

Recherche d'une relation entre température mesurée sous abri et température agissant au niveau des zones de croissance du bananier.

Application au calcul d'une vitesse de développement.

J. GANRY*

RECHERCHE D'UNE RELATION ENTRE TEMPERATURE
MESUREE SOUS ABRI ET TEMPERATURE AGISSANT AU
NIVEAU DES ZONES DE CROISSANCE DU BANANIER

Application au calcul d'une vitesse de développement

J. GANRY (IRFA)

Fruits, oct. 1976, vol. 31, n°10, p. 587-598.

RESUME - On décrit une méthode qui permet d'estimer la distribution des températures au niveau des zones de croissance des feuilles du bananier, à partir des maxima et des minima journaliers mesurés sous abri météorologique, compte tenu de la circonférence du pseudo-tronc de la plante.

Dans une première partie on recherche les relations existant entre températures maxima et minima, sous abri d'une part (θ_m et θ_M), au niveau des zones de croissance d'autre part (T_m et T_M).

Dans une seconde partie on étudie la distribution horaire des coefficients de température R en fonction de la taille du bananier, de T_M et T_m .

A partir de ces estimations de températures, on peut calculer un coefficient de vitesse de croissance K_t , qui, comparée au coefficient de vitesse de croissance mesurée K_m permet :

- de repérer les variations dans le rythme de développement de la plante
- d'apprécier le niveau du potentiel de croissance de la plante.

Dans une précédente publication (*Fruits*, vol. 28, n°7-8, 1973) on a montré que la température avait une action prépondérante sur la vitesse de croissance du bananier, celle-ci étant exprimée à partir de mesures de croissance de la feuille. On a mis en évidence une loi d'action de la température, mesurée au niveau des zones de croissance, sur la vitesse de croissance durant une phase dite phase adulte.

On a montré également que la température agissant sur l'élongation des gaines foliaires est différente de la température de l'air, cette différence étant fonction principalement de la taille de la plante et de la géométrie de la culture.

Le but de l'étude présentée est d'établir la relation existant entre la température mesurée sous abri météorologique et la température agissant au niveau des zones de croissance, à l'intérieur du pseudo-tronc et ainsi de relier directement la vitesse de croissance du bananier aux températures mesurées sous abri météorologique.

RAPPEL ET REMARQUE

La courbe de croissance de la feuille du bananier peut être ajustée à une fonction combinant,

- une fonction tangente hyperbolique :
$$l = \frac{L}{1 + \exp^{-K(t-t_0)}}$$

* IRFA - Station de Neufchâteau - 97135 SAINTE MARIE (Guadeloupe).

- et une fonction exponentielle : $l = L [1 - e^{-K(t-t_0)}]$
(voir FRUITS, vol. 28, n°7-8, 1973).

La vitesse de croissance de la feuille est alors exprimée par la relation $\frac{dl}{dt} = Kl \left(\frac{L-l}{L+l} \right)$

On voit, d'après cette relation, que pour étudier l'influence de la température sur la vitesse de croissance on doit étudier les variations de K avec ce facteur.

On avait appelé K «vitesse de développement», suite à l'analogie qui existe entre ces deux termes. En fait ce n'est qu'une analogie et il apparaît donc préférable d'appeler ce coefficient K «coefficient de vitesse de croissance».

C'est un coefficient comparable à la constante de vitesse de réaction employée en chimie.

Il varie linéairement avec le temps et est indépendant de la taille de l'organe.

CONDITIONS EXPERIMENTALES MATÉRIEL ET MÉTHODES

On mesure la température à l'intérieur du pseudo-tronc grâce à 4 thermocouples en cuivre - constantan, dont la référence est à 0°C. Ces thermocouples sont fixés à l'extrémité de sondes piqueuses métalliques isolées électriquement.

Chaque sonde est enfoncée jusqu'aux deux tiers du rayon du pseudo-tronc, afin de ne pas blesser les organes en croissance active. Les niveaux des quatre sondes sont déterminés en fonction de la hauteur du bananier, la hauteur des zones d'élongation variant avec la hauteur du bananier (tableau 1).

TABLEAU 1

hauteur du bananier cm	niveaux des thermocouples cm			
	1	2	3	4
90-110	10	30	50	70
110-150	10	33	57	80
150-170	10	40	70	100
170-200	10	40	70	100

La position des sondes est revue une fois par semaine et modifiée en fonction de la taille du bananier.

La «température moyenne» agissant au niveau des zones de croissance est calculée en pondérant les températures en fonction du gradient d'élongation dans le pseudo-tronc - En effet comme on l'a déjà montré, une température agissant au niveau d'élongation maximum, aura plus de poids que tout autre.

On a déterminé les coefficients à affecter aux températures de chaque niveau, comme l'indique le tableau 2, à partir du diagramme d'élongation présenté dans une précédente publication (voir figure 6, Fruits, vol. 28, n°7-8, 1973).

TABLEAU 2 - Coefficients d'élongation (en p. cent)

hauteur du bananier cm	niveaux des thermocouples				total
	1	2	3	4	
90-110	20	41	31	8	100
110-150	22	42	30	6	100
150-170	17	39	36	8	100
170-200	13	33	36	18	100

On montre, en annexe (annexe 1) que la «moyenne» calculée en utilisant les coefficients d'élongation et la moyenne arithmétique des quatre températures sont très voisines, à l'échelle horaire et dans le cas bien précis de quatre niveaux de mesure.

Afin de simplifier les calculs des moyennes horaires, et de s'affranchir du terme «hauteur du bananier» nous avons travaillé sur des moyennes arithmétiques.

Durée de l'expérimentation et caractéristiques des bananiers mesurés.

Les mesures se sont déroulées du 7 janvier au 25 mai 1975, et ont porté sur 5 bananiers de tailles différentes (issus de parcelles en plantations échelonnées). Les caractéristiques sont données dans le tableau 3.

La densité était de 2.100 pieds/hectare.

Dépouillement des données brutes.

Pour toute la durée de l'expérimentation, on a relevé les températures maxima et minima sur la bande enregistreuse du potentiomètre et, ce, pour chaque bananier (4 niveaux) et pour chaque jour (sauf accident de mesure). Pour un certain nombre de journées caractéristiques on a relevé les températures de chaque niveau de mesure heure par heure.

METHODE D'INTERPRÉTATION

En raison du déphasage qui existe entre température sous abri et température du pseudo-tronc et de la variation de ce déphasage avec la taille du bananier (voir Fruits, vol. 28, n°7-8, 1973), il apparaît difficile de relier directement heure par heure les deux températures.

Aussi on a utilisé une méthode permettant de relier indirectement les deux températures.

HALLAIRE a montré (3, 4) qu'une température horaire θ_h relevée sous abri météorologique pouvait être donnée avec une approximation suffisante par la relation:

TABLEAU 3 - Caractéristiques (hauteur «h» et circonférence «c» à 30 cm) des bananiers mesurés

N° bananier	Date	7/1	21/1	4/2	18/2	4/3	18/3	1/4	14/4	29/4	13/5	27/5	10/6
A	h	255											
	c	85											
B	h	212	223	230	240	245	250						
	c	78,4	80,4	81,0	82,2	82,9	83,0						
C	h	110	125	140	151	163	177	195	200	210	222	230	237
	c	34,4	39,5	43,7	47,9	52,1	57,1	61,5	64,5	68,2	71,0	73,9	77,6
D	h							94	107	114	123	144	158
	c							34,5	36,5	39,5	43,6	50,0	54,8
E	h											61	90
	c											24,0	30,5

$$\theta_h = \theta_m + P_h \cdot A$$

θ_m désignant la température minimum du jour considéré, A l'amplitude et P_h un coefficient dépendant de l'heure et de la durée du jour. On applique cette relation aux températures du pseudo-tronc du bananier.

$$T_h = T_m + R_h \cdot A$$

T_h représente la «température moyenne» horaire au niveau des zones de croissance ; T_m le minimum journalier, A l'amplitude ($T_M - T_m$) et R_h un coefficient horaire variant principalement avec la taille du bananier.

Pour connaître T_h , il est nécessaire de déterminer les 3 grandeurs suivantes :

- la température maximum journalière T_M au niveau des zones de croissance
- la température minimum journalière T_m au niveau des zones de croissance
- le coefficient R_h et sa distribution horaire en fonction de la taille de la plante.

Il apparaît alors possible de connaître la distribution horaire des températures sans dépouillement fastidieux de température heure par heure, et d'en déduire des «sommes de développement» journalières à partir d'une loi connue d'action de la température.

DÉTERMINATION DES TEMPÉRATURES MAXIMA ET MINIMA AU NIVEAU DES ZONES DE CROISSANCE, A PARTIR DES TEMPÉRATURES MAXIMA ET MINIMA MESURÉES SOUS ABRI MÉTÉOROLOGIQUE

On a déjà montré (2) que pour des bananiers d'âges différents et pour un même niveau, les températures varient par leur amplitude et leur déphasage en fonction de la taille du bananier, et en particulier avec la circonférence du pseudo-tronc et avec l'indice foliaire.

Dans une première approximation, on peut admettre qu'en conditions normales de végétation, et pour une densité de plantation donnée, l'indice foliaire et la circonférence du pseudo-tronc sont en étroite relation jusqu'à la floraison.

On a donc, dans un premier temps, recherché la relation entre T_m , T_M et θ_m , θ_M compte tenu du seul critère C, mesure de la circonférence du pseudo-tronc. Il sera ultérieurement nécessaire d'introduire le facteur indice foliaire en comparant diverses densités de plantation.

Faute de moyens de calcul assez puissants, on a travaillé sur les moyennes pentadaires des maxima et des minima dans le pseudo-tronc et sous abri météorologique.

62 groupes de valeurs ont été analysés, correspondant donc à 310 couples de mesures.

Les combinaisons de T_m et θ_m , T_M et θ_M peuvent être de plusieurs formes.

La forme la plus simple est $\gamma = T_M - \theta_M = a_1 C + a_0$. relation (1) (de même pour $T_m - \theta_m$), relation (6).

On peut logiquement penser que l'écart $T_M - \theta_M$ est en relation avec l'amplitude diurne des températures ($A = \theta_M - \theta_m$).

En effet ces deux grandeurs sont sous l'action directe du rayonnement solaire et varient donc dans le même sens.

Par contre, cette relation devrait être moins nette en ce qui concerne l'écart $T_m - \theta_m$.

On étudiera donc les deux relations suivantes :

relation (2) : $\gamma = T_M - \theta_M = a_0 + a_1 C + a_2 A$
et relation (7) pour $T_m - \theta_m$

relation (3) : $\gamma = \frac{T_M - \theta_M}{A} = a_1 C + a_0$
et relation (8) pour $T_m - \theta_m$.

Le déphasage de température et l'amortissement étant

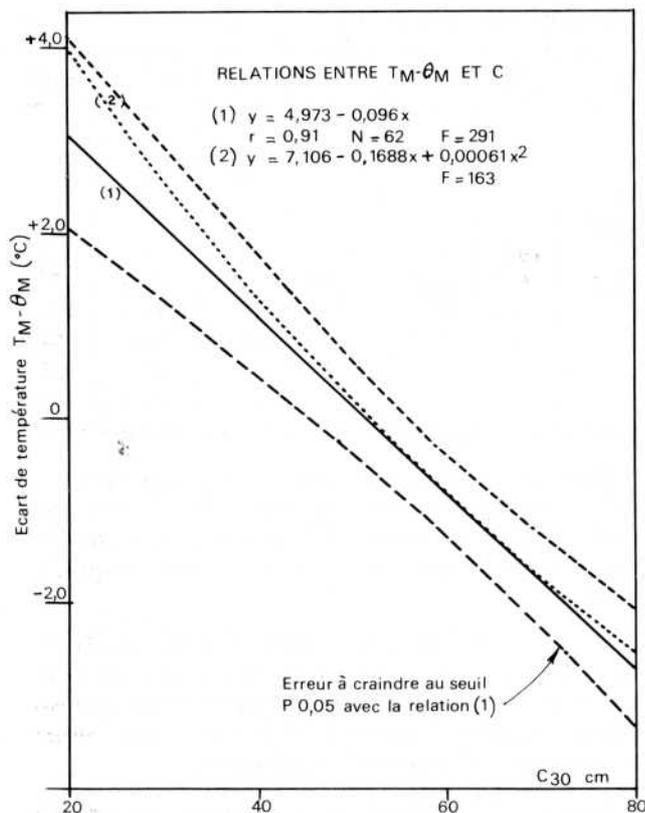


Figure 1. Relation entre la température maximum sous abri météorologique et la température maximum agissant au niveau des zones d'élongation des feuilles, dans le pseudo-tronc, en fonction de la circonférence du pseudo-tronc à 30 cm.

fonction du volume du pseudo-tronc, donc du carré du rayon, on étudiera également les relations quadratiques

relation (4) : $y = T_M - \theta_M = a_0 + a_1C + a_2C^2$

et relation (9) pour $T_m - \theta_m$

relation (5) : $y = \frac{T_M - \theta_M}{A} = a_0 + a_1C + a_2C^2$

et relation (10) pour $T_m - \theta_m$.

Les résultats de l'analyse figurent dans les tableaux 4 (températures maxima) et 5 (températures minima), ainsi que sur les figures 1 et 2.

Dans tous les cas la relation entre l'écart thermique et la circonférence du pseudo-tronc est hautement significative.

On ne note aucune différence significative entre les

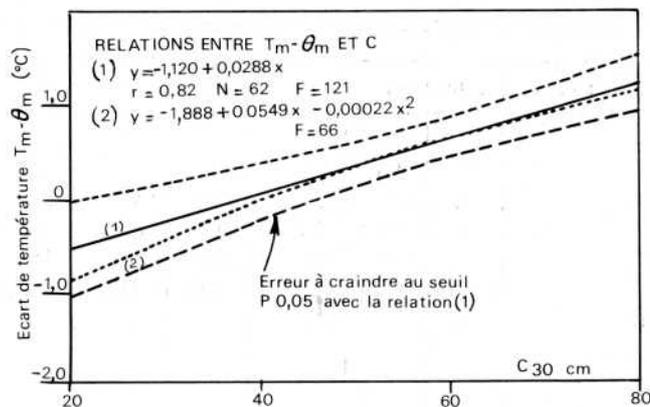


Figure 2. Relation entre température minimum sous abri météorologique et température minimum agissant au niveau des zones d'élongation des feuilles, dans le pseudo-tronc, en fonction de la circonférence du pseudo-tronc à 30 cm.

diverses relations. L'introduction du facteur amplitude n'améliore pas significativement la précision.

Remarque : les variations de l'amplitude thermique, dans le cas de notre analyse, sont assez faibles (écart type de 0,6°C).

Ceci pourrait expliquer le peu d'importance que prend ce paramètre en fin d'analyse. On peut prévoir qu'il aura plus d'importance dans une zone où on notera une plus grande variation d'amplitude, ou lorsque l'on comparera des zones à amplitudes différentes, ceci étant surtout valable pour les maxima.

DISTRIBUTION HORAIRE DES COEFFICIENTS DE TEMPÉRATURE R EN FONCTION DE LA TAILLE DU BANANIER

Après avoir estimé les valeurs des températures minima T_m et maxima T_M au niveau des zones d'élongation, à partir des températures minima θ_m et maxima θ_M , mesurées sous abri météorologique, il s'agit de connaître la valeur du coefficient de température R_h pour déterminer une température horaire T_h .

$$T_h = T_m + (T_M - T_m) R_h$$

Afin de déterminer les valeurs de R_h et leur distribution au cours d'une journée, on utilise les températures T_h relevées heure par heure sur la bande enregistreuse du

TABLEAU 4 - Températures maxima. Étude de diverses relations entre T_M et θ_M , C et A

N°	Relation	$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$	r	F	Variance de l'erreur
1	$y = T_M - \theta_M$	$y = 4,973 - 0,096 x_1$	0,910	291	0,685 dl = 60
2	$y = T_M - \theta_M$ $x_1 = C$ $x_2 = A$	$y = 6,017 - 0,097 x_1 - 0,180 x_2$		146	0,684 dl = 59
3	$y = \frac{T_M - \theta_M}{A}$ $x_1 = C$	$y = 0,888 - 0,0172 x_1$	0,911	292	0,0216 dl = 60
4	$y = T_M - \theta_M$ $x_1 = C$ $x_2 = C^2$	$y = 7,106 - 0,1688 x_1 + 0,00061 x_2$		163	0,623 dl = 59
5	$y = \frac{T_M - \theta_M}{A}$ $x_1 = C$ $x_2 = C^2$	$y = 1,293 - 0,0309 x_1 + 0,000116 x_2$		167	0,0194 dl = 59

$N = 62$ $\bar{C} = 61,2$ cm $\bar{A} = 5,70^\circ\text{C}$ $(\overline{T_M - \theta_M}) = -0,933^\circ\text{C}$
 dl = nombre de degrés de liberté

TABLEAU 5 - Températures minima. Étude des diverses relations entre T_m et θ_m , C et A.

N°	Relation	$y = a_0 + a_1 x_1 + b_2 x_2$	r	F	Variance de l'erreur
6	$y = T_m - \theta_m$ $x_1 = C$	$y = -1,120 + 0,0288 x$	0,817	121	0,147 dl = 60
7	$y = T_m - \theta_m$ $x_1 = C$ $x_2 = A$	$y = -0,779 + 0,0290 x_1 - 0,0617 x_2$		60	0,149 dl = 59
8	$y = \frac{T_m - \theta_m}{A}$ $x_1 = C$	$y = -0,198 + 0,0051 x$	0,812	116	0,048 dl = 59
9	$y = T_m - \theta_m$ $x_1 = C$ $x_2 = C^2$	$y = -1,888 + 0,0549 x_1 - 0,00022 x_2$		66	0,140 dl = 59
10	$y = \frac{T_m - \theta_m}{A}$ $x_1 = C$ $x_2 = C^2$	$y = -0,3419 + 0,0101 x_1 - 0,00043 x_2$		63	0,0046 dl = 59

$N = 62$ $\bar{A} = 5,70^\circ\text{C}$ $\bar{C} = 61,2$ cm $(\overline{T_m - \theta_m}) = +0,645^\circ\text{C}$

potentiomètre.

On en déduit les valeurs de $R_h = \frac{T_h - T_m}{T_M - T_m}$.

On obtient ainsi une distribution horaire de R_h au cours d'une journée [soit $F_i(R_h)$], pour un bananier i , de circonférence à 30 cm égale à C_i . On établit ensuite une distribution moyenne $\overline{F_i(R_h)}$ correspondant à un bananier i , et à n jours consécutifs.

La distribution $\overline{F_i(R_h)}$ correspond à un bananier de circonférence égale à $\frac{\sum n C_i}{n}$.

Sur la figure 3 on donne des exemples de distribution de R_h correspondant à des bananiers de tailles différentes. On met ainsi en évidence l'effet de la taille de la plante sur le déphasage de température. On remarque que ce déphasage peut atteindre 4 heures pour les minima et 5 heures pour les

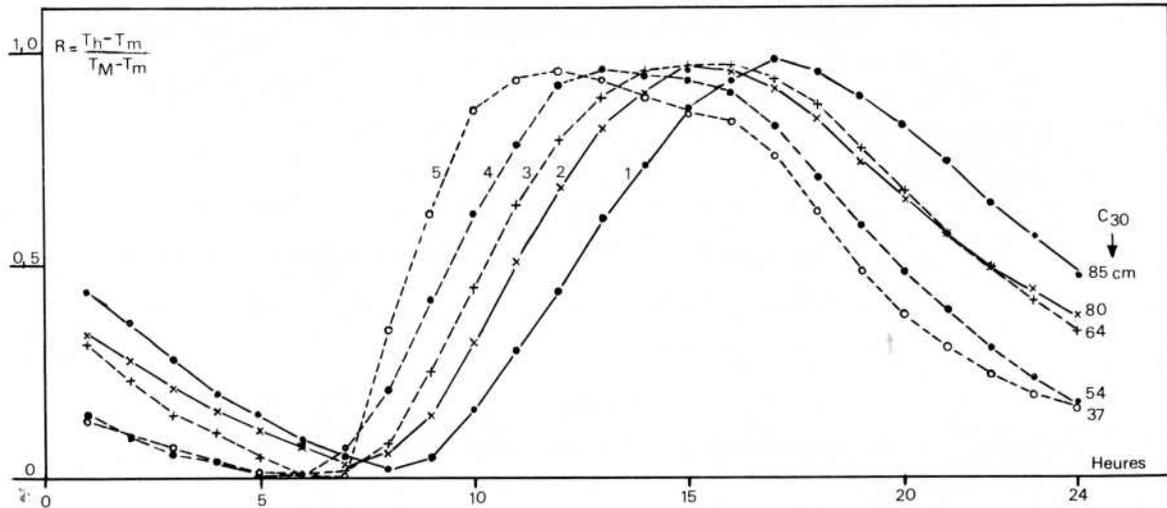


Figure 3. Distribution horaire des coefficients de température R, au cours de la journée pour des bananiers de tailles différentes.

maxima, ce qui pourrait expliquer les inversions de vitesse de croissance diurnes et nocturnes indiquées par LASSOUDIÈRE (5).

Pour chaque distribution $\overline{F}_i(R_h)$, les valeurs de R_h , variant de 0 à 1, sont réparties en dix classes de valeurs (0,0 - 0,1 ; 0,1 - 0,2 ; ... 0,9 - 1,0).

On obtient ainsi par journée, un nombre d'heures par classe de R soit pour la classe j, un nombre d'heures n_j .

$$\text{On aura } \sum_{24} n_j = 24$$

Les valeurs n_j (nombre d'heures par classe de R) et \overline{R} (valeur moyenne de R pour une journée) varient en fonction de la taille du bananier. C'est ce qu'indiquent les figures 4 et 5 ainsi que le tableau 7.

Il apparaît que la relation entre le coefficient \overline{R} et la circonférence à 30 cm du pseudo-tronc peut être exprimée par une équation de régression hautement significative : $y = 0,3417 + 0,00191 x$; relation (11).

Du tableau 7, on peut déduire les équations reliant le nombre d'heures par classe de R à la circonférence à 30 cm. Ces équations seront du type :

$$n_j = a C_{30} + b$$

avec $\sum n_j = 24$ quel que soit C_{30}

les deux conditions nécessaires sont : $\sum a = 0$ et $\sum b = 24$.

Pour que ces deux conditions soient remplies, on a établi deux classes de circonférence ($C_{30} < 50$ cm et $C_{30} > 50$ cm), et pour chacune des classes, on a calculé C_{30} moyen et n_j

moyen (voir tableau 7) et établi les relations $n_j = a C_{30} + b$ à partir de ces valeurs moyennes (tableau 8).

APPLICATION AU CALCUL D'UNE VITESSE DE CROISSANCE

On vient de montrer qu'il est possible d'estimer :

- les températures maxima et minima journalières au niveau des zones de croissance (soit T_M et T_m)
- la distribution des coefficients de température pour une journée (soit $n_j =$ nombre d'heures par classes de R et $\overline{R} =$ valeur moyenne de R pour une journée), lorsque l'on connaît :
- les températures maxima (θ_M) et minima (θ_m) sous abri météorologique
- la circonférence à 30 cm (C_{30}) du bananier.

Il apparaît maintenant possible d'estimer la distribution horaire des températures au niveau des zones de croissance par la relation.

$$T_h = T_m + (T_M - T_m) R_h$$

Connaissant la loi d'action de la température T_h sur la vitesse de croissance, il apparaît possible de calculer cette vitesse de croissance sur une échelle de temps déterminée.

On pourra distinguer deux cas :

- on se situe dans la gamme d'action linéaire de la température (cas particulier)

TABLEAU 7 - Relation entre la circonférence du pseudo-tronc à 30 cm et le nombre d'heures par classe de R.

C ₃₀ en cm	Nombre d'heures par classe de R											
	85	82	80	76	64	Moy.	54	45	37	37	28	Moy.
N	21	12	14	15	10	72	15	12	14	10	15	66
0,0-0,1	3,6	4,0	3,1	4,1	4,0	3,7	5,1	5,5	4,7	5,0	7,1	5,5
0,1-0,2	2,6	2,9	3,0	2,4	2,6	2,7	3,3	3,5	4,9	3,8	3,6	3,8
0,2-0,3	2,0	2,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,6	2,5	2,0	1,9	2,2
0,3-0,4	2,0	1,8	2,6	1,2	1,9	1,9	1,5	2,3	1,7	1,7	1,5	1,7
0,4-0,5	2,5	2,0	2,3	1,5	1,9	2,1	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	1,4
0,5-0,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,6	1,7	1,4	1,3	1,3	1,0	1,1	1,2
0,6-0,7	1,9	1,7	1,8	1,8	1,6	1,8	1,6	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3
0,7-0,8	2,0	1,7	1,7	2,0	1,7	1,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,5
0,8-0,9	2,4	2,2	2,4	2,7	2,1	2,4	1,9	1,6	2,0	2,8	2,5	2,2
0,9-1,0	3,3	3,5	3,2	4,4	4,4	3,7	4,1	3,0	2,9	3,4	2,4	3,2

C₃₀ = circonférence à 30 cm du pseudo-tronc (en cm) N = nombre de valeurs
 0,0-0,1 ; 0,9-1,0 = classes de R

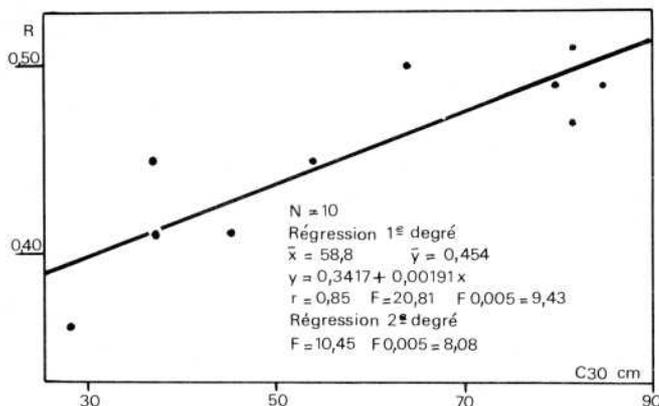


Figure 4. Relation entre le coefficient de température journalier moyen R et la circonférence à 30 cm du bananier.

TABLEAU 8 - Équations reliant la circonférence du pseudo-tronc C₃₀ au nombre d'heures par classe de R.

Classe	équation n _j = a C ₃₀ + b	
	a	b
0,0-0,1	-0,0469	7,3891
0,1-0,2	-0,0286	4,9544
0,2-0,3	-0,0026	2,3049
0,3-0,4	+0,0052	1,4901
0,4-0,5	+0,0182	0,6654
0,5-0,6	+0,0130	0,6753
0,6-0,7	+0,0130	0,7753
0,7-0,8	+0,0104	1,0802
0,8-0,9	+0,0052	1,9901
0,9-1,0	+0,0130	2,6753
	Σa = 0,0001	Σb = 24,0001

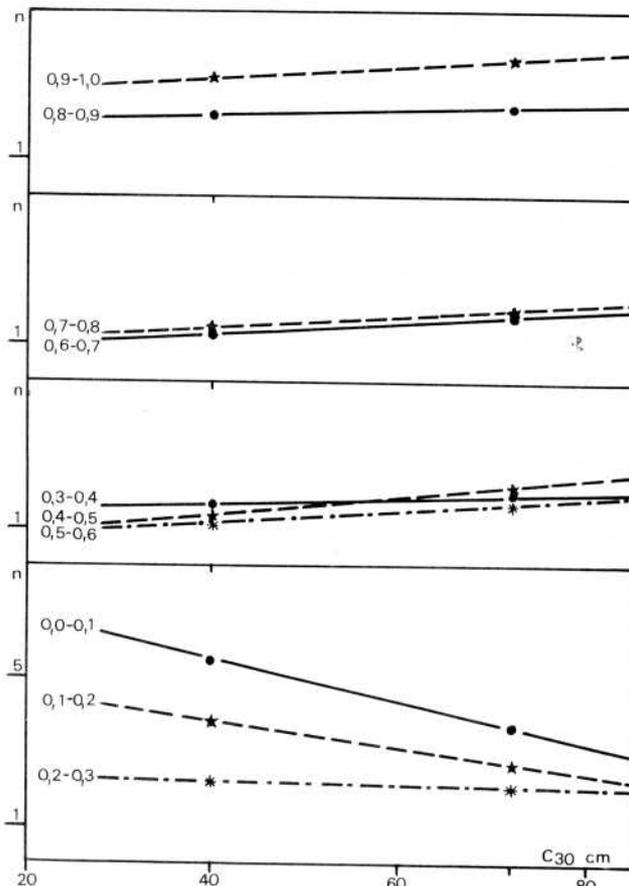


Figure 5. Relation entre la circonférence à 30 cm du pseudo-tronc et le nombre d'heures n_j par classe de R.

on se situe dans et hors de la gamme d'action linéaire de la température (cas général).

Cas général : loi d'action non strictement linéaire.

En général la loi d'action de la température a l'allure d'une courbe en cloche asymétrique (voir GANRY, Fruits, vol. 28, n° 7-8, 1973). On peut s'arranger pour découper cette courbe en tronçons sensiblement linéaires.

Par exemple, pour le bananier, la figure 6 montre que l'on peut ajuster la courbe, avec une assez bonne précision, à deux droites situées de part et d'autre de l'optimum thermique, T_{opt} .

La première droite (B) a pour équation $K = a_1 T + b_1$

La deuxième droite (C) a pour équation $K = a_2 T + b_2$

K : coefficient de vitesse de croissance

T : température agissant au niveau des zones de croissance

a_1 : Coefficient angulaire positif

a_2 : Coefficient angulaire négatif.

Dans le cas de la figure 6, les deux droites ont pour équation :

$$K = 0,1250 T - 1,5000 ; \text{ relation (12)}$$

$$K = -0,1864 T + 7,5307, \text{ relation (13)}$$

($K_{max} = 2,12$ pour $T_{opt} = 29^\circ C$).

K exprime ici le coefficient de vitesse de croissance horaire.

Calcul d'un coefficient de vitesse de croissance journalière

Pour chaque jour on évalue, en fonction de la circonférence du bananier :

- 1) T_M et T_m à partir θ_M et θ_m
- 2) la distribution de R_h (relations du tableau 8)
- 3) la distribution de T_h par la relation :

$$T_h = T_m + (T_M - T_m) R_h$$

Si l'on a n_j heures dans la classe " $R_{j-1} - R_j$ " on aura n_j valeurs de T_{hj} , T_{hj} étant obtenu en donnant à R_h la valeur moyenne de sa classe (R_{hj}).

- 4) la distribution des coefficients K_j

Les valeurs de K_j sont obtenues par les relations (12) ou (13), selon que T_{hj} est inférieur ou supérieur à $29^\circ C$.

- 5) le coefficient de vitesse de croissance journalière

$$K_{\text{jour}} = \sum_{j=1}^{10} n_j K_j$$

avec n_j : nombre d'heures pour la classe correspondant à R_j

K_j : coefficient de vitesse de croissance horaire

correspondant à $T_j = T_m + (T_M - T_m) R_j$

Exemples d'application :

1er exemple : soit un bananier de 40 cm de circonférence

$$\theta_M = 30^\circ C$$

$$\theta_m = 21^\circ C$$

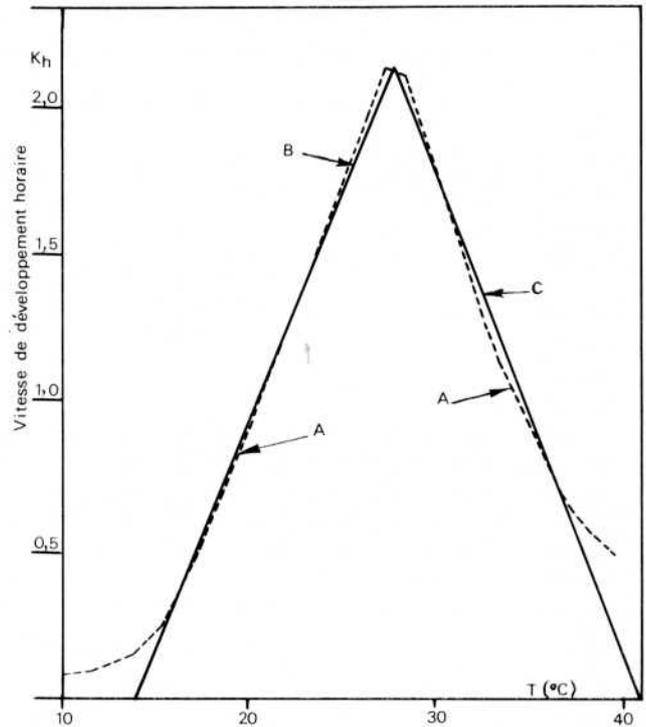


Figure 6. Action de la température « moyenne » du pseudo-tronc (zones de croissance) sur le coefficient de vitesse de croissance du bananier en phase adulte.

- Courbe expérimentale A
- Droites d'ajustement B et C
- B : $K_h = 0,1250 T - 1,5000$
- C : $K_h = -0,1864 T + 7,5307$

- 1) calcul de T_M et T_m en utilisant les relations (1) et (6)

$$T_M = 34,98 - 0,096 \times 40 = 31,1^\circ C$$

$$T_m = 19,88 + 0,029 \times 40 = 21,0^\circ C$$

- 2) distribution de R_h , de T_h et K_j
voir tableau 7 ou appliquer les relations du tableau 8

Classe de R_h	R_{hj}	n_j	T_{hj}	F (T)	K_j	$\frac{\sum K_j}{n_j \times K_j}$
0,0 - 0,1	0,05	5,5	21,5	(12)	1,19	6,55
0,1 - 0,2	0,15	3,8	22,5	(12)	1,31	4,98
0,2 - 0,3	0,25	2,2	23,5	(12)	1,44	3,17
0,3 - 0,4	0,35	1,7	24,5	(12)	1,56	2,65
0,4 - 0,5	0,45	1,4	25,5	(12)	1,69	2,37
0,5 - 0,6	0,55	1,2	26,6	(12)	1,83	2,20
0,6 - 0,7	0,65	1,3	27,6	(12)	1,95	2,53
0,7 - 0,8	0,75	1,5	28,6	(12)	2,08	3,12
0,8 - 0,9	0,85	2,2	29,6	(13)	2,01	4,42
0,9 - 1,0	0,95	3,2	30,6	(13)	1,83	5,86
Total		24				37,84

$$T_{hj} = 21 + R_{hj} \times 10,1$$

F (T) : relation utilisée (12) : $K_j = 0,125 T - 1,50$

(13) : $K_j = -0,186 T + 7,53$

On obtient finalement pour la journée un coefficient de vitesse de croissance journalière $K_{\text{jour}} = 37,8$.

2^e exemple : on considère un bananier de 60 cm de circonférence la même journée :

1) $T_M = 29,2^\circ\text{C}$; $T_m = 21,6^\circ\text{C}$.

2) en utilisant le même processus de calcul, on trouve $K_{\text{jour}} = 38,4$

3^e exemple : si on considère un bananier de 20 cm de circonférence :

1) $T_M = 33,1^\circ\text{C}$; $T_m = 20,5^\circ\text{C}$

2) $K_{\text{jour}} = 34,0$.

Cas particulier : lois d'action linéaire.

Si, compte tenu de la forme de la courbe, la gamme de températures à laquelle les plantes sont soumises permet d'ajuster la loi d'action à une droite sans faire trop d'erreurs, le problème se simplifie.

Dans ce cas là,

$$K_h = a T_h + b \text{ quel que soit } T$$

En l'absence d'un optimum thermique, il est possible de calculer directement le coefficient de vitesse de croissance.

$$K_{\text{jour}} = \sum_{24} (a T_h + b) = a \sum_{24} T_h + 24 b$$

$$\text{Or } \sum_{24} T_h = 24 T_m + (T_M - T_m) \sum_{24} R_h = 24 [T_m + (T_M - T_m) \bar{R}_h]$$

D'après la relation (11)

$$\bar{R}_h = 0,3417 + 0,00191 C$$

Si l'on considère la zone d'action linéaire de la température entre 13 et 29°C, le coefficient de vitesse de croissance journalière en phase adulte est donné par la relation :

$$K_{\text{jour}} = 24 [0,1250 [T_m + (T_M - T_m) (0,3417 + 0,00191 C)] - 1,5000]$$

soit plus simplement :

$$K_{\text{jour}} = 3 [T_m - 12 + (T_M - T_m) (0,34 + 0,002 C)] \quad (14)$$

Application : on reprend les trois exemples précédents en utilisant la loi d'action linéaire :

C = 20 cm $K_{\text{jour}} = 42,2$ au lieu de 34,0

C = 40 cm $K_{\text{jour}} = 40,7$ au lieu de 37,8

C = 60 cm $K_{\text{jour}} = 38,3$, très voisin de la valeur calculée précédemment

La loi linéaire devra donc être utilisée avec beaucoup de précautions, en tenant compte des valeurs de θ_M et C (voir annexe 1)

APPLICATION A LA DÉTERMINATION DE VARIATIONS DANS LE RYTHME DE DÉVELOPPEMENT DU BANANIER

Une loi d'action de la température a été établie pour une

phase de développement dite phase adulte.

Elle permet, d'après ce qui vient d'être dit, de calculer un coefficient de vitesse de croissance journalière : $K_C = f(\theta)$

On peut d'autre part mesurer le coefficient de vitesse de croissance de la plante à partir de l'élongation de la feuille soit K_M (K mesuré).

En phase adulte, le rapport $\frac{K_M}{K_C}$ sera voisin de 1 et relativement constant. Théoriquement, la plante ne sera plus en phase adulte, lorsque ces deux conditions ne seront plus remplies.

En fait, la condition $\frac{K_M}{K_C} \approx 1$ pourra ne pas être remplie si

la plante n'est pas en conditions climatiques (autres que thermiques) ou édaphiques optimales (potentiel maximum). On a déjà fait remarquer (1), en effet, qu'au voisinage de l'optimum thermique, les facteurs limitants autres que thermiques s'exprimaient avec une intensité accrue par rapport aux basses températures.

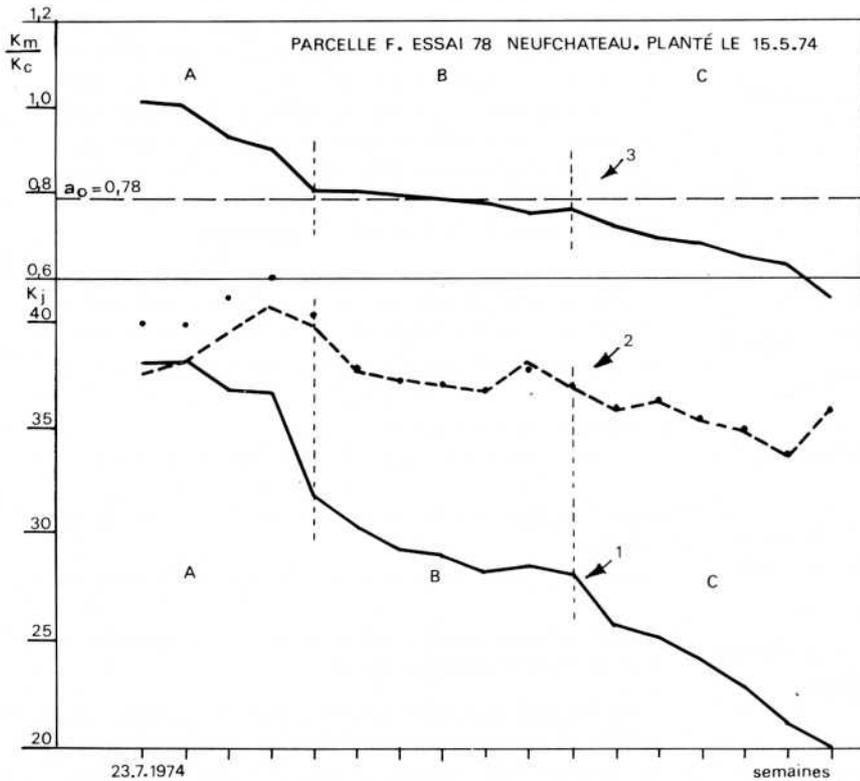
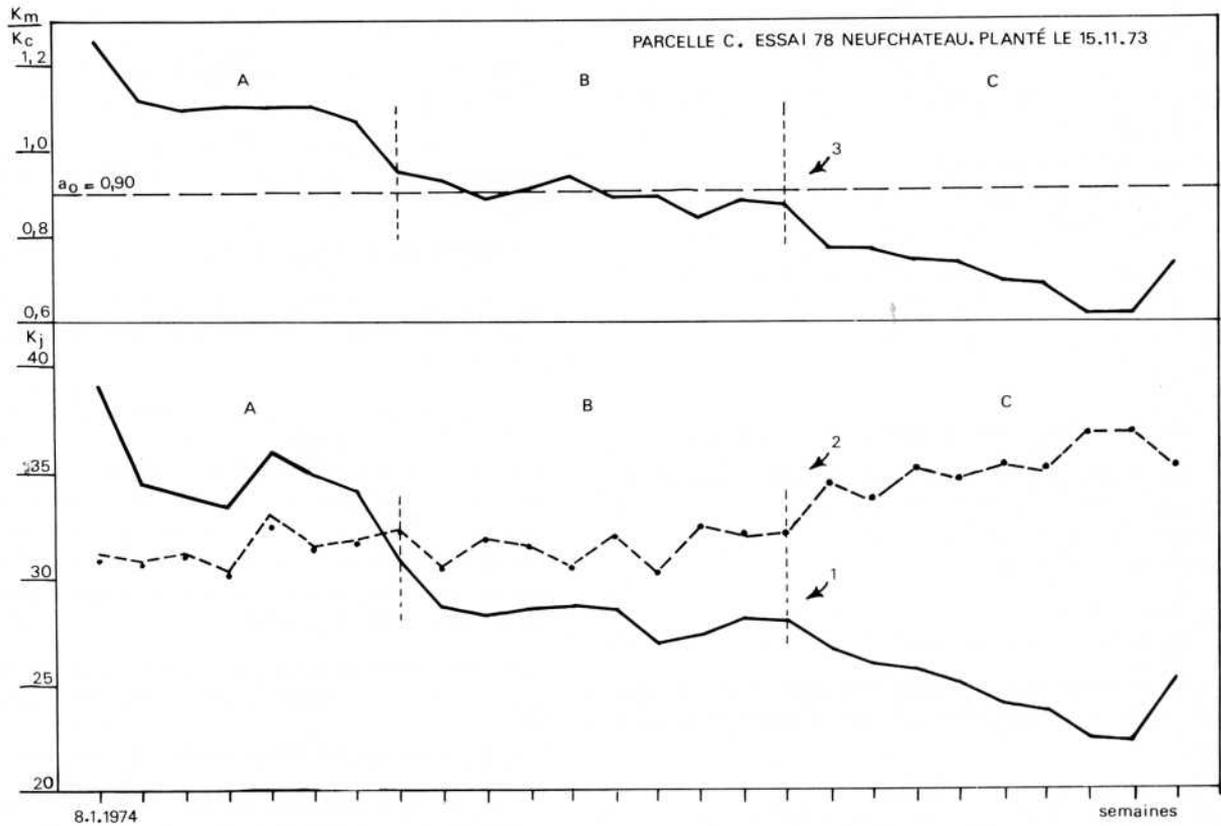
En fait, ce seront donc plus les variations du rapport $\frac{K_M}{K_C}$ qui seront une indication des variations du rythme de développement, que les valeurs absolues de ce rapport.

Deux exemples d'application sont donnés sur la figure 7 (a et b). Pour les 20 bananiers observés dans les deux séries A et B, on a calculé un coefficient moyen de vitesse de croissance hebdomadaire déterminé à partir de dépouillements graphiques des courbes individuelles de coefficients de vitesse de croissance. Ce coefficient moyen K_M correspond à la courbe 1. La courbe 2 représente K_C hebdomadaire calculé à partir de la loi d'action de la température sur la vitesse de croissance en phase adulte. Les points représentent K_C' hebdomadaire calculé à partir de l'ajustement linéaire. La courbe 3 représente le rapport $\frac{K_M}{K_C}$.

Cette dernière courbe permet de distinguer trois phases correspondant à des rythmes de développement différents :

- une phase pour laquelle $\frac{K_M}{K_C}$ est relativement constant, correspondant à la phase dite adulte
- une phase antérieure, pour laquelle $\frac{K_M}{K_C}$ est supérieur au rapport en phase adulte, et correspondant à la phase de vie parasite sur le pied parent.
- une phase postérieure, pour laquelle $\frac{K_M}{K_C}$ est inférieur au rapport en phase adulte, et décroissant, et correspondant à la phase de différenciation florale.

On constate donc que, à la loi interne de croissance des feuilles, se superpose une loi interne de croissance générale du bananier qui conduit à une croissance des feuilles



Figures 7a et 7b. Évolution du coefficient de vitesse de croissance journalière au cours d'un cycle de première génération.

1 - Coefficient de vitesse de croissance journalière (moyenne hebdomadaire) déterminé à partir de mesures de l'allongement de la feuille K_m

2 - Coefficient de vitesse de croissance journalière (moyenne hebdomadaire) calculé à partir de la loi d'action de la température en phase adulte K_c .

Les points (•) représentent le coefficient de vitesse de croissance journalière calculé à partir de l'ajustement linéaire K_c' .

3 - Rapport des coefficients de vitesse de croissance $\frac{K_m}{K_c}$

A : $K_m/K_c > a_0$: phase parasite sur le pied parent

B : $K_m/K_c \approx a_0$: phase adulte végétative

C : $K_m/K_c < a_0$: phase florale

d'autant plus lente que le bananier est plus âgé.

Dans certains cas, l'ajustement linéaire peut surestimer le coefficient de vitesse de croissance et ce, d'autant que le nombre d'heures à température supérieure à l'optimum thermique est important.

Il ne faudra donc utiliser l'ajustement linéaire que dans les cas où T_M est inférieur à 29°C, soit, d'après la figure 1, θ_M inférieur 26-27°C.

CONCLUSION

On vient de montrer qu'il est possible d'estimer les températures horaires T_h agissant au niveau des zones de croissance des feuilles du bananier, et leur distribution journalière, à partir des températures minima et maxima mesurées sous abri météorologique et de la circonférence à 30 cm du pseudo-tronc.

La relation obtenue s'applique à une géométrie de plantation (densité) donnée. Pour comparer diverses géométries de culture, il sera nécessaire d'introduire le critère

indice foliaire.

A partir de ces données thermiques, on peut calculer une vitesse de croissance à partir de la loi d'action de la température en phase adulte. La comparaison du coefficient de vitesse de croissance calculée et du coefficient de vitesse de croissance mesuré permet d'étudier les variations du rythme de développement et devrait permettre de quantifier l'action des facteurs limitants autres que thermiques.

ANNEXE 1

Conditions nécessaires pour pouvoir utiliser une loi linéaire d'action de la température :

A chaque circonférence à 30 cm C correspond une température maximum sous abri θ_M , au-delà de laquelle la loi linéaire n'est plus applicable.

C	20	30	40	50	60	70	80
M	25,9°	16,9°	27,9°	28,8°	28,9°	30,7°	31,7°

BIBLIOGRAPHIE

1. DURAND (R.). 1967.

Action de la température et du rayonnement sur la croissance. *Ann. Physiol. végét. INRA*, 1967, 9, 1, p. 5-27.

2. GANRY (J.). 1973

Etude du développement du système foliaire du bananier en fonction de la température. *Fruits*, vol. 28, n°7-8, 1973.

3. HALLAIRE (M.). 1950.

Sur une méthode rapide de dépouillement horaire de la température à partir du minimum et du maximum journaliers.

C.R. Acad. Sci., 231, 1950, p. 406-408

4. HALLAIRE (M.). 1950.

Les températures moyennes nocturnes diurnes et nyctémérales exprimées en fonction du minimum et du maximum journaliers de température.

C.R. Acad. Sci., 231, 1950, p. 1533-1535

5. LASSOUDIERE (A.) et CHARPENTIER (J.-M.).

La vitesse de sortie des feuilles du bananier cultivar 'Poyo'. *Fruits*, vol. 26, n°6, 1971.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier R. DURAND, Maître de Recherches à l'INRA et P. LOSSOIS, Chef du Service de Biométrie de l'IRFA, pour leurs conseils.

ANNEXE 2

Températures moyennes au niveau des zones d'élongation
des gaines foliaires :

1 - «moyenne» calculée en tenant compte des coefficients
d'élongation

2 - moyenne arithmétique des quatre valeurs.

Date	B					C					D				
	C	T _{m1}	T _{m2}	T _{M1}	T _{M2}	C	T _{m1}	T _{m2}	T _{M1}	T _{M2}	C	T _{m1}	T _{m2}	T _{M1}	T _{M2}
26/3		21,3	21,3	22,8	22,7		20,9	20,9	24,5	24,5		20,4	20,6	28,7	28,8
27/3		21,3	21,3	23,1	23,0		21,1	21,2	24,9	24,8		19,8	19,9	27,4	27,5
28/3		20,9	20,9	22,4	22,3		20,8	20,8	23,9	23,9		18,7	18,8	29,7	29,7
29/3		20,4	20,4	23,1	23,0		20,2	20,2	24,9	24,9		18,6	18,7	28,6	28,7
30/3		20,5	20,5	22,9	22,8		20,1	20,2	24,3	24,3		21,1	21,2	28,8	28,9
31/3		21,5	21,6	23,1	23,0		21,6	21,6	24,7	24,7		20,5	20,6	26,9	26,9
1/4	83	21,4	21,4	22,8	22,7	61,5	21,2	21,2	23,8	23,8	34,5	17,9	18,0	28,9	28,9
2/4		19,8	19,9	22,7	22,6		19,4	19,5	24,2	24,2		17,3	17,4	30,5	30,4
3/4		19,7	19,7	23,2	23,0		19,1	19,2	25,1	25,1		18,0	18,1	28,4	28,4
4/4		20,0	20,0	23,4	23,3		19,4	19,5	25,6	25,6		19,7	19,8	29,4	29,6
5/4		20,9	20,9	23,8	23,6		20,7	20,8	25,7	25,6		19,4	19,4	28,8	28,8
6/4		20,8	20,8	23,3	23,2		20,4	20,4	24,9	24,9		18,7	18,8	28,6	28,6
7/4		21,7	21,7	23,8	23,7		21,5	21,5	25,3	25,2		19,0	19,0	29,0	29,0
8/4		20,6	20,6	23,1	23,0		20,2	20,2	24,9	24,8		20,6	20,6	29,8	30,0
9/4		20,9	21,0	24,0	23,9		20,5	20,5	26,0	25,9		19,3	19,4	29,2	29,2
10/4		20,9	21,0	23,9	23,8		20,6	20,6	25,9	25,8		20,0	20,0	30,4	30,4
11/4		21,5	21,4	23,8	23,7		21,1	21,2	25,4	25,3		21,4	21,4	30,6	30,6
12/4		22,5	22,5	24,4	24,3		22,4	22,3	25,8	25,8		21,7	21,8	31,9	32,1
13/4		22,6	22,6	24,6	24,4		22,5	22,5	26,2	26,2		21,3	21,3	30,2	30,2
14/4	83	22,5	22,4	24,0	23,9	64,5	22,0	22,1	25,2	25,2	36,5	20,0	20,0	28,0	28,0
15/4		21,5	21,5	23,6	23,5		21,1	21,1	24,9	24,9		20,9	20,9		
16/4		22,0	22,0				22,0	22,0	26,0	25,9		21,2	21,1		
17/4															
18/4		22,1	22,1	24,8	24,7		22,0	22,1	26,0	25,9		21,2	21,1	30,4	30,2
19/4															
20/4		21,2	21,2	22,8	22,7		21,1	21,1	23,5	23,5		20,2	20,2	26,6	26,6
Moy.		21,2	21,2	23,4	23,3		20,9	20,9	25,1	25,0		19,9	19,9	29,1	29,1
Écart type		0,81	0,79	0,64	0,63		0,92	0,90	0,76	0,74		1,23	1,20	1,28	1,28

C = circonférence du pseudo-tronc à 30 cm

T_m = température minimum «moyenne» au niveau des zones d'élongation

T_M = température maximum «moyenne» au niveau des zones d'élongation

