellule pour permettre la flexion. Lorsqu'on replace la plante verticalement, elle tend à se redresser, comme le ferait une lame d'acier ; quoique ici encore, le mouvement soit freiné, la plante dépasse sa position normale, puis revient en arrière pour reprendre sa direction primitive par une série d'oscillations ; ces oscillations seront d'amplitude de plus en plus faible comme celle d'un ressort.

Nos courbes (fig. 18, 19 et 20) montrent que la première oscillation surtout est forte tandis que les suivantes restent dans la limite des erreurs.

Mon intention était de calculer les valeurs des quantités  $v$  et  $\beta$  de l'équation  $h = vt - \beta t^2$  comme je l'avais fait pour les plantes exposées à la pesanteur pendant toute la durée de l'expérience. Il ne m'a pas été possible de le faire pour les raisons suivantes : 1<sup>o</sup> à cause de la superposition du mouvement oscillatoire décrit plus haut ; 2<sup>o</sup> parce que en 55 minutes, durée de l'expérience, on n'a guère que la partie ascendante de la courbe, et 3<sup>o</sup> parce que la forme de la courbe n'est une parabole que d'une façon approchée vu que  $\beta$ , qui serait l'accélération négative due à l'autotropisme, varie avec la courbure. La discussion des résultats des expériences sera faite dans le chapitre théorique (page 530).

### Essai d'une théorie mathématique du géotropisme.

Dans ce chapitre, je veux essayer de coordonner les résultats quantitatifs fournis par les expériences présentées dans les paragraphes précédents avec ceux des différents auteurs qui ont énoncé des lois sur le géotropisme. Qu'il soit bien entendu que je ne m'occupe ici que du géotropisme des organes orthotropes, c'est-à-dire de ceux qui ont leur position normale dans la direction de la verticale.

La théorie que je vais donner est une *théorie simplifiée*,

car j'ai dû faire des hypothèses et des simplifications quand j'ai dû tenir compte du rôle de la nutation et de l'autotropisme.

Les conclusions auxquelles sont arrivés les différents auteurs qui se sont occupés du géotropisme peuvent se résumer comme suit: 1<sup>o</sup> *Si l'on place une plante de façon qu'elle fasse un angle avec la direction d'une force capable d'agir géotropiquement sur elle (pesanteur ou force centrifuge), la plante ne commence à se courber qu'au bout d'un certain temps (temps de réaction); 2<sup>o</sup> si, après avoir soumis une plante à une force capable d'induire une réaction géotropique, pendant un certain temps (temps d'exposition), on soustrait la plante à l'action de la force, il n'y a courbure que si le temps d'exposition a atteint ou dépassé une certaine durée (temps de présentation).*

Mes expériences me semblent démontrer que ces conclusions sont erronées ; les plantes exposées et observées en position horizontale présentent une flexion vers le bas au début de l'expérience, flexion qui se fait surtout à la base de la plante ; mais en même temps commence la courbure géotropique vers le haut, et rien ne parle pour que cette courbure ne commence pas immédiatement ; le temps de réaction, s'il existe, serait donc excessivement court et n'aurait plus aucun rapport avec ce que les auteurs ont nommé jusqu'à présent temps de réaction. Les expériences faites avec des plantes exposées pendant 5, 2 minutes et 15 secondes horizontalement puis observées verticalement montrent une décroissance régulière de la courbure maxima atteinte au fur et à mesure que le temps d'exposition diminue ; rien n'autorise à prétendre qu'en choisissant un temps d'exposition moindre, il puisse arriver qu'il ne se produise plus de courbure. Il pourrait advenir que la déviation moyenne soit complètement masquée par l'erreur probable due à la nutation, mais en faisant un nombre très grand d'expériences on pourrait toujours démontrer une déviation dans le sens positif.

Je crois pouvoir tirer de mes expériences la conception suivante : *Une plante soumise à l'action d'une force capable d'agir géotropiquement sur elle commence à se courber immédiatement. Les temps de réaction et de présentation ne peuvent être définis comme les temps d'exposition nécessaires pour que la courbure commence, mais comme les temps d'exposition nécessaires pour qu'il se produise une courbure telle qu'on puisse l'apercevoir à l'œil nu ou armé.* En étudiant le temps de réaction, nous étions déjà arrivé à cette conclusion (voir page 469).

Les lois trouvées en mesurant les temps de réaction et de présentation gardent malgré ce changement de définition une signification. Ce chapitre montrera que ces lois sont approximatives et peuvent être déduites d'une loi fondamentale, que j'énoncerai plus loin, en négligeant certains termes, généralement petits dans les conditions où l'on se place quand on détermine soit le temps de présentation soit le temps de réaction.

On a énoncé jusqu'à aujourd'hui cinq lois régissant le géotropisme; les voici dans l'ordre chronologique.

**PREMIÈRE LOI.** Fitting<sup>1</sup>, à l'aide de son clinostat intermittent, est arrivé à des résultats qui peuvent s'énoncer comme suit : *Pour que les inductions géotropiques produites par l'exposition d'une plante à la pesanteur agissant sous des angles  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$  soient égales, il faut que les plantes soient soumises à l'action de la pesanteur pendant des temps  $t_1, t_2, t_3, \dots$  tels que l'on ait*

$$t_1 \sin \alpha_1 = t_2 \sin \alpha_2 = t_3 \sin \alpha_3 = \dots$$

Cette loi peut également s'énoncer comme suit :

*L'induction géotropique (effet produit sur la plante) est proportionnelle au sinus de l'angle que fait l'axe de la plante avec la verticale et proportionnelle au temps pendant lequel la pesanteur agit.*

<sup>1</sup> H. Fitting. *Untersuchungen über den geotropischen Reizvorgang.* (Jahrb. f. w. Bot. Bd 41. 1904.

**DEUXIÈME LOI.** En 1909<sup>1</sup>, j'ai démontré la loi suivante : *Pour que l'induction géotropique produite par une force centrifuge  $f_1$  soit égale à l'induction produite par une force  $f_2$ , il faut que le rapport  $\frac{f_1}{f_2}$  soit égal au rapport  $\frac{t_2}{t_1}$  des temps pendant lesquels les forces agissent.*

Cette loi peut aussi s'énoncer de la manière suivante : *L'induction géotropique (effet produit sur la plante) est proportionnelle à la force centrifuge et au temps pendant lequel la force agit.*

Dans les deux premières lois, l'induction se définit par la propriété suivante : *Deux inductions géotropiques sont égales, lorsque, agissant en directions opposées sur la plante, alternativement ou simultanément, la plante ne se courbe pas.* Ces deux premières lois sont indépendantes de l'état psychologique de l'observateur.

**TROISIÈME LOI.** *Le produit de la force centrifuge qui agit sur une plante par le temps de présentation géotropique correspondant est une constante.* Cette loi était donnée implicitement par la figure où Bach<sup>2</sup> montre graphiquement la variation du temps de présentation en fonction de la force centrifuge ainsi que par sa table 36. Fröschel<sup>3</sup>, qui a démontré que le produit du temps de présentation phototropique par l'intensité lumineuse agissant sur la plante est une constante, a montré que les résultats de Bach amenaient les mêmes conclusions pour le géotropisme; le travail de Fröschel a été présenté le 2 avril 1908 à l'Académie des Sciences de Vienne. Sans avoir eu connaissance

<sup>1</sup> A. Maillefer. *Etude sur le géotropisme.* Bull. Soc. vaud. Sc. nat. XLV. 1909.

<sup>2</sup> Heinrich Bach. *Ueber die Abhängigkeit der geotropischen Präsentations- und Reaktionszeit von verschiedenen äusseren Faktoren.* Jahrb. f. w. Bot. Bd. 44, 1907.

<sup>3</sup> Paul Fröschel. *Untersuchung über die heliotropische Präsentationszeit Mitteilung.* Sitzungs berichten d. k. Akad. d. Wissenschaften in Wien. Mat.-naturw. Kl. Bd CXVII Abt. I. 1908.

des travaux de Fröschel, j'énonçai moi-même<sup>1</sup> cette loi le 17 février 1909 en partant du travail de Bach ; enfin le 29 mai 1909, Mlle *Pekelharing*<sup>2</sup> (maintenant Mme Rutten), sans avoir eu connaissance du travail de Fröschel ni du mien, énonçait la même loi devant l'Académie des Sciences d'Amsterdam en partant d'expériences personnelles très soigneusement faites.

**QUATRIÈME LOI.** *Le produit du temps de présentation d'une plante soumise à la pesanteur agissant obliquement sur elle par le sinus de l'angle que fait la plante avec la verticale est une constante.* Cette loi a été énoncée par Mlle *Pekelkaring* en même temps que la précédente.

**CINQUIÈME LOI.** *Le produit de la force centrifuge  $f$  qui agit géotropiquement sur une plante par le temps de réaction correspondant  $R$  diminué d'une constante  $k$  est une constante  $a$ .*

$$(R - k)f = a$$

Cette loi a été énoncée par *Tröndle*<sup>3</sup> ; en étudiant les résultats très insuffisants fournis par Bach (loc. cit.), j'avais cru pouvoir formuler la loi suivante<sup>4</sup> : *Le temps de réaction géotropique est inversement proportionnel à la racine cinquième de la force centrifuge agissant.*

$$R = \sqrt[5]{\frac{a}{f}}$$

**SIXIÈME LOI.** *La vitesse de la courbure géotropique est proportionnelle au temps pendant lequel la pesanteur a agi sur la plante et proportionnel à un facteur nommé accélération géotropique.*

<sup>1</sup> A. Maillefer. *Variation de l'induction géotropique*. Procès-verbaux. Soc. vaud. Sc. nat. Séance du 17 février 1909.

<sup>2</sup> E.-J. Pekelharing *Onderzoeken omtrent de betrekking tusschen presentatietijd en grotte van den prikkel bij geotropische krommingen*. Proceedings Koninklijke Akad. v. Wetenschappen. 1909.

<sup>3</sup> A. Tröndle. *Der Einfluss des Lichtes auf die Permeabilität der Plasmahaut*, Jahrb. f. wiss. Bot. 48. 1910.

<sup>4</sup> A. Maillefer. *Etude sur le géotropisme*. Bull. Soc. vaud. Sc. nat. XLV. 1909, p. 297.

Cette loi formait la conclusion de mon travail de 1910 sur la réaction géotropique<sup>1</sup>.

Le but de ce travail sera de montrer qu'en développant la sixième loi, en y incorporant une définition de l'accélération géotropique, on peut retrouver les quatre premières lois, donner une nouvelle définition à la cinquième loi et en même temps coordonner les résultats des expériences qui sont relatées au début de ce travail.

La sixième loi développée, que j'appelera par la suite la **loi fondamentale du géotropisme**, non parce que je crois avoir atteint le fond des choses, mais simplement parce que les autres lois peuvent s'en déduire simplement, a la teneur suivante :

Lorsqu'on soumet une plante orthogéotropique à l'action d'une force (force centrifuge ou gravité), elle commence immédiatement à se courber avec une certaine vitesse  $v$  due à une accélération de courbure  $b$  proportionnelle à la force qui agit sur la plante et au sinus de l'angle que fait l'axe de la plante avec la direction de la force. La vitesse de courbure  $v$  est proportionnelle au temps écoulé depuis le début de l'action géotropique. Si l'action de la force cesse à un moment donné, la courbure continue à s'accentuer en vertu de la vitesse de courbure acquise. La courbure géotropique est contrariée par une action antagoniste, l'autotropisme qui tend constamment à ramener la plante dans sa position primitive; cette action peut être représentée par une accélération  $\beta < b$ . Après que la force aura cessé d'agir, la plante continuera à se courber, mais avec une vitesse de plus en plus faible; la courbure atteindra un maximum puis diminuera de nouveau.

La courbure se définit comme l'inverse du rayon de courbure; ceci suppose que la courbe présentée par la plante est un arc de cercle, ce qui sûrement n'est pas le

---

A. Maillefer. *Etude sur la réaction géotropique*. Bull. Soc. vaud. Sc. nat. XLVI. 1910, p. 254.

cas, la base de la coléoptile se courbe moins que d'autres régions ; il faudra une étude de détail pour voir si la courbure des diverses régions de la tige se fait suivant la loi fondamentale ; ce que je crois probable. Comme la courbure au bout du temps de réaction est encore très faible, la courbe réelle ne doit pas différer beaucoup d'un arc de cercle.

Les termes accélération et vitesse sont compris de la même manière qu'en mécanique ; les formules de la mécanique sont donc directement applicables. Dans les déductions qui suivent, j'ai supposé l'accélération de courbure géotropique  $b$  constante, ce qui n'est pas le cas d'après l'énoncé même de la loi fondamentale du géotropisme ; en effet, la plante en se courbant ne présente plus ses différentes parties sous le même angle à l'action de la pesanteur ; comme nous avons supposé l'accélération géotropique proportionnelle au sinus de l'angle que la plante fait avec la verticale, cette accélération doit changer constamment de valeur. Il sera possible par la suite, à l'aide d'expériences qu'on peut prévoir très délicates, de tenir compte des positions successives des diverses parties de la plante sur l'accélération géotropique. Cette étude donnerait la loi suivant laquelle la sensibilité géotropique est répartie le long de la plante. Une telle étude m'eût entraîné trop loin. Du reste, pendant mes expériences et celles où les auteurs ont déterminé les temps de présentation et de réaction, les courbures n'ont jamais atteint une valeur telle qu'il n'ait plus été permis de supposer que la pesanteur n'agissait plus avec la même intensité sur la plante, surtout lorsqu'il s'agissait de plantes exposées horizontalement.

J'ai de même supposé constante l'accélération  $\beta$  due à l'autotropisme ; on ne sait rien actuellement sur la variation de cette accélération en fonction de la courbure de la plante ; il ne m'est donc pas possible de tenir compte de cette accélération ; il est probable que  $\beta$  croît avec la cour-

bure; c'est pourquoi lorsque les courbures devenaient très petites, j'ai pu négliger l'autotropisme; dans les autres cas j'ai supposé  $\beta$  constant; les courbures restant toujours très faibles.

La loi fondamentale nous permettra de résoudre les problèmes suivants<sup>1</sup>:

1°. *Pendant combien de temps une force produisant une accélération de courbure géotropique b doit-elle agir pour que, grâce à la vitesse de courbure acquise la plante atteigne une courbure maximum C?*

L'accélération qui agit réellement sur la plante est  $b - \beta$ . La vitesse acquise au bout du temps  $t_1$  sera

$$v_1 = (b - \beta) t_1$$

En vertu de cette vitesse acquise, la courbure maximum atteinte ensuite sera

$$C = \frac{v_1^2}{2 \beta} = \frac{(b_1 - \beta)^2 t_1^2}{2 \beta} \text{ d'où } t_1 = \frac{\sqrt{2 \beta C}}{(b_1 - \beta)}$$

en négligeant la faible courbure produite pendant le temps  $t_1$ .

Pour amener une même courbure  $C$ , une accélération de courbure  $b_2$  devra agir pendant un temps  $t_2$

$$t_2 = \frac{\sqrt{2 \beta C}}{(b_2 - \beta)}$$

Supposons que  $C$  soit précisément la courbure la plus faible qui soit visible à l'œil:  $t_1$  et  $t_2$  seront les temps de présentation correspondant aux accélérations  $b_1$  et  $b_2$ . Faisons le rapport:

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{(b_2 - \beta) \sqrt{2 \beta C}}{(b_1 - \beta) \sqrt{2 \beta C}} = \frac{b_2 - \beta}{b_1 - \beta}$$

Comme, au moment où la courbure commence à être vi-

<sup>1</sup> Les formules employées sont celles de la chute des corps, en remplaçant l'accélération  $g$  par l'accélération de courbure  $b$ , la vitesse par la vitesse de courbure et l'espace parcouru par la courbure atteinte.

sible à l'œil nu, elle est encore très faible, l'accélération  $\beta$  due à l'autotropisme est encore très faible, nous pouvons la négliger ; il vient alors

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{b_2}{b_1} \text{ ou } t_1 b_1 = t_2 b_2$$

Comme d'après la loi fondamentale l'accélération géotropique de courbure est proportionnelle à la force qui agit sur la plante on a

$$t_1 f_1 = t_2 f_2$$

ce qui peut s'exprimer comme suit : *Le produit de la force centrifuge (ou autre) qui agit sur la plante par le temps de présentation géotropique est une constante.* Nous retrouvons ainsi la troisième loi.

D'après la loi fondamentale, l'accélération géotropique de courbure est proportionnelle au sinus de l'angle suivant lequel la force agit sur la plante ; on a en remplaçant  $b_1$  par  $\sin \alpha_1$  et  $b_2$  par  $\sin \alpha_2$

$$t_1 \sin \alpha_1 = t_2 \sin \alpha_2$$

ce qui peut se rendre comme suit : *Le produit du temps de présentation d'une plante soumise à la pesanteur ou à une force centrifuge agissant obliquement sur elle par le sinus de l'angle que fait la plante avec la direction de la force est une constante.* Or ce n'est pas autre chose que la quatrième loi étendue aux forces centrifuges.

*2<sup>o</sup> Faisons agir, alternativement, un grand nombre de fois, sur les deux faces opposées de la plante deux forces différentes, provoquant des accélérations de courbure  $b_1$  et  $b_2$ , pendant des temps  $t_1$  et  $t_2$  ; quelle relation doit lier les temps et les accélérations pour que la plante ne se courbe pas ?*

Dans ces conditions expérimentales, l'accélération due à l'autotropisme  $\beta$  est négligeable. A la fin de la première période  $t_1$ , l'accélération  $b_1$  aura communiqué une vitesse de courbure

$$v_1 = b_1 t_1$$

Pendant la deuxième période  $t_2$ , si on laissait la plante à elle-même, elle continuerait à se courber ; sa vitesse irait en décroissant ; si l'on prend  $t_2$ , et par conséquent  $t_1$  assez petits, on peut admettre que pendant la deuxième période  $t_2$  la plante continuera à se courber avec une vitesse uniforme égale à  $v_1$ .

A la fin de la deuxième période, l'accélération  $b_2$  communiquerait à la plante, si elle agissait seule, une vitesse de courbure

$$v_2 = b_2 t_2$$

Pour qu'il n'y ait pas courbure, il suffit qu'à la fin de la deuxième période on ait  $v_1 = v_2$  ; si cette condition est remplie à ce moment, elle le sera aussi au bout de la quatrième, sixième, huitième, ..... période, par conséquent tant que l'expérience durera. Il suit de là qu'il faut que

$$b_1 t_1 = b_2 t_2$$

D'après la loi fondamentale, l'accélération de courbure est proportionnelle à la force agissant sur la plante, donc pour qu'il n'y ait pas courbure il faut que

$$f_1 t_1 = f_2 t_2$$

Nous avons ainsi retrouvé la deuxième loi.

L'accélération de courbure est également, d'après la loi fondamentale, proportionnelle au sinus de l'angle suivant lequel la force agit ; ce qui nous donne

$$t_1 \sin \alpha_1 = t_2 \sin \alpha_2$$

c'est-à-dire la première loi.

3° *Laissons agir une force d'accélération de courbure b sur une plante ; au bout de combien de temps la courbure aura-t-elle atteint une certaine valeur C ?*

Les formules de mécanique donnent immédiatement

$$C = \frac{1}{2} bt^2$$

On en tire

$$t^2 = \frac{2 C}{b} \text{ et } t = \sqrt{\frac{2 C}{b}}$$

Si  $C$  est la courbure la plus faible que l'œil puisse apprécier,  $t$  est le temps de réaction ; désignons-le par  $R$ .

Dans la dernière équation posons  $\sqrt{2C} = r = \text{constante}$ , elle devient

$$R = \frac{r}{\sqrt{b}}$$

$b$  étant proportionnel à la force, on peut poser

$$R = \frac{r'}{\sqrt{f}}$$

Telle serait la formule donnant la valeur du temps de réaction en fonction de la force (*f.* centrifuge ou gravité) agissant sur la plante.

Tröndle (*loc. cit.*) était arrivé à la formule

$$(R - k)f = a$$

et j'étais moi-même arrivé en parlant des résultats incomplets et très sujets à caution de Bach à

$$R = \frac{a}{\sqrt[5]{f}}$$

La forme de ma formule était donc juste, et si j'avais eu à ma disposition des chiffres corrects je serais infailliblement arrivé à la formule exacte en employant soit la méthode des moments, soit la méthode des moindres carrés.

Ce qui précède s'applique au temps de réaction mesuré, en laissant la pesanteur agir sur la plante jusqu'à la fin de l'expérience. Supposons qu'on expose une plante de manière à lui fournir une accélération géotropique de courbure, juste pendant le temps de présentation puis qu'on la place sur le clinostat de manière à neutraliser l'action de la pesanteur ; la plante continuera à se courber, atteindra la courbure qui est précisément la plus faible perceptible à l'œil puis tendra à se redresser sous l'influence de l'autotropisme. Le temps de réaction dans ces conditions se composera de la somme du temps de présentation et du temps qui s'écoule depuis la fin de l'exposition jusqu'au moment de la courbure perceptible.

Désignons par  $P$  le temps de présentation ; la vitesse de courbure acquise au bout de ce temps sera

$$v = bP$$

et la courbure atteinte au bout du temps  $P$  sera

$$c_1 = \frac{1}{2} bP$$

La courbure qui se produira ensuite en vertu de la vitesse initiale  $v$  sera

$$c_2 = \frac{v^2}{2\beta} = \frac{b^2 P^2}{2\beta}$$

et cela au bout du temps

$$t = \frac{v}{\beta} = \frac{bP}{\beta}$$

La courbure totale sera

$$C = c_1 + c_2 = \frac{1}{2} bP + \frac{b^2 P^2}{2\beta}$$

Admettons que ce soit la courbure minimum apercevable.

Nous avons d'après la troisième loi

$$b \cdot P = \text{constante} = a$$

donc

$$P = \frac{a}{b}$$

$$\text{et } t = \frac{bP}{\beta} = \frac{b \cdot a}{\beta \cdot b} = \frac{a}{\beta} = \text{constante}$$

Nous pouvons tirer de cette équation une nouvelle loi :

*Si l'on expose une plante à l'action d'une force agissant géotropiquement sur elle pendant la durée du temps de présentation (c'est-à-dire pendant le temps strictement nécessaire pour que la courbure maximum atteinte, une fois la plante soustraite à l'action unilatérale de la pesanteur, soit visible à l'œil), le temps qui s'écoule entre le moment où la plante est soustraite à l'action de la pesanteur et celui où la courbure est maximum et par conséquent devient visible est constant.*

Cette loi n'est valable que si l'on peut considérer l'accélération  $\beta$  due à l'autotropisme comme constante ; nous croyons qu'on peut faire cette supposition puisqu'il s'agit de courbures très faibles. Nous verrons que l'accélération  $\beta$  dépend probablement de la vitesse de courbure. |

Dans les conditions ci-dessus le temps de réaction  $R$  est

$$R = P + t$$

nous avons vu que  $t = \text{constante}$

donc  $R = P + \text{constante}$

mais  $P = \frac{a}{b}$

et  $R = \frac{a}{b} + \text{const.} = \frac{a}{b} + k$

Après transformation il vient

$$b(R - k) = a$$

mais comme l'accélération de courbure  $b$  est proportionnelle à la force  $f$  agissant sur la plante, on peut écrire

$$f(R - k) = \text{constante}$$

Nous sommes arrivé à la formule de *Tröndle*. La constante  $k$  n'est pas autre chose que  $t$ , c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre le moment où la plante cesse d'être soumise à la pesanteur et celui où l'on aperçoit la courbure ; remarquons en outre que

$$R - k = P$$

et par conséquent l'on a

$$f \cdot P = \text{constante}$$

c'est-à-dire que nous retrouvons la troisième loi.

Le temps  $t$  dépend uniquement en effet de la vitesse initiale de courbure ; cette vitesse initiale est

$$v = bP$$

c'est la vitesse de courbure acquise pendant la période d'exposition.

Notre loi fondamentale du géotropisme renferme par conséquent toutes les lois données jusqu'ici sur la variation du géotropisme en fonction de la force qui agit et de l'angle suivant lequel elle agit. Nous avons ainsi tout lieu de croire qu'elle est exacte.

Il nous reste à montrer comment la loi fondamentale, qui nous a été suggérée par une première inspection des résultats des expériences détaillées au début de ce travail, s'applique à ses dernières.

Comparons d'abord les expériences où les plantes d'avoine étaient exposées de manière à faire respectivement des angles de  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $15^\circ$  avec la verticale. La loi fondamentale nous dit que la courbure géotropique se fait de telle façon que la courbure ou (ce qui revient à peu près au même si la courbure est faible) la déviation  $k$  de l'extrémité de la plante obéisse à l'équation

$$k = bt^2$$

où  $b$  est l'accélération géotropique de courbure qui est elle-même proportionnelle au sinus de l'angle  $\varphi$  que la plante fait avec la verticale ; on peut donc poser :

$$b = b' \sin \varphi$$

par conséquent

$$k = b' \sin \varphi t^2$$

Nous avons vu d'autre part que cette courbure géotropique vers le haut est accompagnée d'une courbure vers le bas, simple flexion mécanique se faisant lentement par suite d'un freinage qui est probablement dû à la résistance opposée à la filtration de l'eau de cellule à cellule par les membranes cellulaires ; si le freinage est assez énergique, la vitesse de la flexion, mesurée par le déplacement  $f$  de l'extrémité de la plante, sera uniforme et sera donné par

$$f = a t$$

où  $a$  est une constante négative. Il est permis d'admettre que

$$a = a' \sin \varphi$$

c'est-à-dire que la flexion est proportionnelle au sinus de l'angle que la plante fait avec la verticale.

Le déplacement  $h$  dû au géotropisme et à la flexion mécanique agissant simultanément sera par conséquent donné par

$$h = k + f = a' \sin \varphi t + b' \sin \varphi t^2$$

qu'on peut écrire

$$h = \sin \varphi (a' t + b' t^2)$$

Lorsque la plante est exposée sous un angle de  $90^\circ$ , c'est-à-dire horizontalement

$$\sin \varphi = 1$$

$$\text{et} \quad a' = a, b' = b$$

dans l'équation

$$h = at + bt^2$$

pour les plantes exposées horizontalement. Quand on possédera les valeurs de  $h$  moyen au bout des différents intervalles de temps pour des plantes placées horizontalement, il suffira de multiplier ces valeurs par  $\sin \varphi$  pour obtenir les valeurs de  $h$  moyen correspondant des plantes placées de façon à faire un angle  $\varphi$  avec la verticale.

Ceci nous fournira un moyen de vérifier si la loi fondamentale du géotropisme s'applique bien à nos résultats. Pour cela nous prendrons les valeurs de  $h$  moyen des catégories température-longueur pour lesquels nous avons des mesures faites avec des angles d'exposition différents ; nous les multiplierons par  $\sin \varphi$  et nous comparerons les valeurs ainsi calculées avec les valeurs observées ; la comparaison de la différence  $\delta$  entre ces deux valeurs de  $h$  moyen et l'erreur probable nous permettra de nous rendre compte de l'exactitude de la loi.

Le tableau XXXVII donne les valeurs calculées de  $h$  moyen, les valeurs observées, la différence  $\delta$  entre ces valeurs et l'erreur probable de  $h$  observé, d'abord pour un angle d'exposition de  $45^\circ$  puis pour l'angle de  $15^\circ$  ; pour ce dernier nous avons trop peu d'expériences pour pou-

TABLEAU XXXVII

	TEMPS EN MINUTES											
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Angle 45°</b>												
<i>h</i> calc.	0,000	0,018	0,023	0,030	0,040	0,049	0,061	0,073	0,093	0,126	0,196	0,334
<i>h</i> obs.	0,000	0,019	0,019	0,046	0,062	0,069	0,073	0,100	0,154	0,212	0,285	0,435
$\delta$	0,000	-0,001	0,004	-0,006	-0,013	-0,009	-0,012	-0,017	-0,028	-0,016	0,000	-0,101
E	0,018	0,033	0,042	0,050	0,064	0,054	0,058	0,055	0,049	0,043	0,045	0,059
<i>h</i> calc.	-0,042	-0,046	-0,057	-0,055	-0,049	-0,023	-0,023	0,062	0,152	0,275	0,400	0,545
<i>h</i> obs.	-0,017	-0,018	-0,011	0,044	0,067	0,111	0,113	0,244	0,350	0,467	0,639	0,833
$\delta$	-0,025	-0,028	-0,028	-0,046	-0,099	-0,116	-0,134	-0,136	-0,182	-0,198	-0,239	-0,288
E	0,012	0,013	0,022	0,032	0,046	0,064	0,073	0,080	0,085	0,093	0,101	0,112
<i>h</i> calc.	-0,025	-0,044	-0,032	-0,010	0,024	0,073	0,168	0,309	0,490	0,663	0,865	1,104
<i>h</i> obs.	-0,031	-0,050	-0,042	-0,011	0,000	0,000	0,103	0,214	0,381	0,553	0,806	1,072
$\delta$	0,006	0,006	0,010	0,001	0,024	-0,030	-0,046	-0,072	-0,063	-0,143	-0,207	-0,285
E	0,019	0,027	0,033	0,033	0,031	0,036	0,040	0,061	0,055	0,070	0,078	0,087
<b>Angle 15°</b>												
<i>h</i> calc.	-0,009	-0,016	-0,012	-0,004	0,009	0,026	0,062	0,113	0,180	0,243	0,316	0,401
<i>h</i> obs.	-0,009	-0,020	-0,027	-0,004	0,012	0,030	0,070	0,148	0,230	0,398	0,446	0,576
$\delta$	0,000	-0,004	-0,015	0,000	-0,003	0,004	-0,008	-0,035	-0,050	-0,155	-0,130	-0,175
E	0,008	0,011	0,015	0,015	0,021	0,025	0,029	0,035	0,037	0,042	0,051	0,053

voir les répartir en catégories ; nous avons comparé  $h$  moyen de l'ensemble des expériences avec  $h$  moyen calculé au moyen de  $h$  de la catégorie 21° C, 20 mm. des plantes horizontales.

Si nous comptons pour les expériences faites à 45°, le nombre de fois où  $\delta$  est plus petit que 1, 2, 3, 4.... fois l'erreur probable de  $h$ , nous trouvons que

$\delta$ est < E	17 fois contre 19 ou 0,89 contre 1
$\delta$ » < 2E	27 » 9 » 3 » 1
$\delta$ » < 3E	35 » 1 » 35 » 1
$\delta$ » < 4E	36 » 0 » $\infty$ » 1

tandis que la théorie des probabilités prévoit pour

$\delta < E$	1 cas contre 1
$\delta < 2E$	4,5 » 1
$\delta < 3E$	142 » 1

Il semble à première vue que  $\delta$  soit trop grand par rapport à l'erreur probable ; la différence est du reste petite ; mais il faut se souvenir que l'erreur probable E est celle de  $h$  observé et que la valeur de  $h$  des expériences à 90° qui multiplié par  $\sin \varphi$  donne  $h$  calculé est aussi entaché d'une erreur probable, de sorte qu'on peut considérer la concordance entre les valeurs calculées et observées comme très satisfaisante.

Pour les expériences faites avec des plantes exposées de manière à faire un angle de 15° avec la verticale, on trouve que

$\delta$ est < E	8 fois contre 4 ou 2 contre 1
$\delta$ » < 2E	9 » » 3 » 3 » 1
$\delta$ » < 3E	10 » » 2 » 5 » 1
$\delta$ » < 4E	12 » » 0 » $\infty$ » 1

Ici encore la concordance est très remarquable puisque nous trouvons deux fois contre une la différence  $\delta$  plus petite que l'erreur probable de  $h$ , alors que s'il n'y avait qu'un cas contre un, cela suffirait pour confirmer l'exactitude de nos conclusions.

Nous croyons ainsi avoir donné la démonstration que *l'accélération géotropique de courbure est proportionnelle au sinus de l'angle que fait la plante avec la verticale*, comme le veut la loi fondamentale du géotropisme.

Etudions maintenant comment se comportent vis-à-vis de la loi fondamentale les résultats des expériences où les plantes d'avoine étaient exposées respectivement pendant  $\frac{1}{4}$ , 2 et 5 minutes horizontalement, puis replacées verticalement pour l'observation.

La loi fondamentale nous dit qu'au bout du temps d'exposition  $\theta$ , la vitesse de courbure acquise sera

$$v = b \theta$$

où  $b$  est l'accélération géotropique de courbure. Sous l'influence de cette vitesse initiale de courbure, la plante replacée verticalement atteindra au bout d'un temps  $t$  une courbure maximum (mesurée par le déplacement  $h$  de son sommet) donnée par

$$h_{\text{max.}} = \frac{v^2}{2 \beta}$$

où  $\beta$  est l'accélération due à l'autotropisme qui tend à s'opposer à l'action du géotropisme. En remplaçant  $v$  par sa valeur il vient

$$h_{\text{max.}} = \frac{b^2 \theta^2}{2 \beta}$$

Si  $\beta$  était constant, la courbe qu'on obtiendrait en portant dans un graphique, en abscisses les temps d'exposition  $\theta$  et en ordonnée la déviation maximum serait une parabole symétrique par rapport à l'axe des  $h$ , à concavité tournée vers le haut et dont le sommet serait à l'origine.

Dans la figure 21, j'ai porté en ordonnée les valeurs de  $h_{\text{max.}}$  correspondant aux temps d'exposition  $\theta$  portés en abscisses et j'ai réuni par des droites les points correspondants des diverses catégories température-longueur. On voit au premier coup d'œil que la courbe représentant la

variation de  $h$  maximum au temps d'exposition  $\theta$  n'est pas du tout une parabole de la forme indiquée plus haut. On voit que les courbes sont sensiblement des droites passant par l'origine. Il est regrettable que je ne possède pas assez de résultats expérimentaux et en particulier que je n'aie pas eu le temps de faire des expériences avec des temps d'exposition de 1, 3 et 4 minutes, ce qui m'eût permis de

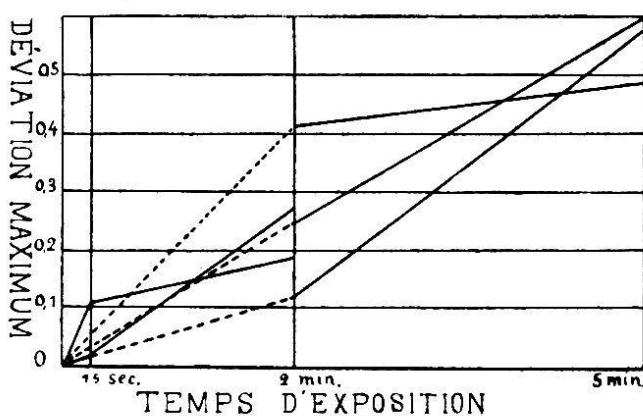


Fig. 21.

déterminer plus exactement l'allure de ces courbes. Il ressort cependant du graphique, ou bien que la loi fondamentale est fausse ou, ce qui est plus probable, que  $\beta$  n'est pas constant.

En faisant l'hypothèse très plausible que l'accélération négative de courbure  $\beta$  due à l'autotropisme est proportionnelle à l'induction géotropique, c'est-à-dire en définitive à la vitesse de courbure acquise pendant l'exposition horizontale, ce qu'on peut écrire

$$2\beta = \alpha v = \alpha b \theta$$

où  $\alpha$  est une constante. En introduisant cette valeur de  $\beta$  dans l'équation

$$\therefore h_{\text{max.}} = \frac{b^2 \theta^2}{2\beta}$$

il vient

$$h_{\text{max.}} = \frac{b^2 \theta^2}{\alpha b \theta} = \frac{b \theta}{\alpha}$$

l'équation d'une droite passant par l'origine.

Nous voyons que si l'hypothèse sur l'accélération autotropique est exacte, la loi fondamentale s'applique aussi au cas où une plante d'avoine est exposée à la pesanteur pendant un certain temps, puis soustraite à cette action.

On pourrait faire d'autres hypothèses sur l'accélération  $\beta$ , la supposer par exemple proportionnelle en chaque instant à la vitesse de courbure ou bien à la courbure ; l'étude de ces questions demande à être reprise avec détail ; cette question de l'autotropisme demande une étude particulière et faite de manière très précise et mathématiquement. J'entrevois dans cette étude que j'ai commencée une mine de renseignements qui jetteront une vive lumière sur les tropismes.

Comme les lois sur le temps de présentation et le temps de réaction ont été trouvées pour les autres tropismes et pour toute une série de phénomènes d'irritations chez les plantes et chez les animaux, je ne doute pas que ma loi fondamentale du géotropisme ne soit aussi applicable à ces phénomènes avec des modifications tenant compte de chaque cas particulier. Cette loi deviendrait en quelque sorte la loi fondamentale de l'irritabilité.

---

P. S. Le manuscrit de ce travail était terminé quand j'ai reçu de l'auteur le texte d'une communication préliminaire faite par *A. Tröndle*<sup>1</sup> à la Société botanique allemande.

Dans ce travail, *Tröndle* annonce qu'il a trouvé comme moi que la variation de la déviation  $h$  du sommet d'une plante d'avoine placée horizontalement obéit à l'équation

$$h = at + bt^2,$$

mais il prétend que si la courbure géotropique se fait avec une certaine accélération  $b$ , c'est parce que la plante commence à se courber à l'extrémité seulement puis que la

---

<sup>1</sup> A. Tröndle, *Geotropische Reaktion und Sensibilität* (Vorläufige Mitteilung) Ber. d. deutsch. bot. Ges. XXX 1912. Generalversammlung.

zone qui se courbe s'étend avec une vitesse uniforme vers la base de la plante; pour chaque région de la plante prise en particulier, la courbure se fait avec une vitesse constante. *Tröndle* annonce également que le temps de réaction des différentes régions de la plante est proportionnel à la distance qui sépare la région considérée du sommet de la plante.

J'attends avec une vive impatience la publication des résultats complets des expériences de *Tröndle*. Les calculs préliminaires que j'ai pu faire sur les résultats numériques donnés par lui me semblent montrer qu'on peut très facilement les faire rentrer dans ma loi fondamentale, malgré qu'à première vue il semble plutôt y avoir contradiction entre *Tröndle* et moi.

Je suis très heureux qu'un expérimentateur consciencieux comme *Tröndle* ait répété mes expériences avec d'autres appareils; ce n'est, en effet que par la collaboration de plusieurs expérimentateurs et par le choc de leurs idées que nous arriverons à débrouiller le problème si compliqué des tropismes.

