

Depuis 80 ans, la production de caoutchouc naturel par hectare et par an est passée de 400 kg à 2 500 kg dans les meilleures zones. Les objectifs de sélection se diversifient. Les méthodes sont en pleine évolution.

Hévéa stratégies de sélection

Clément-Demange A.¹, Nicolas D.¹, Legnaté H.²,
Rivano F.³, Le Guen V.⁴, Gnagne M.², Chapuset T.²

1 CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

2 IDEFOR-DPL, 01 BP 1536, Abidjan 01, Côte d'Ivoire

3 Gremial de Huleros de Guatemala, 7A Av. 11-63 Zona 9, Edificio Calle España 3 ER, Guatemala City, Guatemala

4 Plantation E. Michelin, Av. Cuiaba 1241, CP 80, 78700-090 Rondonopolis MT, Brésil

Le caoutchouc naturel représente environ un tiers de la production totale de caoutchouc ; il possède par rapport au caoutchouc de synthèse issu de la pétrochimie des qualités spécifiques, telles que la résistance à l'échauffement, aux microfissures, qui en font un produit difficilement substituable. Il provient de l'espèce *Hevea brasiliensis*, dont le centre d'origine se situe en Amazonie (Schultes, 1990). L'hévéa est un arbre monoïque à cycle long appartenant à la famille des Euphorbiacées. Il est considéré comme préférentiellement allogame. Il semble que ce soit un allotétraploïde dont le comportement se rapproche fortement de celui d'un diploïde.

À l'état natif, c'est un grand arbre de la forêt, à feuilles caduques, avoisinant 1 à 2 m de circonférence pour 20 à 30 m de hauteur. Il vit en petits peuplements peu denses, de l'ordre de quelques arbres à l'hectare.

L'introduction de l'hévéa en Asie, en 1876, a permis le passage d'une économie de cueillette par les *seringueiros* à l'économie de plantation.

Les variétés d'hévéas sont des clones de greffe, plantés à la densité de 400 à 500 arbres par ha et mis en saignée vers 5 à 7 ans. La saignée est pratiquée 5 à 10 fois

par mois pendant 20 à 35 ans selon l'état de l'écorce et du peuplement. Elle consiste à inciser l'écorce selon une encoche en demi-spirale pour le système d'exploitation le plus courant. Il s'agit donc d'une production en continu tout au long de l'année, sous forme de latex, cytoplasme cellulaire renfermant des particules de caoutchouc (Jacob *et al.*, 1995 a).

À la longue, des arbres cassent sous l'effet du vent, meurent par attaques de maladies ou cessent de produire en raison d'un phénomène d'altération des cellules laticifères nommé «encoche sèche». On abat la plantation pour, éventuellement, la renouveler, lorsque le nombre d'arbres saignés est devenu trop faible pour permettre d'atteindre encore le seuil de rentabilité.

Depuis 80 ans, l'amélioration génétique accompagne le développement de cette culture (encadré 1) dont la production est passée de 400 à 2 500 kg par ha et par an, dans les meilleures zones (Dijkman, 1951 ; Ho Chai Yee, 1979 ; Tan, 1987 ; Simmonds, 1989). Elle est amenée aujourd'hui à prendre en compte une diversité croissante d'objectifs (augmenter la rentabilité des exploitations, maintenir la production de caoutchouc naturel) et intègre une panoplie de méthodes en pleine évolution.



Augmenter la rentabilité des plantations

La raréfaction de la main-d'œuvre et le renchérissement de son coût dans certains grands pays producteurs (Malaisie) nécessitent une augmentation de la productivité par unité de surface. Cette productivité est liée principalement à la densité du peuplement, et à la productivité du saigneur qui dépend de la production par arbre.

La production par arbre

La mise en exploitation a lieu quand 50 % des arbres ont atteint 50 cm de circonférence à 1 m du sol. Jusque là, le métabolisme primaire de l'arbre est orienté vers la production de biomasse : croissance en hauteur et en épaisseur. L'âge de mise en saignée, et donc de la période initiale non productive, dépend de cette croissance. Or, les calculs d'actualisation financière montrent que le caoutchouc produit en début d'exploitation représente un meilleur résultat économique que celui obtenu en fin de cycle (figure 1). Des gains génétiques importants peuvent être attendus : les clones les plus courants sont mis en saignée entre 5 et 7 ans alors que certains comme PB 235, IRCA 111 ou IRCA 230 peuvent l'être à 4 ans et demi (figure 2).

La saignée met en place un métabolisme secondaire de régénération du latex dans l'écorce, qui concurrence la production de biomasse et s'accompagne d'une forte réduction de la croissance en épaisseur du tronc (figure 2). La consommation progressive de l'écorce provoque une modification physiologique continue de l'arbre. La productivité doit donc être jugée sur le long terme, en fonction d'un itinéraire d'exploitation du panneau de saignée.

Une sélection orientée vers des clones de types «cycle long» ou «cycle court»⁽¹⁾ laisse prévoir des gains très nets et peut se justifier pour l'obtention de clones spécialisés selon l'objectif des planteurs. Une sélection conjointe associant un métabolisme actif et une bonne stabilité dans le temps du potentiel de production, assistée par un typage physiologique précoce et une estimation des vitesses de croissance des clones, avant et en cours de saignée, présente pourtant de meilleures garanties de rentabilité économique (Hénon *et al.*, 1984).

(1) Les clones de «cycle long» démarrent lentement mais leur vie économique est prolongée, tandis que les clones de «cycle court» produisent rapidement mais doivent être renouvelés plus tôt.

Encadré 1. Quelques faits marquants pour la sélection de l'hévéa

		Production (kg/ha/an)
1876	Introduction de l'hévéa en Asie du Sud-Est (Wickham).	
1900	Réalisation de plantations de <i>seedlings</i> à partir de graines «tout venant».	400
1910	Sélection des arbres producteurs en caoutchouc pour fournir les graines de plantation.	800
1920	Poursuite de la sélection «généraliste» par production de graines en champs semenciers.	1 200 à 1 600
1920	Mise au point du greffage sur hévéa, repérage des arbres hauts producteurs têtes de clones, développement des clones primaires (GT 1, PR 107, PB 86...).	1 400 à 2 000
1950	Etude de l'hévéa <i>in situ</i> par Schultes : constitution de collections en Colombie. La propagation clonale s'impose, création de clones par recombinaison des meilleurs génotypes (RRIM séries 500, 600, 700 ; PB séries 200 et 300 ; PR séries 200 et 300 ; RRIC série 100...).	1 800 à 2 500
1970	Mise en place du programme de sélection IRCA en Côte d'Ivoire.	
1974	Prospection franco-brésilienne en Amazonie.	
1981	Prospection internationale IRRDB au Brésil et création de centres de ressources génétiques en Asie (Malaisie) et en Afrique (Côte d'Ivoire).	
1985	Transfert par le CIRAD d'échantillons des collections Schultes de Colombie en Côte d'Ivoire, <i>via</i> la Martinique.	
1995	Réalisation de la première carte du génome de l'hévéa à Montpellier.	

La collecte, le séchage et les traitements modifient profondément le caoutchouc, depuis sa sortie de l'arbre jusqu'à son utilisation. Certains facteurs clonaux, comme la viscosité Mooney ou l'indice de rétention de plasticité (PRI) ont une incidence sur ces processus et sont actuellement pris en compte au stade final de la sélection (on rejette actuellement des clones produisant un caoutchouc trop dur comme AVROS 2037 ; les chutes saisonnières de PRI de fond de tasse limitent les perspectives d'utilisation de PB 217 en plantations villageoises). Mais l'importance relative de ces critères varie avec l'âge des arbres, l'évolution des techniques et les besoins

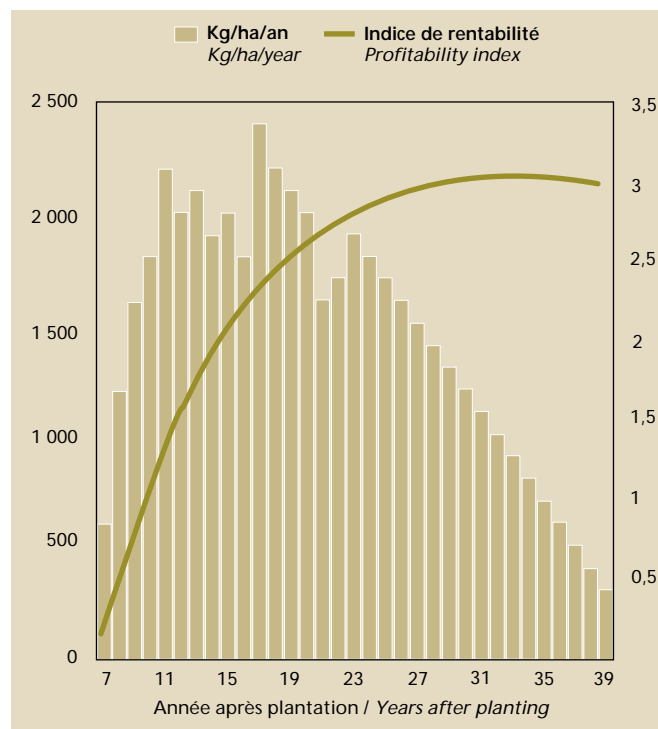


Figure 1. Scénario-type de la vie économique du clone GT 1, clone dominant dans les plantations, (mis en saignée à 6 ans). L'indice de rentabilité désigne le rapport du revenu obtenu (valorisé au taux d'intérêt de 8 %) à celui d'un investissement équivalent placé au même taux. Lorsque l'indice atteint 1, le recouvrement de l'investissement est réalisé. On voit que la rentabilité maximale d'une parcelle n'est atteinte qu'après 30 ans.
Typical scenario of the economic life span of GT 1, the most frequently planted clone (first tapping at 6 years). The profitability index indicates the ratio of the income obtained (valued at an interest rate of 8%) to that of an equivalent investment at the same rate. When the index reaches 1, the investment is recovered. It can be seen that it takes 30 years to reach maximum plot profitability.

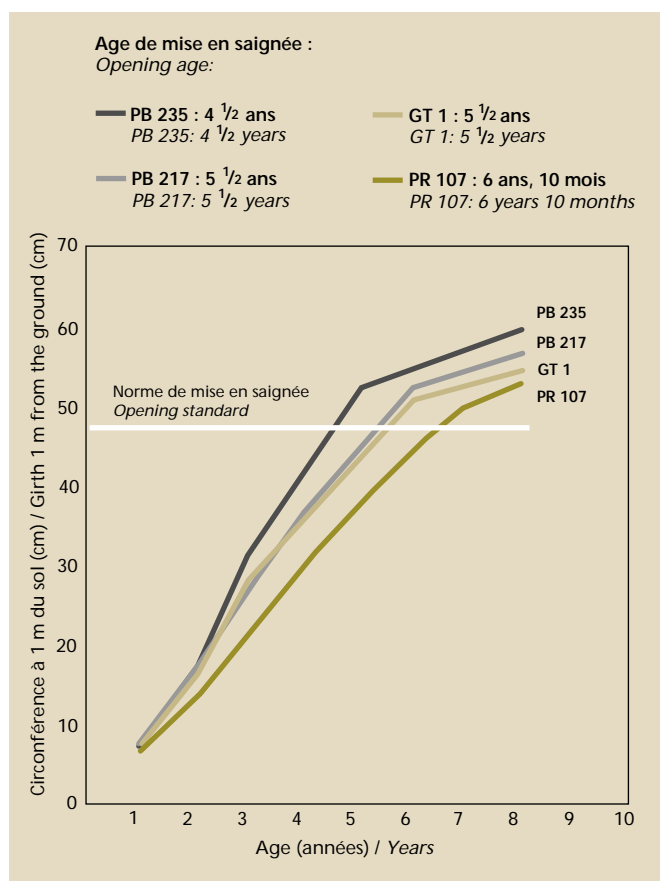


Figure 2. Croissances des clones GT 1, PR 107, PB 217 et PB 235 avant et après la mise en saignée. On ouvre les arbres dépassant 50 cm de circonférence lorsque la moitié de l'effectif atteint cette norme, la circonférence moyenne du peuplement est alors d'environ 47 cm.
Growth of clones GT 1, PR 107, PB 217 and PB 235 before and after first tapping. Trees more than 50 cm in girth are opened once half the stand reaches 50 cm, at which stage the mean girth of the stand is around 47 cm.

du marché, ce qui rend difficile leur prise en compte en sélection précoce. Le sélectionneur pourrait, toutefois, être amené assez rapidement à aborder l'analyse de la transmission héréditaire de critères, dont la validité est assurée pour de nombreuses années.

Stabilité du peuplement

La diminution progressive du nombre d'arbres producteurs au cours du temps (figure 3) est un facteur essentiel de la durée de vie économique, et donc de la rentabilité, d'une plantation (figures 4, 5).

Face à la mort d'arbres due à la pourriture blanche des racines (*Fomes*) qui s'exerce sur les porte-greffes, le sélectionneur est actuellement impuissant. Il ignore même si un fonds génétique de résistance existe. Une expérimentation menée sur porte-greffes clonaux permettra d'évaluer les possibilités d'une lutte génétique.

Les dégâts dus aux coups de vent peuvent entraîner le déracinement, la casse ou des lésions graves du tronc, et donc une diminution du nombre d'arbres en place. L'aspect catastrophique de ce phénomène (photo 1) est tellement démoralisant qu'il est spontanément pris en compte par le sélectionneur ; mais sa complexité rend son approche génétique précoce très imparfaite ; seule la mise à l'épreuve en vraie grandeur, et sur le long terme, permet de donner une certaine garantie sur la qualité d'un clone.

L'apparition progressive d'arbres secs, c'est-à-dire ne donnant plus de caoutchouc à la saignée, alors que leur croissance et leur développement ne sont pas contrariés, peut diminuer considérablement le nombre d'arbres productifs d'un peuplement. La relation entre l'«encoche sèche» et les critères physiologiques du diagnostic latex offre une possibilité de repérage précoce des clones éventuellement sensibles.

Adaptation aux plantations villageoises

Les plantations industrielles constituent le secteur le plus actif pour l'introduction, la promotion et l'évaluation des clones modernes. Cependant, les petites plantations représentent environ 85 % des surfaces plantées en hévéas dans le monde. Le sélectionneur doit donc rechercher une sortie variétale adaptée à ce secteur soumis à de nombreuses contraintes, et qui n'exploite souvent que partiellement le potentiel de production des nouveaux clones. Les facteurs de dégradation des panneaux de saignée et du peuplement y



Figure 3. Evolution du peuplement des clones GT 1, PR 107, PB 217 et PB 235 jusqu'à 20 ans après plantation. Les effets de la casse due au vent se traduisent par des diminutions brutales du peuplement (PB 235 et GT 1).
Variation in GT 1, PR 107, PB 217 and PB 235 stands up to 20 years after planting. Wind damage is reflected in a sharp reduction in the stand (PB 235 and GT 1).



Photo 1. Côte d'Ivoire : hévées cassés par la tornade du 13 mai 1967. / Côte d'Ivoire: hevea trees broken by the tornado on 13th May 1967.

A. Bonnaire

sont particulièrement importants, rendant nécessaire un retour sur investissement rapide. Des considérations socio-économiques sont à prendre en compte. Certains critères de sélection, tels que la vitesse de couverture du sol, permettant une réduction des exigences d'entretien, ou la réduction de la part relative de la saignée sur écorce régénérée dans la production globale doivent être valorisés.

Participer au maintien de la production mondiale

Exploiter de nouvelles zones

Depuis plusieurs années, la culture s'étend vers de nouvelles zones agroclimatiques, autrefois considérées comme marginales. Ainsi l'hévéaculture chinoise s'est remarquablement développée dans des régions nordiques marquées par le froid ; l'Inde réalise d'importants projets dans le Nord-Est ; le Brésil et le Vietnam plantent dans des zones de hauts plateaux soumises au froid, à des vents secs et à des effets de l'altitude encore mal appréhendés. De tels développements ont été initiés avec les clones actuellement disponibles ; mais un matériel végétal mieux adapté à ces nouvelles conditions sera obtenu par sélection

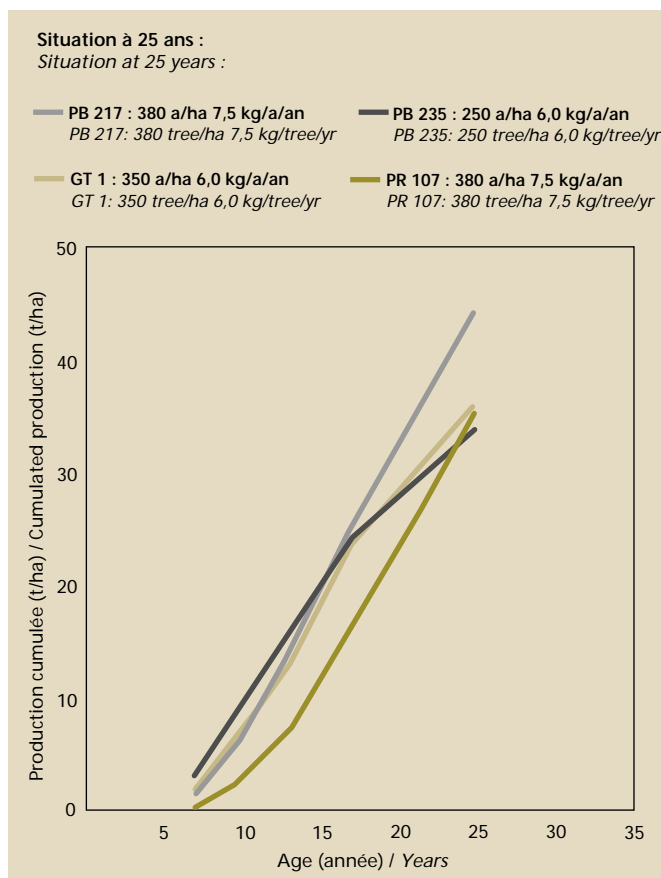


Figure 4. Comparaison des productions cumulées de GT 1, PR 107, PB 217 et PB 235 jusqu'à 25 ans après plantation.
Comparison of cumulated yields for GT 1, PR 107, PB 217 and PB 235 up to 25 years after planting.

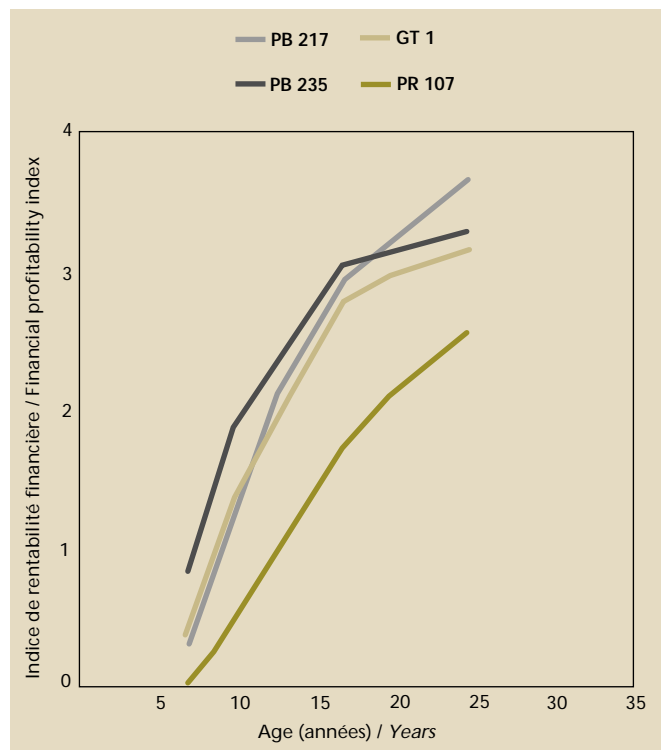


Figure 5. Indices de rentabilité financière des clones GT 1, PR 107, PB 217 et PB 235 jusqu'à 25 ans après plantation.
Financial profitability of clones GT 1, PR 107, PB 217 and PB 235 up to 25 years after planting.

in situ. Les réelles potentialités adaptatives de l'hévéa sont encore mal définies, elles dépendent à la fois de critères biologiques et agronomiques assez facilement pris en compte dans un programme d'amélioration génétique, mais également de critères socio-économiques plus difficiles à intégrer.

Le caoutchouc du continent latino-américain représente moins de 2 % de la production mondiale. La cause principale de cette situation provient de la présence, dans cette région du globe, d'un champignon parasite des feuilles d'hévéa, *Microcyclus ulei*, qui provoque des dégâts considérables dans les plantations par des défoliations massives et répétées. Cette maladie représente un danger permanent pour l'hévéaculture mondiale qui appréhende son introduction accidentelle en Asie et en Afrique. Les luttes chimique et biologique s'étant avérées inefficaces, ou économiquement inapplicables, seule la lutte génétique est envisageable. Des formes de résistance totale existent chez l'espèce *Hevea brasiliensis* et d'autres espèces du genre, mais toutes les tentatives pour les introduire par *backcross* (rétro-croisement) sur du matériel sensible et haut producteur, ont abouti à la création de clones dont la résistance a toujours été rapidement contournée. De nouveaux concepts permettent cependant de reprendre aujourd'hui ce travail sur de nouvelles bases.

De façon plus générale, toutes les zones très sensibles à certaines maladies fongiques telles que *Colletotrichum*, *Corynespora*, *Corticium* (Gabon, Cameroun, Vietnam) nécessitent une approche génétique spécifique du problème rencontré et une sélection *in situ*.

Attribuer à l'hévéa de nouvelles destinées

L'exploitation du bois d'hévéa, pratiquement méconnu il y a encore 20 ans, devient de plus en plus courante. La dégradation des forêts tropicales et les mesures conservatoires prises par les États entraînent une raréfaction de la disponibilité en bois dans certains pays du Sud et une diminution des flux d'exportation. Les caractéristiques technologiques du bois d'hévéa en font un produit de substitution de relativement bonne qualité, le marché est créé et la demande s'amplifie.

Jusqu'à présent, on s'est contenté de valoriser de vieilles plantations lors de l'abattage, en finançant, au moins en partie, le coût des replantations. Des études écono-

miques indiquent que la valorisation du bois d'hévéa ne peut être envisagée seule mais nécessairement dans le cadre d'une production mixte caoutchouc-bois (Gan *et al.*, 1994). Une réflexion est donc amorcée, associant économistes, sylviculteurs, physiologistes et sélectionneurs, visant à proposer un nouveau type de matériel végétal, alliant des caractéristiques de croissance très rapide et de production en cycle court, et susceptible d'offrir une réponse économique satisfaisante pour les deux objectifs.

Un peu partout dans le monde tropical, de vastes régions dénudées et envahies de mauvaises herbes ont un statut fragile. L'hévéaculture, considérée comme assez peu exigeante pour les sols, pourrait contribuer à leur restauration. Ainsi, en Côte d'Ivoire, elle participe à la reforestation. L'impératif de rentabilité de la production de caoutchouc et les coûts habituels de plantation semblent pourtant difficilement compatibles avec un but de protection de l'environnement. Là encore, si un tel objectif est désigné, la définition pluridisciplinaire d'un idéotype sera l'étape préliminaire d'une démarche de sélection adaptative.

Les méthodes d'amélioration

Constitution de ressources génétiques

La première démarche du généticien est de rassembler une collection des meilleurs génotypes accessibles, issus des sélections les plus variées provenant de l'amélioration de la petite population initiale (population W), afin de situer les premières sorties clonales à un haut niveau de production. Une centaine de clones constituent une bonne base qui doit être soumise à une évaluation agronomique et génétique (valeur propre et valeur en croisement). La connaissance des généalogies permet de raisonner les croisements en limitant les situations d'apparement. L'utilisation de l'électrophorèse isoenzymatique assure un contrôle de conformité des multiplications et des croisements.

Dans les années 70 et 80, diverses inspections en Amazonie, et notamment celle qui fut organisée par l'IRRDB (*International Rubber Research and Development Board*) en 1981, ont doté les programmes d'une population de base de grande taille (population Am) représentative de l'espèce *Hevea brasiliensis*. Bien que le niveau de production de cette population se situe à

seulement 10 % de celui des clones Wickham⁽²⁾ actuels, les études de diversité génétique, réalisées par électrophorèse isoenzymatique et RFLP (Chevallier, 1988 ; Seguin *et al.*, 1992 ; Besse, 1993), ont mis en évidence un réel enrichissement génétique par la présence d'environ 50 % d'allèles nouveaux. De plus, une structure en plusieurs groupes a pu être établie et un fonds de résistance aux maladies de feuilles a pu être observé (Nicolas *et al.*, 1994).

Dans une perspective de gestion à long terme, on constitue, à partir de la population Am, une collection noyau (*core collection*) rassemblant sous une forme réduite un bon échantillonnage de la diversité génétique existante de l'espèce *Hevea brasiliensis* ainsi que les représentants disponibles d'autres espèces du genre. Afin d'élever rapidement le niveau de production et d'éliminer les défauts les plus visibles dans la population de base, un important travail d'évaluation agronomique et de sélection précoce est entrepris pour constituer une collection de travail Am (figure 6), préalable nécessaire à l'utilisation des accessions amazoniennes comme géniteurs pour la sortie clonale (encadré 2).

Choix des géniteurs et recombinaison

Dans le passé, les géniteurs W étaient choisis sur leur valeur agronomique propre pour produire, par pollinisation manuelle, des familles de pleins-frères. On cherchait généralement à combiner des clones offrant des caractéristiques complémentaires du point de vue des critères de sélection utilisés (croissance, production, résistance à l'encoche sèche, à la casse due au vent, à diverses maladies...). Les études génétiques disponibles sur des populations de clones Wickham concluent à une prépondérance de la variance additive sur la variance de dominance pour la croissance et la production (Tan *et al.*, 1975 ; Tan, 1987 ; Simmonds, 1989). Ces résultats confortent les choix du passé. Cependant, il est admis que cette situation évolue au cours de la sélection dans le sens d'une diminution de la part de l'additivité.

Il est donc nécessaire d'actualiser l'étude des paramètres génétiques et d'estimer les aptitudes à la combinaison. De ce point de vue, la faible fertilité femelle de la plupart des clones (Leconte, 1983) constitue une contrainte majeure pour la réalisation de plans de croisement satisfaisants et risque de favoriser le développement d'apparements importants si on limite le choix des femelles aux clones les plus fertiles.

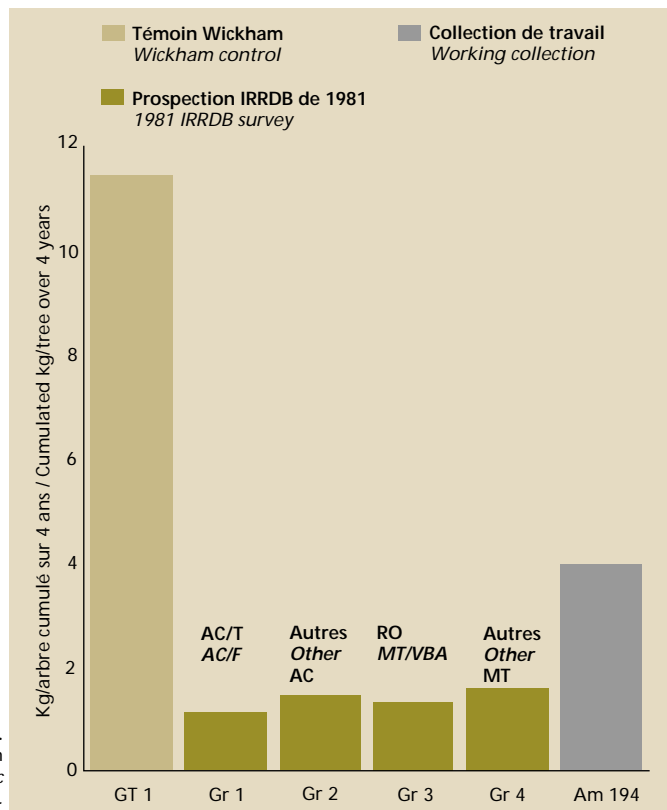
(2) Les clones Wickham sont issus de la population récoltée en Amazonie par Sir H. Wickham et transférée en Asie en 1876.

Encadré 2. Structure de la collection génétique hévéa de Côte d'Ivoire

Catégories	Effectifs
Collection avancée (Wickham)	201
Population de base issue des prospections de 1981 :	
groupe 1 : Acre, districts AC/T, AC/F	339
groupe 3 : Rondonia et district MT/VBA	684
groupe 4 : autres districts du Mato Grosso	827
Population Schultes	341
CNSAM, MDF	42
espèces d'hévéa non <i>brasiliensis</i>	4
divers	153
Collections sélectionnées dans la population de base :	
Collection noyau (diversité maximale)	300
Collection de travail (productivité maximale)	200
Clones W x Am introduits : GU, IAN, FX, MDX	45
Produits de la recombinaison génétique :	
génotypes créés de 1974 à 1994 et répartis dans 460 croisements de pleins-frères	35 000
clones expérimentaux IRCA, étudiés en champs de clones à grande échelle	50

Figure 6.

Niveau de production de la population de base amazonienne. Production cumulée des 4 premières années d'exploitation. / Production level of the basic Amazon population. Cumulated yields for the first 4 years of tapping.



L'étude préliminaire des croisements W x Am, avec des géniteurs amazoniens non sélectionnés, met en évidence une croissance avant la mise en saignée équivalente et une production se situant entre 30 et 50 % de celle des croisements W x W (figure 7). Pour la croissance comme pour la production, le résultat des croisements W x Am n'est pas nécessairement en relation avec le niveau des parents amazoniens. Certains géniteurs Am semblent avoir, malgré une valeur propre faible, une très bonne aptitude à la combinaison sur les géniteurs W utilisés. Certains clones W x Am manifestent une croissance exceptionnelle, tel l'IRCA 652 qui pouvait être mis en saignée vers 3 ans et demi, soit près d'un an avant les clones Wickham les plus vigoureux. Avec une production améliorée, de tels clones à croissance très rapide, éventuellement multipliés *in vitro*, et cultivés sans greffage sur leur propre système racinaire supposé également très vigoureux (pour éviter un risque de déracinement lié au déséquilibre pondéral entre la partie racinaire et la partie aérienne), pourraient présenter un intérêt particulier pour une production mixte caoutchouc-bois.

L'étude génétique des croisements W x Am et la sélection des géniteurs Am les plus aptes à la recombinaison sur le groupe W sont donc à poursuivre. L'amélioration de ces géniteurs pourrait passer par quelques

cycles de sélection récurrente interne à chaque groupe amazonien en alternant une évaluation par sélection précoce et une recombinaison en jardins de pollinisation libre. Une estimation de l'écart à la panmixie dans de tels jardins, grâce à des marqueurs génétiques obtenus par électrophorèse isoenzymatique, est en cours pour savoir si les descendances obtenues pourront être exploitées génétiquement comme des familles de demi-frères.

Sélection

Trois dispositifs expérimentaux sont actuellement employés :

- le CES (champ d'évaluation des

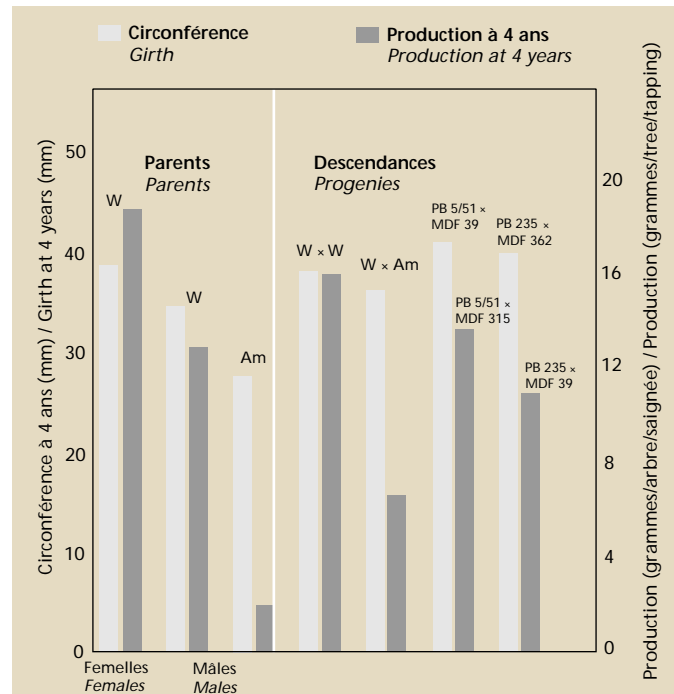


Figure 7. Croissances et productions précoces comparées de 4 croisements W x W et de 16 croisements W x Am. En moyenne, la circonférence des parents Am vaut 80 % de celle des parents W ; la circonférence des croisements W x Am vaut 95 % de celle des croisements W x W. En moyenne, la production des croisements W x Am vaut 41 % de celle des croisements W x W. Mais les 2 meilleurs croisements W x Am atteignent respectivement 86 % et 68 %. Les 20 croisements étudiés sont issus de 20 parents : 2 femelles W, 4 mâles W et 14 mâles Am. / Comparative early growth and yields for 4 W x W crosses and 16 W x Am crosses. On average, the girth of the Am parents was 80% that of the W parents; the girth of the W x Am crosses was 95% that of the W x W crosses. On average, the yields of the W x Am crosses were 41% of those of the W x W crosses, but the best 2 W x Am crosses reached 86% and 68% respectively. The 20 crosses studied were obtained from 20 parents: 2 females, 4 W males and 14 Am males.

seedlings)⁽³⁾, planté à 4 000 arbres/ha, est évalué à 2 ans (photo 2). Dans ce dispositif, les arbres proviennent directement des graines issues de la recombinaison génétique. Chaque génotype n'est donc représenté que par un seul arbre. Il est théoriquement possible de réaliser une sélection génotypique individuelle à ce niveau, mais avec une précision faible. En revanche, l'évaluation et le classement des familles selon leur niveau de production présente un grand intérêt pour la constitution des essais de l'étape suivante (figure 8). Après évaluation, les génotypes de tous les CES sont conservés sous forme d'une collection vivante et les CES sont alors gérés comme des jardins à bois de greffe ;

- le CCPE (champ de clone à petite échelle), est le dispositif adapté à la sélection clonale précoce. Il est évalué entre 3 et 5 ans, c'est-à-dire avant l'âge normal de mise en saignée de la plupart des clones. Chaque génotype est représenté par 2 à 3 parcelles de 3 à 4 arbres greffés dans un dispositif comportant un plan de croisement *single-pair* ou factoriel (structure familiale). Il a pour objectifs conjoints l'évaluation des paramètres génétiques de la population étudiée et des géniteurs présents (lorsque le plan le permet) et l'estimation de la valeur propre des clones par sélection combinée individu-famille (Clément-Demange *et al.*, 1994). Selon le niveau de production attendu, deux options sont prévues dans le dispositif :
 - pour les croisements à potentiel élevé (W x W par exemple), la densité de peuplement est normale (500 arbres/ha) et l'évaluation se fait à 4 ans, avec la possibilité de poursuivre jusqu'à 8 ans (âge où les compétitions inter-clones commencent à biaiser les résultats). Ce dispositif vise en priorité la sortie clonale ;
 - pour les croisements à potentiel limité, la densité de peuplement est élevée (2 000 arbres/ha), et l'évaluation se fait à 3 ans. Ce type d'essai est orienté vers le choix de géniteurs au sein des populations sauvages amazoniennes, sur la base de leur valeur propre ou de leur valeur en croisement sur quelques clones du groupe Wickham utilisés comme testeurs. La courte durée de

ces essais permet leur recyclage rapide et aisé.

Compte tenu de la faible taille des parcelles, les productions observées en CCPE sont des productions par arbre. Les facteurs liés au peuplement ne peuvent être estimés que de façon indirecte et imprécise à ce stade (diagnostic latex pour l'encoche sèche par exemple) ;

- le CCGE (champ de clones à grande échelle) est planté à densité normale et évalué jusqu'à l'âge de 15 à 20 ans. Chaque génotype comporte 4 parcelles d'au moins 60 arbres greffés. C'est un

test clonal de longue durée, sans structure familiale. Les résultats de production sont exprimés en kg/ha/an ou en production cumulée sur une période de plusieurs années, valeurs auxquelles on peut adjoindre un paramètre de rentabilité économique calculé par actualisation financière des charges et des produits. L'évolution du nombre d'arbres saignés est suivie pour prédire la production à long terme des clones en essai. Le réseau des CCGE permet une mise à jour régulière des fiches de clones et des recommandations d'utilisation (Clément-Demange et Kéli, 1993).

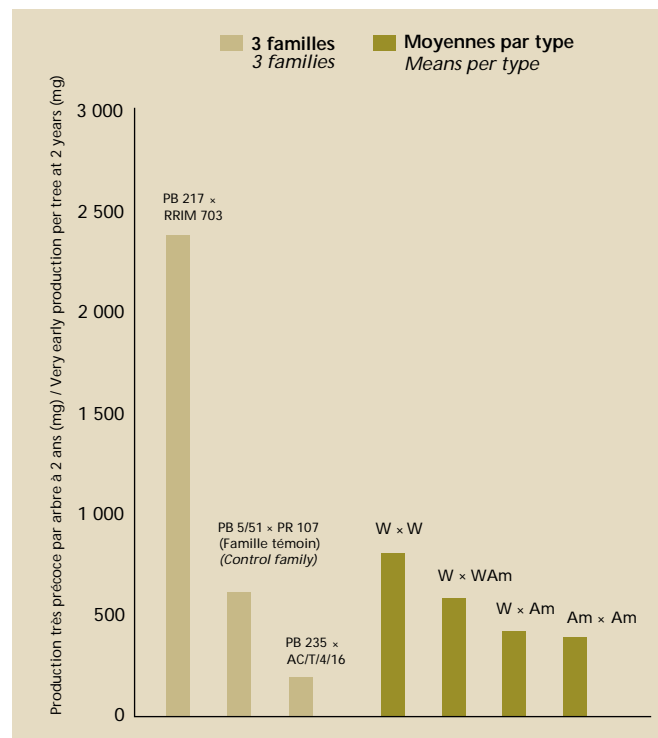


Figure 8. Productions comparées de différents types de croisements évalués en champ d'évaluation de *seedlings* (CES). La représentation des deux familles extrêmes (PB 217 x RRM 703 et PB 235 x AC/T/4/16) illustre les différences de niveaux de production mises en évidence entre les familles en CES. Comparative yields of different types of crosses assessed in seedling evaluation trial (SET). The representation of the two extreme families (PB 217 x RRM 703 and PB 235 x AC/T/4/16) shows the differences in production levels found between the families in the SET.



Photo 2. Test de microsaignée. / Microtapping test.

A. Diez

(3) Un *seedling* est un plant issu de graine, c'est-à-dire directement de la reproduction sexuée ; un greffé est issu du greffage d'un bourgeon sur un porte-greffe (multiplication végétative).

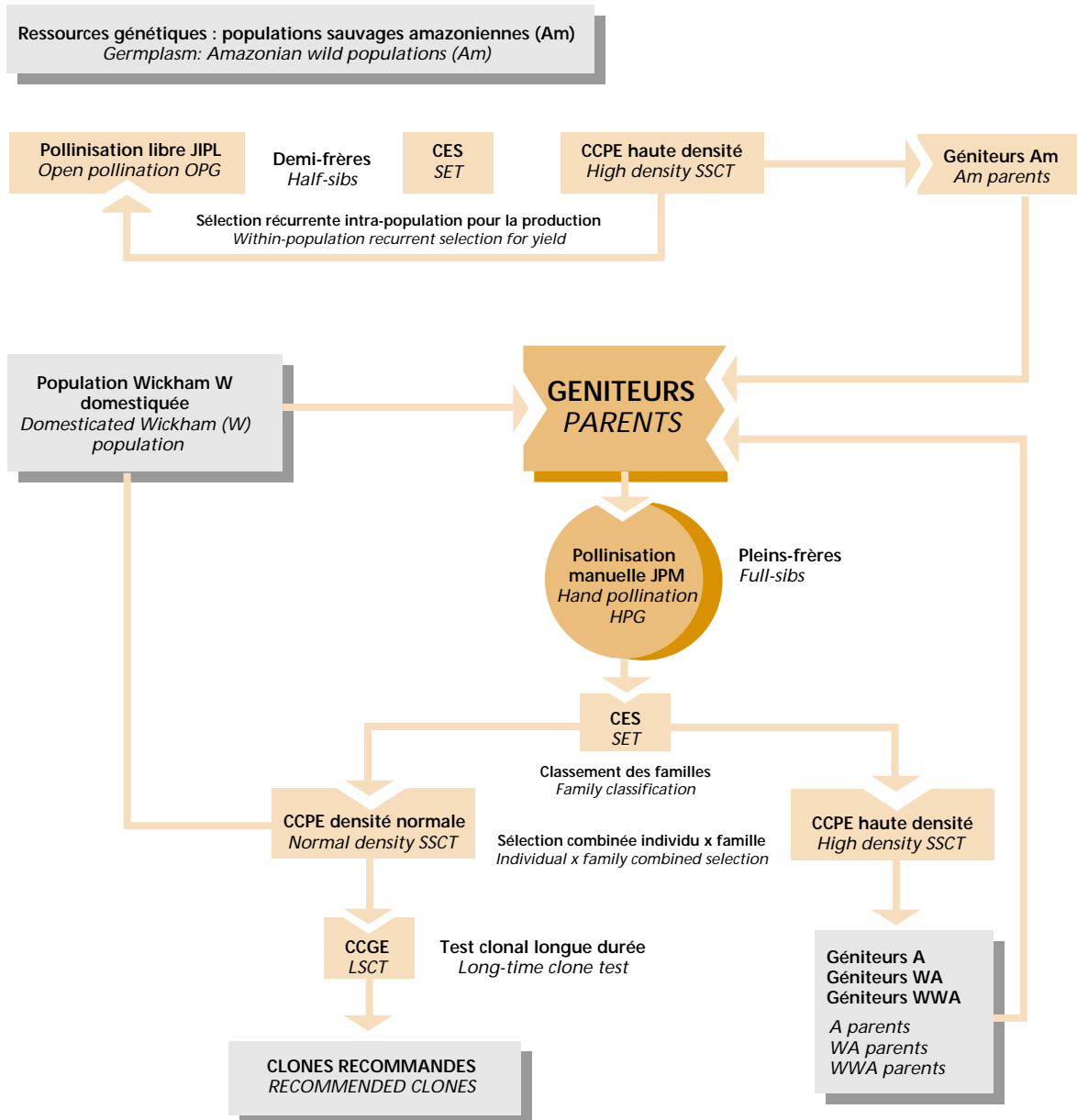


Figure 9. Schéma d'un programme d'amélioration génétique de l'hévéa. / Diagrammatic representation of a Hevea genetic improvement programme.

Du CES au CCGE, les dispositifs sont donc progressivement plus étendus et d'une durée plus longue. Le nombre d'unités génétiques diminue, mais la précision par unité augmente pour aboutir à une évaluation de la valeur d'un clone suffisante pour envisager son installation sur une surface monoclonale d'une taille proche de celle d'une parcelle pré-industrielle. Le processus de sélection est accompagné par une multiplication progressive, en jardin à bois de collection puis de diffusion, des clones qui franchissent les étapes successives.

Un schéma général pour l'amélioration génétique de l'hévéa est présenté (figure 9).

Lutte génétique contre *Microcyclus ulei*

Microcyclus ulei représente le frein principal du développement de l'hévéaculture en Amérique du Sud (photo 3) et une menace très forte pour l'Asie et l'Afrique, continents jusqu'à présent indemnes de la maladie. Par sa virulence et la grande variabilité de son pouvoir pathogène, le champignon a réussi, jusqu'à présent, à contourner toutes les formes de résistance totale qu'on a pu lui opposer. Il est donc envisagé de mettre au point des formes de résistance durable contre ce pathogène.

Une méthodologie a été conçue pour identifier et évaluer des composantes de

résistance partielle, au champ et en conditions contrôlées. Une dizaine de caractéristiques clonales, présentant des différences significatives pour des manifestations différentes de la maladie, ont été mises en évidence : la durée de la période de latence infectieuse, le nombre et la taille des lésions, l'intensité de la sporulation, la formation de stromas fertiles, la perte de feuilles... En l'état de l'analyse, aucun clone ne réunit l'ensemble ou une partie de ces caractéristiques de résistance partielle à un niveau suffisant (Rivano, 1992). Un programme de recombinaison génétique est lancé pour associer, dans certains clones, ces facteurs de résistance avec des caracté-

ristiques agronomiques intéressantes pour le développement. Ce type de démarche devrait être également profitable, sur le plan méthodologique, aux autres programmes de lutte génétique contre les maladies.

Nouveaux outils, nouvelles méthodes

Au cours des années 80, parmi les diverses approches explorées, certaines se sont avérées très informatives et efficaces comme aide à la sélection. Ainsi le diagnostic latex (Jacob *et al.*, 1995 b) devient inséparable de la sélection précoce car il estime la réponse des clones étudiés à l'intensification de l'exploitation. L'électrophorèse isoenzymatique (Leconte *et al.*, 1994) a fourni une grande partie de la connaissance sur la diversité des ressources génétiques de l'hévéa. C'est, aujourd'hui, un moyen efficace de contrôle-qualité et un outil d'investigation pour l'étude de la pollinisation libre. Ces méthodes, qui paraissaient très sophistiquées il y a dix ans, sont aujourd'hui d'une mise en oeuvre aisée à un coût acceptable dans les pays du Sud.

La multiplication *in vitro* (Meunier, 1995) vise à obtenir le clonage du système racinaire. Elle permet d'envisager une lutte génétique contre le *Fomes* ainsi que l'obtention de clones entiers sans greffage et donc affranchis des mauvaises relations entre porte-greffe et greffon, bénéficiant d'une sélection sur la totalité de l'arbre, et

Encadré 3. Sigles

AC/F :	district de Feijo de l'Etat de l'Acre	IRCA :	Institut de recherches sur le caoutchouc
AC/T :	district de Tarauca de l'Etat de l'Acre	IRRDB :	<i>International Rubber Research and Development Board</i>
Am :	matériel amazonien	JIPL :	jardin isolé de pollinisation libre
BPM :	<i>Balai Penelitian Medan</i>	JPM :	jardin pollinisation manuelle
CCGE :	champ de clones à grande échelle	MDF :	<i>Madre de Dios Firestone</i>
CCPE :	champ de clones à petite échelle	MDX :	<i>Madre de Dios</i> , issus de croisements
CES :	champ d'évaluation de <i>seedlings</i>	MT/VBA :	district de Villa Buena de l'Etat du Mato Grosso
CIRAD :	Centre international en recherche agronomique pour le développement	PB :	<i>Prang Besar Estate</i>
CNSAM :	<i>Centro Nacional de Seringueira Amazonas</i>	PR :	<i>Proefstation voor Rubber</i>
FX :	Ford, issus de croisements	QTL :	<i>Quantitative Trait Loci</i>
GT :	<i>Gondang Tapen Estate, East Central Java</i>	RFLP :	<i>Restriction Fragment Length Polymorphism</i>
GU :	Guatemala	W :	matériel Wickham
IAN :	<i>Instituto Agronômico do Norte</i>		

donc beaucoup plus efficace. Elle ouvre, de plus, la voie aux perspectives de transformation génétique.

La faisabilité, chez l'hévéa, d'une sélection assistée par les marqueurs moléculaires (recherche de QTL), est en cours d'étude. Une carte génétique de l'hévéa sera prochainement publiée (Lespinasse, 1993).

Conclusion

En réponse à la diversité croissante des objectifs, le sélectionneur utilise à la fois le processus de création variétale classique, qui profite considérablement de l'évolution des méthodes de la génétique quantitative et des moyens de traitement des données, et les nouveaux outils de la biologie moderne. Pourtant l'hévéa, par comparaison avec d'autres plantes, ne bénéficie glo-

balement que d'un effort de recherche assez modeste à l'échelle internationale. Garantir la compétitivité du caoutchouc naturel suppose donc, concernant l'amélioration génétique, que soient encouragés les échanges de matériel végétal et la coopération entre partenaires.

Le sélectionneur intervenant sur l'hévéa vise des rendements plus élevés, mais avec des coûts de production plus bas. Il valorise les ressources génétiques en exploitant une biodiversité qu'il contribue à mieux faire connaître. Son intervention s'intègre dans le cadre d'un développement viable et durable, propice au respect de l'environnement. Enfin, il contribue à l'amélioration de la vie des agriculteurs. Tout ceci montre que son action se situe parfaitement dans le cadre de réflexion de ce que doit être une «double révolution verte». ■

D. Nicolas



Photo 3. Clone attaqué par *Microcyclus ulei* (à droite). / Clone attacked by *Microcyclus ulei* (on the right).

Bibliographie / References

- BESSE P., 1993. Identification des clones cultivés et analyse de la diversité génétique chez *Hevea brasiliensis* par RFLP. Thèse de docteur en sciences, université Paris XI Orsay, France, 114 p.
- CHEVALLIER M.H., 1988. Genetic variability of *Hevea brasiliensis* germplasm using isozyme markers. *J. Nat. Rubber Res.* 3 (1) : 42-53.
- CLÉMENT-DEMANGE A., KÉLI Z.J., 1993. Performances agronomiques des clones d'hévéa en Côte d'Ivoire. Communication présentée au Forum sur le caoutchouc naturel africain, Assemblée générale ACNA des 7 et 8 juin 1993 à Abuja, Nigeria. Abidjan, IDEFOR-DPL, Côte d'Ivoire, DEA n° 19/93, 39 p.
- CLÉMENT-DEMANGE A., SAVY Y., GNAGNE M., LEGNATÉ H., NICOLAS D., 1994. Estimation de la valeur génétique appliquée à la sélection précoce chez *Hevea brasiliensis*. In : Séminaire de biométrie et génétique quantitative, Montpellier, France, 12-14 sept 1994, 17 p.
- DIJKMAN M.J., 1951. Hevea: thirty years of research in the far east. Coral Gables, University of Miami Press, 329 p.
- GAN L.T., CHEW J.S., HO C.Y., 1994. Economic evaluation of planting rubber as a dual purpose tree. In : Management for enhanced profitability in plantations, International planters conference, Kuala Lumpur, Malaisie, 24-26 octobre 1994. Kuala Lumpur, Malaisie, Incorporated Society of Planters, p. 243-288.
- JACOB J.L., AUZAC J. D', PRÉVOT J.C., SERIER J.B. 1995 a. Une usine à caoutchouc naturel : l'hévéa. *La Recherche* 26 (276) : 538-545.
- JACOB J.L., PRÉVOT J.C., LACROTTE R., ESCHBACH J.M. 1995 b. Le diagnostic latex. *Plantations, Recherche, Développement* 2 (2) : 33-37.
- HÉNON J.M., NICOLAS D., NOUY B., ODIER F., 1984. Utilisation de facteurs physiologiques et anatomiques pour la sélection précoce de l'*Hevea brasiliensis*. In : Hévéa 84 : Exploitation, Physiologie, Amélioration, colloque IRRDB, Montpellier, France, 7-9 juillet 1984, p. 501-518.
- HO CHAI YEE, 1979. Contributions to improve the effectiveness of breeding, selection and planting recommendations of *Hevea brasiliensis* Muell.Arg. Thesis in agricultural sciences, faculty of agricultural sciences, Gant, Belgique, 340 p.
- LECONTE A., 1983. La reproduction sexuée de l'*Hevea brasiliensis*. Une approche histologique et expérimentale. Thèse de doctorat de 3e cycle en sciences agronomiques, université de Montpellier, France, 96 p.
- LECONTE A., LEBRUN P., NICOLAS D., SEGUIN M. 1994. Electrophorèse : application à l'identification clonale de l'hévéa. *Plantations, Recherche, Développement* 1 (2) : 28-36.
- LESPINASSE D., 1993. Recherche de marqueurs en vue d'une cartographie génétique chez *Hevea brasiliensis*. DEA «Ressources génétiques et amélioration des plantes», ENGREF, Paris, France, 66 p.
- MEUNIER J., 1995. Biotechnologies : quelles perspectives pour les cultures pérennes tropicales ? *Plantations, Recherche, Développement* 2 (1) : 7-18.
- NICOLAS D., RIVANO F., LEGNATÉ H., SEGUIN M., GOBINA M.S., 1994. Projet STD3 n° TS3-CT 92-0148. Etude et caractérisation de nouvelles ressources génétiques : leur utilisation en amélioration de l'hévéa. Principaux résultats obtenus depuis le début du contrat à la date du 30 novembre 1993. Montpellier, France, CIRAD-CP, France, 89 p.
- RIVANO F., 1992. La Maladie sud-américaine des feuilles de l'hévéa. Etude, en conditions naturelles et contrôlées, des composants de la résistance partielle à *Microcyclus ulei* (P. Henn.) V. Arx. Thèse de doctorat, université de Paris XI, Orsay, France, 260 p.
- SCHULTES R.E., 1990. A brief taxonomic view of the genus *Hevea*. MRRDB Monograph 14, 60 p.
- SEGUIN M., BESSE P., LEBRUN P., CHEVALLIER M.H., 1992. Hevea germplasm characterization using isozymes and RFLP markers. Poster in : International symposium on population genetics and gene conservation of forest trees. Carcans-Maubuisson, France, 24-28 août 1992.
- SIMMONDS N.W., 1989. Rubber breeding. In : Rubber, C.C. Webster et W.J. Baulkwill éd., Londres, Royaume-Uni, Longman, p. 85-124.
- TAN H., MUKHERJEE T.K., SUBRAMANIAM S., 1975. Estimates of genetic parameters of certain characters in *Hevea brasiliensis*. *Theor. Appl. Genet.* 46 : 181-190.
- TAN H., 1987. Strategies in rubber tree breeding. In : Improving vegetatively propagated crops, A.J. Abbott, R.K. Atkin éd., Londres, Royaume-Uni, Academic Press, p. 27-62.

Rubber: breeding strategies

Clément-Demange A.¹, Nicolas D.¹, Legnaté H.², Rivano F.³, Le Guen V.⁴, Gnagne M.², Chapuset T.²

1 CIRAD-CP, BP 5035, 34032 Montpellier Cedex 1, France

2 IDEFOR-DPL, 01 BP 1536, Abidjan 01, Côte d'Ivoire

3 Gremial de Huleros de Guatemala, 7A Av. 11-63 Zona 9, Edificio Calle España 3 ER, Guatemala City, Guatemala

4 Plantation E. Michelin, Av. Cuiaba 1241, CP 80, 78700-090 Rondonopolis MT, Brazil

In 80 years, natural rubber production per hectare per year has increased from 400 kg to 2,500 kg in the best zones. Breeding objectives are becoming increasingly diversified and the methods used are advancing all the time.

Natural rubber accounts for around a third of total rubber production; compared to synthetic rubber produced from petrochemicals, it has specific properties, such as resistance to heating and microsplitting, which make it a difficult product to replace. It comes from the species *Hevea brasiliensis*, which originated in Amazonia (Schultes, 1990). *Hevea* is a long cycle monoecious tree belonging to the Euphorbiaceae family. It is considered to be primarily cross-fertilizing. It seems to be an allotetraploid which behaves very much like a diploid.

In its native state, it is a tall deciduous forest tree with a trunk circumference of 1 to 2 m for a height of 20 to 30 m. It grows in small sparse stands of a few trees per hectare.

When the rubber tree was introduced into Asia in 1876, it led to a switch from a gatherer economy practised by the *seringueiros* to a plantation economy.

Hevea varieties are budded clones, planted at a density of 400 to 500 trees per ha opened at 5 to 7 years. Tapping is carried out 5 to 10 times a month for 20 to 35 years, depending on the condition of the bark and the stand. The most frequent tapping system consists in incising a half-spiral cut, with continuous production throughout the year in the form of latex, which is cell cytoplasm containing rubber particles (Jacob *et al.*, 1995 a).

As time goes by, trees are broken by the wind, are killed by diseases or stop producing due to an alteration in the latex-bearing cells called «tapping panel dryness». The plantation is felled and may be renewed when the number of trees being tapped has dropped too far for them to be profitable.

For the last 80 years, genetic improvement has gone hand in hand with the development of this crop (box 1), with yields increasing from 400 to 2,500 kg per ha per year in the best zones (Dijkman, 1951; Ho Chai Yee, 1979; Tan, 1987; Simmonds, 1989). Nowadays, increasingly diverse objectives have to be taken into account

(1) «Long cycle» clones start off slowly, but their economic life span is extended, whereas «short cycle» clones start yielding rapidly but have to be renewed sooner.

■ Box 1. A few rubber breeding landmarks

		Yields kg/ha/an
1876	<i>Hevea</i> introduced into Southeast Asia (Wickham).	
1900	Seedling plantations set up with non-selected seeds.	400
1910	Selection of high-yielding trees for seed production purposes.	800
1920	Continuation of «generative» selection by seed production in seed gardens.	1,200 to 1,600
1920	Development of <i>Hevea</i> budding, identification of high-yielding ortets, primary clone development (GT 1, PR 107, PB 86...).	1,400 to 2,000
1950	<i>Hevea</i> study <i>in situ</i> by Schultes: setting up collections in Colombia. Clonal propagation takes off, clone creation by recombination of the best genotypes (RRIM series 500, 600, 700; PB series 200 and 300; PR series 200 and 300; RRIC series 100...).	1,800 to 2,500
1970	IRCA breeding programme launched in Côte d'Ivoire.	
1974	Franco-Brazilian survey in Amazonia.	
1981	IRRDB international survey in Brazil and creation of Germplasm Centres in Asia (Malaysia) and Africa (Côte d'Ivoire).	
1985	Transfer by CIRAD of samples from the Schultes collections in Colombia to Côte d'Ivoire, via Martinique.	
1995	First <i>Hevea</i> linkage map produced in Montpellier.	

(increasing farm profitability, maintaining natural rubber production) and an ever changing panoply of methods has to be taken on board.

Increasing plantation profitability

The growing scarcity and cost of manpower in certain producing countries (Malaysia) have resulted in the need to increase productivity per area unit. Productivity is mainly linked to stand density and tapper output depends on production per tree.

Production per tree

Tapping begins when 50% of trees have reached 50 cm in circumference 1 m from the ground. Up to then, the primary metabolism of the tree is geared towards biomass production: vertical growth and thickening. The tree opening age, hence the initial unproductive period, depend on this growth. Financial discount calculations have shown that rubber produced at the start of tapping represents a better economic result than

that obtained at the end of the cycle (figure 1). Considerable genetic gains can be expected; the most common clones are tapped for the first time between 5 and 7 years, whereas on some, such as PB 235, IRCA 111 or IRCA 230, tapping can begin at 4½ years (figure 2).

Tapping triggers a secondary latex regeneration metabolism in the bark, which competes with biomass production and is combined with a sharp reduction in trunk thickening (figure 2). Gradual bark consumption causes an ongoing physiological change within the tree. Productivity therefore has to be judged in the long term, depending on tapping panel management.

Selection geared towards «long cycle» or «short cycle»⁽¹⁾ type clones suggests highly substantial gains can be made, and can be justified for the production of clones specifically designed to meet growers' requirements. However, combined selection for an active metabolism and a stable production potential over time, aided by early physiological typing and an estimate of clone growth rates before and

during tapping offers better guarantees of economic profitability (Hénon *et al.*, 1984).

Between leaving the tree and its end use, rubber is substantially modified by collection, drying and processing. Some clonal factors, such as Mooney viscosity or plasticity retention index (PRI) affect these processes and are currently taken into account at the final selection stage (clones that produce a rubber that is too hard, such as AVROS 2037, are rejected, and seasonal variations in cup lump PRI limit the prospects for using PB 217 in smallholdings). However, the relative importance of these criteria varies with tree age, advances in the techniques used and market requirements. They are therefore difficult to take into account in early selection. Nevertheless, breeders could quite soon be involved in an analysis of the hereditary transmission of these criteria, which would be valid for many years.

Stand stability

The gradual drop in the number of productive trees over time (figure 3) is a basic factor in the economic life span, hence the profitability, of a plantation (figures 4, 5).

Breeders are currently powerless against tree death caused by white root rot (*Fomes*), which affects rootstocks. They do not even know whether there is any source of genetic resistance. Experiments on clonal rootstocks will reveal any possibilities of genetic control.

Wind damage can involve uprooting, trunk snapping or serious lesions, hence a drop in the number of trees remaining. The disastrous scene left by this phenomenon (photo 1) is so demoralizing that breeders automatically take it into account, but it is so complex that an early genetic approach remains far from complete; the quality of a clone can only be guaranteed with any certainty after full-scale trials over long periods.

The gradual appearance of dry trees, i.e. trees no longer producing latex when tapped, whereas their growth and development remain undisturbed, can considerably reduce the number of productive trees in a stand. The relation between «tapping panel dryness» and the physiological criteria of latex diagnosis provide a possibility for early identification of potentially susceptible clones.

Adaptation to smallholdings

Estate plantations are the most active sector for the introduction, promotion and assessment of modern clones, but smallholdings account for 85% of the areas planted with rubber worldwide. Breeders therefore need to seek a varietal output that is adapted to this sector, which is subjected to numerous constraints and which often only partially exploits the production

potential of new clones. Tapping panel and stand deterioration are particularly important factors, making a rapid return on investment necessary. Socio-economic considerations need to be taken into account. Optimum use needs to be made of certain breeding criteria, such as ground cover rate, which reduces upkeep requirements, or a reduction in the relative amount of tapping taking place on regenerated bark for overall production.

Helping to maintain world production

Exploiting new zones

Over the last few years, rubber cultivation has spread into new agroclimatic zones that were once considered marginal. For example, Chinese rubber cultivation has developed remarkably in the northern regions marked by low temperatures; India is implementing major projects in the Northeast; Brazil and Vietnam are planting in the high plateau zones that are subject to cold, dry winds and high altitude effects that are still not fully understood. Such developments have taken place with the clones available at the time, but new planting material more suitable for these new conditions will be obtained by *in situ* selection. The true adaptability of *Hevea* has still not been clearly defined and will depend on both biological and agronomic criteria that are easy to include in a genetic improvement programme, but also on socio-economic criteria that will be more difficult to incorporate.

Rubber from Latin America accounts for less than 2% of world production, the main reason being the existence of a *Hevea* leaf parasitic fungus, *Microcyclus ulei*, in that part of the world, which causes considerable damage in plantations through massive and successive defoliations. The disease is a constant threat to world rubber cultivation and its accidental introduction is feared in Asia and Africa. As chemical and biological control have proved ineffective, or economically unfeasible, only genetic control can be envisaged. Forms of total resistance exist in the *Hevea brasiliensis* species and in other species of the genus, but all attempts to introduce them by back-crossing on susceptible and high-yielding material have resulted in the creation of clones whose resistance was always rapidly overcome. However, with the latest concepts now available, this work can be resumed on a new footing.

Generally speaking, all the zones highly susceptible to fungal diseases such as *Colletotrichum*, *Corynespora*, *Corticium* (Gabon, Cameroon, Vietnam) require a specific genetic approach to the problem encountered, and *in situ* selection.

A new destiny for the rubber tree

Rubberwood was virtually unknown 20 years ago, but is now increasingly being used. The destruction of tropical forests and conservation measures taken by the States involved are leading to timber scarcities in some developing countries and a drop in export volume. The technological characteristics of rubberwood make it a relatively good quality substitute; the market has been created and demand is on the increase. So far, only old plantations have been used after felling, thereby partly funding the cost of replantings. Economic studies indicate that rubberwood utilization cannot be envisaged alone, and has to be considered in a mixed rubber and timber production context (Gan *et al.*, 1994). A debate has thus been launched, involving economists, foresters, physiologists and breeders, with a view to proposing a new type of planting material combining very rapid growth with short cycle production, capable of providing a satisfactory economic answer to both objectives.

Throughout the Tropics, vast tracts of cleared forest land invaded by weeds are a fragile environment. Rubber cultivation is considered not to be very demanding on soils and could contribute towards their restoration. Thus, in Côte d'Ivoire, rubber is contributing to reforestation. However, the prerequisite of profitable rubber production and the usual costs of planting do not seem to be particularly compatible with environmental protection concerns. Here again, if such an objective is set, the multidisciplinary definition of an ideotype will be the first step in an adaptive selection approach.

Improvement methods

Building up genetic resources

The first job for geneticists is to build up a collection of the best genotypes available, obtained from the most varied selections derived from improvement of the small initial population (W population), so that the first clonal outputs are already high-yielders. Around a hundred clones is a good basis for agronomic and genetic assessment (specific value and combining ability). Knowledge of pedigrees means that rational crossing can be carried out by limiting relatedness. The conformity of the multiplications and crosses is checked by isozyme electrophoresis.

In the 1970s and 1980s, various surveys in Amazonia, particularly the one organized by the IRRDB (International Rubber Research and Development Board) in 1981, provided programmes with a large basic population (Am population) representative of the *Hevea brasiliensis* species. Although the production level of this population is only 10% of that of the

current Wickham clones⁽²⁾, genetic diversity studies using isozyme electrophoresis and RFLP (Chevallier, 1988; Seguin *et al.*, 1992; Besse, 1993), have revealed true genetic enrichment through the presence of around 50% new alleles. Moreover, it has been possible to draw up a classification of several groups and a source of resistance to leaf diseases has been observed (Nicolas *et al.*, 1994).

With a view to long-term management, a core collection has been assembled from the Am population, which contains a representative sample in reduced form of the genetic diversity to be found in the *Hevea brasiliensis* species, along with available representatives of other species of the genus. A considerable amount of agronomic assessment and early selection work has been undertaken to increase yield levels rapidly and eliminate the most blatant defects in the basic population, and build up a working Am collection (figure 6), which is necessary before the Amazon accessions can be used as parents for clonal outputs (box 2).

Choice of parents and recombinations

In the past, W parents were chosen for their specific agronomic value to produce full-sib families by hand pollination. Attempts were generally made to combine clones that offered complementary characteristics as regards the selection criteria used (growth, yield, resistance to tapping panel dryness, to wind damage and to various diseases, etc.). The genetic studies available on populations of Wickham clones concluded that additive variance prevailed over dominance variance for growth and yields (Tan *et al.*, 1975; Tan, 1987; Simmonds, 1989). These results vindicated past choices, but it is acknowledged that this situation evolves towards a drop in the share of additivity in the course of the selection process.

Consideration of genetic parameters therefore has to be updated and combining abilities need to be estimated. The low female fertility rate of most clones (Leconte, 1983) is a major limiting factor for the implementation of satisfactory crossing plans and is likely to lead to substantial relatedness if the choice of females is limited to the most fertile clones.

A preliminary study of W x Am crosses with non-selected Amazon parents revealed equivalent growth prior to tapping and yields between 30 and 50% of those produced by W x W crosses (figure 7). For both growth and yields the result of the W x Am crosses was not

necessarily in direct relation to the level of the Amazon parents. Some Am parents seemed to have a very good combining ability with the W parents used, despite a low inherent value. Some W x Am clones revealed exceptional growth, such as IRCA 652, which could be tapped at around 3½ years, i.e. almost a year before the most vigorous Wickham clones. With improved yields, such fast-growing clones, if multiplied *in vitro* and grown without budgrafting on their own root system,

which is also reputed to be highly vigorous (to avoid the risk of uprooting due to a weight imbalance between the root system and the aerial part), could be particularly suitable for mixed rubber and timber production.

There is therefore justification for continuing genetic studies of W x Am crosses and selection of the most suitable Am parents for recombination with the W group. Improvement of these parents could involve several recurrent selection cycles within each Amazon group, alternating evaluation by early selection with recombination in open pollination gardens. Panmixia deviation in such gardens is currently being estimated by genetic markers obtained by isozyme electrophoresis to determine whether the resulting progenies could be used genetically as half-sib families.

Selection

Three experimental designs are currently being used:

- the SET (seedling⁽³⁾ evaluation trial) planted at 4,000 trees/ha, is assessed at 2 years (photo 2). In this design, the trees come directly from seeds obtained by genetic recombination. Each genotype is therefore only represented by one tree. In theory, it is possible to carry out individual genotypic selection at this level, though precision is low. On the other hand, families can be assessed and ranked according to their production level, which is particularly useful for setting up the trials in the next phase (figure 8). After assessment, the genotypes of all the SETs are kept in a living collection and the SETs are then run as budwood gardens;

■ Box 2. Structure of the *Hevea* collection in Côte d'Ivoire

Categories	Number
Advanced collection (Wickham)	201
Basic population obtained from surveys (Am):	
IRRDB 1981 survey:	
group 1 : Acre, AC/T, AC/F districts	339
group 2 : other districts in Acre	684
group 3 : Rondonia and MT/VBA district	986
group 4 : other districts in Mato Grosso	827
Schultes population	341
CNSAM, MDF	42
non- <i>brasiliensis</i> species of <i>Hevea</i>	4
miscellaneous	153
Collections selected from the basic population:	
Core collection (maximum diversity)	300
Working collection (maximum productivity)	200
Introduced W x Am clones: GU, IAN, FX, MDX	45
Results of genetic recombination:	
genotypes created from 1974 to 1994 and distributed in 460 full-sib crosses	35 000
IRCA experimental clones, studied in large-scale clone trials	50

- the SSCT (small-scale clone trial), is a design adapted to early clonal selection. It is assessed at between 3 and 5 years, i.e. before the normal tapping age for most clones. Each genotype is represented by 2 to 3 plots of 3 to 4 budded trees in a design involving a single pair or factorial (family structure) crossing plan. Its dual objective is to assess the genetic parameters of the studied population and of the parents present (when the plan allows), and to estimate the inherent value of the clones by combined individual-family selection (Clément-Demange *et al.*, 1994). Depending on the production level expected, this design allows for two options:

- for high-potential crosses (e.g. W x W), the stand density is normal (500 trees/ha) and assessment is carried out at 4 years, with the possibility of continuing up to 8 years (age at which the competition between clones begins to add bias to the results). This design is mainly intended for clonal outputs,
- for limited-potential crosses, the stand density is high (2,000 trees/ha), and assessment is carried out at 3 years. This type of trial is geared towards choosing parents from the wild Amazon populations, on the basis of their inherent value or their combining ability with a few clones from the Wickham group used as testers. These trials are short and can be rapidly and easily recycled.

As the plots are small, the yields observed in the SSCT are yields per tree. Factors linked to the stand can only be roughly estimated

(2) Wickham clones are derived from a population harvested in Amazonia by Sir Henry Wickham and transferred to Asia in 1876.

(3) A seedling is obtained directly from seed, whereas a budding is obtained by grafting a bud onto a rootstock (vegetative propagation).

indirectly at this stage (e.g. latex diagnosis for tapping panel dryness);

- the LSCT (large-scale clone trial) is planted at normal density and assessed up to 15 or 20 years. Each genotype comprises 4 plots of at least 60 budgrafted trees. It is a clonal trial of long duration, with no family structure. The yield results are expressed in kg/ha/year or as cumulated production over a period of several years, values to which an economic profitability factor can be added, calculated by financial discounting of costs and products. The change in the number of tapped trees is monitored to make long-term production forecasts for the clones in the trial. The LSCT network enables regular updating of clone specification sheets and recommendations for their use (Clément-Demange and Kéli, 1993).

The designs become larger and the durations longer from the SET to the LSCT. The number of genetic units diminishes, but accuracy per unit increases, and a sufficiently reliable evaluation of the value of a clone can be obtained to consider planting it in a monoclonal planting approaching the size of a pre-commercial plot. The selection process is combined with the gradual multiplication of clones that make it through these three successive stages in collection budwood gardens, then distribution budwood gardens.

A general *Hevea* genetic improvement scheme is shown in figure 9.

Genetic control of *Microcyclus ulei*

Microcyclus ulei is the main obstacle to the development of rubber cultivation in Latin America (photo 3) and a very serious threat to Asia and Africa, continents which have so far remained free of this disease. Through its virulence and greatly variable pathogenicity, the fungus has so far managed to overcome all forms of total resistance set against it. There are therefore plans to develop sustainable forms of resistance to this pathogen.

A methodology has been drawn up to identify and evaluate the components of partial resistance, both in the field and under controlled conditions. Ten or so clonal characteristics have been discovered that reveal significant differences for different forms of the disease: duration of the latency period, number and size of lesions, sporulation intensity, formation of fertile stromata, leaf loss, etc. No one clone has

yet been seen to combine all or part of these partial resistance characteristics to a sufficient degree (Rivano, 1992). A genetic recombination programme has been launched to combine these resistance factors in certain clones with agronomic factors of value for development. In terms of methodology, this type of approach should also be beneficial for other programmes working on genetic disease control.

New tools, new methods

Of the various approaches explored in the 1980s, some have proved to be highly informative and effective as breeding aids. For example, latex diagnosis (Jacob *et al.*, 1995 b) is inseparable from early selection, since it estimates the responses of the clones studied to intensified tapping. Isozyme electrophoresis (Leconte *et al.*, 1994) has provided much of the knowledge available on the diversity of *Hevea* genetic resources. It is now an efficient quality control method and an investigation tool for studying open pollination. Ten years ago, these methods appeared too sophisticated, but they are now easily used and affordable in developing countries.

In vitro multiplication (Meunier, 1995) is concentrating on root system cloning, which would provide a means of genetically controlling *Fomes* and of obtaining whole clones without budding, thus benefitting from selection based on the whole tree, which is more efficient and bypasses poor rootstock-scion relations. It also opens up the way for genetic transformation.

The feasibility of *Hevea* selection assisted by molecular markers (search for QTL), is currently being examined. A linkage map is due to be published shortly for *Hevea* (Lespinasse, 1993).

Conclusion

Faced with increasingly diverse objectives, breeders are using both the conventional variety creation process, which has derived considerable benefits from the advances made in quantitative genetics methods and data processing possibilities, and the new tools of modern biology. However, on an international scale, rubber has only benefitted from a fairly modest research effort on the whole compared to other plants. So, in genetic improvement terms, guaranteeing the competitiveness of natural rubber will mean encouraging planting material exchanges and cooperation between partners.

■ Box 3. Abbreviations

AC/F:	Acre state, Feijo district
AC/T:	Acre state, Tarauca district
Am:	Amazon material
BPM:	Balai Penelitian Medan
CIRAD:	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNSA :	Centro Nacional de Seringueira Amazonas
FX:	Ford, obtained from crosses
GT:	Gondang Tapen Estate, East Central Java
GU:	Guatemala
IAN:	Instituto Agronómico do Norte
IOPG:	Isolated open pollination garden
IRCA:	Institut de recherches sur le caoutchouc
IRRDB:	International Rubber Research and Development Board
LSCT:	Large-scale clone trial
MDF:	Madre de Dios Firestone
MDX:	Madre de Dios, obtained from crosses
MT/VBA:	Mato Grosso state, Villa Buena district
PB:	Prang Besar Estate
PR:	Proefstation voor Rubber
QTL:	Quantitative Trait Loci
RFLP:	Restriction Fragment Length Polymorphism
SET:	Seedling evaluation trial
SSCT:	Small-scale clone trial
W:	Wickham material

Hevea breeders are aiming for high yields, but lower production costs, making maximum use of genetic resources by exploiting the biodiversity they themselves help to make more widely known. Their work is an integral part of environment-friendly viable and sustainable development. Lastly they help to improve farmers' living standards, which all goes to show that their work fits perfectly into the idea of what a «doubly green revolution» should be. ■

Résumé

La sélection de l'hévéa vise à améliorer le potentiel de production par arbre et la stabilité du peuplement de clones tolérants aux principales adversités, adaptés aux petites plantations, à de nouvelles zones agroclimatiques, voire même à la production de bois ou à la reconquête de terres dégradées. L'enrichissement des ressources génétiques par les prospections en Amazonie offre des perspectives intéressantes pour la création de matériel nouveau très vigoureux ou résistant aux maladies de feuilles. Malgré la faible fertilité femelle de l'hévéa, le choix des géniteurs dépend de l'estimation des paramètres génétiques et des valeurs en combinaison. La sélection privilégie des méthodes précoces auxquelles succèdent des tests clonaux de longue durée. La combinaison de facteurs de résistance partielle au *Microcyclus* apparaît très prometteuse. Aux méthodes de sélection classiques s'ajoutent aujourd'hui les outils nouveaux de la culture *in vitro* et de la biologie moléculaire.

Abstract

Hevea breeders seek to improve yields per tree and stability in a clone stand that is tolerant of the main adversities, adapted to smallholdings, to new agroclimatic zones, or even to timber production or the reclamation of deteriorated land. Germplasm enrichment following the surveys in Amazonia offers interesting prospects for the creation of new material that is very vigorous or resistant to leaf diseases. Despite the low female fertility of the rubber tree, parent choice depends on an estimation of genetic parameters and combining abilities. Breeders opt for early methods followed by clonal trials of long duration. Combining factors of partial resistance to *Microcyclus* seems to be very promising. New *in vitro* culture and molecular biology methods can now be added to the conventional breeding methods.

Resumen

La selección del hevea tiende a mejorar el potencial de producción por árbol y la estabilidad de la población de clones tolerantes a las principales adversidades, adaptados a las pequeñas plantaciones, a nuevas zonas agroclimáticas, inclusive a la producción de madera o a la reconquista de tierras deterioradas. El enriquecimiento de los recursos genéticos por medio de prospecciones en Amazonia ofrece interesantes perspectivas para la creación de material nuevo muy vigoroso o resistente a las enfermedades foliares. A pesar de la baja fertilidad femenina del hevea, la selección de los genitores depende de la evaluación de los parámetros genéticos y de los valores en combinación. La selección privilegia métodos precoces a los cuales suceden pruebas clonales de larga duración. La combinación de factores de resistencia parcial a *Microcyclus* aparece muy alentadora. A los métodos de selección clásica se añaden hoy día las nuevas herramientas del cultivo *in vitro* y de la biología molecular.