Samper M., 1999. Trayectoria y viabilidad de las caficulturas centroamericanas. *In* : *Desafios de la Caficultura en Centroamerica* (B. Bertrand, B. Rapidel, eds), Cirad-IICA, San José, Costa Rica, 1-68.

Sanchez P., 1995. Science in agroforestry. *Agrofor Syst*, 30, 5-55.

Soto G., Le Coq J.-F., 2011. Certification process in the coffee value chain: Achievements and limits to foster provision of environmental services. *In* : *Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry: Measurement and Payment* (B. Rapidel, F. DeClerck, J.F. Le Coq, J. Beer, eds), Earthscan, Londres, Royaume-Uni, 319-346.

Toniutti L., Breitler J.-C., Etienne H., Campa C., Doulbeau S., Urban L., Lambot C., Pinilla J.-C.H., Bertrand B., 2017. Influence of environmental conditions and genetic background of Arabica coffee (*C. arabica* L.) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*) pathogenesis. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2025.

Tulet J.-C., 2008. Le café, un marqueur identitaire en Amérique latine tropicale. *Café d'Outre-Mer*, 243, 243-262.

CHAPITRE 9

De nouvelles variétés pour des systèmes caféiers agroforestiers innovants

Benoit Bertrand, Jean-Christophe Breitler, Frédéric Georget, Éric Penot, Mélanie Bordeaux, Pierre Marraccini, Sophie Léran, Claudine Campa, Olivier Bonato, Luc Villain, Hervé Étienne

Dans l'industrie de l'amélioration des plantes (ce qu'on appelle aussi l'industrie semencière), le sélectionneur applique un cahier des charges issu d'une logique productiviste qui considère l'environnement comme un support de production et se préoccupe peu de la quantité d'intrants à apporter. Par ailleurs, cette industrie est absente des filières des plantes

pérennes tropicales (hévéa, cacaoyer, caféier, cocotier…) qui sont approvisionnées majoritairement par des petits producteurs peu solvables et donc peu intéressants économiquement. La création variétale et la production de semences sont parfois réalisées par des organisations professionnelles ou nationales. En conséquence, l'offre mondiale de nouvelles variétés dans ce secteur-là est extrêmement réduite et le progrès génétique très limité. Or dans un contexte de réchauffement climatique et de perte de la biodiversité, il est nécessaire de créer des variétés plus adaptées et de repenser les caractères cibles de la sélection pour les plantes pérennes tropicales.

Pour illustrer ce besoin de revisiter les cibles d'amélioration génétique dans un contexte de transition agro-écologique, nous présentons l'exemple des nouvelles variétés de caféiers adaptées aux systèmes agroforestiers.

Le caféier Arabica est majoritairement cultivé en Amérique centrale entre 600 et 1 200 m d'altitude, et au Pérou (proche de l'équateur) entre 1 000 et 1 500 m d'altitude. Dans ces régions, les caféiers sont cultivés très majoritairement en systèmes agroforestiers. Ceux-ci apportent de nombreux services écosystémiques, que ce soit pour la conservation de la biodiversité, le cycle de l'eau dans les bassins versants ou la séquestration de carbone. D'un point de vue socio-économique, la caféiculture est très demandeuse de main-d'œuvre et contribue à freiner l'exode rural et la migration illégale vers les États-Unis. La majorité des producteurs de ces zones accède difficilement au marché des cafés dits « spéciaux » mieux rémunérés.

Ce chapitre a pour objectif de montrer pourquoi des variétés productives et en « bonne santé » sont la pierre angulaire de la reconquête de la rentabilité de la caféiculture en Amérique centrale, andine et au Mexique, dans ces zones basses qui représentent plus de 90 % du café Arabica produit au Salvador, au Honduras ou au Nicaragua, 50-60 % au Costa Rica, environ 40 % au Guatemala, plus de 50 % dans le Chiapas au sud du Mexique, et plus de 80 % pour les zones de culture les plus septentrionales essentiellement localisées dans les États de Veracruz et Oaxaca.

Nous rappellerons brièvement quelles sont les contraintes et les défis de cette caféiculture pratiquée pour l'essentiel en systèmes agroforestiers. Nous décrirons ensuite les cibles de sélection dans le contexte de l'agroforesterie et les types de variétés les plus adaptées. Nous évoquerons comment produire, puis diffuser les variétés.

Les défis à relever

Une caféiculture peu durable

L'utilisation des pesticides dans l'agriculture, même raisonnée, a des conséquences sur l'environnement. Les effets sont nombreux car les molécules issues de la dégradation des produits agrochimiques épandus sont susceptibles de se retrouver non seulement dans les différents compartiments de l'environnement (air, eau, sédiments…) mais également dans les aliments. La caféiculture en plein soleil est une culture consommatrice d'intrants chimiques : engrais synthétiques, herbicides, fongicides et insecticides. Les agriculteurs sont directement exposés aux produits chimiques et les communautés environnantes sont également touchées par des résidus qui migrent facilement d'un compartiment à un autre et s'y stockent.

Le risque de la perte de la biodiversité

Actuellement, la perte de biodiversité, qui s'opère à une vitesse 1 000 fois plus élevée que la moyenne géologique, correspond à une sixième crise d'extinction massive depuis l'apparition de la vie sur Terre. Même si la disparition d'espèces fait partie du cours naturel de l'histoire de la Terre, l'activité humaine est responsable de cette accélération du rythme d'extinction. Selon la théorie de la biogéographie insulaire (MacArthur et Wilson, 1967), base des recherches en biologie de la conservation depuis 40 ans, la réduction d'un habitat disponible entraîne une perte proportionnelle du nombre d'espèces et inversement. En conséquence, un paysage agricole ayant un couvert arboré important abrite plus d'espèces forestières qu'un paysage sans arbre. Le lien entre culture du caféier et déforestation a été souligné par le WWF qui a montré que sur les 50 pays qui présentent les plus forts taux de déforestation, 37 sont des pays producteurs de café.

Des pressions parasitaires plus importantes

Dans les plantations de caféiers, les différents niveaux d'ombrage influencent l'ensemble de la fonctionnalité du réseau trophique *via* notamment l'intensité lumineuse et l'humidité relative. La pression des maladies et des ravageurs ainsi que l'impact des agents de lutte (microflore et faune) diffèrent selon le climat, l'altitude et la nature des sols (Staver *et al*., 2001). Par exemple avec le changement climatique, les épidémies de rouille (principale maladie des feuilles des caféiers) se multiplient et s'intensifient. Le réchauffement agit en effet à la fois sur le développement du champignon et sur l'état physiologique de la plante qui subit des stress environnementaux.

Une caféiculture peu rentable

Dans les zones montagneuses d'Amérique centrale, de Colombie et du Pérou, la caféiculture apparaît souvent comme la seule culture qui procure des revenus aux paysans. Même dans les endroits les plus éloignés, des réseaux de collecte du café vert ont été mis en place pour l'acheminer jusqu'à des centres de séchage et triage, puis vers les ports pour l'exporter à des torréfacteurs qui transforment le produit et le commercialisent.

Mais le producteur est dépendant d'un prix qui est fixé ailleurs. Il est conscient que les cours mondiaux sont volatils et que le café qu'il produit doit se différencier des cafés les moins chers. Il sait également que si les grands pays producteurs comme le Brésil ou le Vietnam — qui pratiquent des caféicultures intensives fortement consommatrices de pesticides et d'engrais — produisent trop, le prix mondial s'effondrera et le prix du marché ne couvrira pas ses dépenses. Dans ce contexte défavorable, le producteur peut rarement recourir aux crédits bancaires. En effet, pour les banques nationales, la volatilité des cours, les épidémies récurrentes comme les différentes crises de la rouille depuis 2008 (McCook et Vandermeer, 2015 ; Avelino *et al*., 2015), les risques liés au changement climatique, la faiblesse des garanties présentées par les producteurs font de la caféiculture un secteur à risques. Tout ce qu'elles proposent aux producteurs relèvent ainsi de crédits usuriers (entre 12 et 20 % par an).

Par ailleurs, dans beaucoup de pays producteurs (à l'exception notable de la Colombie où la fédération des *Cafeteros* structure puissamment la filière), et dans une moindre mesure au Honduras et au Costa Rica, l'État ne joue pas son rôle de régulation au travers du crédit et du conseil

agricole, de la fourniture de semences, de la recherche et de l'innovation. Les impôts collectés à l'exportation ne sont réinvestis que partiellement dans la filière de production. S'agissant des variétés, l'absence de secteur semencier structuré aboutit à une production de semences et de plants de mauvaise qualité, tant génétique qu'horticole. La propagation de hors-types est fréquente et a un impact négatif sur la productivité. Pour au moins 40 pays, l'innovation en termes de création variétale repose sur les efforts consentis dans d'autres pays (Brésil, Colombie). L'importation de semences venant de ces pays est rarement facilitée par les autorités nationales. L'introduction des variétés se fait parfois de façon illégale avec une traçabilité très insuffisante.

La création de variétés adaptées à l'agroforesterie

Les systèmes agroforestiers correctement conduits exploitent des synergies biologiques et économiques, débouchant sur une gestion durable des terres et la création de revenus locaux stables pour les parties prenantes (essentiellement des petits agriculteurs). Il est attendu que la culture dans des systèmes ombragés, tels que les systèmes agroforestiers, réduise la dépendance à des intrants extérieurs. Malheureusement, la productivité des systèmes agroforestiers à base de caféiers est moindre de 30 % par rapport aux systèmes plein soleil (Vaast *et al*., 2005). Une des raisons à cela est qu'on y cultive des variétés sélectionnées pour les systèmes intensifs et de plein soleil, et par conséquent non adaptées aux systèmes agroforestiers (Bertrand *et al*., 2011 ; Van der Vossen *et al*., 2015). L'amélioration variétale pour les systèmes intensifs a ainsi mis dans les mains des producteurs des variétés non adaptées à l'ombrage alors que le caféier Arabica est une espèce naturellement tolérante à l'ombrage et donc aux systèmes agroforestiers.

Le projet *Breedcafs*

Les solutions que nous allons décrire sont actuellement à l'étude dans le cadre d'un projet européen H2020 (2017-2021) appelé *Breedcafs* (*BREEDding Coffee for Agroforestry Systems*)[29]. Son objectif est d'établir une nouvelle stratégie de sélection pour créer des variétés de caféier plus résistantes et plus résilientes aux changements climatiques

dans les systèmes agroforestiers. Ici, le caféier est considéré comme une culture pérenne modèle ; la plupart des résultats attendus et l'expérience acquise sur le caféier serviront de base à l'amélioration d'autres cultures pérennes tropicales telles que le cacaoyer.

Utilisant les nouveaux hybrides F_1 d'Arabica comme cas d'étude, le projet *Breedcafs* conçoit et teste des variétés de caféiers mieux adaptées à un faible niveau d'intrants, aux systèmes agroforestiers et au changement climatique, en maintenant un système de défense robuste face aux stress biotique et abiotique.

Le projet organise de nombreux dispositifs comparant des hybrides à des variétés cultivées et/ou des hybrides à leurs deux parents dans différents scénarios qui miment le réchauffement climatique (hausse du CO_2, hausse du régime thermique, avec ou sans ombrage, etc.) que ce soit en phytotrons en conditions contrôlées (température, lumière, sécheresse, CO_2, N_2), en essais au champ, ou encore dans des réseaux de parcelles chez des producteurs. Il est en place dans huit pays : Nicaragua, Costa Rica, France (en Guyane française et en serre à Montpellier), Cameroun, Salvador, Vietnam, Portugal et Danemark. Les torréfacteurs sont impliqués dans le processus d'amélioration à travers l'évaluation de la qualité de la boisson et les producteurs sont impliqués dans les mesures au champ. L'avis des producteurs et des torréfacteurs est pris en compte grâce à des plateformes de dialogue mises en place au Vietnam, au Nicaragua et au Cameroun.

Les types de variétés pour l'agroforesterie : hybrides *vs* lignées

Coffea arabica a été introduit en Amérique latine à partir d'un très faible nombre de plantes, ce qui a conduit à un goulot d'étranglement (Anthony *et al*., 2002). Cependant, cette faible diversité génétique initiale a donné naissance à des variétés adaptées au plein soleil qui ont permis l'adoption de systèmes de culture intensifs, essentiellement au Brésil, en Colombie et au Costa Rica. Toutefois, la combinaison de ces variétés avec des cultures haute densité (souvent mécanisées) et des méthodes de contrôle des maladies systématiques n'a jamais été adoptée dans le reste de l'Amérique latine et en Afrique. Dans ces régions, les caféiers continuent à être cultivés sous ombrage sans amélioration technologique majeure, et on

assiste à une stagnation voire une baisse des rendements.

En 1990, le Cirad et ses partenaires de recherche publics et privés (Catie[30], Icafé[31], Ecom Trading[32]) ont créé des variétés hybrides qui se sont avérées adaptées aux systèmes agroforestiers, en utilisant un procédé de sélection basé sur le croisement de variétés lignées américaines et d'individus sauvages d'Éthiopie et du Soudan (photo 9.1) phylogénétiquement distants (Van der Vossen *et al*., 2015). Il a été ainsi possible d'obtenir des hybrides permettant des augmentations de production de 30-60 % sous des systèmes agroforestiers sans accroissement de fertilisants (Bertrand *et al*., 2011) et une amélioration de la qualité aromatique (Bertrand *et al*., 2006). Les temps de sélection des hybrides F_1 significativement plus courts que ceux des variétés lignées conventionnelles (8 *vs* 25 ans) sont aussi un argument en leur faveur.

Photo 9.1. Hybrides F_1 de *Coffea arabica* plantés en systèmes agroforestiers (Matagalpa, Nicaragua). © Benoît Bertrand / Cirad.

L'étude des réponses des hybrides F_1 aux stress multiples (photo 9.2) a permis de mieux comprendre comment l'hétérosis (*i.e.* la vigueur hybride)

se manifeste en réponse aux contraintes de l'environnement. Sous ombrage, l'efficacité photosynthétique des hybrides est non seulement supérieure à celle des variétés lignées, mais elle est surtout beaucoup plus stable et plus forte (c'est ce qu'on appelle l'homéostasie) en conditions de stress abiotiques multiples (Toniutti *et al*., 2017). Or l'homéostasie est une des composantes majeures de l'hétérosis chez les plantes améliorées et chez l'Arabica en particulier (Bertrand *et al*., 2011, 2015).

Les plantes présentant des niveaux de résistance aux stress proportionnels à la quantité d'énergie dont elles disposent pour y faire face (Kangasjärvi *et al*., 2012 ; Ballaré, 2014), il est logique que les hybrides présentent une meilleure résistance aux stress. La mesure de la fluorescence de la chlorophylle (a), en donnant accès au fonctionnement du Photosystème II et à la chaîne de transport d'électrons, s'est révélée un excellent marqueur de l'état de santé des caféiers et capable de prédire leur capacité à résister à la rouille. À l'inverse, plus l'efficacité photosynthétique est affectée, plus le stress oxydatif augmente. C'est ce qu'on observe chez les variétés lignées qui sont moins adaptées aux contraintes de l'environnement (Toniutti *et al*., 2017).

Photo 9.2. Mesures de photosynthèse sur des variétés hybrides de *Coffea arabica* cultivées sous ombrage simulant les conditions d'agroforesterie (Teocelo, État de Veracruz, Mexique). © Luc Villain / Cirad.

Jusqu'au projet *Breedcafs*, l'adaptation aux futures contraintes climatiques

et aux faibles intensités lumineuses caractéristiques des systèmes agroforestiers n'avait jamais cependant vraiment été un objectif de sélection. On s'est contenté jusqu'ici de profiter de l'homéostasie des hybrides pour les cultiver en agroforesterie (fig. 9.1). Des progrès importants pour l'adaptation des hybrides d'Arabica aux systèmes agroforestiers et aux stress biotiques et abiotiques dans ces agrosystèmes semblent d'autant plus atteignables que l'on s'appuie aujourd'hui sur les nouveaux outils (génomique, transcriptomique, métabolomique) et sur la séquence du génome (Denœud *et al*., 2014).

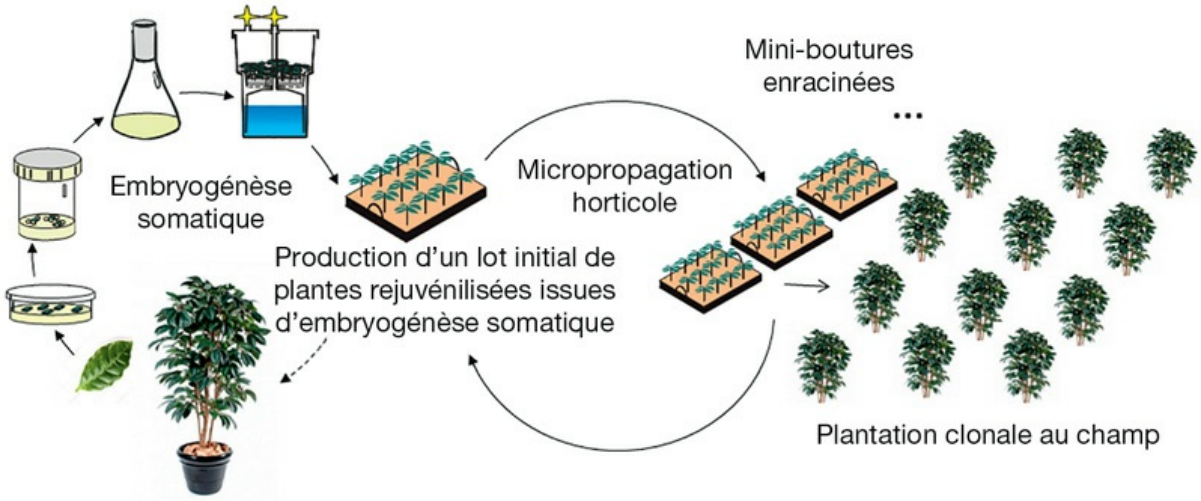

Figure 9.1. Comment les hybrides sont propagés végétativement.

Histoire	Programmes	Sélection des hybrides F_1	Matériel, étapes de sélection	Cibles de sélection	Résultat attendu
1990-2017	Programmes IICA-Cirad-Catie-Promecafe, Cirad-Ecom	Sélection phénotypique sur les hybrides F_1	Variétés américaines × éthiopiennes (sauvages ou cultivars traditionnels)	Résistance à la rouille, qualité à la tasse, forte productivité	
2017-2021	*Breedcafs*, Projet H2020, Union européenne	Sélection assistée des hybrides F_1 avec des biomarqueurs	Identification de marqueurs robustes (allélique, épigénétique, métabolique, moléculaire) pour la prédiction des géniteurs et l'évaluation précoce des hybrides F_1	Adaptation aux systèmes agroforestiers et au changement climatique, résistance aux maladies, qualité à la tasse et forte productivité	Prédicteurs précoces de performances des hybrides F_1
			Validation des marqueurs avec une large population d'hybrides et de parents cultivés en systèmes agroforestiers		Prédiction des meilleurs parents au sein d'un large panel de génotypes
2019 -	Nouvelle gouvernance internationale à déterminer (partenaires privés et publics)	Sélection basée sur de nouveaux outils « omiques » permettant la prédiction de l'hétérosis et de l'adaptation à l'agroforesterie	Évaluation et sélection d'hybrides F_1 *Breedcafs* BREEDCAFS	Adaptés aux systèmes agroforestiers et aux changements climatiques	Diffusion mondiale et accessible à tous les planteurs. Variétés adaptées à l'agroforesterie et au changement climatique

Figure 9.2. Vers une nouvelle stratégie de sélection pour les hybrides F_1 d'Arabica.

Figure 9.3. Mise en place d'un procédé de propagation végétative horticole par mini-boutures enracinées à partir de plantules rejuvénilisées issues d'embryogenèse somatiques.

a : plantes rejuvénilisées de 15 semaines obtenues par embryogenèse somatique et plantées dans des boîtes de plastique
b : boutures de plantules issues d'embryogenèse somatique

c : plantation des mini-boutures en plaques alvéolées
d : mini-boutures enracinées obtenues après 6 semaines d'acclimatation en serre
e : mini-boutures enracinées de 8 semaines avec mottes de substrat horticole
f : mini-boutures enracinées de 8 semaines à racines nues
g : mini-boutures enracinées après 3 mois d'endurcissement en pépinière
h : mini-boutures enracinées après 6 mois de pépinière et prêtes pour un transfert au champ.

La figure 9.2 montre schématiquement les changements proposés par le projet H2020 *Breedcafs* durant le processus de sélection des hybrides. L'objectif est d'évoluer d'une sélection phénotypique vers une sélection sur le génome. L'Arabica est une espèce polyploïde avec une diversité génétique réduite. *Breedcafs* propose des logiciels pour l'analyse des polymorphismes des espèces polyploïdes. Ces logiciels vont être utilisés pour la détection des marqueurs mais seront également facilement adaptables pour l'analyse des données épigénétiques. Les variations dans les marqueurs (épi-)génétiques entre des hybrides F_1 réciproques et leurs parents cultivés dans des conditions environnementales variées sont recherchées et reliées aux idéotypes identifiés dans les essais expérimentaux et au champ. Ces données sont utilisées pour prédire les interactions génotype-phénotype-environnement pour des traits attendus complexes.

Améliorer les outils et les méthodes de sélection

Le but de *Breedcafs* est de passer d'une sélection exclusivement phénotypique des hybrides à une sélection assistée par les outils de la génomique et de la transcriptomique (fig. 9.3).

Encadré 9.1. L'approche transcriptomique de la sélection du caféier

L'environnement est utilisé comme une source de variation pour identifier des corrélations entre l'expression des gènes et les caractéristiques de croissance (QTT ou *Quantitative Traits Transcripts*) liées à l'adaptation à l'ombrage. L'utilisation des variations environnementales pour identifier des QTT a été proposée par Passador-Gurgel *et al.* (2007), dans le cas de la résistance de la drosophile à la nicotine, et appliquée par Joët *et al.* (2009) pour déterminer l'accumulation d'acides chlorogéniques dans la graine de caféier. Cette méthode se base sur le principe que l'environnement est un facteur puissant qui module les niveaux d'expression des gènes et qui de ce fait permet la

détection des QTT corrélés au caractère mesuré. Cette approche est adaptée à une plante allopolyploïde présentant peu de polymorphisme.

À l'aide d'approches transcriptomiques et transgéniques, des gènes candidats impliqués dans la tolérance à la sécheresse chez *Coffea canephora* et *C. arabica* ont été identifiés (Marraccini *et al*., 2012 ; Mofatto *et al*., 2016 ; Alves *et al*., 2017, 2018). En couplant les approches phénotypiques, écophysiologiques, transcriptomiques et biochimiques, la mise en évidence des voies biosynthétiques surexprimées ou sous-exprimées lors des phénomènes d'adaptation (gènes du métabolisme primaire ou secondaire, photosynthèse, photoprotection, composés volatiles du café vert) permettra de révéler les gènes marqueurs pouvant être utilisés dans la sélection. Par ailleurs, une approche plus classique portant sur la recherche d'outils de sélection génomique est également mise en œuvre.

L'adoption des variétés par les producteurs

Dans une filière caractérisée par un fort conservatisme, quelles sont les raisons qui poussent les producteurs à l'adoption de nouvelles variétés ?

L'augmentation de la productivité peut être une motivation car elle est nécessaire dans les systèmes agroforestiers. On a besoin pour cela de variétés plus productives et différentes de celles qui sont actuellement utilisées. On assiste ainsi depuis moins d'une dizaine d'années à un changement variétal massif. Ce changement s'est opéré dans le contexte de la grande crise de la rouille (McCook et Vandermeer, 2015), en valorisant des variétés lignées introgressées appelées 'Catimors', 'Sarchimors' ou 'Castillo', qui sont réputées durablement résistantes à la rouille orangée. Malheureusement, on assiste à un contournement important de la résistance à la rouille de ces variétés. Or la recherche de nouveaux gènes de résistance n'a pas donné de résultats depuis de nombreuses années, sauf en Colombie. Dans très peu d'années, il ne restera donc que deux choix aux producteurs : soit utiliser un parapluie phytosanitaire systématique à base de fongicides dangereux pour l'environnement ; soit recourir à une solution intermédiaire en plantant des variétés hybrides, également sensibles mais plus tolérantes, plus résilientes (Toniutti, 2018). Sur ces variétés hybrides sensibles, les épidémies de rouille peuvent être contrôlées avec des traitements cupriques (autorisés en agriculture

biologique).

Pour accompagner le renouvellement des plantations de caféiers avec des variétés hybrides, il faut que des conditions soient réunies. Nous les passons en revue.

Organisation et garanties d'une filière de semences

Une fois qu'une variété de caféier a été créée par les sélectionneurs, il faut pouvoir la multiplier à grande échelle de façon conforme et la distribuer à bon marché auprès des producteurs (Bertrand *et al*., 2012 ; fig. 9.4).

Au Costa Rica, au Honduras, en Colombie et au Brésil par exemple, des organismes d'État ou des coopératives distribuent des semences (graines) de variétés lignées de très bonne qualité germinative et d'une pureté variétale proche de 90-95 %, à un coût subventionné de 8 $ US/kg, soit environ 15 $ US/ha.

Dans les autres pays, les caféiculteurs se tournent vers des producteurs de semences non certifiés, ce qui leur fait courir un certain nombre de risques quant à la pureté variétale (semences très hétérogènes dues à des mélanges et à des pollinisations croisées), à la capacité de germination très variable selon les lots, à la productivité et à la qualité du café qui parfois peuvent être bien inférieures au standard.

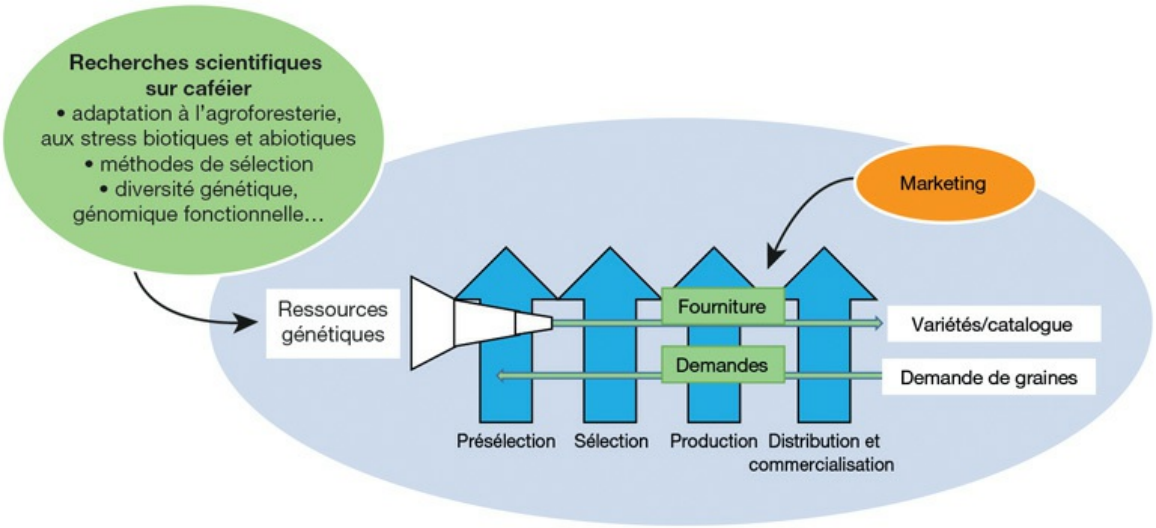

Figure 9.4. Processus de création variétale chez *Coffea arabica* pour l'adaptation à l'agroforesterie et aux changements

climatiques.

Il se décompose schématiquement en recherche en science végétale, conservation et utilisation des ressources génétiques, suivie des étapes de présélection, de sélection (avec une étape nécessaire de validation multi-locale), de production des semences et de leur marketing.

Le pari du projet *Breedcafs* est que dans un contexte de changement climatique, les meilleures variétés pour les systèmes agroforestiers sont des hybrides F_1. Or la diffusion des clones F_1 pose des problèmes inédits à la fois commerciaux et logistiques. Il faut en effet que ces variétés qui sont reproduites par multiplication végétative (et pas par graines) soient livrées sous la forme de plantes développées, à des coûts les plus faibles possibles, aux petits producteurs qui vivent souvent dans des zones éloignées et montagneuses.

En ce qui concerne les clones d'hybrides F_1, le manque d'une filière semencière (décrit plus haut) est encore plus grave puisqu'aucune structure étatique ou privée (à l'exception de l'alliance Cirad/Ecom sur Arabica) ne diffuse à l'heure actuelle ces nouvelles variétés. Il faut ajouter que, jusqu'à tout récemment, les coûts de production d'un plant hybride F_1 prêt à être planté (0,70-0,80 $ US) étaient bien supérieurs aux coûts de production des plants de variétés issues de semences (0,15-0,20 $ US), ce qui a limité fortement leur diffusion.

Pour résumer, la diffusion des hybrides F_1 se heurte à quatre difficultés majeures :
– un coût trop élevé du plant ;
– des problèmes de logistique pour atteindre les petits producteurs ;
– un besoin de certification de la filière de production de plants ;
– la non-solvabilité des petits producteurs.

Des solutions horticoles pour baisser le coût de la semence F_1

L'idée générale est de professionnaliser le secteur semencier du caféier chargé de multiplier des clones d'hybrides F_1 en les produisant en grandes quantités (plusieurs dizaines de millions par an), 100 % traçables, avec une excellente qualité horticole et selon un itinéraire technique bien défini

(serres hautement technicisées et pépinières certifiées avec utilisation de substrat inerte).

L'alliance Cirad/Ecom produit chaque année quelques centaines de milliers de plants hybrides F_1 à partir de la technique de l'embryogénèse somatique (Etienne *et al*., 2012, 2016 ; Bobadilla-Landey *et al*., 2013). La mise au point récente de la propagation par mini-bouturage (Georget *et al*., 2017) a permis d'augmenter le nombre de plants produits à partir d'un embryon somatique (taux supérieur à 10) et donc de diviser par deux le coût de production d'une plante hybride par rapport à une plante directement issue d'embryon somatique. L'alliance Cirad/Ecom ayant montré la voie avec ce concept de production, nous pensons que cette technologie de production des plants hybrides F_1 peut être prise en charge par des industriels de l'horticulture, comme c'est le cas pour d'autres plantes (plantes ornementales, arbres fruitiers, arbres forestiers, etc.). Cela permet d'offrir des plantes à des prix compétitifs (0,4 à 0,50 $ US/plante), compte tenu de la haute productivité de ces clones.

Des coopératives de semences pour les zones éloignées

Lorsque l'éloignement rend l'industrialisation impossible, nous avons mis au point la technique de mini-bouturage en milieu paysan. En nous inspirant des réseaux de semences paysannes (*farmers seed systems*), qui sont surtout adaptés à la reproduction par graines, nous avons mis en place des réseaux de coopératives de semences. La technique horticole de mini-boutures enracinées est ainsi transférée à des coopératives de femmes afin de :
– réduire les coûts de production des mini-boutures ;
– réduire les inégalités entre hommes et femmes ;
– populariser l'accès aux hybrides F_1 et leur utilisation.

Cette expérience a été mise en place, dans le cadre du projet *Breedcafs*, dans trois contextes très différents : ceux du Vietnam, du Cameroun et du Nicaragua.

À partir d'une petite quantité d'explants initiaux provenant d'un producteur de semences certifiées et renouvelée chaque année, les coopératives de femmes s'engagent à reproduire et commercialiser des

mini-boutures qu'elles distribuent ensuite aux producteurs de la zone. Les coopératives s'engagent aussi à reverser chaque année une redevance qui reconnaît le droit de l'obtenteur.

La certification des semences : une garantie pour l'industrie

Ce processus a été initié depuis 2003 par l'alliance Cirad/Ecom au Nicaragua, au Mexique et au Costa Rica. L'industrie a bien compris l'intérêt de cette démarche et a créé et financé, depuis 2015, le World Coffee Research (WCR). Des programmes de vérification des variétés et des pépinières de production ont été mis en place, comme le programme *WCR Verified*. Celui-ci constitue la première norme mondiale pour les plants de caféier pour vérifier que les producteurs de semences de caféier ou de clones d'hybrides F_1 et les pépinières associées produisent des plantes saines et génétiquement pures.

Un prix juste pour un approvisionnement garanti en quantité et en qualité

En situation de crise des prix, ou en situation de coûts de production trop élevés, lorsque les termes de l'échange sont trop inégaux, les petits producteurs adoptent des stratégies de non-investissement qui ont des répercussions importantes et durables en termes de rendement et de qualité. Parallèlement, les producteurs de taille moyenne qui ont accès à des crédits bancaires usuriers sont ruinés et abandonnent parfois leurs fermes. Ainsi, l'instabilité des termes de l'échange, la volatilité des prix et la faible productivité nuisent à la modernisation de la filière et contribuent à sa perte de compétitivité. L'ensemble de la chaîne de valeur est finalement impacté. Le meilleur exemple est sans doute celui du Mexique, économie de premier plan mais dont la filière café, essentiellement en systèmes agroforestiers, est sans doute l'une des moins productives et des moins rentables du monde.

La solution du *fair trade* a été appliquée avec succès aux petits caféiculteurs du Mexique (Van der Hoff, 2010). Cette solution a ensuite été reprise pour de nombreuses denrées dans le monde. Mais il est

maintenant acquis — malgré des impacts non négligeables sur le niveau de vie des producteurs — que le *fair trade* ne suffit pas pour une modernisation en profondeur de la caféiculture. De plus, cette solution est réservée aux petits producteurs (moins de 5 ha). Nous pensons que le véritable enjeu est d'augmenter la rentabilité des exploitations. Cela passe par une augmentation de la productivité par hectare mais également par une meilleure valorisation du produit.

L'innovation variétale pour assurer la rentabilité des systèmes caféiers agroforestiers

La variété, un outil de traçabilité et de différenciation

La base du concept est que la variété et le café qu'elle produit deviennent un outil de traçabilité et un instrument de différenciation par sa relative nouveauté. En effet, comme il existe très peu de variétés[33], toute nouvelle variété apporte non seulement des nouvelles caractéristiques de résistance, de productivité, de qualité à la tasse, mais également un patrimoine génétique unique que les techniques modernes de marquage génétique sont capables de révéler non seulement dans le café vert mais également dans le café torréfié (Morel *et al*., 2012). La possibilité de tracer le produit tout au long de la filière, jusqu'y compris dans le café torréfié, est un instrument unique pour garantir l'origine, les pratiques et, éventuellement, maintenir la rareté du produit qui lui assurera une demande de la part des acheteurs soucieux d'apporter de la nouveauté aux consommateurs.

Le *cluster* agroforestier *Business driven* : une nouvelle approche intégrative

L'idée générale est de favoriser la création des *clusters*. Un *cluster* est un groupement de producteurs qui s'associent sur un territoire donné pour produire selon des normes environnementales et agronomiques un café 100 % traçable. La qualité et la quantité sont fixées en fonction des besoins de l'industriel, qui en retour s'engage sur un prix minimum. Les *clusters* agroforestiers imposent un cahier des charges strict concernant la

plantation d'arbres d'ombrage (nombre, diversité par hectare), avec des services environnementaux associés, sur un terroir déterminé, en favorisant au maximum le commerce direct (*direct trading*) pour offrir un produit consistant et correspondant aux normes demandées en bout de chaîne par le torréfacteur industriel qui commercialise le produit selon ses standards de très haute qualité. L'ensemble des pratiques écoresponsables, le terroir, les pratiques d'un commerce plus équitable, et les qualités sensorielles propres à la variété et éventuellement accrues par le traitement post-récolte aboutissent à créer un café de haute qualité et différent.

Le *cluster* agroforestier *Business driven*, c'est donc : un terroir + des pratiques agroforestières (certifiées *Utz* et/ou *Rainforest*) + une transformation maîtrisée + une certification + 100 % de traçabilité.

Un prototype de 1 350 ha[34] a été mis en place au Nicaragua autour de la variété 'Marsellesa' (variété Cirad-Ecom) pour produire un café d'exception exploité par l'industrie (Nespresso). Le concept est applicable à d'autres pays. Ce modèle a vocation à être répliqué à l'échelle de nouveaux terroirs, pour des projets de 1 000 à 2 000 ha environ et une production minimale annuelle de 2 500 tonnes de café, quantité minimale nécessaire pour justifier les investissements.

Perspectives

Le développement de systèmes agroforestiers durables et rentables chez le caféier passe par la sélection et l'adoption par les planteurs de nouvelles variétés hybrides d'Arabica adaptées aux conditions de faible luminosité caractéristiques de l'agroforesterie. Cela suppose de mieux comprendre les mécanismes moléculaires à la base d'une meilleure adaptation à l'ombrage, afin de redéfinir les cibles de sélection, mais également de créer des outils et des méthodes spécifiques. L'exemple de l'Arabica doit servir à d'autres filières pour proposer des variétés mieux adaptées à l'agro-écologie. C'est le cas de la majorité des plantes pérennes tropicales. Or, du fait des défis climatiques et épidémiques à venir, mais aussi pour se différencier et pour préserver la biodiversité, il faut non seulement créer continuellement de nouvelles variétés mais également les produire, les commercialiser et les faire adopter par les producteurs et par l'industrie.

Pour le café, les chercheurs, les industriels et les producteurs ont

collectivement commencé à trouver des solutions. Elles sont encore imparfaites mais représentent un progrès significatif. Il reste finalement à proposer des règles de gouvernance dans la filière café qui respectent les droits des pays propriétaires des ressources génétiques (notamment l'Éthiopie, la République de Côte-d'Ivoire, la République centrafricaine, le Gabon, le Cameroun, l'Angola, la République du Congo).

Le projet *Breedcafs* a aussi pour objectif d'étudier les conditions de l'émergence d'une industrie semencière pour les systèmes agroforestiers à base de caféiers, tout en proposant des règles d'éthique et de gouvernance commune pour la conservation et l'accès aux ressources génétiques, la création et la diffusion des variétés. L'exemple d'une recherche de gouvernance globale devrait inspirer des initiatives similaires sur d'autres espèces pérennes tropicales.

Références

Alves G.S.C., Torres L.F., Déchamp E., Breitler J.-C., Joët T., Gatineau F., Carvalho Andrade A., Bertrand B., Marraccini P., Etienne H., 2017. Differential fine-tuning of gene expression regulation in coffee leaves by CcDREB1D promoter haplotypes under water deficit. *J. Exp. Bot.*, 68 (11), 3017-3031, https://doi.org/10.1093/jxb/erx166.

Alves G.S.C., Ferreira Torres L., de Aquino S.O., Reichel T., Perreira Freire L., Gomes Vieira N., Vinecky F., This D., Pot D., Etienne H., Vilela Paiva L., Marraccini P., Carvalho Andrade A., 2018. Nucleotide diversity of the coding and promoter regions of DREB1D: A candidate gene for drought tolerance in *Coffea* Species. *Tropical Plant Biology*, 11 (1-2), 31-38, https://doi.org/10.1007/s12042-018-9199-x.

Anthony F., Combes C., Astorga C., Bertrand B., Graziosi G., Lashermes P., 2002. The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Theor. Appl. Genet.*, 104 (5), 894-900.

Avelino J., Cristancho M., Georgiou S., Imbach P., Aguilar L., Bornemann G., Läderach P., Anzueto F., Hruska A.J., Morales C., 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7 (2), 303-321, https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9.

Ballaré C.L., 2014. Light regulation of plant defense. *Ann. Rev. Plant Biol.*, 65 (1), 335-363, https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040145.

Bertrand B., Alpizar E., Lara L., Santacreo R., Hidalgo M., Quijano J.M., Montagnon C., Georget F., Etienne H., 2011. Performance of *Coffea arabica* F_1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars. *Euphytica*, 181 (2), 147-158.

Bertrand B., Bardil A., Baraille H., Dussert S., Doulbeau S., Dubois E., Severac D., Dereeper A., Etienne H., 2015. The greater phenotypic homeostasis of the allopolyploid *Coffea arabica* improved the transcriptional homeostasis over that of both diploid parents. *Plant Cell Physiol.*, 56 (10), 2035-2051, https://doi.org/10.1093/pcp/pcv117.

Bertrand B., Montagnon C., Charmetant P., Georget F., Etienne H., 2012. Création et diffusion de variétés de caféiers Arabica : Quelles innovations variétales ? *Cah. Agric.*, 21, 77-88, https://doi.org/10.1684/agr.2012.0547.

Bertrand B., Vaast P., Alpizar E., Etienne H., Davrieux F., Charmetant P., 2006. Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America. *Tree Physiol.*, 26 (9), 1239-1248, http://dx.doi.org/10.1093/treephys/26.9.1239.

Bobadilla Landey R., Cenci A., Georget F., Bertrand B., Camayo G., Dechamp E., Simpson J., Herrera J.C., Santoni S., Lashermes P., Etienne H., 2013. High genetic and epigenetic stability in *Coffea arabica* plants derived from embryogenic suspensions and secondary embryogenesis as revealed by AFLP, MSAP and the phenotypic variation rate. *PloS ONE*, 8 (2), e56372. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056372.

Denœud F., Carretero-Paulet L., Dereeper A., Droc G., Guyot R., Pietrella M., Zheng C., Alberti A., Anthony F., Aprea G., Aury J.M., Bento P., Bernard M., Bocs S., Campa C., Cenci A., Combes M.C., Crouzillat D., Da Silva C., Daddiego L., De Bellis F., Dussert S5, Garsmeur O., Gayraud T., Guignon V., Jahn K., Jamilloux V., Joët T., Labadie K., Lan T., Leclercq J., Lepelley M., Leroy T., Li LT., Librado P., Lopez L., Muñoz

A., Noel B., Pallavicini A., Perrotta G., Poncet V., Pot D., Priyono., Rigoreau M., Rouard M., Rozas J., Tranchant-Dubreuil C., VanBuren R., Zhang Q., Andrade AC., Argout X., Bertrand B., de Kochko A., Graziosi G., Henry R.J., Jayarama., Ming R., Nagai C., Rounsley S., Sankoff D., Giuliano G., Albert V.A., Wincker P., Lashermes P., 2014. The coffee genome provides insight into the convergent evolution of caffeine biosynthesis. *Science*, 345, 1181-1184.

Etienne H., Bertrand B., Dechamp E., Maurel P., Georget F., Guyot R., Breitler J.C., 2016. Are genetic and epigenetic instabilities of plant embryogenic cells a fatality? The experience of coffee somatic embryogenesis. *Human Genet Embryol.*, 6, 136, http://dx.doi.org/10.4172/2161-0436.1000136.

Etienne H., Bertrand B., Montagnon C., Bobadilla Landey R., Dechamp E., Jourdan I., Alpizar E., Malo E., Georget F., 2012. Un exemple de transfert technologique réussi en micropropagation : La multiplication de *Coffea arabica* par embryogenèse somatique. *Cahiers agricultures*, 21,115-124.

Georget F., Courtel P., Garcia E.M., Hidalgo M., Alpizar E., Breitler J.C., Bertrand B., Etienne H., 2017. Somatic embryogenesis-derived coffee plantlets can be efficiently propagated by horticultural rooted mini-cuttings: A boost for somatic embryogenesis. *Sci. Horticult.*, 216, 177-185, http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.12.017.

Joët T., Laffargue A., Salmona J., Doulbeau S., Descroix F., Bertrand B., de Kochko A., Dussert S., 2009. Metabolic pathways in tropical dicotyledonous albuminous seeds: *Coffea arabica* as a case study. *New Phytol.*, 182 (1), 146-162, https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02742.x.

Kangasjärvi S., Neukermans J., Li S., Aro E.M., Noctor G., 2012. Photosynthesis, photorespiration, and light signalling in defence responses. *J. Exp. Bot.*, 63 (4), 1619-1636, https://doi.org/10.1093/jxb/err402.

Marraccini P., Vinecky F., Alves G.S.C., Ramos H.J.O., Elbelt S., Vieira N.G., Carneiro FA., Sujii P.S., Alekcevetch J.C., Silva V.A., DaMatta F.M., Ferrão M.A.G., Leroy T., Pot D., Vieira L.G.E., da Silva F.R., Andrade A.C., 2012. Differentially expressed genes and proteins upon drought acclimation in tolerant and sensitive genotypes of *Coffea*

canephora. *J. Exp. Bot*., 63 (11), 4191-4212, https://doi.org/10.1093/jxb/ers103.

MacArthur R.H., Wilson O., 1967. *The Theory of Island Biogeography*, Princeton Univ. Press, Princeton, États-Unis, 203 p.

McCook S., Vandermeer J., 2015. The Big Rust and the Red Queen: Long-term perspectives on coffee rust research (review). *Phytopathol*., 105, 1164-1173. https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0085-RVW.

Mofatto L.S., Carneiro F.A., Vieira N.G., Duarte K.E., Vidal R.O., Alekcevetch J.C., Guitton M.G., Verdeil J.L., Lapeyre-Montes F., Lartaud M., Leroy T., De Bellis F., Pot D., Rodrigues G.C., Carazzolle M.F., Pereira G.A.G., Andrade A.C., Marraccini P., 2016. Identification of candidate genes for drought tolerance in coffee by high-throughput sequencing in the shoot apex of different *Coffea arabica* cultivars. *BMC Plant Biol*., 16, 94.

Morel E., Bellanger L., Lefebvre-Pautigny F., Lambot C., Crouzillat D., 2012. DNA traceability for variety purity in Nespresso product. *In* : *24th International Conference on Coffee and Science*, Association for Science and Information on Coffee (Asic), Costa Rica.

Passador-Gurgel G., Hsieh W.P., Hunt P., Deighton N., Gibson G., 2007. Quantitative trait transcripts for nicotine resistance in *Drosophila melanogaster*. *Nature Genet*., 39 (2), 264.

Staver C., Guharay F., Monterroso D., Muschler R.G., 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: Shade-grown coffee in Central America. *Agroforest. Syst*., 53, 151-170.

Toniutti L., Breitler J.C., Etienne H., Campa C., Doulbeau S., Urban L., Lambot C., Herrera Pinilla J.C., Bertrand B., 2017. Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee (*C. arabica* L.)(on leaf rust (*Hemileia vastatrix*) pathogenesis. *Front. Plant Sci*, https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02025.

Toniutti L., Breitler J.C., Guittin C., Doulbeau S., Etienne H., Campa C., Lambot C., Herrera Pinilla J.C., Bertrand B., 2018 (soumis). Unravel the better agronomic performance of one *Coffea arabica* hybrid clone using a transcriptomic approach. *Tree Physiology*.

Vaast P., Angrand J., Franck N., Dauzat J., Génard M., 2005. Fruit load and branch ring-barking affect carbon allocation and photosynthesis of leaf and fruit of *Coffea arabica* in the field. *Tree Physiol.*, 25, 753-760.

Van der Hoff F., 2010. *Manifeste des pauvres*, coll. Encres d'orient, Éditions Érick Bonnier, 78 p.

Van der Vossen H., Bertrand B., Charrier A., 2015. Next generation variety development for sustainable production of arabica coffee (*Coffea arabica* L.): A review. *Euphytica*, 204, 243-256.

1https://www.agriculture.bf (consulté le 14/08/2018).
2http://food-fertipartenaires.cirad.fr.
3*Tanety* : culture pluviale (dépendant uniquement des précipitations pour son approvisionnement en eau) réalisée sur les versants et les sommets des collines.
4 *System approach for the TRAnsition to bio-DIVersified agroecosystems, from process analysis to multi-scale co-conception with actors*, projet financé par la fondation Agropolis.
5Voir par exemple https://www.youtube.com/watch?v=Qy8WZfT0DqE (consulté le 08/11/2018).
6Respectivement Institut national des recherches agricoles du Bénin, Kenya Agricultural and Livestock Research Organization et Institut sénégalais de recherches agricoles.
7International Centre of Insect Physiology and Ecology.
8United States Agency for International Development Horticulture Innovation Lab.
9https://www.youtube.com/watch?v=FKyJjpC4p2g (consulté le 08/11/2018).
10https://www.youtube.com/watch?v=Y6Ri6SuWTqk (consulté le 08/11/2018).
11https://ali-sea.org.
12https://ali-sea.org.
13#AgroecologyLearningAlliance.
14#ALiSEAMekong.
15Les films sélectionnés sont accessibles sur une *playlist* dédiée de la chaîne YouTube d'Alisea : https://bit.ly/2CzuMqV.
16Ce dernier a mobilisé un représentant du MAF au Laos, la directrice du groupe de réflexion Focus on the Global South (https://focusweb.org), le directeur du réseau régional The Field Alliance (www.thefieldalliance.org) et un documentariste spécialiste des questions environnementales. La conférence peut être visionnée ici : https://bit.ly/2CAm6Ai (consulté le 23/06/2018).
17https://laouplands.org (consulté le 25/06/2018).
18Gamour : Gestion agro-écologique des mouches des légumes à la Réunion, http://gamour.cirad.fr/site.
19www.agriculture-biodiversite-oi.org/Biophyto.
20L'agriculteur ne passe plus son temps à traiter, mais adopte des activités plus agréables et libère du temps pour autre chose.
21Les morpho-espèces recouvrent des espèces dont certaines ne sont pas déterminées au niveau taxonomique.
22Armeflhor : Association réunionnaise pour la modernisation de l'économie fruitière, légumière et horticole ; FDGDON : Fédération départementale des groupements de défense contre les organismes nuisibles de la Réunion.
23Arifel : Association réunionnaise interprofessionnelle des fruits et légumes ; AROPFL :

Agricultures
et défis du monde
Collection Cirad-AFD

La transition agro-écologique des agricultures du Sud

F.-X. Côte, E. Poirier-Magona,
S. Perret, P. Roudier,
B. Rapidel, M.-C. Thirion,
éditeurs

éditions Quæ

La transition agro-écologique des agricultures du Sud

François-Xavier Côte, Emmanuelle Poirier-Magona, Sylvain Perret, Bruno Rapidel, Philippe Roudier, Marie-Cécile Thirion, éditeurs

© éditions Quæ, 2018

ISBN papier : 978-2-7592-2822-5
ISBN PDF : 978-2-7592-2823-2
ISBN ePub : 978-2-7592-2824-9

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex

www.quae.com

Pour toutes questions, remarques ou suggestions : quae-numerique@quae.fr

www.quae.com

La série *Agricultures et défis du monde* présente annuellement un ouvrage issu des travaux de recherche que le Cirad mène pour le développement durable des agricultures du monde tropical. Elle est coéditée par les