

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 48 (1912)
Heft: 177

Artikel: Nouvelle étude expérimentale sur le géotropisme et essai d'une théorie mathématique de ce phénomène
Autor: Maillefer, Arthur
Kapitel: Le "temps de réaction"
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-269358>

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: 12.01.2026

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

la plante dans l'appareil, se superpose aux courbures dues à la pesanteur. Cette oscillation est du reste très faible (voir les valeurs de $\frac{\sum \delta}{n}$) 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^{re} le numéro de l'expérience, ce qui permettra au lecteur de se reporter au protocole¹; la 2^{me}, intitulée R, le « temps de réaction » en minutes ; la 3^{me}, 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^{me} $h_{\min.}$ indique la déviation au point le plus bas atteint par la plante ; la 5^{me} $h_r - h_{\min.}$ 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.

¹ Bull. Soc. vaud. Sc. nat., vol. XLVI, 1910, p. 416 et suiv.

TABLEAU XVI

N ^o	Temps de réaction	h_R	h min.	$h_R - 2h$ min.	Tempé- rature	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.	Tempé- rature	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 ^o	Temps de réaction	h_R	h min.	$h_R - 2h$ min.	Tempé- rature	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 min.	$h_R - 2h$ min.	Tempé- rature	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

Température 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.	ndéterminable.	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° à 27°) ; 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.

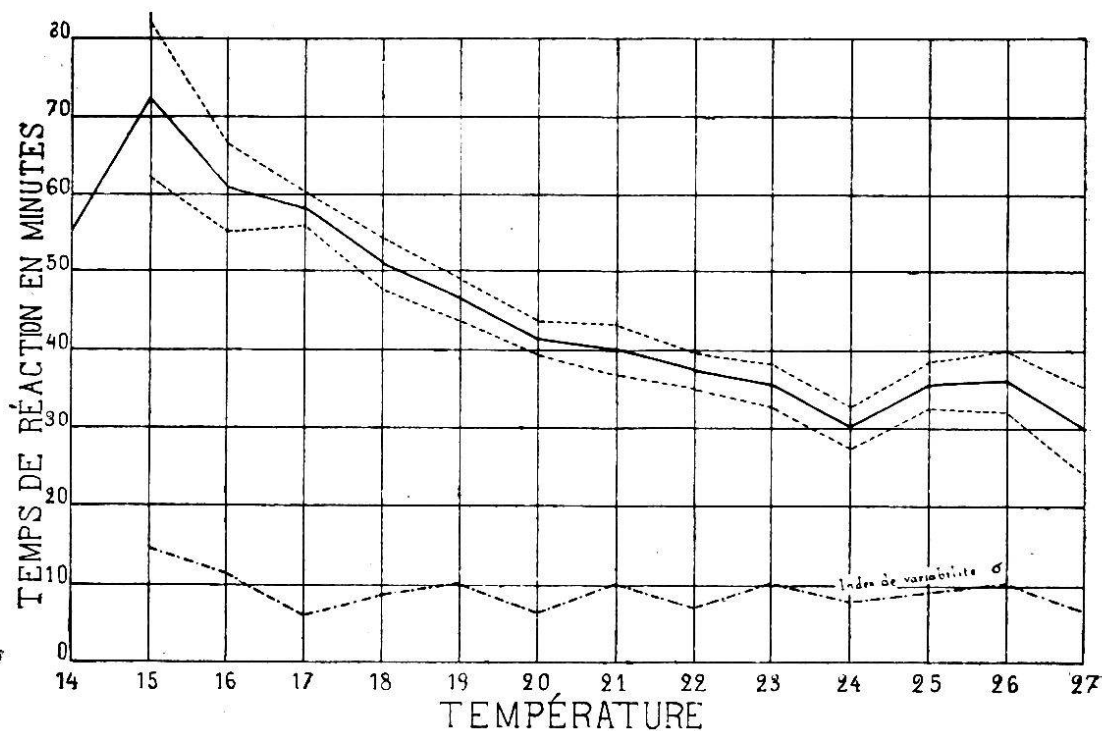


Fig. 10.

L'index de variabilité du temps de réaction ne semble présenter que des variations irrégulières, par conséquent l'on peut dire qu'entre 14° et 27° , 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.

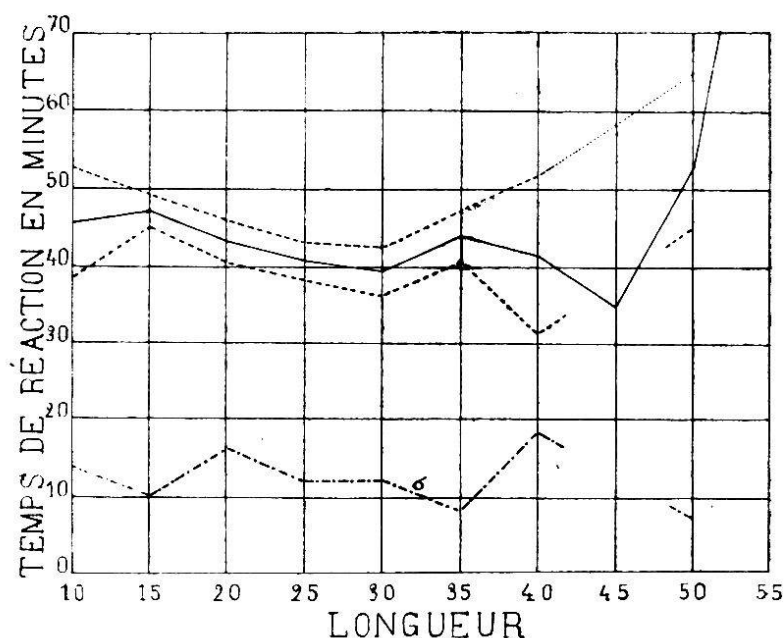


Fig. 11.

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

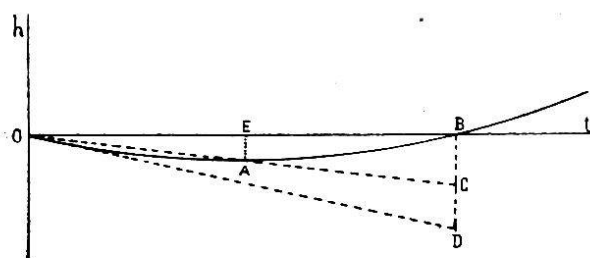


Fig. 12.

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 ($AE = h \text{ min.}$); la correction consisterait à retrancher de h_r la quantité $BC = 2 h \text{ min.}$ 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^{me} colonne donne la valeur de $h \text{ min.}$ et la 5^{me} celle de $h_r - 2 h \text{ min.}$; cette dernière quantité serait en quelque sorte la mesure approchée de la courbure due au géotropisme seul.

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

TABLEAU XXI

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

Remarquons que les erreurs probables données dans le tableau sont celles de la moyenne de $h_r - e h \text{ min.}$ 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.

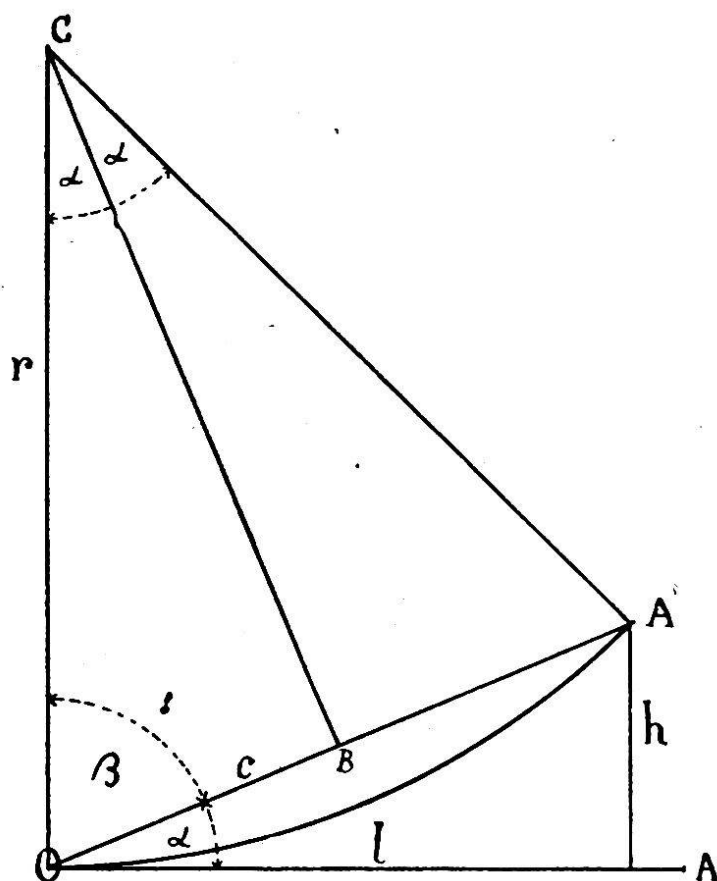


Fig. 13.

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

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

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

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

Posons $C = \frac{1}{r}$; C 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^{er} 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-

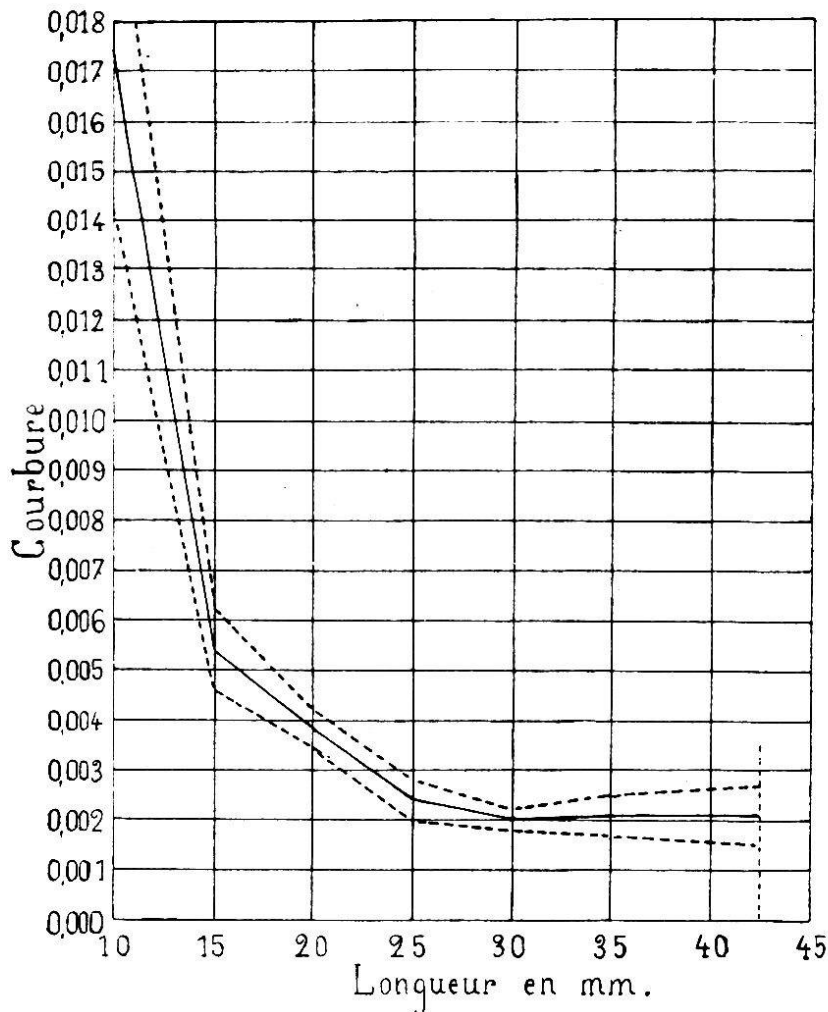


Fig. 14.

faitement droit; le 3^{me} 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.

Números	TEMPS EN MINUTES												Température en degrés C.	Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
484	-0,1	-0,1	-0,05	-0,15	-0,2	-0,2	-0,25	-0,25	-0,3	-0,25	-0,2	-0,15	13	19
491	-0,05	-0,05	-0,05	0,0	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,15	0,25	0,3	13	21
498	0,05	0,05	0,0	0,1	0,2	0,25	0,3	0,25	0,35	0,35	0,5	0,6	13	21
490	-0,05	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,15	-0,1	0,0	0,05	13	22
485	0,0	0,15	0,2	0,25	0,25	0,25	0,4	0,45	0,5	0,6	0,6	0,65	13	23
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	13	24
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	13	24
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	13	24
492	0,0	0,1	0,0	0,0	0,05	0,0	0,0	0,15	0,2	0,35	0,5	0,7	14	12
480	-0,05	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,35	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,15	0,0	14	16
493	-0,05	-0,1	-0,05	0,0	0,0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,25	14	18
500	0,0	0,0	0,0	0,05	0,05	0,05	0,1	0,15	0,2	0,35	0,5	0,85	14	19
489	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,25	-0,35	-0,3	-0,35	-0,3	-0,25	-0,05	14	20
486	-0,1	-0,05	-0,05	-0,05	0,0	0,0	0,0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	14	21
494	0,05	0,0	0,0	0,05	0,0	0,0	0,05	0,1	0,2	0,25	0,35	0,6	14	21
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	14	22
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	14	22
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	14	22
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	14	23
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	14	23
488	-0,1	-0,15	-0,25	-0,3	-0,35	-0,4	-0,3	-0,15	-0,1	0,0	0,15	0,3	14	25
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	15	17
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	15	18
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	15	18
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	15	18
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	16	14
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	16	18
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	16	20
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	17	12
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	17	16
466	-0,1	-0,1	-0,1	0,4	0,6	0,8	0,9	1,05	1,1	1,3	1,5	1,5	17	18

469	0,05	-0,1	-0,1	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	0,1	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,15	0,2	0,2	18
472	-0,05	-0,05	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,4	-0,2	-0,1	-0,05	-0,05	0,1	0,3	0,3	18
463	0,0	-0,05	-0,1	-0,15	-0,15	-0,25	-0,45	-0,45	-0,45	-0,45	-0,6	-0,45	-0,35	-0,15	-0,15	0,0	0,2	0,2	20
464	0,1	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,2	-0,1	-0,2	-0,15	-0,15	-0,05	-0,05	0,05	0,05	20
470	0,0	0,05	0,05	0,0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,15	0,3	0,4	0,4	21
462	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45	0,45	0,45	0,5	0,5	0,65	0,7	0,9	1,2	1,2	1,45	1,45	23
453	-0,2	-0,3	-0,2	-0,3	-0,15	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,25	0,5	0,7	0,7	0,9	0,9	18
451	-0,2	-0,25	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,05	-0,05	0,1	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	0,9	18
452	-0,15	-0,15	-0,05	-0,15	-0,15	-0,05	0,1	0,1	0,15	0,15	0,3	0,3	0,55	0,7	0,85	1,1	1,1	1,1	20
471	-0,3	-0,35	-0,4	-0,4	-0,4	-0,35	-0,35	-0,35	-0,35	-0,15	-0,15	-0,05	0,0	0,2	0,55	0,8	0,8	0,8	38
323	0,0	0,0	0,0	-0,15	-0,25	-0,25	-0,3	-0,3	-0,3	-0,15	-0,25	-0,15	-0,15	0,1	0,25	0,55	0,55	0,55	15
454	0,05	0,1	0,25	0,35	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45	0,45	0,7	0,85	1,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	15
310	0,0	-0,1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	0,5	0,7	0,85	1,0	1,0	1,0	1,0	16
321	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,05	0,05	0,1	0,25	0,6	0,8	1,05	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	16
320	-0,05	0,05	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,35	0,6	0,75	1,05	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	18
457	0,05	0,1	0,3	0,35	0,5	0,5	0,7	0,75	1,0	1,2	1,3	1,5	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	18
455	-0,05	-0,05	-0,3	-0,4	-0,5	-0,5	-0,55	-0,55	-0,6	-0,65	-0,6	-0,4	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	25
456	-0,2	-0,3	-0,35	-0,2	0,0	0,0	0,1	0,15	0,15	0,25	0,5	0,75	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	25
458	-0,05	-0,1	-0,05	-0,25	-0,35	-0,35	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1	0,05	0,2	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	26
468	-0,2	-0,15	0,0	-0,1	-0,2	-0,2	-0,05	-0,05	0,1	0,25	0,35	0,5	0,9	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	29
459	-0,2	-0,15	-0,2	-0,25	-0,35	-0,35	-0,25	-0,25	0,0	0,25	0,45	0,65	0,95	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	34
461	-0,45	-0,7	-0,95	-1,2	-1,35	-1,35	-1,4	-1,4	-1,4	-1,45	-1,4	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	40
460	-0,6	-0,95	-1,3	-1,65	-1,95	-1,95	-2,1	-2,1	-2,25	-2,45	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,4	-2,4	44
316	0,05	0,0	0,0	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,45	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	10
325	0,0	0,15	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	12
311	0,05	-0,05	-0,15	-0,15	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,15	0,05	0,15	0,3	0,55	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	13
319	0,0	0,0	-0,1	-0,05	0,0	0,0	0,05	0,05	0,2	0,4	0,6	0,7	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	14
305	-0,1	0,2	0,0	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	1,1	15
327	-0,15	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	0,9	1,1	1,1	1,1	1,4	1,4	1,4	16
317	-0,1	-0,15	-0,3	-0,25	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,3	0,45	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	18
322	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,5	0,8	0,95	1,3	1,8	1,8	1,8	2,1	2,1	2,1	18
329	-0,2	-0,15	-0,3	-0,3	-0,25	-0,25	-0,2	-0,2	-0,1	-0,15	0,1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,85	0,85	0,85	18
318	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	0,0	0,0	0,15	0,35	0,35	0,75	1,15	1,55	2,05	2,05	2,05	2,35	2,35	2,35	19
326	0,0	-0,1	-0,05	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,05	0,05	0,1	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	19
304	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,6	0,7	1,0	1,1	1,1	1,1	1,4	1,4	1,4	20
328	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	1,2	1,2	1,2	1,55	1,55	1,55	21
307	-0,3	-0,25	-0,3	-0,15	-0,3	-0,3	-0,3	-0,15	-0,15	-0,05	0,2	0,4	0,65	0,65	0,65	1,15	1,15	1,15	21
334	-0,15	-0,25	-0,15	-0,15	-0,1	-0,1	0,1	0,2	0,2	0,45	0,55	0,9	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	22
312	-0,05	0,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,55	0,65	0,8	1,2	1,2	1,2	1,55	1,55	1,55	23
313	0,3	0,45	0,8	0,85	1,25	1,25	1,35	1,65	1,65	2,0	2,45	2,85	3,15	3,15	3,15	3,55	3,55	3,55	23

TABLEAU XXIII (suite)

Numéros	TEMPS EN MINUTES												Température en degrés C.	Longueur en millim.
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60		
330	-0,1	0,0	0,05	-0,05	0,1	0,1	0,15	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	23	
309	-0,3	-0,45	-0,5	-0,45	-0,3	-0,1	-0,2	-0,2	0,05	0,45	0,6	0,9	28	
303	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-0,2	-0,05	0,1	0,3	0,5	0,6	29	
308	0,0	0,1	0,05	0,0	-0,05	0,05	0,2	0,6	0,7	0,8	1,1	1,4	29	
306	0,1	-0,15	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,25	0,4	0,65	1,0	1,4	30	
335	-0,05	-0,05	-0,1	-0,1	-0,1	0,15	0,4	0,55	0,65	0,9	1,15	1,45	17	
324	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,9	18	
336	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	1,1	1,4	18	
332	0,0	-0,3	-0,4	-0,3	-0,2	-0,25	-0,3	-0,3	-0,2	0,0	0,2	0,4	20	
301	0,0	0,1	0,2	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,7	1,2	1,3	1,7	21	
331	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,8	0,85	1,0	1,1	1,5	21	
302	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5	0,9	1,1	1,4	27	
315	0,0	-0,1	0,05	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	17	
333	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,75	1,0	1,25	1,5	17	
314	-0,2	-0,4	-0,3	-0,25	-0,2	-0,15	-0,05	0,2	0,4	0,7	0,9	1,2	19	
337	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,15	0,1	0,3	0,5	0,8	1,1	1,4	1,8	20	
340	0,0	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,3	1,6	2,0	21	
338	0,0	0,1	0,1	0,25	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9	1,3	1,6	2,1	22	
339	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6	27	
347	0,0	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,1	1,4	1,9	2,3	2,75	18	
348	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,2	0,45	0,6	1,0	1,5	2,2	21	
343	-0,3	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	0,1	0,2	22	
349	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,05	0,2	0,4	0,7	0,9	1,3	2,0	30	
341	0,0	-0,05	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,1	1,5	1,9	31	
346	0,1	0,1	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1,1	1,4	1,7	1,8	14	
345	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	18	
344	0,1	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,9	1,3	1,9	2,4	2,7	3,2	20	
350	0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	0,2	0,4	0,7	1,1	1,4	1,8	2,3	20	
342	0,1	0,0	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,3	1,8	2,4	3,0	27	

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 (nos 301-350 et nos 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