

**Zeitschrift:** Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Herausgeber:** Société Vaudoise des Sciences Naturelles  
**Band:** 45 (1909)  
**Heft:** 166

**Artikel:** Étude sur le géotropisme  
**Autor:** Maillefer, Arthur  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-268639>

### **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:** 17.04.2026

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

# ÉTUDE SUR LE GÉOTROPISME

PAR

Arthur MAILLEFER

---

## I

### **Relation entre la force centrifuge, le temps d'exposition et la grandeur de l'effet géotropique.**

Depuis deux ans, j'ai entrepris une série d'études expérimentales sur le géotropisme, soit sur les phénomènes de courbures provoqués chez les plantes par la pesanteur. Ce sont les résultats d'une première série d'expériences que je veux publier aujourd'hui.

Depuis les expériences de Knight <sup>1</sup>, on sait qu'une force centrifuge agit sur les plantes de la même manière que la pesanteur. Pour l'étude du géotropisme cette propriété est précieuse en ce sens que l'on dispose, dans la force centrifuge, d'une force que l'on peut faire varier, ce qui n'est pas le cas pour la pesanteur.

Pour mesurer l'effet d'une force centrifuge sur une plante, il existe deux méthodes : l'une, directe, consiste à mesurer le temps nécessaire pour que, sous l'action de la force en jeu, tel ou tel effet ait été produit (temps de présentation, de réaction, etc.) ; l'autre, indirecte, analogue aux méthodes de réduction à zéro utilisées en physique, consiste à exposer une plante alternativement à des forces centrifuges inégales et de sens contraire, agissant sur la plante pendant des temps déterminés ; en faisant varier la durée de l'exposition à chacune des deux forces, on arrive à trouver

---

<sup>1</sup> Knight. *On the direction of the radicle and germen during the vegetation of seeds* (Philos. Transactions, 9 janv. 1806).

un rapport des temps d'exposition tel que la plante en expérience reçoive une « induction » égale de la part des deux forces, et par conséquent ne se courbe pas. Connaisant le rapport des forces centrifuges et le rapport des temps, on aura la loi liant la force centrifuge, le temps d'exposition et l'effet produit sur la plante; on pourra en effet poser les inductions produites par les deux forces agissant pendant les temps correspondants comme égales.

C'est cette seconde méthode que j'ai utilisée dans mes expériences.

La difficulté était de construire un appareil permettant ainsi de faire agir deux forces inégales et opposées sur la plante; mon appareil est basé sur le même principe que celui que Fitting<sup>1</sup> a utilisé pour déterminer l'effet géotropique produit sur une plante lorsqu'on la soumet sous des angles divers à l'action de la pesanteur.

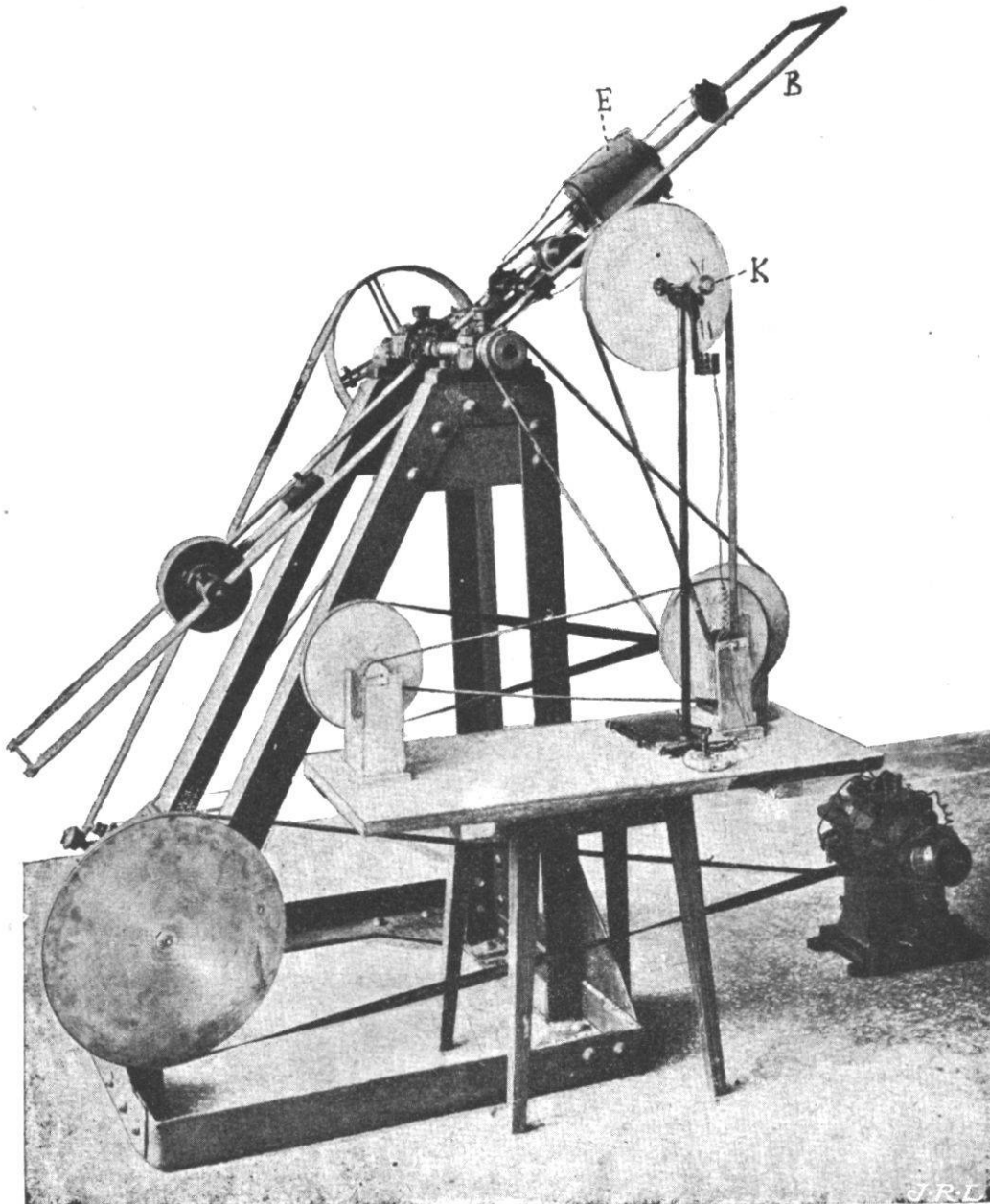
L'appareil se compose (Fig. 1 et 2) d'un fort bâti en fer supportant deux paliers, dans lequel tourne l'arbre A; sur celui-ci sont fixées deux paires de bras B de 1 mètre de longueur; c'est sur ces bras que se fixe le mécanisme qui, automatiquement, place la plante à des distances différentes de l'axe et permet de la soumettre à des forces centrifuges inégales et de sens contraires.

Ce mécanisme se compose d'un axe C pouvant tourner dans deux crapaudines qui peuvent glisser le long des bras et que l'on peut fixer où l'on veut; l'axe C porte deux bras courts dans le prolongement l'un de l'autre; l'un d'eux se termine par un collier dans lequel on peut fixer le vase en zinc contenant la plante; l'autre porte un contre-poids P permettant d'équilibrer le système. L'axe C porte en outre un pignon actionné par une chaîne dont chacune des extrémités est fixée à un cylindre de fer doux formant l'arma-

---

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

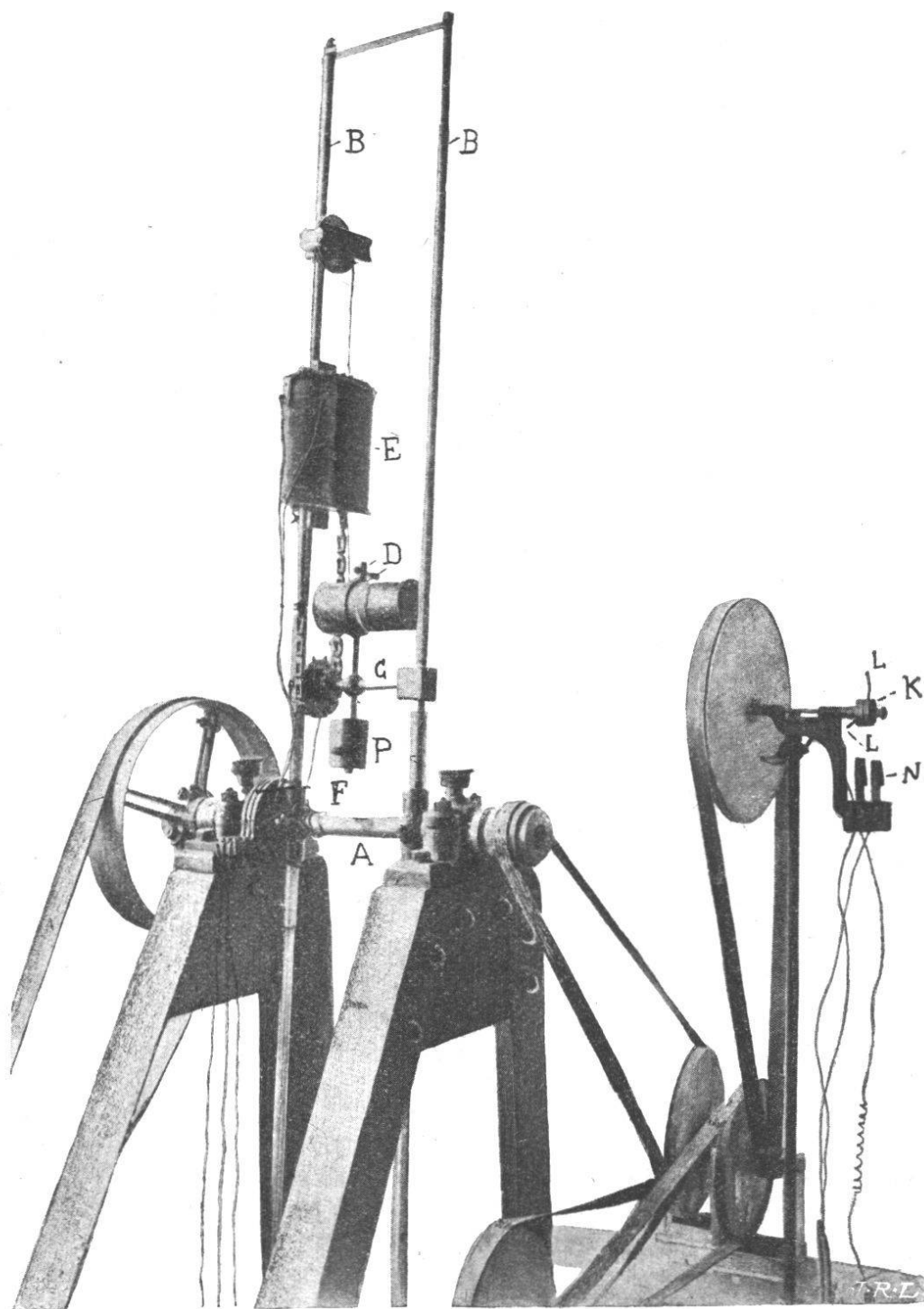
ture plongeante d'un électro-aimant E ; suivant que le courant électrique passe dans l'une ou dans l'autre des bobines, le pignon tourne d'un demi-tour dans un sens ou dans



*Fig. 1.*

l'autre, entraînant le vase contenant la plante. Les bobines reçoivent le courant à l'aide de bagues fixées sur l'arbre A et de balais F placés sur l'un des paliers ; le courant est fermé au moment voulu par un système de contacts que nous examinerons plus loin.

On peut faire glisser le système des électro-aimants et de l'axe portant le vase le long des deux bras; on peut



*Fig. 2.*

placer à volonté l'électro-aimant en dedans et le vase en dehors ou vice-versa; de cette manière le vase peut occuper toutes les positions comprises entre 5 cm. et 95 cm.

Un contrepoids placé sur l'autre paire de grands bras permet d'équilibrer exactement la charge autour de l'axe A.

Voyons maintenant le fonctionnement de l'appareil. Soit une plante  $a$  (Fig. 3), placée au centre du vase; à l'aide de l'électro-aimant, nous l'amèneront alternativement en  $a$  et en  $a'$  puis de nouveau en  $a$ , puis en  $a'$  et ainsi de suite; elle restera dans ces deux positions pendant les temps respectifs  $t$  et  $t'$ ; à la fin d'une expérience la plante sera restée pendant  $nt$  secondes en  $a$  et  $nt'$  sec. en  $a'$  et nous constaterons par exemple qu'elle s'est courbée du côté de  $b$ ; nous en concluons que l'effet de la force  $f'$  en  $a'$  est plus considérable que celui de la force  $f$  en  $a$ ; ceci bien entendu s'il s'agit d'un organe négativement géotropique. Nous diminuerons l'action de la force  $f'$  en laissant la plante moins longtemps en  $a$ ; et par tâtonnements nous finirons par trouver un rapport  $\frac{t}{t'}$  tel que la plante ne se courbe plus. En comparant ce rapport au rapport des forces  $\frac{f}{f'}$  nous pourrions en déduire la loi qui lie la force, le temps et l'effet produit.

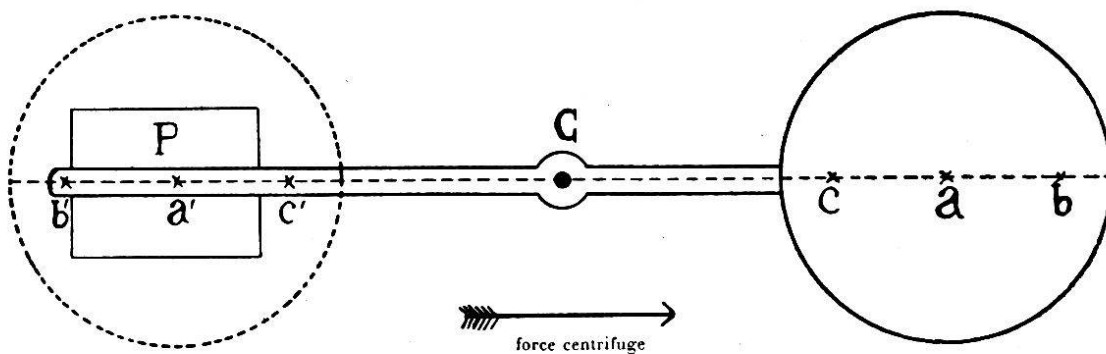


Fig. 3.

Supposons maintenant le rapport des temps réglé de telle sorte que la plante  $a$  ne se courbe pas et considérons la plante  $b$ ; elle se trouve dans sa position externe  $b$  à une plus grande distance de l'axe de rotation que  $a$  et soumise par conséquent à une force plus grande; dans sa position

interne  $b'$ , elle sera plus près de l'axe que  $a'$ ; la force agissante sera donc plus faible; il s'en suit que puisque les temps d'expositions sont les mêmes pour la plante en  $b$  et  $b'$  que pour celle en  $a'$  et  $a$ , l'action de la force  $f$  prévaudra sur celle de  $f'$  et la plante  $b$  se courbera du côté de  $a$ .

La plante  $c$ , si nous supposons encore la plante  $a$  en équilibre sera soumise en  $c$  à une force  $f$  plus faible que  $a$  et en  $c'$  à une force  $f'$  plus forte que  $a'$ ; la plante  $c$  obéira à l'action prévalente de la force  $f'$  et se courbera du côté de  $a$ .

Nous voyons donc que les plantes se courbent toutes du côté de la plante en équilibre; ceci nous permettra de déterminer facilement et avec précision la région où l'équilibre a lieu. Nous n'avons tenu compte que des expériences où une zone neutre où les plantes restaient parfaitement droites était bien définie et où les autres plantes étaient nettement courbées de ce côté.

L'appareil destiné à lancer le courant alternativement dans les deux bobines E se compose de deux disques K dont l'un a sa circonférence divisée en 60 parties et porte une petite tige de laiton L fixée radialement au point zéro de la division, et dont l'autre porte également une tige L' fixée en face d'un trait; on peut faire coïncider ce trait avec n'importe quelle division du premier disque, c'est-à-dire qu'on peut décaler les deux tiges de laiton de l'angle que l'on veut.

Ces deux tiges, aplaties à leur extrémité, viennent alternativement en contact avec deux morceaux de charbon N et N' fixés à l'extrémité de lames faisant ressort, fermant ainsi les circuits de l'une ou de l'autre bobine.

Cet appareil à contacts est mis en mouvement à l'aide d'une transmission prise directement sur l'axe A de la centrifuge; une série de poulies réduit convenablement la vitesse; ce dispositif se voit sur la droite de la figure 2 et devant la figure 1.

Les temps d'exposition étant inversement proportionnels à la vitesse de rotation et par conséquent au carré de la force centrifuge exercée sur la plante, il se produit ainsi une diminution des erreurs due à une vitesse irrégulière, erreurs qui seraient plus considérables si l'appareil des contacts était mû par un mouvement d'horlogerie.

Le moteur électrique qui actionnait la machine n'était en effet pas le moteur idéal qu'il faudrait pour des expériences de cette nature; la vitesse était très difficile à maintenir constante; c'est à ces variations de vitesse que j'attribue le fait des différences quelquefois assez considérables entre la position de la zone neutre d'une expérience à l'autre.

Ces variations de vitesse du moteur enlèvent beaucoup de la rigueur que j'aurai voulu mettre dans mes expériences; aussi je m'engage à reprendre toute cette étude lorsque j'aurai à ma disposition un moteur parfaitement constant.

L'objet sur lequel j'ai expérimenté est la tigelle encore enveloppée de la coléoptile de l'Avoine blonde hâtive de M. Martinet; au moment où je les utilisais elles avaient environ 1 cm. de longueur. Les expériences ont été faites avec des plantes ayant crû en pleine lumière, mais sur le clinostat pour neutraliser l'action héliotropique de la lumière. Pour pouvoir disposer toujours de beaucoup de matériel, j'ai construit un clinostat comportant 12 platines, sur chacune desquelles était un vase, et mû par un petit moteur électrique.

Le vase en zinc contenant les plantes est muni d'un couvercle, de sorte que pendant l'expérience les plantes sont soustraites à l'action de la lumière. Les plantes restaient soumises à la force centrifuge pendant 4-8 heures; au bout de ce temps on pouvait constater si l'on avait une région où les plantes étaient restées droites, tandis que les autres plantes étaient courbées du côté de cette zone neu-

tre. La distance de la zone neutre, dans les deux positions du vase, était déterminée à l'aide du cathetomètre. Comme ce n'est pas tant la valeur absolue des forces centrifuges en jeu qui nous intéressait et que, d'autre part, la force centrifuge est proportionnelle au rayon, on peut prendre directement comme valeur du rapport des forces, le rapport des rayons.

Pour établir le rapport des temps d'exposition, on n'a qu'à lire sur les disques de l'appareil à contacts. Cependant j'ai toujours vérifié le rapport en comptant à l'aide d'un compteur de tours ou directement le nombre de rotations de l'axe principal de la machine entre les changements de position du vase. C'est ce rapport du nombre de tours de l'axe principal pendant que la plante est dans sa position externe au nombre de tours pendant sa position interne que j'ai admis comme le rapport vrai.

Je donne dans le tableau suivant (p. 285) les résultats de mes expériences.

La colonne intitulée « rapport des forces centrifuges » donne le quotient de la force agissant dans la position interne du vase par la force agissant dans la position externe tandis que la colonne intitulée *rapport des temps* donne le quotient du temps passé dans la position externe par le temps d'exposition à l'intérieur. La dernière colonne donne la différence entre le rapport des forces moins le rapport des temps.

On voit que le rapport des temps est toujours voisin du rapport des forces centrifuges ; les différences ne sont cependant pas toujours négligeables mais je les attribue uniquement aux variations de vitesse de mon moteur. En attendant une étude plus exacte avec un moteur constant, étude que je ferai certainement un jour, je me crois autorisé à énoncer la loi suivante.

*L'induction géotropique* (effet produit sur la plante) est

Tableau des résultats des expériences (Avoine blonde hâtive de Martinet).

Force centrifuge		Température	Rayon		Vitesse de rotation de 1 tour en	Rapport des forces centrifuges	Rapport des temps	Différences Rapport des forces Rapport des temps
Position interne	Position externe		Position interne	Position externe				
1,632 g.	2,071 g.	18°	70,7 cm.	89,7 cm.	1,32 sec.	0,788	0,791	- 0,003
0,348 g.	1,371 g.	18°	7,0 cm.	27,6 cm.	0,90 sec.	0,253	0,276	- 0,023
0,201 g.	0,856 g.	18°	6,6 cm.	28,1 cm.	1,15 sec.	0,234	0,276	- 0,042
0,320 g.	1,113 g.	18°	7,8 cm.	27,1 cm.	0,99 sec.	0,287	0,294	- 0,007
0,230 g.	0,747 g.	17°	8,5 cm.	27,0 cm.	1,20 sec.	0,314	0,290	+ 0,024
0,290 g.	0,914 g.	15°	7,8 cm.	24,6 cm.	1,04 sec.	0,317	0,281	+ 0,036
0,327 g.	1,296 g.	17°	26,1 cm.	6,6 cm.	0,90 sec.	0,252	0,250	+ 0,002
0,519 g.	1,100 g.	19°	18,6 - 19,6 cm.	39,4 - 40 4 cm.	1,20 sec.	0,472 - 0,485	0,481	+ 0,000
0,200 g.	0,391 g.	18°	19,3 cm.	38,7 cm.	1,97 sec.	0,498	0,481	+ 0,017
0,405 g.	0,805 g.	20°	19,5 cm.	38,7 cm.	1,39 sec.	0,503	0,482	+ 0,021
0,768 g.	1,577 g.	20°	19,1 cm.	39,2 cm.	1,00 sec.	0,487	0,481	+ 0,006
0,282 g.	0,970 g.	17°	7,9 cm.	27,1 cm.	1,06 sec.	0,291	0,290	+ 0,001
1,162 g.	2,297 g.	26°	61,0 cm.	79,5 cm.	1,18 sec.	0,767	0,764	+ 0,003
0,859 g.	1,636 g.	24°	24,0 cm.	45,7 cm.	1,06 sec.	0,525	0,530	- 0,005

*proportionnelle à la force centrifuge et proportionnelle au temps pendant lequel la force agit.*

On peut également énoncer la loi comme suit :

*Pour que l'induction géotropique produite par une force  $f_1$  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.*

En symboles mathématiques, la loi se traduit comme suit :

$$\text{Si} \quad \frac{f_1}{f_2} = \frac{t_2}{t_1} \quad I_1 = I_2 \quad (I = \text{Induction}),$$

ou bien :

$$\begin{aligned} f_1 t_1 &= f_2 t_2 & I_1 &= I_2 \\ I_1 &= f_1 t_1 \\ I_2 &= f_2 t_2. \end{aligned}$$

Ce résultat nous permettra de définir l'*induction géotropique* comme le *produit de la force qui agit sur la plante par le temps pendant lequel elle agit* et de choisir une unité d'induction géotropique qui sera, par exemple, l'induction produite par une force d'accélération  $g = 9,81 \text{ m. par sec. par sec.}$  agissant pendant une seconde.

## II

### **Interprétation mathématique des résultats obtenus par les divers auteurs qui ont fait des expériences quantitatives.**

A ma connaissance, il n'y a que trois auteurs qui aient envisagé le problème du géotropisme de telle façon que leurs résultats puissent être soumis au calcul; ce sont :

*Czapeck*<sup>1</sup>, *Fitting*<sup>2</sup> et *Bach*<sup>3</sup>; ils ont donné leurs résultats sous forme de tableaux ou de graphiques : *Fitting* a déterminé la relation qui existe entre l'induction géotropique, l'angle sous lequel la pesanteur agit sur la plante et le temps d'exposition et a formulé ses résultats sous forme de loi; *Czapek* et *Bach* n'ont pas cherché à traduire en loi ou en formule les résultats de leurs expériences; or, dans l'élaboration d'une théorie, des résultats bruts ne sont que d'une médiocre utilité; aussi m'a-t-il semblé nécessaire pour ne pas dire urgent de faire une étude mathématique de la question.

Pour la détermination des constantes, j'ai utilisé la méthode des moments telle qu'elle est décrite par *Elderton*<sup>4</sup>; la méthode des moindres carrés serait, dans le cas particulier, d'une application difficile et pour le moins excessivement longue. Du reste, vu l'imperfection des moyens employés dans les mesures, nous ne pouvons demander que des formules approximatives.

#### VARIATION DU TEMPS DE PRÉSENTATION ET DU TEMPS DE RÉACTION EN FONCTION DE LA FORCE CENTRIFUGE.

Le *temps de présentation* est le temps d'exposition minimum pendant lequel il faut faire agir une force donnée sur une plante pour que, soustraite ensuite à l'action de la force, elle réagisse encore.

Le *temps de réaction* est le temps qui s'écoule entre le moment où la plante est soumise à l'action de la force et celui où la plante commence à se courber.

<sup>1</sup> Fr. Czapek, *Untersuchungen über Geotropismus*. Jahrb. f. w. Bot. Bd. 27.  
Fr. Czapek, *Weitere Beiträge*, etc. Jahrb. f. w. Bot. Bd. 32.

<sup>2</sup> H. Fitting, *Untersuchungen über den geotropischen Reizvorgang*. Jahrb. f. w. Bot. Bd. 41.

<sup>3</sup> H. Bach, *Ueber die Abhängigkeit der geotr. Präsentations und Reaktionszeit von verschiedenen äusseren Faktoren*. Jahrb. f. w. Bot. Bd. 44.

<sup>4</sup> Palin Elderton, *Frequency curves and correlation*. Londres 1905.

*Bach* a déterminé le temps de présentation de jeunes tiges de *Vicia Faba* qu'il faisait tourner à l'aide d'une turbine ou d'un clinostat afin de les soumettre à l'action de forces centrifuges comprises entre 0,15 g et 32,6 g F, g désignant ici, comme dans le reste de ce travail, l'accélération due à la pesanteur. Nous résumons les résultats de *Bach* dans le tableau suivant; la température variait entre 19° et 25° C.

Force centrifuge	0,13 à 0,14	0,4	0,6	0,71	1,07	1,2 à 2,3	2,5 à 3,5	3,7 à 6,8	8,4 à 12,9	18,1 à 20,7	22,1 à 3
Temps de présentation	m. 50	m. 30	m. 25	m. 10	m. 8	m. 4 à 5	m. 3	m. 2	m. 1	1/2 m.	1/4 n

Le graphique, fig. 4, a été construit en portant en abscisse la force centrifuge (moyenne) et en ordonnée le temps de présentation; les points semblent, à première vue, placés sur une hyperbole équilatère; la formule de cette courbe est

$$xy = a \quad \text{ou} \quad y = \frac{a}{x} \quad (1)$$

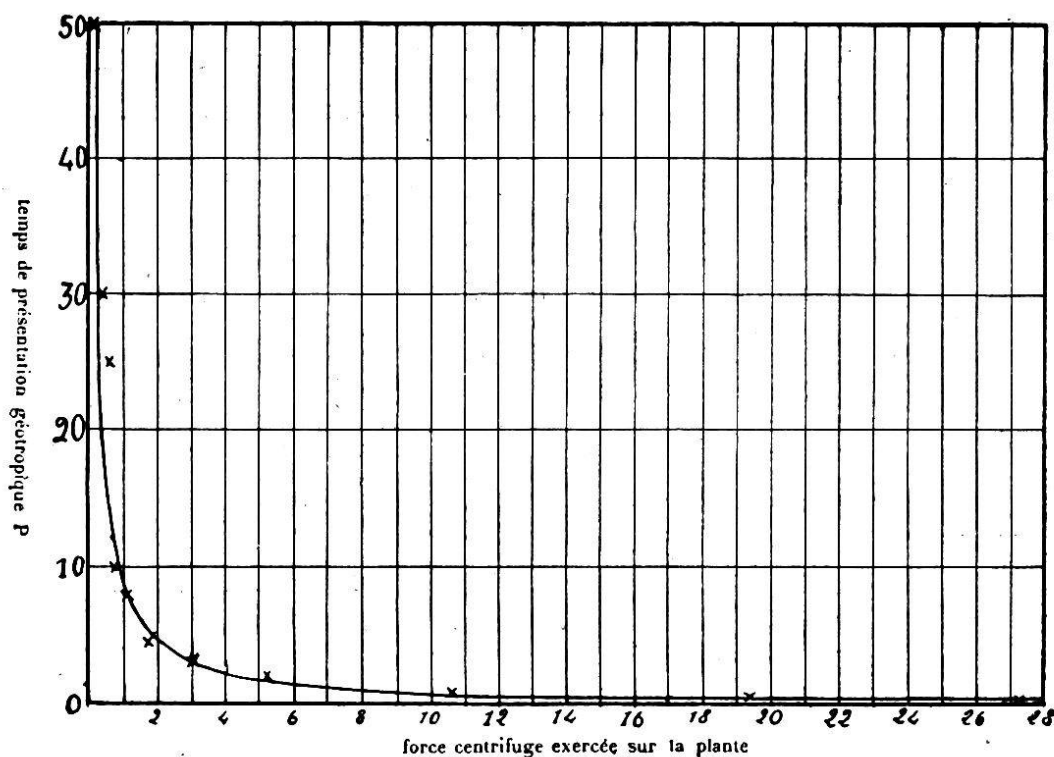


Fig. 4. — Variation du temps de présentation en fonction de la force centrifuge (d'après *Bach*). Les x indiquent les points déterminés expérimentalement; la courbe continue répond à l'équation  $P = \frac{9,2}{f}$ .

Nous avons pris une forme plus générale

$$y = \frac{a}{x^b} .$$

et nous avons calculé les constantes  $a$  et  $b$ . En prenant séparément les résultats donnés par Bach dans ses tabelles 35 et 36, nous avons trouvé

Tabelle 35	Tabelle 36
$a = 7,14$	$a = 9,20$
$b = 1,39$	$b = 1,02$

La valeur de  $b$  est très voisine de 1, surtout pour la tablelle 36; si nous tenons compte des erreurs assez considérables qui entachent les résultats donnés dans la tablelle 35, erreurs dûes au fait que pour les forces centrifuges supérieures à 1, la vitesse de rotation passait par toute une série de valeurs avant d'atteindre la vitesse normale, nous pouvons admettre que  $b = 1$ .

En recalculant la valeur de  $a$  en conséquence, nous obtenons pour les résultats des deux tabelles de Bach réunis  $a = 9,2$ .

En désignant par  $P$  le temps de présentation, par  $f$  la force centrifuge exprimée en  $g$ , la formule qui donne la variation du temps de présentation en fonction de la force centrifuge devient

$$P = \frac{9,2}{f} .$$

$$\text{Si } f = 1 \quad P = 9,2$$

d'où il suit que  $a = 9,2$  est le temps de présentation correspondant à une force centrifuge égale à 1  $g$ ; désignons par  $p_1$  ce temps de présentation et nous aurons en définitive

$$P = \frac{p_1}{f} \quad \text{ou} \quad Pf = p_1 .$$

Nous pouvons exprimer cette formule sous forme de loi :

*Le produit de la force centrifuge qui agit sur une plante par le temps de présentation correspondant est une constante égale au temps de présentation de la plante soumise à l'action de la pesanteur agissant perpendiculairement à l'axe de la plante.*

Ou bien

*Le temps de présentation géotropique est inversement proportionnel à la force centrifuge qui agit sur la plante.*

L'étude de la variation du temps de réaction en fonction de la force centrifuge a été entreprise par *Czapek* et par *Bach*.

*Czapek* donne ses résultats dans la tablelle suivante :

Force centrifuge	35-38	10-28	4,3-7	0,9-3,5	0,6	0,4-0,5	0,02-0,2	0,003	0,001	0,0005
Temps de réaction en heures.	3/4	1	1 1/2	1 3/4	2 1/2	3	4	5	6	>

*Czapek* a expérimenté avec la racine principale de *Vicia Faba* (petite variété) et de *Lupinus albus*; il dit qu'il a obtenu des résultats identiques avec les deux espèces, ce qui serait vraiment extraordinaire; quoiqu'il en soit nous avons étudié les résultats comme si nous avions eu à faire avec un groupe homogène.

Nous prendrons de nouveau une équation de la forme

$$R = \frac{a}{f^b}$$

et nous trouvons

$$\begin{aligned} a &= 1,97 \\ b &= 0,188 \end{aligned}$$

Comme les expériences ne sont qu'approximatives nous pouvons prendre  $b = 0,2$  pour simplifier et  $a = 2$ .

La formule devient

$$R = \frac{2}{f^{0,2}} = \frac{2}{\sqrt[5]{f}} \text{ heures}$$

ou 
$$R = \frac{120}{\sqrt[5]{f}} \text{ minutes.}$$

Bach donne les résultats de ses expériences dans quatre tabelles (n° 31, 32, 33 et 34). Les tabelles 31 et 32 ne comprenant que les résultats obtenus avec des forces centrifuges élevées et donnant des chiffres très irréguliers, dûs probablement aux difficultés de l'expérience, nous calculerons seulement les résultats donnés dans les tabelles 33 et 34 que voici :

Tabelle 33 de Bach.

Force centrifuge	Temps de réaction
0,014 g.	277 min.
0,056	206
0,099	180
0,20	125
0,31	115
0,80	113
1,25 à 2,19	87

Tabelle 34 de Bach.

Force centrifuge	Temps de réaction
0,13—0,15	128 min.
0,4	100
0,6	95
0,7	91
1	87

Reprenons l'équation de la forme

$$R = \frac{a}{f^b}.$$

Nous obtenons les valeurs suivantes de  $a$  et de  $b$  :

$$\text{Tabelle 33} \left\{ \begin{array}{l} a = 96,86 \\ b = 0,243 \end{array} \right. \quad \text{Tabelle 34} \left\{ \begin{array}{l} a = 84,85 \\ b = 0,199 \end{array} \right.$$

En prenant les valeurs moyennes pour  $a$  et pour  $b$ , il vient

$$\begin{aligned} a &= 90,85 \\ b &= 0,22 \end{aligned}$$

Nous pouvons ici également prendre  $b = 0,2$  et nous obtenons

$$R = \frac{90,85}{\sqrt[5]{f}} \text{ minutes.}$$

Bach a expérimenté avec des tiges de *Vicia Faba*. De ces résultats ainsi que ceux de Czapek nous pouvons déduire la loi suivante :

*Le produit de la racine 5<sup>e</sup> de la force centrifuge qui agit sur une plante par le temps de réaction géotropique correspondant est une constante égale au temps de réaction de la plante soumise horizontalement à l'action de la pesanteur.*

Ou bien :

*Le temps de réaction géotropique est inversement proportionnel à la racine 5<sup>e</sup> de la force centrifuge agissante.*

Si nous n'avions considéré que la table 33 de Bach, nous aurions été amené à prendre  $b = 0,25$  ce qui nous eût donné

$$R = \frac{98,8}{\sqrt[5]{f}}$$

De nouvelles mesures plus précises sont donc nécessaires ; pour le moment nous admettons, comme loi *approchée*, que le temps de réaction géotropique est proportionnel à la racine 5<sup>e</sup> de  $f$ .

Si l'on compare l'énoncé mathématique de la loi qui lie le temps de réaction à la force centrifuge avec les conclusions que Bach tire de ses expériences, on verra tout de suite la supériorité de l'énoncé mathématique.

Voici les conclusions de Bach :

1. Schon bei der Einwirkung von 1 g. erreicht die Reaktionszeit ihren minimalen Wert, sie kann auch durch zentrifugalkräfte bis 111 g nicht mehr oder nur ganz unbedeutend verkürzt werden.

2. Zentrifugalkräfte unterhalb 1 g haben eine Verlängerung des Präsentations und Reaktionszeit zur Folge und zwar wächst letztere anfangs langsam, später sehr rasch.

3. Während Zentrifugalkräfte über 1 g auf die Länge der Reaktionszeit nicht weiter vermindern einwirken, zeigt die Präsentationszeit

bei Steigerung der Zentrifugalkraft von 1 auf etwa 27 g eine weitere Abkürzung von 8 auf  $\frac{1}{4}$  Min.

L'énoncé mathématique permet de calculer le temps de réaction ou de présentation pour n'importe quelle force centrifuge ; qu'on essaye de le faire d'après le résumé de Bach ! Ce qui montre bien à quelle drôles de choses l'on peut arriver en discutant des résultats quantitatifs sans les soumettre au calcul, c'est que Bach à deux endroits différents de son travail (p. 28 et p. 30) prétend que ces résultats différents de ceux de Czapek, ce qu'il ne peut s'expliquer ; or les résultats de Bach et ceux de Czapek nous amènent à la même loi et sont identiques au point de vue mathématique.

VARIATION DES TEMPS DE PRÉSENTATION ET DE RÉACTION  
EN FONCTION DE L'ANGLE SOUS LEQUEL LA PESANTEUR  
AGIT SUR LA PLANTE.

Les seuls résultats que nous ayons pour le temps de présentation en plaçant une plante de manière à ce qu'elle fasse différents angle avec la verticale nous sont fournis par Bach ; ses résultats sont réunis dans sa table 37 (p. 91) que nous résumons comme suit.

Angle $\alpha$ avec la verticale.	15°	30°	45°	60°	90°
Temps de présentation P.	18 m.	14 m.	11 $\frac{1}{2}$ m.	10 m.	7 $\frac{1}{2}$ m.

Nous avons choisi une équation de la forme

$$P = \frac{a}{\sin^b \alpha}$$

pour représenter le phénomène.

Nous avons trouvé pour les constantes

$$a = 8,59$$

$$b = 0,6$$

Pour simplifier (le peu de précision des résultats empiriques nous le permet) nous prendrons  $b = 0,5$ ; nous avons donc

$$P = \frac{8,6}{\sqrt{\sin \alpha}}$$

Si nous faisons  $\alpha = 90^\circ$ , nous avons

$$\sin \alpha = 1 \text{ et } P = 8,6$$

par conséquent 8,6 est le temps de présentation lorsque la plante est placée à  $90^\circ$  de la verticale, c'est-à-dire lorsqu'elle est horizontale; c'est donc ce que nous avons désigné plus haut par  $p_1$ . La formule devient

$$P = \frac{p_1}{\sqrt{\sin \alpha}}$$

Nous en tirons la loi suivante :

*Le produit du temps de présentation géotropique par la racine carrée du sinus de l'angle que fait l'axe de la plante avec la verticale est constant et égal au temps de présentation de la plante placée horizontalement.*

• Ou, en d'autres termes :

*Le temps de présentation géotropique est inversement proportionnel à la racine carrée du sinus de l'angle que la plante fait avec la verticale.*

Ce sont des conclusions toutes autres que celles de Bach qui, comparant dans un graphique (p. 92) la courbe du temps de présentation avec une courbe de la forme

$$y = 1 - \sin x,$$

c'est-à-dire une courbe ayant des points à l'infini avec une courbe n'en ayant pas, ce qui est absurde, arrive aux conclusions suivantes :

Die beiden Kurven verlaufen von  $90^\circ$  bis zu  $30^\circ$ , besonders aber zwischen den Werten  $60^\circ$  und  $30^\circ$  ziemlich parallel, zwischen diesen Werten entspricht also die Länge der Präsentationszeit ziemlich genau em Sinus des Winkels. Von  $30^\circ$  an beginnt die Präsentationszeit rascher

zu steigen als die Sinuskurve, d. h. die Präsentationszeit wird verhältniss mässig viel grösser als der Sinuswert des Winkels verlangte, und dieses Missverhältniss steigert sich sehr rasch, bis die Kurve der Präsentationszeit bei 0° ins Unendliche verläuft.

Ob das von 90° bis 60° etwas raschere Austeigen der Präsentationszeitkurve den wirklichen Verhältnissen entspricht, ist nicht sicher, auch wenig wahrscheinlich.

Je donne (fig. 5) sous forme de graphique les résultats de Bach, la sinusoïde renversée qu'il croit propre à représenter la loi et la courbe

$$P = \frac{8,6}{\sqrt{\sin \alpha}}$$

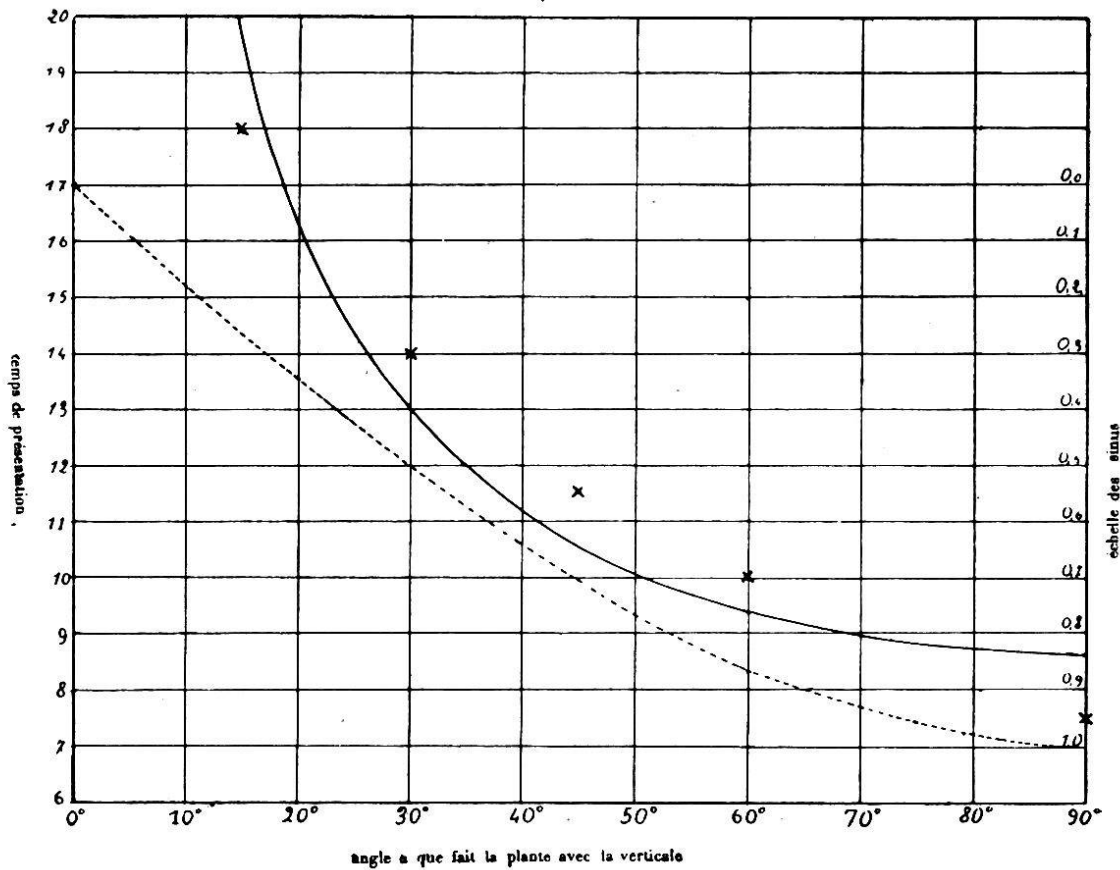


Fig. 5. — Variation du temps de présentation en fonction de l'angle que fait la plante avec la verticale. Les x désignent les points déterminés expérimentalement. La courbe en — est la courbe théorique et la courbe en ..... la sinusoïde de Bach.

Bach a aussi déterminé le *temps de réaction* de tiges de Vicia Faba placées de manière à faire différents angles avec la verticale; il a résumé ses résultats dans le tableau suivant :

Angle $\alpha$ avec la verticale.	15°	30°	45°	60°	90°
Temps de réaction . . . .	98 m.	93 m.	98,7 m.	93,3 m.	97,9 m.

Bach lui-même fait la remarque que ces chiffres sont sensiblement égaux ; en tout cas on ne distingue aucune loi apparente ; cependant si l'on considère qu'à 0°, c'est-à-dire lorsque la plante est verticale, le temps de réaction est infini, puisque la plante ne se courbe pas, il faut admettre qu'entre 15° et 0° le temps de réaction varie excessivement rapidement ; nous avons essayé une fonction de la forme :

$$R = \frac{a}{\sin^b \alpha}$$

qui en effet pour  $\alpha = 0$  donne  $R = \infty$  ; les constantes calculées sont

$$\begin{aligned} a &= 95,8 \\ b &= 0,0066 \end{aligned}$$

La formule serait donc

$$R = \frac{95,8}{\sin^{0,0066} \alpha} = \frac{r_1}{\sin^{0,0066} \alpha}$$

ce qui revient à peu près à

$$R = \frac{95,8}{\sqrt[150]{\sin \alpha}}$$

La courbe est représentée dans le graphique (fig. 6). On peut se demander si le temps de réaction est bien inversement proportionnel à une si faible puissance du sinus de l'angle.

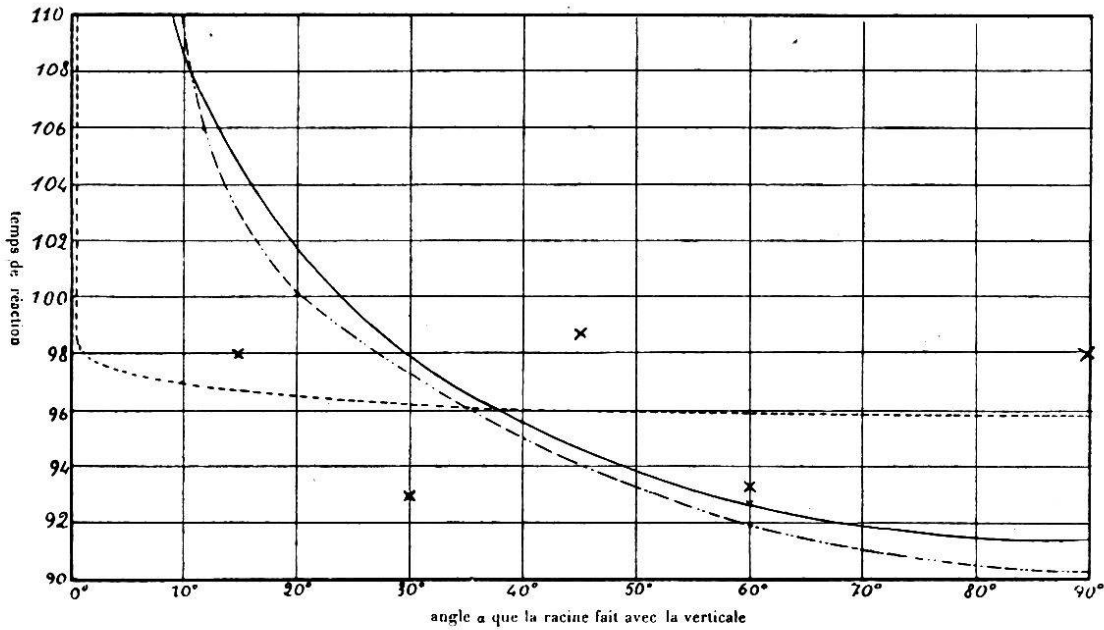


Fig. 6. — Variation du temps de réaction en fonction de l'angle d'exposition; x points déterminés par Bach; — — — — — courbe

$R = \frac{r_1}{\sqrt[150]{\sin \alpha}}$ ; — · — · — · — courbe  $R = \frac{r_1}{\sqrt[8]{\sin \alpha}}$ ; ——— courbe

$R = \frac{r_1}{\sqrt[10]{\sin \alpha}}$ .

Si nous reprenons les formules que nous avons trouvées pour le temps de présentation en fonction de la force centrifuge et de l'angle et pour le temps de réaction en fonction de l'angle d'exposition

(1)  $P = \frac{p_1}{f}$

(2)  $P = \frac{p_1}{\sqrt{\sin \alpha}}$

(3)  $R = \frac{r_1}{\sqrt[5]{f}}$

nous pouvons conclure de 1 et 2 que la force qui agit sur la plante est proportionnelle à  $\sqrt{\sin \alpha}$ ; en introduisant dans (3), nous aurons

$$R = \frac{r_1}{\sqrt[10]{\sin \alpha}}$$

Si nous calculons la constante  $r_1$ , à l'aide de la méthode des moments, nous obtenons

$$r_1 = 91,3$$

d'où 
$$R = \frac{91,3}{\sqrt[10]{\sin \alpha}}$$

Cette courbe est également représentée dans la figure 6. On voit que les écarts avec résultats de Bach ne sont pas très considérables ; il est donc possible que la courbe représentant la variation du temps de réaction en fonction de l'angle soit bien

$$R = \frac{r_1}{\sqrt[10]{\sin \alpha}}$$

Toutefois il ressort clairement de la discussion ci-dessus que les déterminations de Bach ne sont pas suffisantes pour nous permettre d'énoncer une loi.

Czapek a déterminé la variation du *temps de réaction géotropique* de la racine principale de *Lupinus* en fonction de l'angle que les racines font avec la verticale ; il a résumé ses résultats dans un graphique (loc. cit. pl. 10, fig. 6) ; nous pouvons en déduire le tableau suivant :

Angle d'exposition . .	5°	20°—140°	150°	180°
Temps de réaction . .	120 m.	60 m.	62 m.	105 m.

Nous avons essayé d'appliquer une formule de la forme

$$R = \frac{a}{\sin^b \alpha}$$

Ici encore il est difficile de déterminer exactement les constantes, d'autant plus que la ligne droite qui représente la variation du temps de réaction entre 20° et 140° semble être le résultat d'un « coup de pouce ».

Nous avons obtenu à l'aide des résultats de Czapek la courbe

$$R = \frac{55,4}{0,268 \sin \alpha} \text{ soit approximativement } R = \frac{55,4}{\sqrt[4]{\sin \alpha}}$$

en prenant un certain nombre de points entre  $20^\circ$  et  $140^\circ$ ; la courbe serrerait les résultats de Czapek de plus près en prenant une puissance moins élevée de  $\sin \alpha$ .

Czapek a également donné sous forme de graphique (loc. cit. pl. 10, fig. 7) le résultat de ses expériences avec les nœuds de *Secale cereale*. Voici ces résultats sous forme de tableau :

Angle d'exposition .	$5^\circ$	$20^\circ-140^\circ$	$150^\circ$
Temps de réaction .	120 m,	60 m.	62 m.

Ici encore le « coup de pouce » intervient; il est en effet fort improbable que Czapek ait obtenu des résultats identiques pour toutes les mesures entre  $20^\circ$  et  $140^\circ$ ; en prenant quelques points entre  $20^\circ$  et  $140^\circ$ , j'arrive à la formule

$$R = \frac{54,6}{\sqrt[3]{\sin \alpha}}$$

Ici encore  $\sin \alpha$  doit figurer probablement à une puissance moins élevée. On voit donc qu'il est absolument nécessaire de reprendre les expériences afin de déterminer la puissance  $b$  de  $\sin \alpha$  qui doit intervenir dans la formule; d'après les considérations que nous avons faites plus haut,  $b$  doit être voisin de 10; mais c'est à l'expérience qu'il appartient de résoudre la question.

#### VARIATION DE L'ANGLE DE RÉPONSE (NACHWIRKUNG)

EN FONCTION DE L'ANGLE D'EXPOSITION.

Si l'on place une plante de manière à lui faire faire un

angle donné avec la verticale et qu'on la maintienne quelques heures dans cette position en empêchant la courbure de se produire par un moyen mécanique, puis qu'on place la plante sur le clinostat en lui donnant la liberté de se courber on voit la plante réagir et au bout d'un certain temps arriver à un maximum de courbure ; on nomme *angle de réponse* l'angle que font alors les deux segments de la plante placés de part et d'autre de la courbure.

Czapek a fait deux séries d'expériences avec *Lupinus albus* ; il a exprimé ses résultats sous forme de graphiques (Jahrb. f. w. Bot Bd. 27. Taf. X, fig. 4) ; on peut former à l'aide de ces deux séries d'expériences le tableau unique suivant :

Angle d'exposition	0°	20°	45	70°	90°	110°	112°	135°	157°
Angle de réponse	0°	40°	30°	65°	75°	120°	110°	122°	120

Si l'on examine la fig. 7, on voit que la courbe est asymétrique ; deux points sont déterminés théoriquement, ce sont les points correspondant à un angle d'exposition de 0° et 180° où l'angle de réponse est zéro. Comme point de départ pour la discussion on peut prendre une courbe de la forme.

$$A = a\alpha \sin b\alpha$$

ou  $A$  est l'angle de réponse et  $\alpha$  l'angle d'inclinaison ; cette courbe est en effet asymétrique et a une ordonnée 0 pour  $\alpha = 0$  et  $\alpha = 100$  ; mais la détermination directe des constantes  $a$  et  $b$  dans une courbe de cette forme est une chose presque impossible ; j'ai dû chercher par tâtonnement la valeur de  $b$  ; par analogie avec le temps de présentation qui est inversement proportionnel à la racine carrée du sinus de l'angle et où l'effet géotropique est proportionnel à la racine carrée du sinus, j'ai pris  $b = 0,5$ .

La constante  $a$ , calculée par la méthode des moments, devient :

$$a = 1,125.$$

L'équation de la courbe serait donc

$$A = 1,125 \alpha \sqrt{\sin \alpha}.$$

Il est possible que nous ayons une courbe plus rapprochée de la réalité en prenant un autre nombre que 0,5 comme puissance de  $\sin = \alpha$ ; mais vu le peu de précision des chiffres de Czapek nous pouvons en rester là; la figure 7 montre du reste que la courbe théorique suit de très près la courbe empirique.

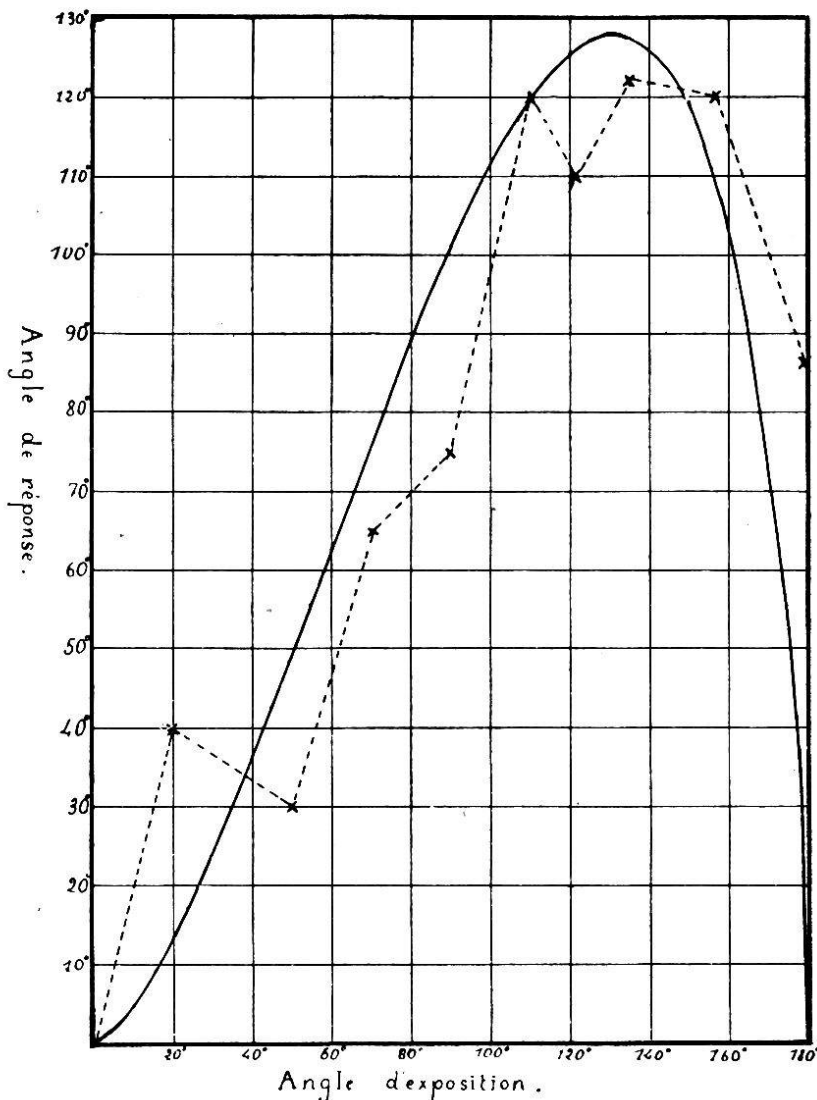


Fig. 7. — Variation de l'angle de réponse en fonction de l'angle d'exposition (*Lupinus albus*). x ..... x résultat de Czapek; ——— courbe théorique  $A = 1,125 \alpha \sqrt{\sin \alpha}$ .

Czapek a également déterminé l'angle de réponse de tiges de seigle; on sait que les nœuds des tiges des graminées conservent jusqu'à l'état adulte la faculté de croître et de réagir géotropiquement. Czapek a pris des fragments de tiges comprenant deux entre-nœuds séparés par un nœud; il a donné ses résultats sous forme de graphique; nous en tirons les données suivantes :

Angle d'inclinaison . . .	0°	30°	60°	90°	120°
Angle de réponse . . . .	0°	4,2°	5,7°	6°	8°

Nous avons essayé de rechercher une fonction de la forme

$$A = a\alpha \sin^{0,5}\alpha$$

qui nous a si bien réussi pour *Lupinus*; nous avons trouvé

$$A = 0,08 \alpha \sqrt{\sin \alpha};$$

mais si nous comparons (fig. 7) la courbe avec les points déterminés expérimentalement, nous ne pouvons que constater le peu de coïncidence; cependant vu le peu d'expériences effectuées par Czapek, nous ne pouvons pas affirmer l'impossibilité de la représentation du phénomène par la courbe ci-dessus.

En considérant la variation de l'angle de réponse de *Secale* indépendamment de celle de *Lupinus*, nous serions amené à prendre plutôt la courbe

$$A = 7,5 \sin \alpha.$$

Cette courbe est également représentée dans la fig. 8.

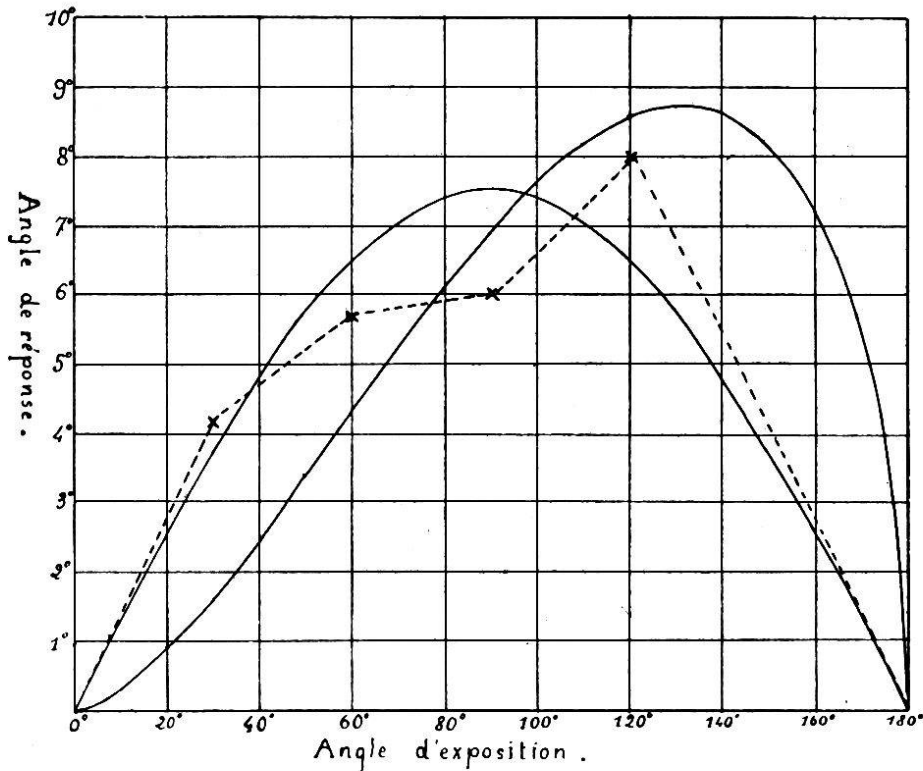


Fig. 8. -- Variation de l'angle de réponse en fonction de l'angle d'exposition ; x --- x Résultats expérimentaux ; ——— courbe  $A = 0,08 \alpha \sqrt{\sin \alpha}$  ; ———  $A = 7,5 \sin \alpha$ .

#### VARIATION DU TEMPS DE PRÉSENTATION ET DU TEMPS DE RÉACTION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.

La chaleur agit vis-à-vis du géotropisme comme pour les autres phénomènes de la vie ; en-dessous d'une certaine température (*minimum*) il n'y a plus de géotropisme ; à partir du minimum les courbures s'effectuent de plus en plus vite à mesure que la température croît jusqu'à un certain point (*optimum*) à partir duquel la rapidité de la courbure diminue jusqu'à devenir nulle à une température donnée (*maximum*).

La courbe représentant l'intensité du géotropisme aurait une forme en cloche avec un maximum à l'optimum et deux points d'ordonnée nulle correspondant au maximum et au minimum. Les courbes qui représenteront la variation du temps de présentation ou du temps de réaction

seront les courbes inverses de la courbe précédente ; c'est-à-dire que lorsque le géotropisme est nul les temps de présentation et de réaction seront infinis ; à l'optimum ils passeront par un minimum.

Ces courbes seront des courbes complexes probablement d'une forme analogue à

$$y = \frac{a}{t^b} \pm \frac{c}{t^d} .$$

Il ne sera possible de déterminer la nature de la courbe que lorsque nous aurons des déterminations précises du temps de présentation ou du temps de réaction à toutes les températures et que le minimum, l'optimum et le maximum auront été déterminés expérimentalement d'une manière exacte. Cette étude fournira sans doute des renseignements intéressants ; malheureusement, les résultats fournis par Bach et qui sont les seuls que nous ayons à notre disposition avec quelques chiffres inutilisables de Czapek (ici encore le « coup de pouce » est trop visible) ne nous permettent pas d'entreprendre cette étude.

Nous avons essayé d'utiliser une parabole de la forme

$$y = a + bt + bt^2$$

qui nous permettra de formuler la variation du temps de présentation et du temps de réaction entre les limites où Bach a fait ses expériences.

Pour le *temps de présentation* de la tige de *Vicia Faba* les données de Bach nous amènent à la formule

$$P = 0,05 t^2 - 2,96 t + 46,0 .$$

En égalant la dérivée à 0 il vient

$$t = 29^{\circ},6 .$$

A cette température le temps de présentation devient donc

minimum ; prenons la température optimum de  $29^{\circ},6$  comme origine, la courbe devient

$$P = 0,05 t'^2 + 2,2.$$

Faisons  $t' = 0$   $P = 2,2$ .

Le temps de présentation minimum des tiges de fève est donc de 2,2 minutes à l'optimum qui est  $29^{\circ},6$ .

La variation du *temps de réaction*  $R$  en fonction de la température  $t$ , calculée d'après les données de Bach peut être représentée par la formule

$$R = 0,31 t^2 - 18,56 t + 322,7.$$

Transportons l'origine des temps de façon à annuler le terme en  $t$  ; la nouvelle origine sera à  $29^{\circ}$  et l'équation devient

$$R = 0,31 t'^2 + 62.$$

Nous en tirons que la température optimum pour le temps de réaction est sensiblement la même que celle pour le temps de présentation et qu'à l'optimum le temps de réaction minimum de *Vicia Faba* est de 62 minutes (pour une force égale à 1 g.).

Ces paraboles donnent des valeurs très rapprochées de celles données par Bach dans toute l'étendue de températures où il a expérimenté, soit entre  $14^{\circ}$  et  $35^{\circ}$  ; mais en dehors de ces limites, une extrapolation ne serait pas à conseiller.

On peut se demander l'utilité de ces paraboles au point de vue théorique ; évidemment nous ne pourrions nous en servir qu'avec réserve dans une discussion, mais elles nous permettraient de ramener toutes les expériences faites à des températures quelconques à une température donnée et d'éliminer ainsi le facteur température des calculs.

## III

**Discussion des résultats.**

Nous avons trouvé (Chapitre I) la loi suivante : *L'induction géotropique est proportionnelle à la force qui agit sur la plante et au temps pendant lequel elle agit ; ce qui peut aussi s'exprimer comme suit : Pour que les inductions produites par 2 ou plusieurs forces  $f_1, f_2, f_3 \dots$  soient égales, il faut qu'elles agissent pendant des temps  $t_1, t_2, t_3 \dots$  tels que l'on ait*

$$f_1 t_1 = f_2 t_2 = f_3 t_3 = \dots$$

Fitting <sup>1</sup> en exposant une plante à l'action de la pesanteur, en la plaçant alternativement pendant des temps donnés de telle manière qu'elle fasse deux angles différents avec la verticale et que dans chacune des deux positions ce soit des faces opposées de la plante qui regardent la terre, est arrivé à la loi suivante : *L'induction géotropique est proportionnelle au sinus de l'angle que la plante fait avec la verticale, ce qui peut aussi s'exprimer comme suit : Pour que les inductions produites par l'exposition d'une plante à la pesanteur agissant sous des angles donnés  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$  soient égales, il faut que les plantes soient soumises à la pesanteur pendant des temps  $t_1, t_2, t_3 \dots$  tels que l'on ait :*

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

Des deux lois précédentes nous pouvons tirer la loi plus générale que voici :

*L'induction géotropique est proportionnelle : à la force qui agit, au sinus de l'angle que fait la direction de la*

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

force avec la plante et au temps pendant lequel la force agit; ou bien : Pour que les inductions géotropiques produites par deux ou plusieurs forces  $f_1, f_2, f_3, \dots$ , faisant des angles  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$  avec l'axe de la plante, il faut qu'elles agissent pendant des temps  $t_1, t_2, t_3, \dots$  tels que l'on ait :

$$f_1, t_1 \sin \alpha_1 = f_2, t_2 \sin \alpha_2 = f_3, t_3 \sin \alpha_3 = \dots$$

Ces lois n'ont de valeur que tant que les temps d'exposition sont assez petits, plus petits en tous cas que le temps de réaction; elles nous permettent de conclure que toute force agissant sur une plante produit une modification quantitative dans celle-ci. L'hypothèse des statolithes<sup>1</sup> rend bien compte du fait que l'induction est proportionnelle à la force qui agit; il paraît en effet assez plausible que, lorsqu'un statolithe est comprimé dans le protoplasma pariétal, l'irritation causée soit proportionnelle à la force et que, transmise aux cellules qui réagissent, elle provoque une production de substances osmotiques ou peut-être une contraction du protoplasma proportionnelle à l'irritation. L'hypothèse rend moins bien compte de la loi de Fitting que l'induction est proportionnelle au sinus de l'angle; en effet, considérons la figure 9; soit  $ABCD$  une cellule à statolithes; soit  $S$  un statolithe et  $f$  la force;  $S$  exercera sur la pellicule protoplasmique qui tapisse la cellule une pression proportionnelle à sa masse et propor-

---

Némeç et Haberlandt ont simultanément émis l'hypothèse que les plantes perçoivent la pesanteur à l'aide de cellules à protoplasma très fluide et contenant des grains d'amidon qui peuvent se déplacer très facilement. Ce serait la pression de ces grains d'amidon sur le protoplasma pariétal qui fournirait l'irritation nécessaire à la perception de la pesanteur. Par analogie avec les organes analogues des animaux, on a appelé ces cellules des *statocystes* et les grains d'amidon des *statolithes*... Telle est l'hypothèse des statolithes qu'on a baptisée pompeusement en Allemagne la théorie statolithique du géotropisme, oubliant qu'une hypothèse même démontrée ne fait pas une théorie. Cette hypothèse d'abord ardemment combattue semble bien en définitive rendre compte d'une foule de faits et paraît devoir être adoptée tôt ou tard par tous les physiologistes.

tionnelle à la composante  $p$  de la pesanteur perpendiculaire à la paroi ; cette composante est

$$P = f \cos (90^\circ - \alpha) = f \sin \alpha .$$

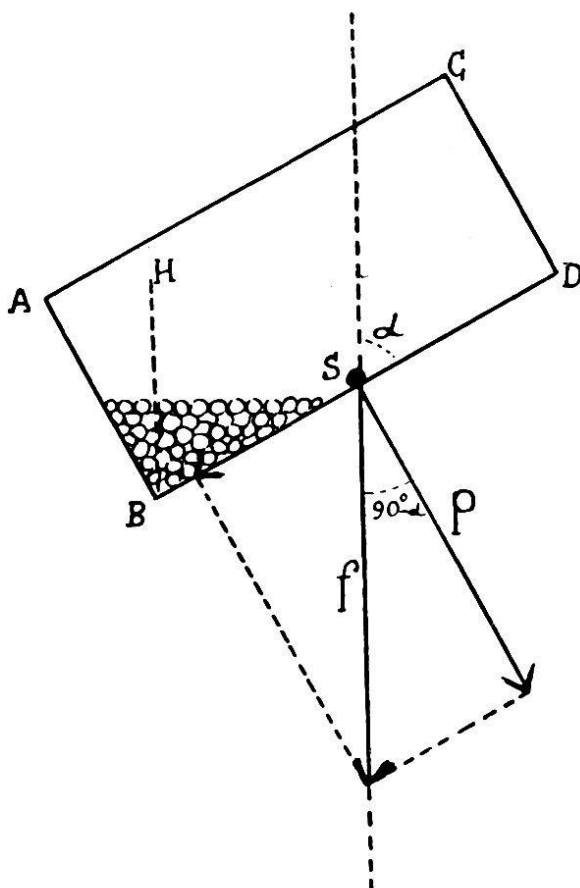


Fig. 9.

Jusqu'à présent tout joue bien avec l'hypothèse des statolithes ; mais considérons comment ceux-ci se comportent dans la cellule. Quand la plante est verticale, tous les grains d'amidon reposent sur la paroi  $AB$  ; si nous inclinons la plante de façon à ce qu'elle fasse avec la verticale un angle  $\alpha$ , les statolithes prendront la position représentée sur la figure ; les grains occupant l'angle  $ABH$  n'exerceront aucune pression sur la paroi  $BD$  qui, d'après l'hypothèse de *Némeç* et de *Haberlandt*, est seule sensible.

Plus l'angle  $\alpha$  sera grand, moins il y aura de statolithes dans cet « angle mort ». On voit donc que l'induction devrait croître plus rapidement que d'après la loi de *Fitting*. Il est possible que la transmission de l'irritation se fasse plus ou moins bien suivant l'inclinaison de la plante et contre-balance l'effet de l'angle mort; quoi qu'il en soit voici un point qui reste à éclaircir par de nouvelles expériences.

Si nous examinons les formules que nous avons trouvées pour la valeur des *temps de présentation et de réaction* en fonction de la force centrifuge

$$(1) \quad P = \frac{p_1}{f} \qquad (2) \quad R = \frac{r_1}{\sqrt[5]{f}}$$

nous voyons que  $P$  et  $R$  sont fonction de  $f$ ; pour une force centrifuge donnée.  $P$  et  $R$  seront déterminés; de (1) nous pouvons tirer

$$f = \frac{p_1}{P}$$

en introduisant cette valeur dans (2) il vient

$$(3) \quad R = \frac{r_1 \sqrt[5]{P}}{\sqrt[5]{p_1}};$$

cette formule nous donne une relation entre  $R$  et  $P$  pour une force donnée;  $r_1$  et  $p_1$  étant des constantes nous pouvons poser

$$\frac{r_1}{\sqrt[5]{p_1}} = a = \text{const},$$

d'où 
$$R = a \sqrt[5]{P}$$

Prenons maintenant les formules qui nous donnent les *temps de présentation et de réaction* en fonction de l'angle que la plante fait avec la verticale

$$(4) \quad P = \frac{p_1}{\sqrt{\sin \alpha}} \qquad (5) \quad R = \frac{r_1}{\sqrt[10]{\sin \alpha}}$$

de 4 nous tirons

$$\sqrt{\sin \alpha} = \frac{p_1}{P},$$

introduisant dans 5 il vient

$$(6) \quad R = \frac{r_1 \sqrt[5]{P}}{\sqrt[5]{p_1}} = a \sqrt[5]{P};$$

nous arrivons à la même formule que plus haut (3); il est donc probable que

$$R = \frac{r_1}{\sqrt[10]{\sin \alpha}}$$

exprime bien la relation qui existe entre le temps de réaction et l'angle d'exposition.

Il est un point qui mérite d'être relevé, c'est que tandis que l'effet géotropique mesuré à l'aide de la méthode d'induction alternative est proportionnel au sinus de l'angle, l'effet géotropique mesuré à l'aide du temps de présentation est proportionnel à la racine du sinus, (puisque le temps de présentation est inversement proportionnel à la racine du sinus); cela est d'autant plus curieux que les deux méthodes appliquées à l'étude de l'induction due à des forces centrifuges nous montrent que dans les deux cas cette induction est proportionnelle à la force. Il y a ici un point obscur; il serait possible de l'éclaircir à l'aide d'une hypothèse; nous ne chercherons pas à le faire, attendant que l'expérience nous ait fourni des données plus sûres que celles dont nous disposons actuellement.

A propos des *temps de présentation et de réaction*, il me semble intéressant de discuter ici la valeur de ces mesures du géotropisme. Dans un ouvrage qui vient de paraître, M<sup>lle</sup> W. Polowzow<sup>1</sup> rend compte des expériences qu'elle a faites avec des tiges d'*Helianthus*; elle les a placées horizontalement pendant 1, 2 ou 3 minutes puis les a replacées verticalement; à l'aide d'un microscope horizontal muni d'un micromètre, elle a suivi la courbure de la tige; elle a observé que l'extrémité de la tige commençait immédiatement à se déplacer le long du micromètre; de ces expériences M<sup>lle</sup> Polowzow conclut que le temps de réaction est beaucoup plus court qu'on ne l'admet généralement, si court qu'il est impossible de le déterminer avec le microscope horizontal et qu'il faut avoir recours aux appareils utilisés en physiologie animale et qui permettent d'apprécier le  $\frac{1}{100}$  ou le  $\frac{1}{1000}$  de seconde.

J'ai immédiatement cherché à contrôler le fait, à l'aide de l'appareil que j'ai décrit dans les Procès-verbaux de la Société vaudoise des Sciences naturelles<sup>2</sup>, j'ai placé horizontalement des plantes d'avoine encore enfermées dans leur coleoptile et à l'aide d'un cathétomètre j'ai suivi les mouvements de l'extrémité; mes premières expériences semblent confirmer entièrement celles de M<sup>lle</sup> Polowzow.

On peut se demander après cela ce qu'il reste des mensurations de *Bach* et de *Czapek* et des déductions mathématiques que j'en ai tirées. Evidemment ce que j'ai appelé plus haut: temps de réaction, n'est pas identique avec le temps de réaction des zoophysiologistes; mais il ne s'ensuit pas que le temps que met la plante pour que la cour-

---

<sup>1</sup> W. Polowzow. *Untersuchungen über Reizerscheinungen bei den Pflanzen*. Jena 1909.

<sup>2</sup> Procès-verbaux de la séance du 21 avril 1909.

bure soit visible à l'œil nu, n'ait pas de valeur comme mesure de l'effet géotropique ; j'ai observé en effet que si l'extrémité de la plante se déplace immédiatement la courbure ne devient visible qu'au bout d'un temps déterminé facile à déterminer à 5 minutes près.

Les expériences de *Czapek* et de *Bach* si elles perdent de leur valeur absolue n'en fournissent pas moins des données permettant une étude précise du géotropisme.

Il serait possible de tirer encore d'autres indications des formules que j'ai données plus haut, mais il serait oiseux de discuter plus longtemps ; quand les expériences auront été faites plus rigoureusement, il sera temps d'y revenir.

Cette étude sur le géotropisme aura, je l'espère, montré quelle riche moisson nous promet une méthode expérimentale rigoureuse alliée à l'analyse mathématique des résultats ; je voudrais avoir démontré que la détermination précise de la loi qui régit les phénomènes vaut mieux qu'une quantité d'expériences sans liens entre elles. Si nous avons pu disposer de séries de chiffres sûrs, nous n'aurions pas constaté les contradictions et les points obscurs auxquels nous nous sommes trop souvent heurtés. La parole est maintenant à l'expérience.

*Lausanne, laboratoire botanique de l'Université,*

*Avril 1909.*

---