

Facteurs affectant la croissance, la floraison et la production du macadamier (*Macadamia integrifolia*) en conditions tropicales

Eric Guevara^{a*}
Gilberth Castillo^b

^a Centro para Investigaciones
en Granos y Semillas
(CIGRAS),
Universidad de Costa Rica,
2060 San Pedro, Costa Rica

^b Ornamentales Siempre
Verde,
PO Box 6944,
San José, Costa Rica

Factors affecting the growth, the flowering and the production of macadamia trees (*Macadamia integrifolia*) in tropical conditions.

Abstract — Introduction. Principal cultivars of macadamia trees cultivated in Costa Rica, originating in the Hawaii Islands, presents strong variations as for the architecture, the ramification, the production and the quality of nut. To better understand certain aspects of the growth and the development of these trees, the objective of the work presented was to study the effect of various mechanical, specific treatments, applied to the branches, on apical predominance and the productivity of the trees. **Materials and methods.** Various treatments (defoliation, bowing, bowing followed by decapitation or the use of a chemical defoliant, annular incision), applied manually to some 8 years old trees belonging to the macadamia cultivars Ka' U and Kakea cultivated in Costa Rica, were carried out at three times of the period of tree growth (at the beginning, the semi-growth and the end of this period). **Results.** On Ka' U, the treatments at the growth beginning result by a better tree ramification, like in a flowering and a harvest improved compared to the treatments made at the end of the growth. On Kakea, none the treatments stimulated the ramification or flowering, the latter being often lower than that of the pilot treatment. **Discussion.** The results obtained suggest that the tree flowering requires the preliminary formation of a productive ramification on which induction takes place, then the floral expression. The temperatures lower than 20 °C would play an important part on floral induction. **Conclusion.** The results underline that it is possible to limit the growth of the macadamia trees to increase its production. The use of chemical defoliant is a way which would deserve to be thorough. (© Elsevier, Paris)

Costa Rica / *Macadamia integrifolia* / cultivation / yields

Facteurs affectant la croissance, la floraison et la production du macadamier (*Macadamia integrifolia*) en conditions tropicales.

Résumé — Introduction. Les principaux cultivars de macadamiers cultivés au Costa Rica, originaires des îles Hawaii, présentent de fortes variations quant à l'architecture, la ramification, la production et la qualité de la noix. Afin de mieux comprendre certains aspects de la croissance et du développement du macadamier, l'objectif des travaux présentés a été d'étudier l'effet de divers traitements mécaniques, spécifiques, appliqués aux branches, sur la dominance apicale et la productivité des arbres. **Matériel et méthodes.** Divers traitements (défoliation, arcure, arcure suivie de décapitation ou de l'utilisation d'un défoliant chimique, incision annulaire), appliqués manuellement sur des macadamiers âgés de 8 ans appartenant aux cultivars Ka'u et Kakea cultivés au Costa Rica, ont été réalisés à trois moments de la période de croissance de l'arbre (au début, à la mi-croissance et à la fin de cette période). **Résultats.** Sur Ka'u, les traitements en début de croissance se traduisent par une meilleure ramification des arbres, ainsi que par une floraison et une récolte améliorées par rapport aux traitements faits en fin de croissance. Sur Kakea, aucun des traitements n'a stimulé la ramification ou la floraison, cette dernière étant souvent inférieure à celle du traitement témoin. **Discussion.** Les résultats obtenus suggèrent que la floraison des arbres nécessite la formation préalable d'une ramification productive sur laquelle a lieu l'induction, puis l'expression florale. Les températures inférieures à 20 °C joueraient un rôle important sur l'induction florale. **Conclusion.** Les résultats mettent en évidence qu'il est possible de limiter la croissance du macadamier afin d'augmenter sa production. L'utilisation de défoliants chimiques est une voie qui mériterait d'être approfondie. (© Elsevier, Paris)

* Correspondance et tirés à part

Reçu le 6 janvier 1998
Accepté le 22 avril 1998

Fruits, 1999, vol. 54, p. 31–48
© Elsevier, Paris

RESUMEN ESPAÑOL, p. 48

Costa Rica / *Macadamia integrifolia* / pratique culturale / rendement

1. introduction

Introduit au Costa Rica vers 1960, le macadamier, *Macadamia integrifolia*, originaire de la forêt tropicale pluvieuse d'Australie, y a connu, depuis 1980, un très important essor ; actuellement, son aire cultivée dépasse les 8 000 ha. Les principaux cultivars, Kakea (Haes 508) et Ka'u (Haes 344) [1], originaires des îles Hawaï, présentent de fortes variations quant à l'architecture, la ramification, la production et la qualité de la noix. Dès leur introduction au Costa Rica, ces arbres se sont développés très vigoureusement, présentant, particulièrement pour le cultivar Ka'u, une forte croissance orthotrope avec des branches peu ramifiées ; les dimensions alors atteintes par ces macadamiers ont été très supérieures à celles observées sur les plantations des îles Hawaï. Cependant, alors que, aux Hawaï, la première floraison intervient vers la quatrième année, au Costa Rica, elle n'est observée qu'à la septième année, avec seulement quelques inflorescences par arbre qui aboutissent à la formation de peu de noix ; par conséquent, la récolte est presque inexistante, ce qui induit un problème économique pour le producteur dont l'investissement

financier de départ n'est pas rentabilisé dans les délais prévus.

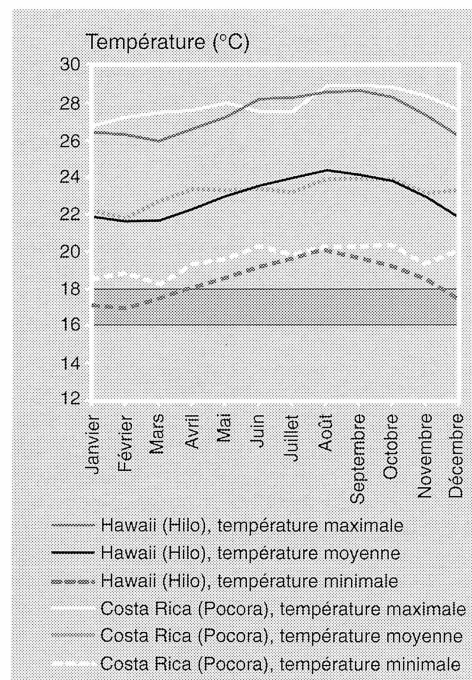
La croissance vigoureuse des macadamiers introduits au Costa Rica semble être due à une forte dominance apicale. Sur de nombreuses espèces fruitières, diverses interventions de type taille, arcure ou incision annulaire ont permis de contrôler la croissance végétative des arbres et, en particulier, la dominance apicale, et ainsi d'augmenter la production [2, 3]. Peu d'études ont cependant été faites sur la croissance et la morphogenèse du macadamier, la plupart des recherches étant orientées vers l'amélioration de la qualité de la noix ou vers l'accélération de la chute des noix de façon à réduire le coût de la récolte [4]. Par ailleurs presque toutes les études sur la floraison, menées en conditions contrôlées et, souvent, en laboratoire [4, 5], portent donc sur des arbres de faible dimension, souvent cultivés en containers, et ne tiennent pas compte des importantes variations climatiques observées in situ.

L'objectif des travaux présentés a donc été d'étudier l'effet de divers traitements spécifiques appliqués aux branches, sur la dominance apicale et la productivité des arbres pour mieux comprendre certains aspects de la croissance et du développement du macadamier.

2. matériel et méthodes

Les expérimentations ont eu lieu de mai 1988 à décembre 1989 au Costa Rica (Amérique centrale) dans une plantation commerciale de *Macadamia integrifolia* située dans la région de Pocora, province de Limón. Cette parcelle présente une topographie homogène sans inclinaison, ainsi que des caractéristiques édaphiques uniformes. Les températures caractéristiques de la zone ont été relevées pendant l'année 1989 afin de les comparer à celles enregistrées aux îles Hawaï, principal producteur mondial de noix de macadamier (*figure 1*). La hauteur des précipitations – plus de 2 000 mm.an⁻¹ – est uniforme pendant toute l'année, excepté pendant les mois de janvier et février où elle est moindre.

Figure 1. Températures observées, pendant l'année 1989, dans deux régions productrices de noix de macadamier : la région de Hilo aux îles Hawaï et la région de Pocora au Costa Rica. Les températures minimales permettant l'expression florale de cet arbre se situent entre 16 et 18 °C.



Les arbres étudiés, d'origine clonale, ont été greffés sur des plants issus de la germination de semences et appartenant à l'espèce *Macadamia tetraphylla*, couramment utilisée comme porte-greffe du macadamier. Le comportement d'arbres de 7 ou 8 ans a été étudié sur les deux cultivars les plus répandus au Costa Rica, Kakea (Haes 508) et Ka'u (Haes 344), à partir de cinq types de traitements appliqués à des branches marquées :

- la défoliation a consisté en l'élimination manuelle de toutes les feuilles sur 60 % de la moitié inférieure des branches choisies ; le macadamier étant une espèce à feuilles persistantes ne pouvait, en effet, être complètement défolié ;

- l'arcure a été pratiquée sur certaines branches des arbres fortement dressées verticalement, en les inclinant vers un plan horizontal au moyen de plusieurs attaches protégées par du caoutchouc au contact des branches, pour ne pas blesser ces organes ;

- dans certains cas, l'arcure a été complétée soit par la décapitation de la tige courbée, à 10 cm de son extrémité, partie concernée par la dernière unité de croissance, soit par l'application, sur la moitié inférieure des branches, d'une solution de cyanamide hydrogène (CH_2N_2) utilisée à une concentration de 6 %, le produit commercial Dormex (Calliope SA, Noguères, France) étant dosé à $520 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de matière active ; CH_2N_2 est une substance qui agit fortement sur le débourrement et la rupture de repos de plusieurs espèces [6] ;

- l'incision annulaire, qui, par sa nature, affecte la totalité de l'arbre, a été réalisée sur le tronc principal, à 50 cm du sol environ, sur une largeur de bande d'environ 1,0 à 1,5 cm et une profondeur approximative de 0,5 cm.

Tous les types de traitements ont été réalisés sur le cultivar Ka'u, alors que le cultivar Kakea, qui présente naturellement une arcure des branches plus prononcée, n'a subi que les traitements défoliation, arcure + décapitation et incision annulaire.

Pour chacun des cultivars, des arbres n'ayant subi aucune intervention spécifique ont constitué le traitement témoin.

Les traitements ont été appliqués à trois dates représentatives des trois périodes de

la croissance de l'arbre : le 31 mai marquant la phase de début de la croissance, le 17 août situé en pleine période de croissance et le 28 novembre caractéristique de la fin de la croissance et du début de la floraison. Cependant, pour l'un et l'autre cultivar, il n'y a pas eu d'incision annulaire pendant la phase de début de croissance

Trois arbres ont été utilisés pour chaque traitement et pour chaque période ; sur chacun d'eux, dix branches d'ordre 1, réparties uniformément sur toute la circonférence de l'arbre (*figure 2*), ont été traitées ; ces branches, de 2 à 4 m, présentaient des ramifications d'ordre 2 et 3. Le choix de l'emplacement des arbres sur le terrain s'est fait de façon statistiquement aléatoire.

Chaque branche traitée a été caractérisée par :

Figure 2.

Schéma de l'architecture d'un macadamier âgé de 8 ans, appartenant au cultivar Ka'u. Les branches d'ordre 1, noircies, sont celles sur lesquelles ont été réalisés les traitements, à raison de dix branches traitées par arbre choisi.

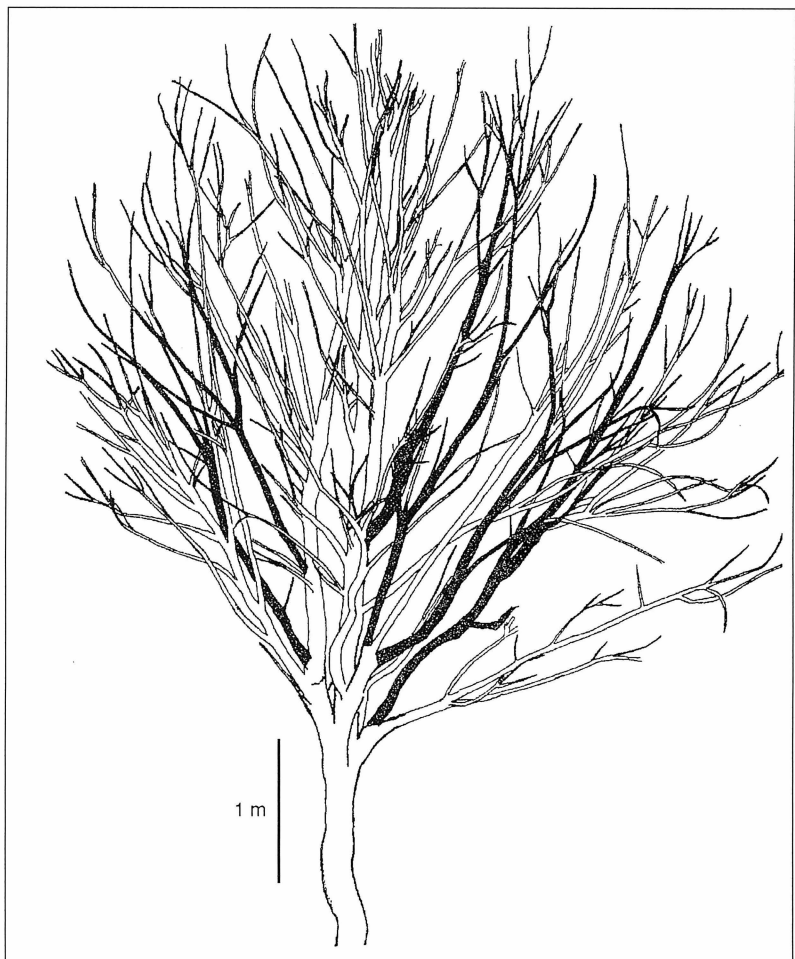
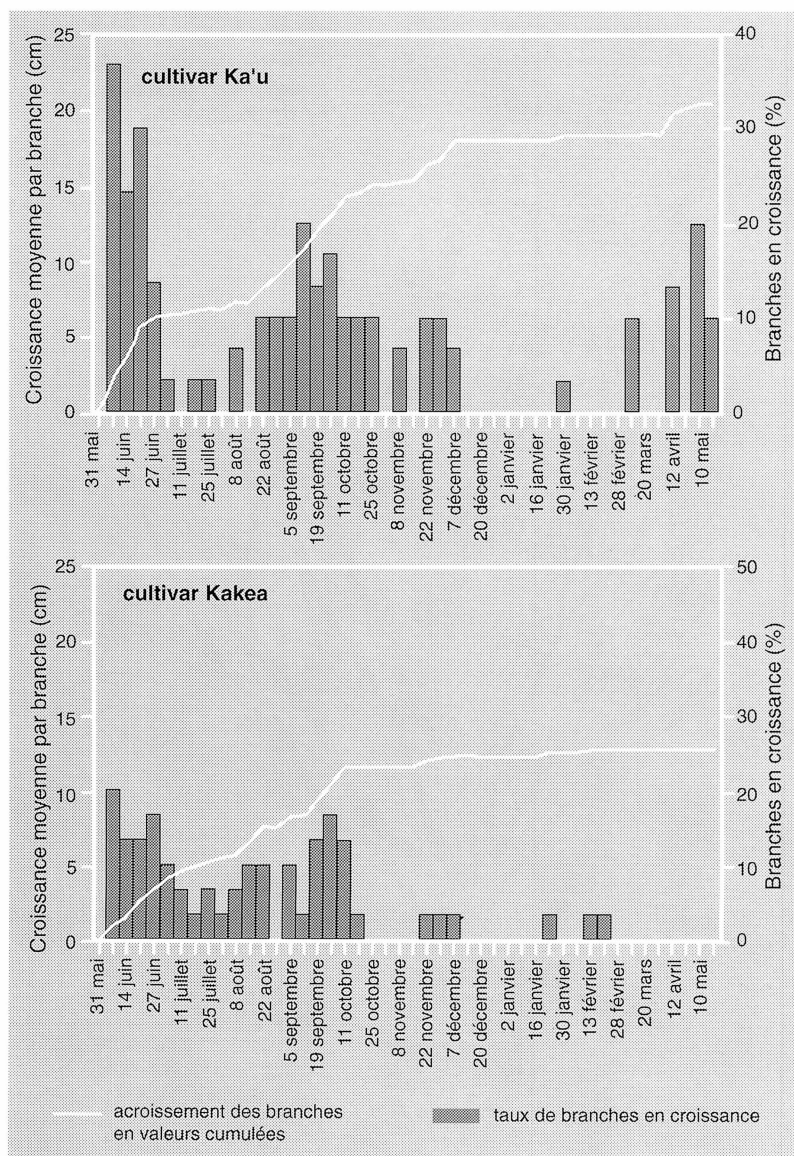


Figure 3. Nombre de branches en croissance par arbre à un moment donné et croissance cumulée par branche sur deux cultivars (Ka'u et Kakea) de macadamiers âgés de 8 ans et cultivés dans la région de Pocora, province de Limón, Costa Rica. Résultats obtenus par mesure de la croissance de l'apex de dix branches primaires par arbre. Moyenne de trois arbres par cultivar.

- sa croissance en longueur (cm),
- la formation de nouvelles ramifications,
- le nombre de verticilles feuillés,
- le nombre d'inflorescences et de fruits formés.

Les mesures ont été faites de façon hebdomadaire sur les arbres témoins, et toutes les 2 semaines pour les différents traitements réalisés. Le nombre d'inflorescences formées ainsi que le poids et le rendement en kg des noix récoltées ont été déterminés pour l'ensemble de l'arbre.



L'écart type à la moyenne a été calculé pour toutes les variables. L'étude statistique des données a été faite au moyen de l'analyse de variance et les moyennes ont été comparées en utilisant le test de Tuckey.

3. résultats

3.1. arbres témoins

3.1.1. croissance et ramification

L'analyse de la croissance des arbres témoins, se développant donc naturellement, montre que le macadamier a des périodes alternées de croissance et de repos des branches, d'intensité et de durée très fluctuantes : le nombre de branches en croissance à un moment donné varie fortement (figure 3). Cette croissance, de type rythmique selon Stephenson et Cull [7], présente un comportement « erratique » comparable à celui observé chez le manguier [8].

L'activité végétative du cultivar Ka'u, plus forte que celle du cultivar Kakea, s'exprime par un plus grand nombre de branches en croissance, cette phase durant alors plus longtemps. Pour les deux cultivars, la principale période d'activité végétative commence au mois de mai et se termine en début décembre. C'est surtout au début de cette période de croissance que s'effectue le développement du plus grand nombre de branches : 35 % pour le cultivar Ka'u et 20 % pour Kakea. Pour les deux cultivars, la croissance ralentit pendant le mois de juillet, puis reprend début août. Le nombre de branches actives est cependant moindre sur Kakea, caractérisé par une période d'arrêt de croissance assez longue – de 4 semaines – entre fin octobre et fin novembre, suivie par une très faible reprise de croissance début décembre. En revanche, pour le cultivar Ka'u, la période comprise entre août et décembre est marquée par une croissance beaucoup plus importante, et les temps d'arrêt observés – de l'ordre de la semaine – sont courts.

Après décembre, mis à part une très faible activité de croissance des branches

en mi-janvier et début février, le cultivar Kakea entre dans une période de repos végétatif qui dure jusqu'à mi-mai. Le cultivar Ka'u présente également cette période de repos mais la croissance de ses branches reprend deux mois plus tôt, en début mars. La croissance moyenne annuelle des branches est plus importante pour le cultivar Ka'u (20,5 cm par branche) que pour le cultivar Kakea (12,9 cm par branche) (figure 3).

Pour les deux cultivars, la ramification des branches s'effectue à deux périodes bien déterminées de l'année : l'une se situe au début de la phase de croissance (du

31 mai au 4 juin) et l'autre intervient entre le 5 et le 26 septembre (figure 4). Ces rameaux sont issus de bourgeons préformés et sont donc de type proleptique. Des différences de comportement apparaissent entre les deux cultivars : Ka'u forme très peu de rameaux – 0,83 rameaux par branche – par rapport à Kakea pour lequel une moyenne de 4,40 rameaux par branche a été relevée. La première période de ramification fait suite à la reprise de croissance de l'apex observée après une phase de repos végétatif et la seconde période est consécutive à une période de plus faible

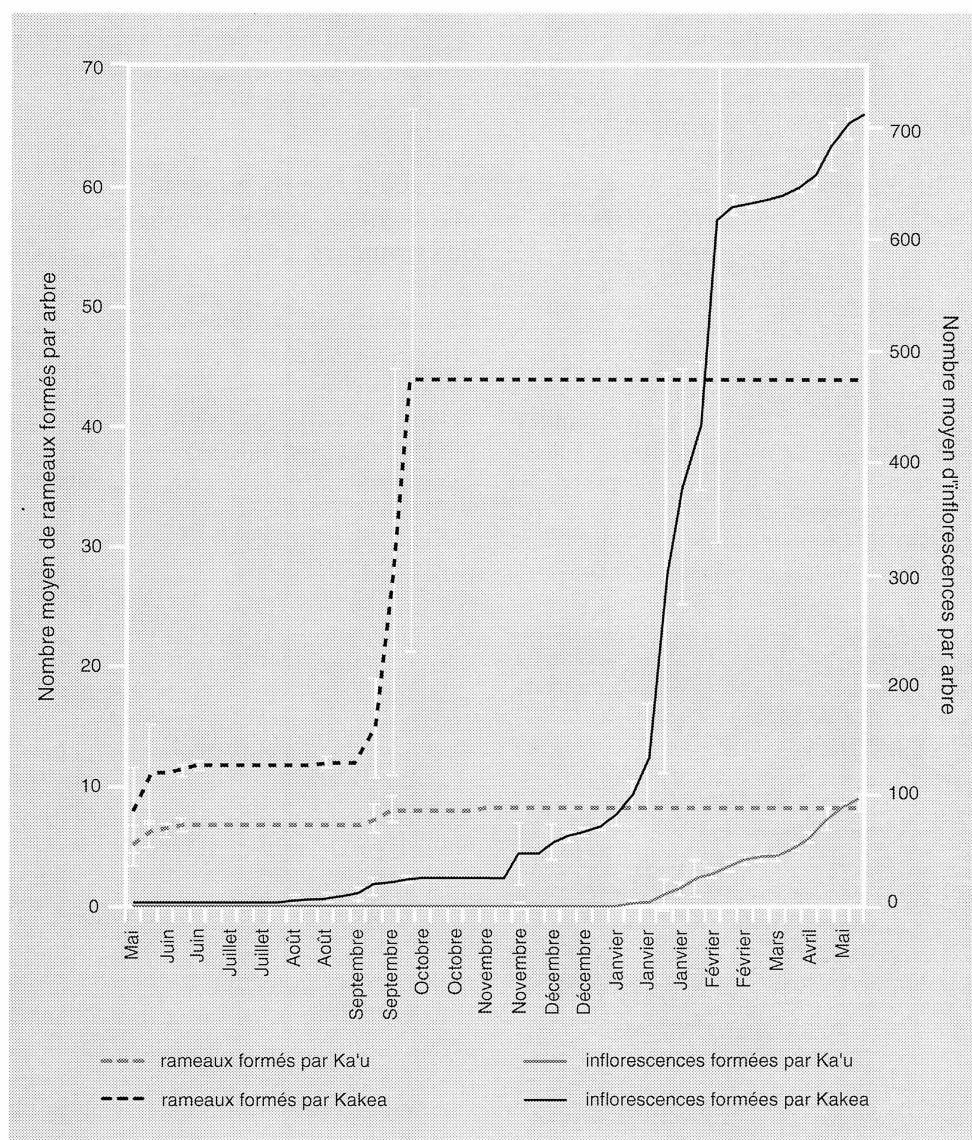


Figure 4. Nombre moyen de rameaux et d'inflorescences formés par arbre sur deux cultivars (Ka'u et Kakea) de *Macadamia integrifolia* de mai 1988 à mai 1989. Moyennes calculées à partir des mesures faites sur dix branches primaires par arbre pour le comptage des rameaux et sur trois arbres par cultivar pour le comptage des inflorescences.

croissance des branches (*figure 3*). Le cultivar Kakea formerait davantage de rameaux pendant la seconde période de ramification qu'au cours de la première (*figure 4*).

Quel que soit le cultivar considéré, la croissance de ces nouveaux rameaux formés dure peu de temps : 8 à 15 d¹. Ils présentent en général un ou deux verticilles feuillés et ont entre 10 et 20 cm de longueur (*figure 5*). Le nombre de rameaux formés par branche est très variable, comme le suggère l'écart type à la moyenne (*tableau I*).

3.1.2. floraison

La floraison du macadamier au Costa Rica a lieu entre novembre et février (*figure 4*). Elle coïncide avec la présence des températures les plus basses qui interviennent pendant quelques heures la nuit, avant d'atteindre plus de 30 °C le jour (*figure 1*). Sauf de très rares exceptions, la formation des inflorescences a lieu sur les rameaux de faible longueur (5 à 40 cm) mais ayant un degré de lignification important (*figure 6*) et pouvant être considérés comme la ramification productive. Le nombre moyen d'inflorescences formées par arbre est plus important sur le cultivar Kakea que sur Ka'u (*figure 4*). Par ailleurs Kakea présente une première floraison dès le début de septembre, qui n'apparaît pas sur Ka'u et qui se produit en même temps que la seconde période de formation de

nouveaux rameaux (*figure 4*). La floraison principale de ce même cultivar est plus précoce, commençant dès le mois de novembre, alors que le cultivar Ka'u ne fleurit qu'à partir des premiers jours de janvier. Enfin, Kakea présente deux pics floraux très évidents dont le second est le plus important. Cependant, pour chaque arbre de ce cultivar, il existe une grande variabilité quant au nombre de fleurs formées, mise en évidence par d'importantes variations de l'écart type à la moyenne (*tableau II*). Sur le cultivar Ka'u, de petites feuilles végétatives se forment dans la partie initiale de certaines inflorescences, ce qui suggère que, pendant l'évolution des bourgeons d'un état végétatif vers un état floral, certains facteurs peuvent affecter leur différenciation en bourgeons floraux.

3.2. effets des traitements mécaniques sur le développement des branches

3.2.1. effets sur la croissance

– cultivar Ka'u

Sur les branches du cultivar Ka'u traitées fin mai, donc au début de la phase de croissance des arbres, la défoliation partielle stimule une activité végétative presque continue, les intervalles d'arrêt de la croissance des branches – de l'ordre de 2 semaines – étant très courts (*figure 7*). C'est d'ailleurs sur ce traitement qu'a lieu la plus forte croissance des tiges (*tableau III*). L'arcure de la branche, suivie ou non d'une décapitation ou d'une application de cyanamide hydrogène, semble freiner la croissance (*figure 7*) et l'accroissement final des branches est inférieur à celui mesuré sur les arbres témoins (*tableau III*). L'application des traitements induit une croissance des branches plus faible pendant la période comprise entre octobre et janvier. Dans tous les cas, pour une période donnée, le nombre de branches en croissance active n'est jamais supérieur à 40 % du total des branches observées. Un plus grand nombre de branches actives ne correspond pas nécessairement à des croissances finales de branche supérieures (*tableau III*).

¹ d = day : unité recommandée pour « jour ».

Figure 5.
Formation de rameaux (voir tronçon identifié) sur une branche ayant subi une arcure suivie d'une application de cyanamide hydrogène (CH₂N₂).

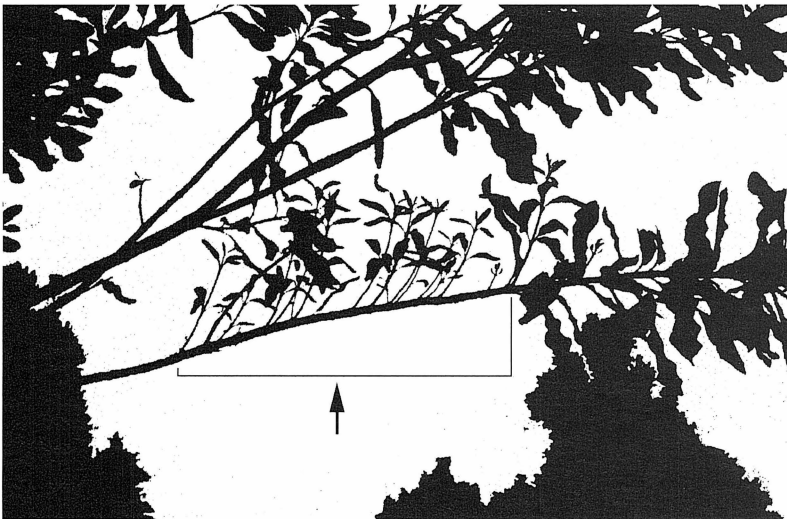


Tableau I.

Nombre moyen de rameaux formés par branche de macadamiers ayant subi différents traitements mécaniques, en fonction du cultivar traité et du moment d'application du traitement par rapport au cycle de croissance annuel de l'arbre (Costa Rica ; moyenne de dix branches par arbre et trois arbres par traitement).

Cultivar	Traitement appliqué	Moment d'application du traitement		
		En début de croissance	À la mi-croissance	À la fin de la croissance
Ka'u	Témoin ¹	0,83 ± 0,29 a	0,17 ± 0,0 a	0,0 ± 0,0
	Défoliation	1,87 ± 0,55 ab	1,87 ± 0,25 a	1,00 ± 0,87
	Arcure	2,33 ± 0,98 ab	1,93 ± 0,81 ab	1,23 ± 0,78
	Arcure + décapitation	4,30 ± 0,44 b	2,37 ± 1,42 ab	2,57 ± 2,40
	Arcure + CH ₂ N ₂	3,57 ± 1,50 b	3,60 ± 1,47 b	0,93 ± 0,15
	Incision annulaire	nr	1,10 ± 0,26 ab	0,87 ± 0,78
	Test de Tuckey	*	*	ns
Kakea	Témoin ¹	4,40 ± 4,36	3,23 ± 4,59	0,0 ± 0,0
	Défoliation	2,00 ± 0,36	1,87 ± 0,84	0,67 ± 0,45
	Arcure + décapitation	3,90 ± 1,95	2,83 ± 1,57	0,90 ± 0,53
	Incision annulaire	nr	2,03 ± 1,16	1,03 ± 1,00
	Test de Tuckey	ns	ns	ns

¹ pour le témoin, les mesures effectuées en pleine période de croissance et à la fin de cette période correspondent aux rameaux formés par les arbres pendant ces périodes.

CH₂N₂ : cyanamide hydrogène.

± : écart type à la moyenne.

nr : traitement non réalisé.

ns : différences non significatives d'après le test de Tuckey.

* différences significatives d'après le test de Tuckey au seuil de $p = 0,05$; pour chaque cultivar et pour une période d'intervention donnée, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas alors statistiquement différentes.

Lorsque les branches sont traitées en août, soit à mi-période de croissance, leur activité végétative est moins importante que celle des arbres témoins (*figure 7*). La tendance globale du développement des branches est semblable à celle observée dans le cas de traitements en début de phase de croissance, mais le ralentissement de l'accroissement des rameaux occasionnés par les différents traitements associés à l'arcure des branches est très net (*tableau III*). Exception faite du cas de la défoliation qui induit, comme précédemment, une croissance presque continue, toutes les branches traitées en août présentent, entre fin octobre et fin décembre, une période de repos végétatif beaucoup plus marquée que celle observée lors des traitements de fin mai. Après cette période de repos, toutes les branches traitées – et particulièrement celles ayant subi une incision annulaire ou une



Figure 6. Développement d'une inflorescence sur un rameau de macadamier (région de Pocora, Costa Rica).

Tableau II.

Nombre d'inflorescences (inflor.) formées par branche et pourcentage de fruits restés sur l'arbre au moment de la récolte, pour des macadamiers ayant subi différents traitements mécaniques. Les résultats sont présentés en fonction du cultivar traité et du moment d'application du traitement par rapport au cycle de croissance annuel de l'arbre (Costa Rica ; moyenne de dix branches par arbre et trois arbres par traitement).

Cultivar	Traitement	Traitement en début de croissance		Traitement en fin de croissance	
		Nombre inflor. par branche	% inflor. portant des fruits	Nombre inflor. par branche	% inflor. portant des fruits
Ka'u	Témoin	7,33 ± 6,37	18,2	–	–
	Défoliation	6,67 ± 4,08	73,8	0,50 ± 0,50	50,0
	Arcure	5,36 ± 0,35	87,5	9,04 ± 2,19	55,2
	Arcure + décapitation	7,50 ± 2,50	75,0	3,33 ± 0,91	68,2
	Arcure + CH ₂ N ₂	8,70 ± 2,98	67,8	7,00 ± 7,00	32,1
	Incision annulaire	nr	nr	8,75 ± 6,69	38,2
	Test de Tuckey	ns	–	ns	–
Kakea	Témoin	28,47 ± 2,99	37,8	–	–
	Défoliation	22,07 ± 13,40	39,5	11,33 ± 6,65	28,5
	Arcure + décapitation	17,85 ± 2,15	75,6	8,89 ± 7,20	55,1
	Incision annulaire	nr	nr	7,56 ± 3,56	32,5
	Test de Tuckey	ns	–	ns	–

CH₂N₂ : cyanamide hydrogène.

± : écart type à la moyenne.

nr : traitement non réalisé.

ns : différences non significatives d'après le test de Tuckey.

arcure accompagnée d'une application de cyanamide hydrogène – ont une croissance active. Cependant, malgré une croissance importante des branches défoliées ou de celles ayant subi une incision annulaire – 8,07 et 8,10 cm par branche, respectivement –, tous les rameaux traités ont eu un accroissement final inférieur à celui du témoin qui a été de 11,17 cm par branche.

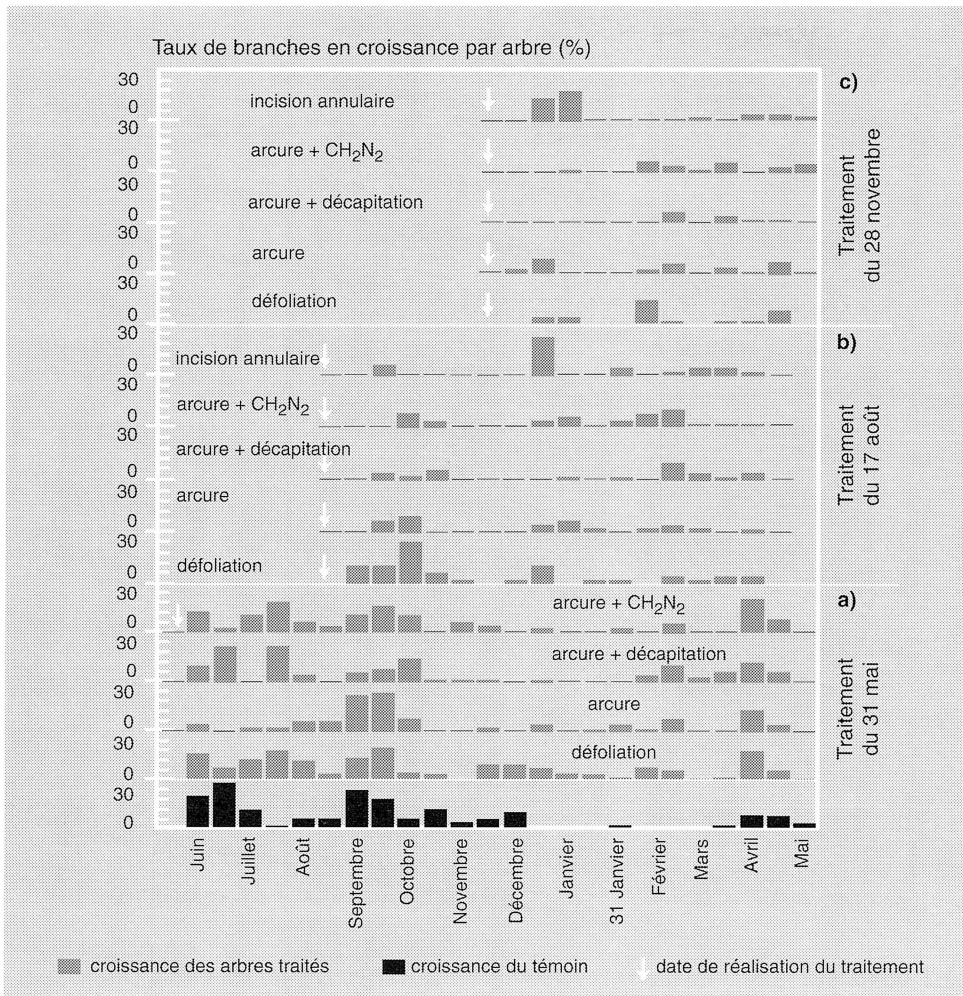
Pour les arbres traités le 28 novembre, soit à la fin de la période de croissance, le développement des branches a la même évolution que celle observée dans le cas précédent (*figure 7*) : les divers traitements associés à l'arcure entraînent un fort ralentissement de la croissance (*tableau III*) et un faible nombre de branches en activité (moins de 10 % du nombre de rameaux observés), alors que la défoliation et l'incision annulaire induisent, à certains moments, de 20 à 30 % de branches en croissance

parmi celles suivies au cours de cette expérimentation. Dans le cas de l'incision annulaire, cette croissance, de 8,20 cm par branche, est statistiquement différente de celle des branches des arbres témoins (4,73 cm par branche).

– cultivar Kakea

La réponse du cultivar Kakea aux différents traitements appliqués est différente de celle constatée pour Ka'u.

Quand les traitements ont lieu le 31 mai, en début de phase de croissance, le nombre de rameaux formés est peu différent de celui des arbres témoins (*tableau I*), malgré, apparemment, une forte activité initiale des branches ayant subi une arcure suivie d'une décapitation (*figure 8*). Les branches ayant été partiellement défoliées ont des périodes d'activité végétative et d'arrêt de croissance comparables au témoin. L'élimi-

**Figure 7.**

Nombre moyen de branches en croissance sur des macadamiers appartenant au cultivar Ka'u, en fonction de différents traitements appliqués en 1988, à trois moments de la période de croissance des arbres.

Traitements faits le :

a) 31 mai,

b) 17 août,

c) 28 novembre.

Moyennes des mesures faites toutes les 2 semaines sur dix branches par arbre (CH_2N_2 : cyanamide hydrogène).

nation de l'apex occasionnée par le traitement de décapitation du rameau induit un retard de croissance mais la stimulation des bourgeons axillaires amenés à remplacer l'apex éliminé fait que les branches ainsi traitées montrent, ensuite, une forte activité végétative qui peut toucher jusqu'à 50 % des axes observés (*figure 8*).

Parmi les traitements effectués le 18 août, la défoliation des branches induit une importante activité végétative pendant les semaines qui suivent l'intervention (*figure 8*), alors que l'arcure suivie d'une décapitation de la tige provoque une faible croissance des branches (*tableau III*). L'incision annulaire produit une légère stimulation de la croissance (6,70 cm contre 6,17 cm par

branche pour le témoin), non significative cependant.

Les traitements réalisés le 28 novembre, à la fin de la période de croissance, stimulent davantage l'activité végétative des rameaux que ceux effectués le 18 août (*figure 8*). Les effets sont les plus évidents pour les branches défoliées dont la croissance finale atteint, en moyenne, 7,40 cm par branche contre 0,7 cm par branche sur le témoin (*tableau III*). Malgré les différences de comportement observées sur les trois périodes qui viennent d'être analysées, l'analyse statistique de la croissance finale ne montre cependant, pour ce cultivar, aucune différence significative entre les différents traitements (*tableau III*).

Tableau III.

Croissance moyenne de branches (cm) de macadamiers ayant subi différents traitements mécaniques, en fonction du cultivar traité et du moment d'application du traitement par rapport au cycle de croissance annuel de l'arbre (Costa Rica ; moyenne de dix branches par arbre et trois arbres par traitement).

Cultivar	Traitement appliqué	Moment d'application du traitement		
		En début de croissance	À la mi-croissance	À la fin de la croissance
Ka'u	Témoin ¹	18,52 ± 5,87	11,17 ± 4,35	0,57 ± 0,49 a
	Défoliation	26,62 ± 6,96	8,07 ± 2,71	5,50 ± 3,20 a
	Arcure	14,13 ± 8,49	3,80 ± 2,10	3,53 ± 2,59 a
	Arcure + décapitation	13,95 ± 2,36	5,37 ± 5,37	1,30 ± 1,01 a
	Arcure + CH ₂ N ₂	15,27 ± 9,43	5,97 ± 3,69	1,97 ± 2,44 a
	Incision annulaire	nr	8,10 ± 0,78	8,20 ± 6,32 b
	Test de Tuckey	ns	ns	*
Kakea	Témoin ¹	12,87 ± 3,56	6,17 ± 4,05	0,70 ± 0,61
	Défoliation	11,40 ± 5,78	5,90 ± 2,19	7,40 ± 6,78
	Arcure + décapitation	12,50 ± 8,53	1,30 ± 0,96	2,70 ± 1,31
	Incision annulaire	nr	6,70 ± 1,06	2,43 ± 0,45
	Test de Tuckey	ns	ns	ns

¹ pour le témoin, les mesures effectuées en pleine période de croissance et à la fin de cette période correspondent aux rameaux formés par les arbres pendant ces périodes.

CH₂N₂ : cyanamide hydrogène.

± : écart type à la moyenne.

nr : traitement non réalisé.

ns : différences non significatives d'après le test de Tuckey.

* différences significatives d'après le test de Tuckey au seuil de $p = 0,05$; pour chaque cultivar et pour une période d'intervention donnée, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas alors statistiquement différentes.

3.2.2. effets sur la ramification

Pour le cultivar Ka'u, quelle que soit la période des traitements réalisés, toutes les interventions faites sur les branches ont induit la formation d'un plus grand nombre de rameaux que ceux produits par les arbres témoins ; en particulier, lorsque l'arcure a été suivie d'une décapitation de la branche ou d'une application de cyanamide hydrogène, le nombre de rameaux formés a été significativement supérieur au témoin (*tableau D*). Plus les traitements ont été réalisés tard dans l'année et, par conséquent, tard par rapport à la période de croissance des arbres, plus le nombre total de rameaux formés sur les branches a diminué. Pour les traitements appliqués à la mi-période de croissance, seule l'arcure des branches suivie de l'application de cyanamide hydrogène a stimulé la formation d'un nombre important de branches par rapport au

témoin. Les traitements réalisés au mois de novembre n'ont induit la formation que d'un très faible nombre de rameaux, sans qu'il y ait de différences significatives avec les arbres témoins. Cette période semble être en rapport avec une moindre activité végétative des arbres.

Dans le cas du cultivar Kakea, tous les traitements ont réduit la formation de rameaux sur les branches. L'écart type à la moyenne montre une très forte variation entre arbres. De ce fait, les différences observées ne sont pas statistiquement significatives, quelle que soit la période de réalisation des traitements (*tableau D*).

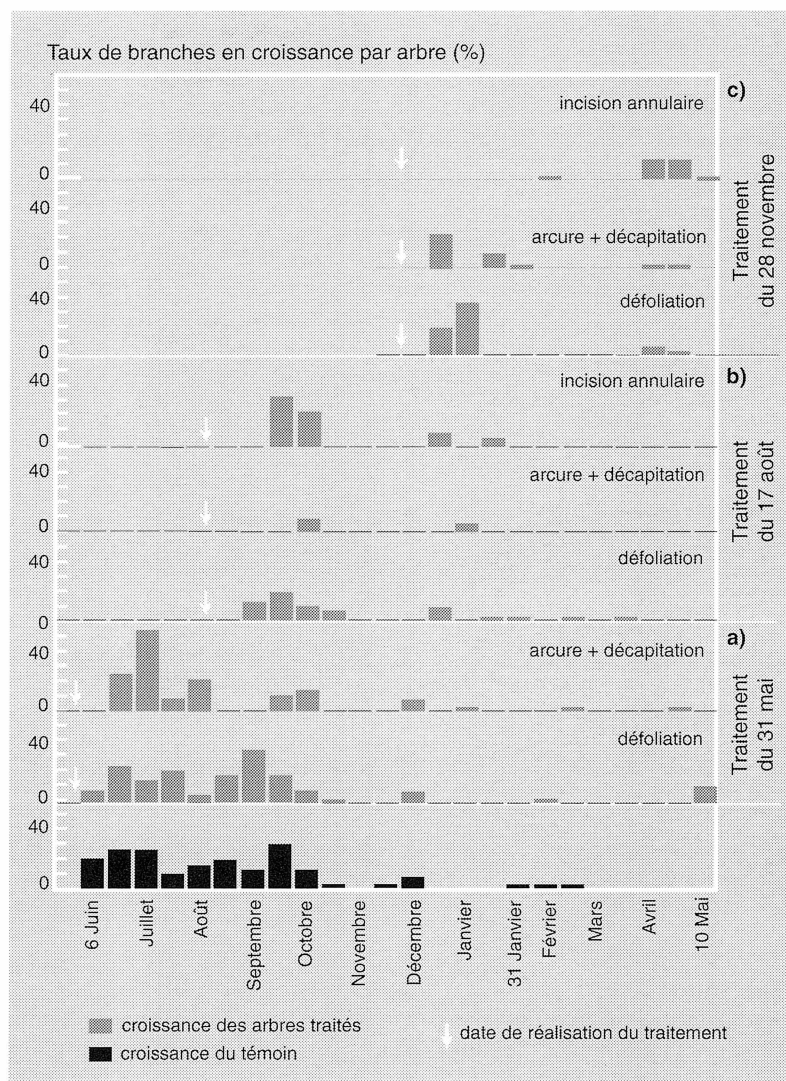
3.2.3. effets sur la floraison

Quel que soit le cultivar de macadamier considéré, Ka'u ou Kakea, aucune différence significative du nombre d'inflor-

cences par branche formées à la suite des traitements effectués n'est apparue par rapport aux observations faites sur le témoin (*tableau II*).

Pour la détermination du nombre total d'inflorescences produites par arbre en fonction des traitements réalisés et de la période à laquelle ils ont été appliqués, seuls 35 % du total des branches de chaque arbre ont été traités, sauf pour l'incision annulaire, qui, comme il a été expliqué précédemment, a été réalisée sur le tronc principal et donc a affecté la totalité de l'arbre. Par conséquent les données présentées dans le *tableau IV* doivent être relativisées quant à l'influence des traitements sur la formation des inflorescences. Malgré cette remarque, tous les arbres de cultivar Ka'u traités en début de période de croissance ont formé davantage d'inflorescences que les arbres traités à des périodes ultérieures (*tableau IVa*). Pour les arbres traités à la fin de la période de croissance, ceux ayant subi l'arcure simple ou une incision annulaire ont formé plus d'inflorescences que ceux ayant reçu les autres traitements, cependant ces résultats restent inférieurs à ceux obtenus lors des traitements effectués en début de croissance. Les écarts types à la moyenne mesurés traduisent une variation importante dans la réponse de chaque arbre, ce qui rend difficile une analyse plus approfondie des résultats obtenus.

Les résultats obtenus sur cultivar Kakea montrent que les traitements réalisés ont un effet négatif sur la floraison des arbres. Le nombre d'inflorescence observé sur le témoin du cultivar Kakea (595 inflorescences) est bien plus important que celui des arbres ayant subi le traitement le plus favorable : 399 inflorescences obtenues en moyenne sur des macadamiers ayant subi une défoliation partielle en fin de période (*tableau IVb*). Contrairement aux résultats obtenus sur le cultivar Ka'u, l'application tardive des traitements alors effectués en fin de période de croissance ne conduit pas à la diminution du nombre d'inflorescences produites. L'écart type à la moyenne met en évidence, dans le cas de ce cultivar, une variabilité encore plus importante que celle obtenue avec le cultivar Ka'u ; le comportement des arbres est donc peu homogène.



Cette variabilité pourrait expliquer qu'aucune différence statistique significative n'ait été observée quant au nombre total d'inflorescences par arbre, aussi bien sur cultivar Kakea que sur cultivar Ka'u.

3.3. formation de fruits

Pour le cultivar Ka'u, le taux d'inflorescences ayant retenu au moins un fruit jusqu'au moment de la récolte est plus important pour les branches ayant subi un traitement que pour celles des arbres témoins (*tableau II*) : ainsi, alors que 18,2 % des inflorescences conduisent à un fruit encore sur l'arbre au moment de la récolte

Figure 8. Nombre moyen de branches en croissance sur des macadamiers appartenant au cultivar Kakea, en fonction de différents traitements appliqués en 1988, à trois moments de la période de croissance des arbres. Traitements faits le : a) 31 mai, b) 17 août, c) 28 novembre. Moyennes des mesures faites toutes les 2 semaines sur dix branches par arbre (CH_2N_2 : cyanamide hydrogène).

Tableau IV.

Nombre moyen d'inflorescences par arbre obtenu sur des macadamiers ayant subi différents traitements mécaniques, en fonction du cultivar traité et du moment d'application du traitement par rapport au cycle de croissance annuel de l'arbre (Costa Rica ; moyenne de trois arbres par traitement pour chaque cultivar).

Traitement	Moment d'application du traitement		
	En début de croissance	À la mi-croissance	À la fin de la croissance
a) Cultivar Ka'u			
Témoin	104,0 ± 97,4	—	—
Défoliation	103,7 ± 24,5	56,0 ± 23,4	51,7 ± 20,6
Arcure	138,5 ± 58,8	57,7 ± 13,3	99,0 ± 25,2
Arcure + décapitation	73,7 ± 24,4	70,0 ± 35,5	41,0 ± 10,1
Arcure + CH ₂ N ₂	104,7 ± 37,8	87,0 ± 31,2	43,0 ± 27,1
Incision annulaire	nr	127,0 ± 106,2	79,0 ± 40,9
Test de Tuckey	ns	ns	ns
b) Cultivar Kakea			
Témoin	595,0 ± 407,7	—	—
Défoliation	362,0 ± 329,0	223,7 ± 50,1	398,7 ± 252,9
Arcure + décapitation	172,0 ± 34,2	226,3 ± 169,3	272,7 ± 148,7
Incision annulaire	nr	349,7 ± 357,9	285,0 ± 232,2
Test de Tuckey	ns	ns	ns

CH₂N₂ : cyanamide hydrogène.

± : écart type à la moyenne.

nr : traitement non réalisé.

ns : différences non significatives d'après le test de Tuckey.

Tableau V.

Évolution du nombre de fruits présents sur des inflorescences de macadamiers (cultivar Ka'u) ayant subi différents traitements mécaniques. Les résultats sont présentés en fonction du moment d'application du traitement par rapport au cycle de croissance annuel de l'arbre (Costa Rica ; valeurs moyennes obtenues sur dix inflorescences par traitement).

Traitement	Moment d'application du traitement								
	En début de croissance			À la mi-croissance			À la fin de la croissance		
	24 février	20 avril	8 juin	24 février	20 avril	8 juin	24 février	20 avril	8 juin
Témoin	5,2 ± 0,3	3,1 ± 0,6	1,5 ± 0,3	—	—	—	—	—	—
Défoliation	3,5 ± 0,7	2,4 ± 0,7	1,7 ± 0,4	4,2 ± 0,5	2,7 ± 0,4	1,2 ± 0,5	3,4 ± 0,4	2,7 ± 0,4	1,3 ± 0,2
Arcure	4,9 ± 1,5	2,9 ± 0,4	2,1 ± 0,4	4,5 ± 0,5	2,7 ± 1,3	1,5 ± 0,6	3,9 ± 0,7	2,6 ± 1,0	1,0 ± 0,4
Arcure + décapitation	5,3 ± 0,6	3,1 ± 0,6	1,9 ± 0,3	5,3 ± 0,9	2,6 ± 0,5	1,3 ± 0,4	3,1 ± 0,5	2,5 ± 0,5	1,7 ± 0,4
Arcure + CH ₂ N ₂	5,9 ± 1,0	3,0 ± 0,3	1,3 ± 0,2	6,1 ± 0,3	3,1 ± 0,4	1,6 ± 0,6	2,7 ± 0,2	1,8 ± 0,3	1,4 ± 0,5
Incision annulaire	nr	nr	nr	5,1 ± 0,7	2,9 ± 0,4	2,0 ± 0,6	3,2 ± 0,4	2,0 ± 0,9	1,4 ± 0,9

CH₂N₂ : cyanamide hydrogène

± : écart type à la moyenne

nr : traitement non réalisé.

pour les arbres témoins, l'incision annulaire, traitement donnant les moins bons résultats, permet à 38,2 % des fruits de se maintenir sur la branche à cette même période. Ce taux est également plus élevé pour les arbres ayant subi les traitements en début de période de croissance qu'en fin de celle-ci. Le cultivar Kakea présente un comportement analogue pour les branches traitées en début de croissance. Lorsque les traitements interviennent en fin de croissance, seule l'arcure suivie d'une décapitation de la branche présente une meilleure rétention des fruits que le témoin.

Par ailleurs, les inflorescences du cultivar Ka'u ont tendance à ne retenir qu'un seul fruit, quels que soient les traitements appliqués aux branches et le moment où ceux-ci sont réalisés (*tableau V*). Les branches du cultivar Kakea retiendraient quant à elles deux fruits par inflorescence (*tableau VI*). Pour l'un ou l'autre de ces deux cultivars, cependant, les différences obtenues entre arbres témoins et arbres ayant subi des traitements ne sont pas statistiquement significatives (selon le test de Tuckey).

3.4. récolte des fruits

La récolte a commencé le 3 juillet 1989 et s'est poursuivie jusqu'au 8 novembre pour le cultivar Ka'u et jusqu'au 22 décembre pour Kakea. Pour récolter les noix, comme la cueillette sur l'arbre n'est pas possible, il faut attendre que celles-ci se détachent et tombent sur le sol ; par ailleurs, le désherbage mécanique, qui est pratiqué couramment pour maintenir le sol dégagé, éparpille les noix ; il n'a donc pas été possible d'évaluer le poids de fruits par branche.

Le poids de fruits récoltés sur tous les arbres traités du cultivar Ka'u a été supérieur à celui récolté sur les arbres témoins sauf pour les macadamiers dont les branches avaient subi l'arcure accompagnée d'une décapitation en début de croissance ou avaient été défoliées partiellement à la fin de leur période de croissance (*tableau VIIa*). Par ailleurs, bien que des traitements, comme la défoliation ou l'incision annulaire, effectués à la période de mi-croissance aient produit un très fort effet stimulateur, les interventions tardives faites le 17 août et

le 28 novembre ont conduit à une récolte inférieure à celle obtenue pour des traitements effectués au début de la phase de croissance des arbres. Cependant l'existence de forts coefficients de variation associés aux poids moyens des récoltes obtenus d'un arbre à l'autre explique l'absence de différences statistiquement significatives des traitements par rapport au témoin.

La production moyenne, par arbre, du cultivar Kakea est bien supérieure à celle observée pour le cultivar Ka'u (*tableau VIIb*). Cependant, comme précédemment pour la floraison, les traitements réalisés ont un effet négatif sur la production qui se traduit par une récolte inférieure à celle des arbres témoins. L'écart type à la moyenne est là encore important, notamment dans le cas du témoin, et, comme pour le cultivar Ka'u, aucun traitement n'est statistiquement différent du témoin.

4. discussion

4.1. croissance et ramification

Les périodes d'activité qui ont été observées sur les branches et leur intensité de croissance ont montré que les branches du cultivar Ka'u avaient une croissance végétative plus importante que celle du cultivar Kakea ; cela révélerait une dominance apicale de la branche, plus forte, ainsi qu'une plus grande inhibition de la formation d'une ramification productive. Ces deux facteurs semblent être à la base du retard observé pour l'apparition de la floraison, qui, compte tenu du comportement observé en Australie et aux îles Hawaii, aurait dû se produire 2 à 3 ans auparavant. Ils pourraient mettre en cause les températures élevées, observées sur les régions de culture du macadamier au Costa Rica, et, en particulier, les températures maximales, comprises entre 27 et 29 °C, et minimales (*figure 1*). Il est connu que les températures plus chaudes ont un effet stimulateur sur le développement végétatif et tendent à renforcer la dominance apicale, en augmentant la vitesse de croissance de l'apex [9-11]. Moncur et al. [12] considèrent que les tempéra-

Tableau VI.

Évolution du nombre de fruits présents sur des inflorescences de macadamiers (cultivar Kakea) ayant subi différents traitements mécaniques. Les résultats sont présentés en fonction du moment d'application du traitement par rapport au cycle de croissance annuel de l'arbre (Costa Rica ; valeurs moyennes obtenues sur dix inflorescences par traitement).

Traitement	Moment d'application du traitement								
	En début de croissance			À la mi-croissance			À la fin de la croissance		
	24 février	20 avril	8 juin	24 février	20 avril	8 juin	24 février	20 avril	8 juin
Témoin	6,2 ± 0,6	4,9 ± 0,9	2,1 ± 0,9	–	–	–	–	–	–
Défoliation	5,9 ± 1,6	4,8 ± 1,2	2,5 ± 0,3	6,3 ± 0,4	3,1 ± 0,5	1,7 ± 0,3	6,0 ± 0,3	3,6 ± 0,6	2,1 ± 0,4
Arcure									
+ décapitation	6,8 ± 0,4	4,4 ± 0,7	2,8 ± 0,6	6,4 ± 0,9	4,7 ± 0,4	2,2 ± 0,4	5,5 ± 1,4	3,3 ± 0,6	1,7 ± 0,2
Incision annulaire	nr	nr	nr	6,5 ± 0,4	4,7 ± 0,5	2,1 ± 0,4	6,8 ± 0,5	4,2 ± 0,4	2,1 ± 0,4

± : écart type à la moyenne.

nr : traitement non réalisé.

Tableau VII.

Production obtenue par des macadamiers ayant subi différents traitements ; les résultats, exprimés en g de noix par arbre, sont présentés pour chacun des cultivars traités en fonction du moment d'application du traitement par rapport au cycle de croissance annuel de l'arbre (Costa Rica ; moyenne de la production de trois arbres par traitement).

Traitement	Moment d'application du traitement		
	En début de croissance	À la mi-croissance	À la fin de la croissance
a) cultivar Ka'u			
Témoin	3 051,7 ± 2 505,2	–	–
Défoliation	6 093,6 ± 2 888,9	14 397,5 ± 6 706,9	1 211,7 ± 1 243,6
Arcure	6 643,3 ± 1 522,5	5 278,3 ± 1 337,9	5 336,7 ± 4 104,0
Arcure + décapitation	2 886,7 ± 982,0	5 673,3 ± 2 637,3	4 188,3 ± 3 542,5
Arcure + CH ₂ N ₂	7 005,0 ± 4 302,3	5 963,3 ± 1 701,8	3 675,0 ± 3 130,7
Incision annulaire	nr	14 108,3 ± 6 273,6	7 466,7 ± 7 832,6
Test de Tuckey	ns	ns	ns
b) cultivar Kakea			
Témoin	22 555,0 ± 17 859,4	–	–
Défoliation	18 978,3 ± 5 988,0	19 291,7 ± 1 872,3	15 703,3 ± 3 790,9
Arcure + décapitation	6 690,0 ± 7 391,1	8 668,3 ± 1 348,3	8 708,3 ± 2 450,0
Incision annulaire	nr	22 398,9 ± 12 798,8	18 398,3 ± 19 054,2
Test de Tuckey	ns	ns	ns

CH₂N₂ : cyanamide hydrogène.

± : écart type à la moyenne.

nr : traitement non réalisé.

ns : différences non significatives d'après le test de Tuckey.

tures supérieures à 25 °C inhibent le bourgeonnement axillaire du macadamier. Ces températures élevées, en stimulant la croissance, ont pour effet d'augmenter la respiration et, par conséquent, de réduire le taux de carbohydrates disponible dans la plante [13, 14]. Sur le macadamier, Trochoulias et Lahav [15] ont observé que des températures supérieures à 25 °C diminuent les carbohydrates totaux formés, réduisant leur disponibilité pour la floraison. Sur le manguier, l'absence de ramification productive pendant les premières années de croissance est le principal facteur responsable d'un retard dans la floraison et la fructification [3]. Ce n'est qu'avec l'édification d'une charpente plus importante (nombre élevé de branches) que survient l'affaiblissement de la dominance apicale et l'apparition de rameaux productifs. Les interventions manuelles permettent d'augmenter cette ramification [3].

L'étude de l'effet du moment de réalisation des traitements par rapport au cycle de croissance de l'arbre a montré que l'efficacité de ces interventions était meilleure lorsqu'elles avaient lieu au début ou à la moitié de la phase de croissance, périodes pendant lesquelles la dominance apicale est la plus importante. Lorsque ces traitements ont été appliqués à la fin de cette phase, la faible croissance observée et le nombre réduit de rameaux formés mettent en évidence une inertie importante des bourgeons qui devraient débousser végétativement.

Sur le macadamier, l'arcure seule n'est pas suffisante pour affaiblir la dominance apicale et doit être suivie d'une décapitation de la branche ou d'une application de cyanamide hydrogène pour induire la formation d'un nombre significatif de rameaux. L'élimination de la dominance apicale par décapitation est bien connue et est souvent employée pour augmenter la ramification d'une plante [3]. Le cyanamide hydrogène appliqué empêche le repos des bourgeons en stimulant leur métabolisme [6]. Ce produit affecte aussi les tissus verts des plantes et entraîne donc la chute d'un certain nombre de feuilles, ce qui pourrait avoir stimulé le développement des bourgeons. Les traitements d'arcure modifient fortement les

propriétés du maintien de l'acrotonie en affectant le comportement des bourgeons axillaires [2], ce qui pourrait expliquer, en partie, le grand nombre de rameaux courts formés, observé à la suite d'un tel traitement par rapport aux résultats obtenus avec les autres interventions réalisées sur le cultivar Ka'u. Dans le cas de cultivar Kakea, la décapitation semble avoir un effet négatif aussi bien sur la croissance que sur le nombre de rameaux formés et montre que la tendance des branches de ce cultivar à s'arquer naturellement s'oppose de façon efficace à la dominance apicale. Cet effet de type gravimorphique serait comparable à celui observé naturellement sur plusieurs espèces tropicales [8].

Dans le cas de cultivar Kakea, seule la décapitation des branches au début de la période de croissance a permis d'obtenir un nombre de rameaux comparable au témoin. Les traitements réalisés lors de la période de fin de croissance ont stimulé la formation d'un petit nombre de rameaux. Qu'un certain nombre d'axillaires se développe lors de la décapitation de l'apex semble démontrer que la dominance apicale est présente bien qu'affaiblie. Par ailleurs, le fait que la défoliation stimule une croissance ainsi qu'une formation de rameaux suggère également un rôle inhibiteur des feuilles adultes [16].

4.2. floraison

D'après la réponse des arbres aux traitements effectués à différents moments de leur croissance, la floraison du macadamier dépendrait principalement de la réalisation de deux étapes du développement.

– La première phase de l'évolution de l'arbre vers la floraison serait la formation de rameaux productifs. Elle a lieu pendant deux moments bien précis de la croissance de l'arbre : en mai-juin et en septembre. Pour le cultivar Kakea, cette étape fait suite à une période de repos ou bien à une baisse de l'activité de croissance des branches et correspond donc à une diminution de la dominance apicale ; par suite, ce cultivar produit une ramification plus importante que Ka'u chez lequel le faible nombre de rameaux formés pourrait être expliqué

par la très forte dominance apicale des branches.

– La deuxième étape conditionnant la floraison serait l'induction puis le développement des inflorescences sur ces rameaux. Sakai et al. [17], de même que Stephenson et Gallagher [5, 18], ont démontré que l'induction florale des bourgeons de macadamier avait lieu, environ, de 17 à 20 semaines avant le développement des inflorescences, ce qui coïncide avec la ramification observée au mois de septembre, soit en pleine période de croissance des arbres, et suggère qu'en cette période les arbres se trouvent dans une condition inductive particulière. Ces mêmes auteurs ont également démontré que des températures nocturnes comprises entre 18 °C et 21 °C étaient suffisantes pour l'induction florale du bourgeon. Le fait que la floraison du cultivar Kakea soit supérieure à celle de Ka'u pourrait s'expliquer par l'observation d'une période de repos plus longue des branches pour ce cultivar, permettant aux bourgeons de recevoir l'induction florale et de se différencier en inflorescences. En revanche, une période de repos moins marquée et une croissance végétative plus intense, ainsi qu'une dominance apicale plus importante, observées chez le cultivar Ka'u, s'opposeraient au mécanisme de la différenciation florale en empêchant un nombre suffisant de bourgeons d'évoluer en inflorescences. Cela pourrait expliquer la formation de petites feuilles observées à la base de certaines inflorescences, résultat d'une différenciation florale insuffisante.

Selon Moncur et al. [19], une fois l'induction réalisée, les bourgeons demeureraient dans un état dormant pendant 50 à 96 d. L'évolution de ces bourgeons en inflorescence, qui se produit quelques mois plus tard en décembre–février, nécessiterait des températures inférieures à 18 °C [17]. Or ces valeurs sont rarement observées dans la région de nos expérimentations au Costa Rica (*figure 1*) si ce n'est pendant quelques heures par nuit pendant les mois de décembre à mars, alors qu'une température nocturne, et même parfois diurne, de 21 °C est commune pendant toute l'année. L'absence d'une exposition suffisamment longue des bourgeons différenciés à des tempé-

tures inférieures à 18 °C pourrait expliquer la période plus courte du développement des inflorescences du cultivar Ka'u, ce qui serait en accord avec les observations rapportées par Moncur et al. [19].

Chez le macadamier, une floraison correcte requiert donc, d'abord, la formation d'une ramification productive. La plupart des inflorescences observées étaient portées par des ramifications présentant un certain degré de lignification, c'est-à-dire ayant atteint une certaine maturité physiologique. Donc les rameaux récemment formés, tels que ceux obtenus lors des traitements réalisés au mois d'août et à la fin novembre, ne seraient pas suffisamment développés pour recevoir le stimulus floral vers les mois d'août et septembre. Seule une ramification végétative antérieure, formée l'année précédente, atteindrait la maturité physiologique suffisante qui permettrait aux bourgeons de recevoir l'induction florale. Nagao et al. [20] ont effectivement observé, à Hawaï, que la floraison avait lieu sur des rameaux formés l'année précédente. Il se pourrait également que la ramification formée en début de croissance, soit à la suite de traitements effectués le 31 mai, puisse atteindre cette maturité physiologique des bourgeons, mais cela n'a pas été vérifié.

Dans le cas de cultivar Kakea, tous les traitements effectués en fin de période de croissance des arbres ont stimulé le développement végétatif des branches ; mais celui-ci s'est fait probablement au détriment de la croissance reproductive et pourrait donc expliquer la moindre productivité des arbres traités par rapport à celle observée sur les témoins.

Le fait que, quel que soit le traitement appliqué aux arbres, le nombre final de fruits obtenus par inflorescence a été faible montre que les facteurs qui contrôlent la fructification sont différents de ceux qui influencent la floraison. Le début de la fructification coïncidant avec la reprise de croissance des arbres, la forte dominance apicale qui a pu être mise en évidence pourrait exercer une influence inhibitrice sur le développement des fruits. Par ailleurs, Stephenson et Gallagher [18] ont observé que

des températures de 30 °C avaient pour effet une chute prématurée des fruits.

Bien qu'aucune différence statistique significative n'ait été mise en évidence entre arbres ayant subi l'incision annulaire et arbres témoins, le cultivar Ka'u ainsi traité a eu tendance à porter un nombre important d'inflorescences et à donner une forte production de noix. Cela pourrait être la conséquence d'une accumulation plus importante de carbohydrates, qui aurait aidé au développement d'un plus grand nombre de fruits. Sur cultivar Kakea, ce sont également les arbres ayant subi l'incision annulaire qui ont donné les meilleures récoltes parmi l'ensemble des macadamiers traités, mais cette production a été inférieure à la récolte des arbres témoins ; les deux cultivars étudiés ont donc présenté un comportement très différent et, par conséquent, ne devront pas être traités de la même façon quant à la régulation de leur croissance. Des observations comparables ont été faites sur l'avocatier [21] : le type de ramification du cultivar Fuerte différant fortement de celui du cultivar Hass, les pratiques de taille pour ces deux variétés ne peuvent pas être les mêmes.

5. conclusion

L'amélioration de la floraison du macadamier dépend en premier lieu de la formation préalable de rameaux productifs qui pourraient alors se développer suffisamment pour recevoir le stimulus floral. Les traitements réalisés ont démontré qu'en diminuant ou en supprimant la dominance apicale, il était possible de stimuler le développement d'une ramification productive plus importante du macadamier. Il pourrait exister une compétition entre les croisances végétative et reproductive. Les températures chaudes favoriseraient la croissance végétative, renforçant la dominance apicale qui s'opposerait à la formation de rameaux productifs, et donc au développement d'inflorescences et de fruits. Ainsi pourrait être expliqué le faible nombre de fruits par inflorescence observé chez le cultivar Ka'u. Les divers traitements faisant

intervenir l'arcure, en freinant la croissance de l'apex, semblent avoir favorisé l'accumulation de carbohydrates et donc l'obtention d'une meilleure récolte. Mais ces interventions ne semblent pas intéressantes d'un point de vue économique car elles nécessitent une main-d'œuvre importante qui entraînerait dans la pratique une augmentation des coûts de production. Les résultats obtenus mettent cependant en évidence qu'il est possible d'altérer la croissance du macadamier afin d'augmenter sa production. L'essai réalisé avec le cyanamide hydrogène montre que l'utilisation de traitements chimiques pouvant agir sur le développement des bourgeons ou des feuilles est une voie à approfondir.

références

- [1] Gonzalez O., Chacón R., Macadamia. Técnicas para su producción, Programa de Comunicación Agrícola, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 1986, 34 p.
- [2] Crabbé J., Aspects particuliers de la morphogenèse caulinaire des végétaux ligneux et introduction à leur étude quantitative, Irsia, Bruxelles, Belgique, 1987, 116 p.
- [3] Oosthuysen S.A., Jacobs G., Relationship between branching frequency, and growth, cropping and structural strength of 2-year-old mango trees, *Sci. Hortic.* 64 (1995) 85–93.
- [4] Sakai W.S., Nagao M.A., Fruit growth and abscission in *Macadamia integrifolia*, *Physiol. Plantarum* 64 (1984) 455–460.
- [5] Stephenson R.A., Gallagher E.C., Effect of night temperature on floral initiation and raceme development in macadamia. *Sci. Hortic.* 30 (1986) 213–218.
- [6] Amberger A., Uptake and metabolism of hydrogen cyanamide in plants, in: Proceedings of bud dormancy in grapevines: potential and practical uses of hydrogen cyanamide on grapevines, University of California, Davis, CA, États-Unis, 1984, pp. 5–7.
- [7] Stephenson R.A., Cull B.W., Vegetative flushing patterns of macadamia trees in South-East Queensland, *Sci. Hortic.* 30 (1986) 53–62
- [8] Halle F., Oldeman R.A.A., Tomlinson P.B., Tropical trees and forests. An architectural approach, Springer-Verlag, Heidelberg, Allemagne, 1978, 441 p.

- [9] Champagnat P., Formation of the trunk in woody plants, in: Tomlinson P.B. and Zimmerman R.H., Tropical trees as living systems, Cambridge University Press, Royaume-Uni, 1978, pp. 401–422.
- [10] Si-Mohamed C., Germination, rythmes de croissance et morphogénèse de jeunes plants de *Castanea sativa*, thèse, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, France, 1983, 438 p.
- [11] Erez A., Couvillon G.A., Hendershott C.H., Quantitative chilling enhancement and negation in peach buds by high temperatures in a daily cycle, J. Amer. Soc. Hort. Sci. 104 (4) (1979) 536–540.
- [12] Moncur M.W., Stephenson R.A., Trochoulias T., Environmental constraints on the flowering process of the macadamia, Sci. Hortic. 27 (1985) 87–96.
- [13] Marcellis van Acker C.A.M., Effect of temperature on development and growth potential of axillary bud in roses, Sci. Hortic. 63 (1995) 241–250.
- [14] Squire G.R., The physiology of tropical crop production, CAB International, Wallingford, Royaume-Uni, 1990, 236 p.
- [15] Trochoulias T., Lahav E., The effect of temperature on growth and dry-matter production of macadamia, Sci. Hortic. 19 (1983) 167–176.
- [16] Champagnat P., Rest and activity in vegetative buds of trees, Ann. Sci. Forest 46 (suppl) (1989) 9–26.
- [17] Sakai W.S., Nakata S., Nagao M.A., Quedado R., Further study of the effect of night temperature on flower initiation and rate of flower growth and development, Haw. Mac. Prod. Assoc., 22nd. Ann. Meet. Proc., 1982, pp. 76–93.
- [18] Stephenson R.A., Gallagher E.C., Effects of temperature during latter stages of nut development on growth and quality of macadamia nuts, Sci. Hortic. 30 (1986) 219–225.
- [19] Moncur M.W., Stephenson R.A., Trochoulias T., Floral development of *Macadamia integrifolia* under Australian conditions, Sci. Hortic. 27 (1–2) (1985) 87–96.
- [20] Nagao M.A., Ho A.E.B., Yoshimoto J.M., Yoshimura E.R., Notley E., Fuchigami L.H., Relationship between vegetative flushing and flowering of *Macadamia integrifolia* in Hawaii, Sci. Hortic. 60 (1–2) (1994) 9–16.
- [21] Thorp T.G., Sedgley M., Architectural analysis of tree form in a range of avocado cultivars, Sci. Hortic. 53 (1993) 85–98.

Factores que afectan el crecimiento, la floración y la producción de la macadamia (*Macadamia integrifolia*) en conditions tropicales.

Resumen — Introducción. Los principales cultivares de macadamia cultivados en Costa Rica, originarios de las islas Hawaii, presentan fuertes variaciones en cuanto a su arquitectura, ramificación, producción y calidad de la nuez. Con el fin de comprender mejor ciertos aspectos del crecimiento y del desarrollo del árbol de macadamia, el objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de diversos tratamientos mecánicos, específicos, aplicados a las ramas, sobre la dominancia apical y la productividad de los árboles. **Materiales y métodos.** Varios tratamientos (defoliación, curvatura, curvatura seguida por una decapitación o del empleo de un defoliante químico, anillado) fueron aplicados en forma manual sobre árboles de macadamia de 8 años de edad pertenecientes a los cultivares Ka'u y Kakea cultivados en Costa Rica, y en tres momentos del período de crecimiento del árbol (al inicio, a medio período, y al final del período). **Resultados.** En Ka'u, los tratamientos al inicio del crecimiento se traducen por una mejor ramificación de los árboles, además de una mejor floración y cosecha con relación a los tratamientos realizados al final del crecimiento. En Kakea, ninguno de los tratamientos estimuló la ramificación o la floración, siendo esta última con frecuencia inferior a la del tratamiento testigo. **Discusión.** Los resultados obtenidos sugieren que la floración de los árboles necesita la formación previa de una ramificación productiva sobre la cual tiene lugar la inducción y luego la expresión floral. Las temperaturas inferiores a 20 °C tendrían un rol importante en la inducción floral. **Conclusión.** Los resultados ponen en evidencia la posibilidad de limitar el crecimiento de la macadamia con el fin de aumentar su producción. El empleo de defoliantes químicos representa una vía que merecería ser profundizada. (© Elsevier, Paris)

Costa Rica / *Macadamia integrifolia* / cultivo / rendimiento

