

## Création et diffusion de variétés de caféiers Arabica : quelles innovations variétales ?

Benoît Bertrand<sup>1</sup>  
Christophe Montagnon<sup>1</sup>  
Frédéric Georget<sup>1</sup>  
Pierre Charmetant<sup>2</sup>  
Hervé Etienne<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cirad  
UMR RPB  
TA A-98/IRD  
IRD  
911, avenue Agropolis  
BP 64501  
34394 Montpellier cedex 5  
France  
<benoit.bertrand@cirad.fr>  
<christophe.montagnon@cirad.fr>  
<frederic.georget@cirad.fr>  
<herve.etienne@cirad.fr>

<sup>2</sup> Cirad  
UMR AGAP  
IAPAR-AMG Biotecnologia  
km375 CE 86047-902 Tres Marcos  
Caixa Postal 481  
Londrina - PR  
Brésil  
<pierre.charmetant@cirad.fr>

### Résumé

Plus de 80 % de la production de café arabica provient d'Amérique latine alors que l'espèce est originaire d'Afrique. La base génétique du caféier Arabica introduite en Amérique latine au XIX<sup>e</sup> siècle se limite à deux populations peu différentes (Bourbon et Typica). Malgré le handicap d'une base génétique étroite, les chercheurs ont créé dans les années 1950 à 1980 des variétés lignées très bien adaptées à l'intensification de la culture et présentant une qualité considérée comme un standard. Avec l'arrivée de la rouille orangée, des gènes de résistance de l'espèce diploïde *C. canephora* ont été transférés dans ces variétés améliorées. Des lignées combinant des résistances à plusieurs maladies et présentant une qualité à la tasse équivalente ou inférieure au standard ont été développées dans les années 1980 à 2000. À partir de 1990, face aux nouvelles exigences du marché, de nouvelles variétés hybrides F1 ont été sélectionnées pour l'adaptation à une agriculture écologiquement intensive basée sur l'agroforesterie. Après une vingtaine d'années d'expérimentations en milieux contrôlés ou chez les producteurs, il apparaît que les hybrides F1 produisent 30-60 % de plus que les meilleures lignées en systèmes agroforestiers, sans apport supplémentaire d'engrais. Aujourd'hui, le progrès génétique ainsi créé est plutôt mal diffusé. Dans de nombreux pays, les variétés sont propagées sans aucun contrôle de leur pureté variétale. Aucun catalogue variétal n'existe et les informations qui parviennent aux producteurs sont largement insuffisantes pour qu'ils puissent raisonner leur choix variétal en fonction de leur système de culture ou des exigences du marché. Pour une culture industrielle d'une telle importance économique, la faiblesse des recherches en amélioration génétique pour une filière semencière dynamique est frappante. La raison en est que la production de semences améliorées n'est pas rentable pour le secteur privé. Là où l'État s'est désengagé, il faut donner la possibilité à ce secteur d'investir dans la recherche et dans la production de semences de qualité.

**Mots clés :** amélioration génétique ; café ; qualité ; résistances ; variétés.

**Thèmes :** amélioration génétique ; productions végétales.

### Abstract

#### Creation and dissemination of Arabica coffee varieties: What varietal innovations?

Over 80 % of all *Coffea arabica* – a species of African origin – is produced in Latin America. The gene pool of *C. arabica*, which was introduced in Latin America in the 19th century, includes only two relatively similar varieties (Bourbon and Typica). Despite this very weak gene pool, researchers have managed to develop pure line varieties that are very well adapted to crop intensification (1950-1980) and that produce coffee of recognised standard quality. With the advent of coffee rust, resistance genes of the diploid species *C. canephora* were transferred to these improved *C. arabica* varieties. Lines combining resistance to several diseases, and having a cup quality equivalent to or less than standard, were developed (1980-2000). As of 1990, to fulfill market requirements, new hybrid F1 varieties were bred to be adapted to agroforestry-based ecologically intensive cropping systems. After some 20 years of testing in controlled environments or on coffee farms, F1 hybrids

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

were found to produce 30-60 % more than the best lines grown in agroforestry systems. This performance is achieved without any supplementary fertilizer input. Little of the genetic progress is currently disseminated to growers. In many countries, varieties are propagated without any control of their varietal purity. There are no existing catalogues and information that does reach growers is not sufficient to help them make varietal choices according to their cropping systems or market requirements. Generally, for such an economically important crop, there is a strikingly low degree of research and investment in coffee improvement simply because improved seed production is not profitable for private stakeholders. In areas where the State has withdrawn, the private sector should be given the opportunity of investing in quality seed production and research.

**Key words:** breeding; coffee; quality; resistances; varieties.

**Subjects:** genetic improvement; vegetal productions.

Deux espèces de caféiers sont cultivées dans le monde *Coffea arabica* (environ 65 % de la production) et *Coffea canephora* (espèce connue commercialement sous le nom de Robusta) qui représente environ 35 % de la production mondiale. Parmi plus de 100 espèces de *Coffea* connues à ce jour, toutes diploïdes ( $2n = 2X = 22$ ), *C. arabica* est la seule espèce allopolyploïde ( $2n = 4X = 44$ ). En réalité on sait maintenant que cette espèce est née de la fusion de deux espèces parentales diploïdes – *Coffea eugenioides*, qui est une espèce sauvage et *C. canephora* (Lashermes *et al.*, 1999). Alors que l'espèce *C. arabica* est originaire d'Afrique, plus précisément des hauts plateaux du Sud-Ouest de l'Éthiopie (Labouisse et Adolphe, 2012), les grandes zones de culture se situent principalement en Amérique latine (82 % de la production contre seulement 9 % en Afrique et le reste en Asie et en Océanie). Les raisons qui expliquent la concentration de la production en Amérique latine sont nombreuses. Outre de puissantes raisons socio-économiques invoquées pour expliquer l'expansion rapide de la culture en Amérique latine (Samper, 1999), ajoutons que l'espèce a été cultivée sur les fronts pionniers qui se développaient sur de vastes territoires vierges de montagne (Amérique centrale et andine) dont le climat frais était proche de celui de son aire d'origine ou sur les vastes plateaux brésiliens. En Amérique centrale par exemple, cette culture est celle qui a le plus contribué à former le paysage des cordillères volcaniques.

En Amérique latine l'introduction de l'espèce *C. arabica* s'est faite à partir d'un très faible nombre de plantes (Anthony *et al.*, 2002.). Il y a donc eu un fort effet de fondation. Cependant, cette faible diversité génétique initiale a été bien utilisée par les programmes de sélection lancés dans les années 1930, principalement au Brésil et a donné naissance à des variétés adaptées à des conditions de culture intensives. Ces programmes se sont appuyés sur des effectifs de plantes très élevés qui ont pu révéler certains mutants favorables. C'est ce que nous verrons dans la première partie de l'article qui traite des variétés développées de 1930 à 1980 dans le cadre de la « révolution verte » (Griffon, 2010). Devant le risque imminent de l'arrivée d'un nouveau pathogène (Kushalappa et Eskes, 1989) en Amérique – la rouille orangée – les sélectionneurs ont développé dans une deuxième phase (1970-2000) des variétés résistantes dont les programmes d'amélioration sont encore en cours et dont les premières sélections ont été diffusées à partir de 1990. Nous analyserons ces programmes d'amélioration dans une seconde partie de l'article qui traite des variétés résistantes aux maladies, développées dans le cadre de la révolution verte. À partir de la décennie 1990-2000, le marché évolue radicalement. D'une part les consommateurs souhaitent des produits diversifiés suivant l'origine, d'autre part les producteurs souhaitent créer des marchés de niche pour mieux valoriser des productions qui s'étaient avérées souvent peu rentables pendant la grande crise

des prix de 2001-2004. La qualité du breuvage devient alors un critère essentiel pour les sélectionneurs. Pour diversifier l'offre variétale, il est fait appel à la diversité génétique de l'espèce. Nous présenterons dans la troisième partie les efforts actuels de la recherche qui se déroule en Amérique latine.

Finalement, face aux grands défis que sont le réchauffement climatique, le risque de grandes épidémies et la hausse des prix du pétrole, nous verrons quels sont les défis majeurs à relever pour l'amélioration du caféier pour les années à venir.

## Les variétés qui accompagnent la révolution verte

### Première vague (1930-1980) : des variétés adaptées à un système de culture intensif

La compréhension dans les années 1930-1940 du système de reproduction autogame (c'est-à-dire autopolinisation) et de l'hérédité disomique des caractères de l'espèce *C. arabica* et de sa nature polypléïde ( $2n=4X=44$ ) ont permis de débiter les travaux de génétique mendélienne et de sélection (Krug et Mendes, 1940). L'*arabica* est majoritairement autogame (85-95 %) en conditions naturelles et une proportion de 5-15 % d'allogamie provient de pollinisations croisées

provoquées par le vent et les insectes. Pour les plantes autogames, la méthode classique de sélection est la sélection généalogique (*pedigree selection*). Le croisement par pollinisation artificielle de 2 lignées permet d'obtenir une première génération appelée F1. À partir de cette première génération les plantes sélectionnées sont soit autofécondées soit rétrocroisées pour produire la génération F2. Le processus d'autofécondation est répété dans les générations suivantes, jusqu'à la génération F8. A cette génération on estime qu'on a obtenu une lignée pure car l'hétérozygotie résiduelle théorique à un locus devrait être inférieure à 1 %. La durée d'une telle sélection est de 20 à 30 ans chez le caféier. Notons cependant qu'il n'existe pas de lignées totalement pures puisque, à notre connaissance, personne ne pratique l'autofécondation contrôlée manuelle au-delà de la F3. Il reste donc toujours un pourcentage d'hétérozygotie non négligeable que l'on estime se situer entre 1 à 5 % chez les lignées les plus purifiées.

Dans les systèmes de culture peu intensifs pratiqués en Amérique latine, les différences de production entre les deux populations Typica et Bourbon initialement introduites étaient peu notables. À partir du début du <sup>xx</sup>e siècle et surtout à partir des années 1950, il est apparu (Castillo, 1990) qu'il fallait faire évoluer les pratiques culturales. Comme pour le blé ou le maïs, grâce aux fertilisants, à l'augmentation de densité, à l'utilisation des herbicides, la culture en plein soleil devient possible. La caféiculture en système agroforestier qui était la règle, cède la place à une caféiculture très intensive (*figure 1*), jetant ainsi les bases d'une véritable révolution verte au Brésil, au Costa Rica et en Colombie. Cependant il apparaît très tôt que cette révolution dans les pratiques culturales doit s'accompagner également d'un changement variétal. Ainsi Carvalho *et al.* (1969) montrent dès 1961 et pour diverses variétés que la production des cultures de plein soleil est supérieure à celle des cultures sous ombrage et que les interactions entre variétés et systèmes de culture apparaissent particulièrement importantes.



**Figure 1.** Trois systèmes de culture en Amérique centrale.

**Figure 1.** Three producing systems in Central America.

A) culture intensive en plein soleil à forte densité (5 500 arbres/ha). Les rendements moyens annuels s'établissent entre 1 et 3 tonnes de café vert ;

B) agroforesterie moderne. Le caféier est planté sous des arbres d'ombrage constitués d'espèces nobles (acajou, noyer d'Amérique, etc.). La densité de culture du caféier est réduite à 4 000 arbres/ha. L'utilisation d'engrais est réduite de 30 à 40 % par rapport au système précédent. Les rendements vont de 1 à 2 tonnes/ha/an de café vert ;

C) cafés plantés sous forêt naturelle. Les densités de culture peuvent être très variables (1 800-4 000 arbres/ha). Les apports d'engrais très variables également peuvent être nuls dans certains cas. Les rendements sont de 250 kg à 1 000 kg/ha/an.

En fait, dès le début des années 1940, il est apparu que les efforts de sélection exploitant la base génétique Typica ne permettaient pas de grands progrès génétiques alors que la sélection dans la population « Bourbon » permettait d'assurer des progrès génétiques significatifs (Castillo, 1990). Au Salvador la variété Tekisic est ainsi sélectionnée. Parallèlement, dans les années 1930 à 1960, les chercheurs découvrent plusieurs mutations naturelles à hérédité mendélienne (Romero, 2002). Un mutant retient particulièrement l'attention, il s'agit du Caturra. Le gène dominant Ct responsable de la mutation réduit la taille des entre-nœuds et en conséquence la taille de l'arbre. Les arbres porteurs de cette mutation sont dits de « port-bas » car leur taille adulte en plantation atteint 2,5-3 m contre 3-4 m pour les arabicas normaux dits de « port-haut ». C'est cependant la découverte du « Bourbon Amarelo » (Mendes, 1949) [qui produit au moins 40 % de plus que les meilleures lignées de Bourbon]

qui donne l'idée de rechercher des hybrides naturels entre les deux populations. En effet, il ressort de l'étude de Mendes que le « Bourbon Amarelo » est un hybride qui associe une mutation du Typica à cerises jaunes avec un Bourbon à fruits rouges. À partir de cette constatation, les chercheurs développent la variété « Mundo-Novo » qui est un hybride spontané entre le Typica « var. Sumatra » et le Bourbon, trouvé dans l'État de São paulo en 1931. Notons que le même type de variété a été créé empiriquement au Costa Rica sous le nom de cv. « Híbrido Tico ». La variété-lignée « Mundo Novo » est encore majoritairement cultivée au Brésil car elle permet une mécanisation de la récolte.

Là où la mécanisation n'est pas possible du fait de reliefs escarpés, c'est l'adoption de variétés de port-bas qui a permis dans les années 1960-1970 de profiter pleinement des principes de la révolution verte. Selon Castillo (1990) les variétés porteuses du gène « Caturra » ont eu le rôle de « cataly-

seur » dans l'adoption des nouvelles pratiques culturales issues de cette révolution verte en Colombie ou au Costa Rica. Au Brésil, où le Caturra n'est pas assez rustique, il fallut le croiser avec le Mundo-Novo pour obtenir une variété de port-nain particulièrement bien adaptée aux conditions brésiliennes (le cv. « Catuai »). La *figure 2* montre les relations qui existent entre ces variétés. Du fait de la très faible diversité génétique initiale, ces variétés sont très consanguines. Elles ont pourtant permis un progrès génétique important (*tableau 1*) par rapport aux variétés traditionnelles (les différences observées sont statistiquement significatives) surtout parce qu'elles ont permis d'augmenter les densités de culture. On observe ainsi qu'à forte densité, l'utilisation de variétés de port-nain permet des augmentations de production allant jusqu'à 25 %. L'adaptation de variétés au nouveau système de culture a donc été particulièrement efficace et a eu un impact important.

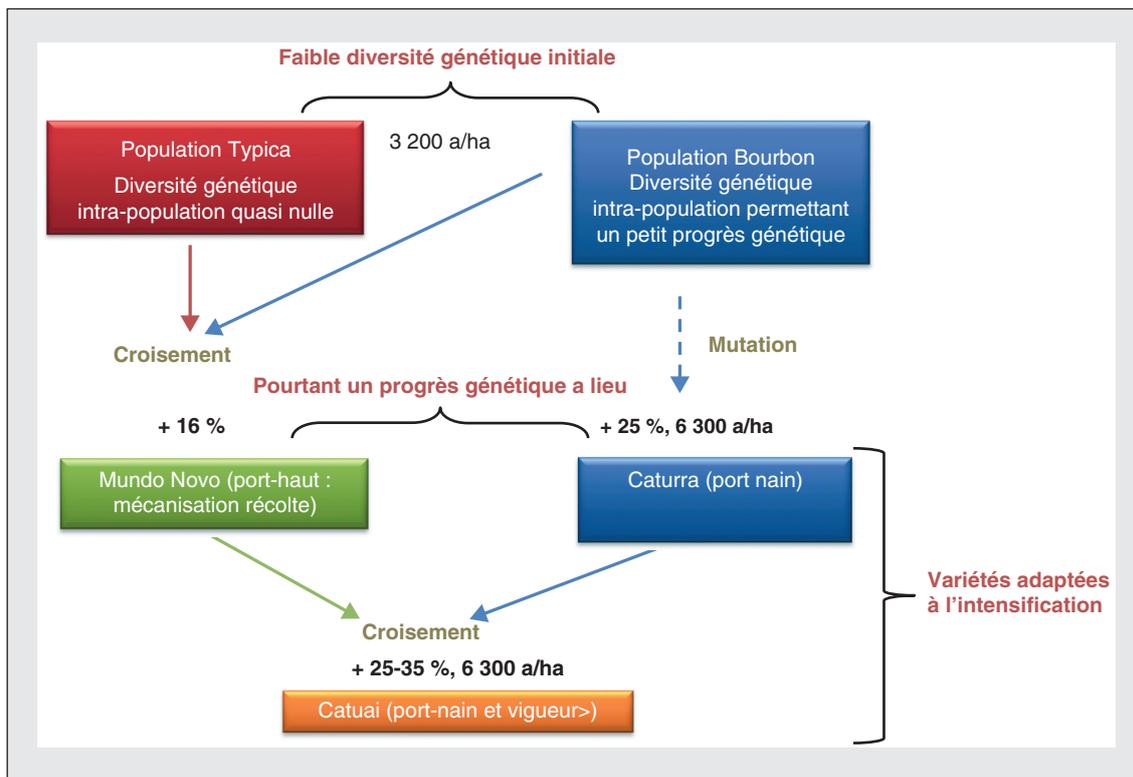


Figure 2. Généalogie des principaux cultivars américains.

Figure 2. Genealogy of the most important American cultivars.

Les progrès en productivité sont indiqués en pourcentages. Une grande partie des progrès est attribuable au format des plantes, mieux adaptées aux fortes densités (la densité est indiquée en arbres par hectare (a/ha)).

**Tableau 1. Comparaison de trois variétés de café cultivées suivant trois densités.**

Table 1. Comparison of coffee varieties grown on three densities.

Variétés	Production relative (%)		
	3 200 arbres/ha	4 200 arbres/ha	6 300 arbres/ha
Caturra (port-bas)	98,5	123	125
Mundo Novo (port-haut)	114,2	112	109
Hibrido Tico (lignée H33) (port-haut)	100 (2 660 kg)*	100 (2 620 kg)*	100 (3 000 kg)*

La production de Caturra et de Mundo Novo est exprimée sur la base 100 de la variété Hibrido Tico.

\* Production en kilos de café vert par hectare et par an. Chiffres moyens de 5 récoltes à Barva de Heredia, Costa Rica.

### Avantages et inconvénients des variétés traditionnelles et des variétés issues de la première vague de la révolution verte

*Inconvénients* : Du fait de la faible base génétique de ces variétés, leur principal défaut réside dans l'absence d'allèles de résistance aux principales maladies, c'est-à-dire à la plupart des races de rouille, aux nématodes d'Amérique latine et au *Colletotrichum kahawae* (CBD), une maladie fongique des fruits que l'on trouve exclusivement en Afrique pour l'instant.

*Avantages* : A l'état naturel en Éthiopie, l'arabica est une plante de sous-bois qui de fait est mal adaptée à la culture en plein soleil. L'une des premières innovations amenées par les premiers caféiculteurs (sans doute au Yémen vers le <sup>xiv</sup> siècle selon Pendergrast [2002]) a été la culture en plein soleil. Il semble qu'une importante différence existe entre le Typica et certaines lignées de Bourbon pour l'adaptation au plein soleil. Les meilleures lignées de Bourbon et les variétés dérivées (Caturra, Mundo-Novo, Catuai) sont particulièrement bien adaptées à ce mode de culture. Notons toutefois que le Caturra en comparaison avec le Catuai peut s'avérer moins productif en conditions climatiques limitantes.

En ce qui concerne la qualité du breuvage, le marché considère généralement que le Bourbon est supérieur

aux variétés dérivées Caturra ou Catuai. En réalité les différences que le marché attribue à la variété se confondent avec le système de culture. Nous avons démontré que le Bourbon en système extensif d'agroforesterie donnera un breuvage de meilleure qualité (plus acide et peut-être plus fruité) que celui du Caturra (ou « Catuai ») cultivé à la même altitude en système intensif. Toutefois, lorsque les conditions de culture sont les mêmes, les deux variétés sont strictement équivalentes (données des auteurs, non publiées).

Quel que soit le système de culture, on doit considérer que les variétés Caturra, Catuai, Mundo Novo, du fait de leur poids majoritaire dans le verger, représentent le standard et que n'importe quelle nouvelle variété doit leur être *a minima* égale pour la qualité du breuvage.

### Deuxième vague (1970-2000) : des variétés résistantes aux maladies

L'arrivée de la rouille orangée sur le continent américain (en 1970 au Brésil, en 1981 au Mexique, 1983 au Costa Rica et en Colombie) a été immédiatement prise en compte par les sélectionneurs. En effet, depuis le <sup>xix</sup> siècle on connaissait des sources de résistance à la rouille (Eskes, 1989) mais surtout, depuis 1955 grâce aux travaux du Centro de Investigação da Ferrugem do cafeeiro ([CIFC] Oieras, Portugal), un hybride spontané

(l'hybride de Timor) issu du croisement entre *C. arabica* et *C. canephora* (Bettencourt, 1973) s'était révélé hautement résistant à toutes les races de rouille connues. Actuellement cet hybride est à la base de presque toutes les variétés résistantes à la rouille en Amérique latine mais également en Afrique de l'Est ou en Asie (Van der Vossen, 2009). Ces variétés dérivées de l'hybride de Timor sont appelées « Catimors » ou « Sarchimors » ou « Colombia ».

Au Brésil, des hybrides interspécifiques du même type que l'hybride de Timor ont été créés artificiellement et ont donné naissance à des variétés résistantes appelées « Icatu » (Kushalappa et Eskes, 1989).

Les schémas de sélection basés sur l'hybride de Timor consistent à récupérer ses gènes de résistance dans le fond génétique d'une variété arabica de port-nain. Tout d'abord l'hybride est croisé en général avec une variété de port-nain, puis éventuellement rétrocroisé. Débute alors une sélection généalogique qui consiste à revenir vers le type parental arabica tout en conservant le maximum de gènes de résistance provenant de l'hybride interspécifique dits « introgressés ».

Plusieurs variétés obtenues suivant ce schéma (figure 3) sont actuellement en cours de diffusion. Citons par exemple IAPAR59, un sarchimor sélectionné par l'Instituto Agronomico de Parana (IAPAR) (Bertrand *et al.*, 1999) diffusé au Brésil, ou la variété Castillo® en Colombie, une variété multilignée, ou très récemment la variété Marsellesa® au Nicaragua et au Mexique.

### Avantages et inconvénients des variétés dérivées de l'hybride de Timor

*Avantages* : Les avantages des lignées dérivées de l'hybride de Timor quand elles ont été soigneusement sélectionnées (ce qui n'a pas toujours été le cas) résident dans leur haut niveau de résistance à plusieurs races de rouille (Castillo, 1990). Cela se traduit par une hausse de production estimée à environ 25 % dans des essais en station. En réalité, maintenant que les variétés ont été diffusées massivement, on estime cette hausse de production plutôt aux alentours de 15 % (observations des

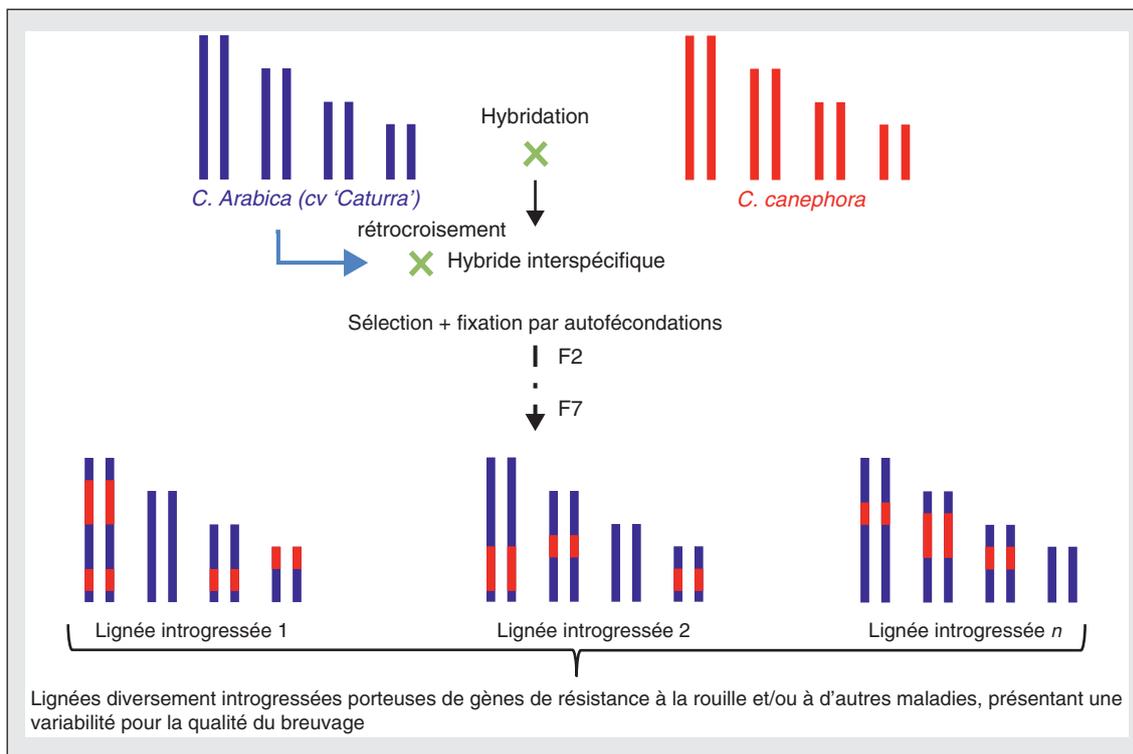


Figure 3. Cycles d'hybridations et de rétrocroisements.

Figure 3. Cycle of hybridization and backcrosses.

L'Arabica se croise spontanément avec *C. canephora*. L'hybride interspécifique obtenu se recroise soit avec *C. arabica* soit avec *C. canephora*. Les rétrocroisements vers l'Arabica sont appelés « Hybrides de Timor ». Les chromosomes des deux espèces sont représentés de façon schématique (bleu = chromosomes de *C. arabica* ( $2n = 4X = 44$ ) et rouge = chromosomes de *C. canephora* ( $2n = 2X = 22$ )).

auteurs) après analyse de plusieurs dizaines d'essais chez les producteurs. La résistance à la rouille permet également de diminuer voire de supprimer totalement les traitements chimiques contre cette maladie.

Par ailleurs, la sélection n'ayant pas été assistée par des marqueurs moléculaires, il s'avère que la plupart des lignées dérivées de l'hybride de Timor conservent une part non négligeable du génome de *C. canephora* (Lashermes *et al.*, 2000). Les fragments chromosomiques conservés peuvent dans certains cas porter également des gènes de résistance aux nématodes ou au *Colletotrichum kahawae* (Gichuru, 2008 ; Bertrand *et al.*, 2001). **Inconvénients :** Le principal défaut des variétés dérivées de l'hybride de Timor porte sur la qualité à la tasse. Plusieurs lignées sélectionnées comme par exemple T5175 se sont avérées largement inférieures en qualité au standard Caturra. La variété CR95 s'est avérée légèrement inférieure. Cependant, on note aussi

plusieurs variétés de bonne qualité mais différente du standard. C'est le cas notamment de la variété T5296 ou de la variété Marsellesa® qui donnent des cafés plus acides que le Caturra. Ces modifications des qualités organoleptiques de la boisson s'expliquent par la présence de fragments chromosomiques hérités de *C. canephora*.

### Phase 3 (1990-2010) : de nouvelles variétés pour une agriculture écologiquement intensive

L'organisation internationale du café reconnaît sur le marché trois catégories de café arabica : cafés doux (de Colombie, du Kenya et de Tanzanie), autres doux et cafés naturels du Brésil. La fixation des prix est d'abord basée sur ces trois grandes catégories, lesquelles ne sont aucunement en relation avec les variétés. À l'intérieur de chacune de ces catégories, des dis-

tinctions sont encore faites selon l'origine géographique (région ou altitude de production) ou des procédés particuliers de culture ou de post-récolte. La préoccupation majeure du marché est de se procurer des produits de qualité constante pour réaliser des mélanges (*blends*) qui constituent des marques commerciales auxquelles sont attachés les consommateurs. Comme nous l'avons observé dans un article antérieur (Bertrand *et al.*, 2006), les torréfacteurs ont forcément une attitude conservatrice vis-à-vis d'éventuelles modifications dans la qualité des cafés qu'ils achètent.

Toutefois, la situation a beaucoup évolué ces dix dernières années avec la croissance à deux chiffres du marché des cafés dits « spéciaux » (Giovannucci *et al.*, 2008). Ce marché a été décrit comme une « *decommoditization* » (Daviron et Ponte, 2005 ; Vagneron et Daviron, 2012). Sur ce nouveau marché de niche, certains cafés différenciés suivant les origines géographiques ou les terroirs et/ou suivant le mode de

production ou de commercialisation (équitable, « bio », etc.), et/ou pour leur qualité intrinsèque trouvent acquéreur auprès de consommateurs avertis. La croissance de ce marché de spécialité a eu deux conséquences contradictoires sur la perception du facteur variétal par le marché. D'une part, il est apparu que des variétés du type « Catimors » pouvaient présenter des défauts sensoriels non négligeables (Bertrand *et al.*, 2003). Mais il est apparu qu'il était également possible de faire mieux que les variétés « standard » en matière de qualité du breuvage, ce qui a mis en lumière l'importance de revisiter la diversité génétique au sein de l'espèce et les interactions génotype-environnement et traitements post-récolte.

En même temps que croît la demande en cafés de très haute qualité, la crainte de manquer d'approvisionnement se répand parmi les négociants et les torréfacteurs. Malheureusement cette crainte est renforcée chaque année par de nombreux événements qui concernent l'impact du changement climatique sur la durabilité économique et écologique des systèmes de culture. Inondations, sécheresses, gelées, il y a de moins en moins d'années sans crise climatique et chaque fois avec des conséquences négatives sur l'offre. La baisse de l'offre entraîne une hausse continue des cours mais également une baisse de l'intérêt des producteurs qui se détournent de la culture du café et optent pour d'autres types de production mieux adaptée aux risques climatiques. Après des années d'indifférence et après avoir réalisé récemment que la qualité du breuvage devenait un facteur clé, les acteurs de la filière prennent maintenant conscience de ce que la productivité à l'hectare est un facteur essentiel. L'entreprise « Nespresso » a récemment inventé le néologisme de *quality*<sup>TM</sup> pour décrire ce nouveau paradigme qui consiste à produire à la fois qualité et quantité.

Rompant avec le schéma traditionnel de la sélection généalogique, plusieurs chercheurs ont proposé à partir des années 1980 de créer des variétés hybrides F1 (Charrier, 1978 ; Walyaro, 1983 ; Teri *et al.*, 2004 ; Bellachew, 1997). Chez les plantes allogames comme le maïs, le progrès génétique est basé sur l'exploitation de l'hétéro-

sis. Les variétés hybrides sont proposées lorsque : i) l'hybride permet l'accumulation immédiate dans un génotype de gènes favorables qui se trouvent chez des génotypes complémentaires ; ii) se manifeste le phénomène de vigueur hybride (hétérosis). Charrier (1985) ou Van der Vossen (2001) ont noté la complémentarité de certaines populations de caféiers en ce qui concerne la résistance aux maladies. Chez les plantes autogames, le recours à la voie hybride est plus rare que chez les allogames car les phénomènes d'hétérosis sont de plus faible intensité. Cependant, chez l'arabica, des travaux pionniers établissent une vigueur hybride de 20 à 30 % (Charrier, 1978 ; Van der Vossen, 1985) et soulignent l'intérêt d'une accumulation rapide de gènes de résistance. Le schéma de sélection mis en œuvre (*figure 4*), est fondé sur l'intercroisement de trois pools de matériel génétique (les arabicas cultivés de port-nains, les cultivés de port-nains introgressés (dérivés de l'hybride de Timor), les caféiers « sauvages » d'Éthiopie ou du Soudan. Outre les deux hypothèses déjà évoquées (c'est-à-dire, vigueur hybride et complémentarité) qui sous-tendaient le succès d'une création variétale basée sur l'intercroisement de ces trois pools, il fallait démontrer également qu'il pouvait exister des méthodes de propagation massale peu coûteuses pour diffuser les variétés hybrides par la voie clonale, en l'absence de système de stérilité mâle maîtrisé. Cette question est traitée par Etienne *et al.* (2012).

Aujourd'hui, après une vingtaine d'années d'expérimentations en milieu contrôlé ou chez les producteurs, il apparaît que les hybrides F1 produisent de 30 à 35 % de plus que les meilleures lignées en conditions d'agriculture intensive et de 30 à 60 % de plus en systèmes agroforestiers (*figure 5*) (Bertrand *et al.*, 2011). Cette performance est acquise sans apport supplémentaire d'engrais. Lorsque les hybrides proviennent du croisement d'une lignée dérivée de l'hybride de Timor par une origine éthiopienne, il est possible de sélectionner aisément des clones présentant de bons niveaux de résistance à la rouille orangée, aux nématodes comme au *Colletotrichum*. Enfin, la qualité générale des hybrides les situe au même niveau de qualité

« standard » que le Caturra ou le Catuai. Dans certains cas et dans des environnements particuliers, on note même une qualité aromatique très supérieure à celle du Caturra avec des notes florales qui apparaissent par exemple chez la variété hybride « Centroamérica » lorsqu'elle est cultivée à plus de 1 200 m d'altitude au Nicaragua.

## Les conditions de diffusion du progrès génétique

Les variétés d'origine Typica et Bourbon sont encore très cultivées en agriculture familiale en Amérique Andine et en Amérique centrale. Pour des raisons socio-économiques qui sont liées à la faible taille des exploitations, à la difficulté d'accès au crédit, au manque d'information, mais aussi à une très bonne durabilité des systèmes agroforestiers, beaucoup de producteurs n'ont pas su (voulu, ou pu) basculer vers des systèmes intensifs. Dans ces systèmes peu intensifs, l'avantage comparatif des variétés du type « révolution verte » est inexistant. Par ailleurs, beaucoup de ces petits producteurs rénovent leur verger avec leur propre semence. Au fil des années, on assiste ainsi à une perte importante de pureté variétale.

Les variétés Caturra et Catuai ainsi que les nouvelles variétés dérivées de l'hybride de Timor font l'objet de programmes de multiplication diversement menés suivant les pays. Au Costa Rica, en Colombie, au Brésil les organismes étatiques ou coopératifs distribuent au prix de production (environ deux fois le prix du kilo de café à l'exportation) des semences de très bonne qualité germinative et d'une pureté variétale qui, si elle n'est pas parfaite, est du moins proche de 90-95 %. Au Costa Rica, selon les années ce sont entre 5 et 30 tonnes de semences qui sont commercialisées. En Colombie, la *Federación de cafeteros* commercialise plus de 80 tonnes de semences annuellement. Il faut signaler que les prix de vente au producteur sont très largement subventionnés et ne couvrent pas les coûts de production réels qui

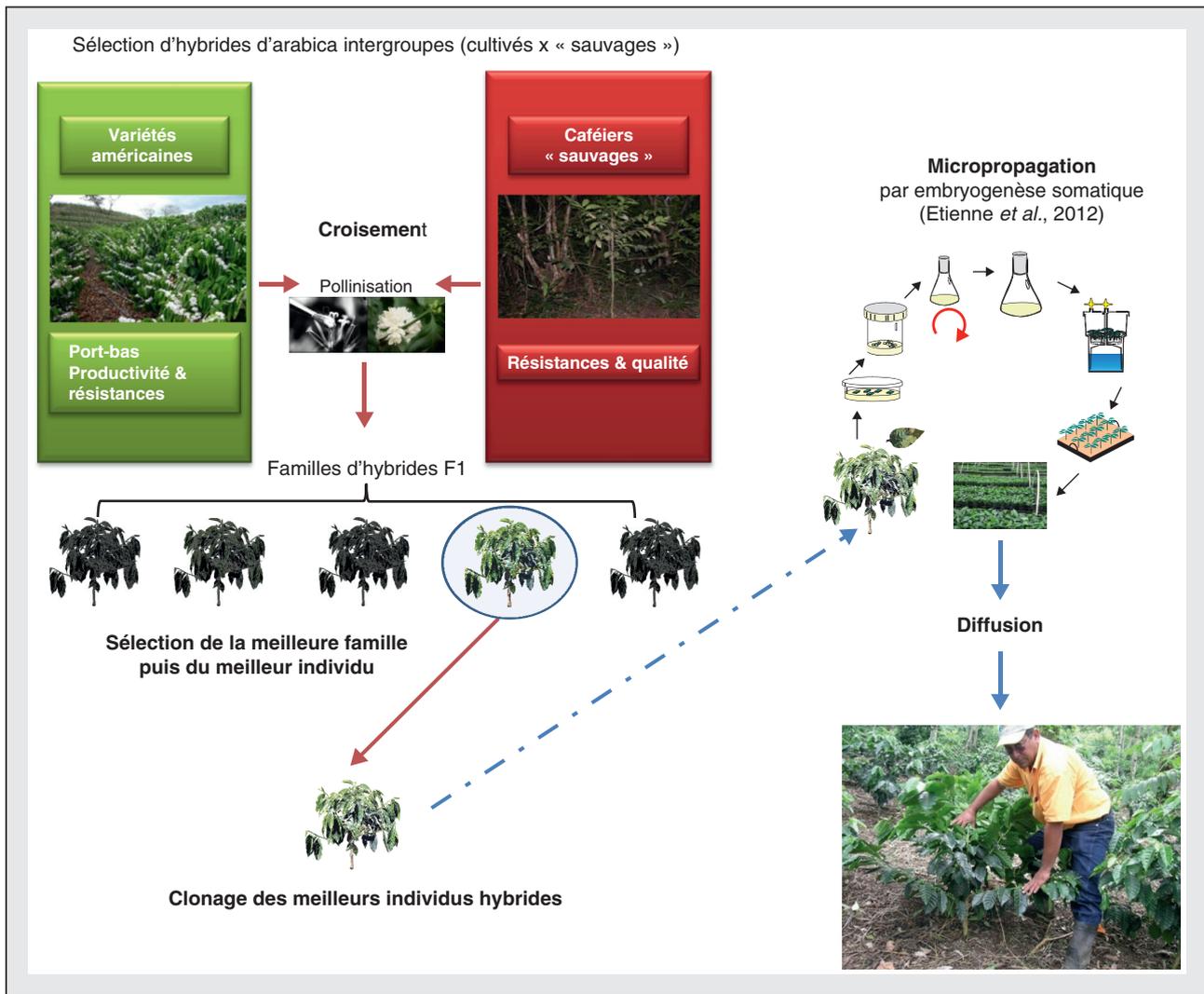


Figure 4. Schéma de croisement, de sélection, de propagation et de diffusion de clones d'hybrides F1.

Figure 4. Scheme of crosses, selection, propagation and diffusion of F1 hybrids clones.

devraient tenir compte des coûts de la recherche, du marketing et de la distribution. Les producteurs se tournent néanmoins vers des producteurs de semences non certifiées dont le principal argument de vente porte sur la capacité germinative et non sur la pureté variétale.

Très peu de variétés, même les plus récentes, ont fait l'objet de dépôt de brevet ou de demandes de reconnaissance auprès de l'Union pour la protection des obtentions végétales (Upov<sup>1</sup>). Beaucoup de variétés n'ont donc pas de propriétaires et sont en

libre accès. C'est par exemple le cas de la variété CR95 qui est issue de l'hybride de Timor 832/1 et sélectionnée par PROMECAFE (Bertrand *et al.*, 1999). Cette variété est actuellement propagée par de nombreux opérateurs sans préoccupation de pureté génétique. La variété T5175 constitue à cet égard un autre exemple intéressant. Cette lignée a été diffusée sans contrôle et sans aucune autorisation de l'Institut du café (ICAFE) en Amérique centrale. Actuellement elle continue d'être propagée alors que la qualité du café produit est largement inférieure à celle du standard Caturra. Il existe de nombreux cas comme celui-ci. Il n'y a aucun catalogue et les réglementations sont rarement

respectées (Pérou, Mexique, pays d'Amérique centrale...). Enfin les informations qui parviennent aux producteurs sont insuffisantes, voire erronées. Les producteurs qui se procurent des semences hors des systèmes certifiés courent un quadruple risque : i) ne pas se faire conseiller la bonne variété pour le bon usage ; ii) acheter des semences de mauvaise capacité germinative ; iii) acheter des semences hétérogènes (manque de pureté génétique) ; iv) acheter une variété qui produit un café de qualité inférieure au standard ou dont la productivité est inférieure au standard.

Le succès de la diffusion à large échelle des variétés hybrides dépend

<sup>1</sup> [http://www.upov.int/index\\_fr.html](http://www.upov.int/index_fr.html)



Figure 5. Variété hybride « Centroamérica » plantée en système agroforestier.

Figure 5. 'Centroamerica' hybrid variety growing in agroforestry system.

1 100 m, Matagalpa, ferme La Cumplida, Nicaragua. Cette variété hybride a été sélectionnée car sa productivité en système agroforestier est supérieure de 30-60 % à celle des variétés traditionnelles Caturra ou Catuai.

d'abord de la maîtrise du système de reproduction mais également des coûts de production des semences. Si l'on utilise la micropropagation *in vitro* (figure 4), le coût additionnel par arbre est actuellement d'environ 0,5-0,70 dollar US, ce qui représente un investissement de 2 500-3 000 dollars US par hectare. Une récente étude de l'école de commerce *Instituto de Comercio Americano* (INCAE) au Costa Rica (données non disponibles) montre que la rénovation des vergers avec des hybrides F1 est beaucoup plus rentable pour le producteur que la rénovation avec des variétés du type Caturra. Après six ans, la différence en valeur nette cumulée est de plus de 5 000 dollars US/ha en faveur des hybrides.

Actuellement deux voies sont ouvertes pour la poursuite du développement des variétés hybrides. La première serait basée sur le triptyque « *origine x cépage x savoir-faire* » dans lequel la variété est l'équivalent du cépage pour le vin. La difficulté relative de la multiplication des hybrides F1 jointe à la possibilité de créer rapidement

des nouveaux hybrides adaptés à chaque région, assure une bonne protection à l'originalité du produit. La seconde voie, qui reproduit ce qui s'est passé chez le maïs, verrait le développement massif d'hybrides de première puis de seconde génération qui, grâce à des programmes de sélection bien orientés, permettraient d'adapter la culture à des conditions difficiles. Pour que cette deuxième voie aboutisse il faudrait trouver des systèmes de reproduction plus puissants que l'embryogenèse somatique. Des essais de reproduction d'hybrides basés sur l'utilisation d'une stérilité mâle génique sont actuellement menés par notre équipe.

## Les grands défis de l'amélioration

De nombreux défis devront être relevés par la caféiculture d'arabica dans les prochaines décennies. Ils constituent des enjeux de nature

multiple dont nous faisons un rapide inventaire.

## Changement climatique

Le changement climatique dans la ceinture intertropicale devrait se traduire par des amplitudes plus fortes des températures et par des variations plus importantes de la pluviosité (Dai, 2010). Concernant le caféier, sont à craindre notamment des excès de température et/ou des successions rapides d'années sèches ou trop pluvieuses (Delgado *et al.*, 2004). Les zones les plus fragiles seront celles pour lesquelles l'eau est une ressource déjà rare ou celles pour lesquelles les températures moyennes sont déjà élevées. Les défis à relever pour l'amélioration du caféier arabica dans ce contexte ne sont pas de nature très différente de ceux identifiés pour d'autres cultures. Il sera important de sélectionner d'une part des cultivars plus tolérants aux amplitudes thermiques (et éventuellement à la sécheresse) et d'autre part, des plantes mieux adaptées à des conditions d'éclairage plus faibles (en cas d'augmentation des intensités d'ombrage en système agroforestier). Nous avons vu précédemment que la voie hybride pouvait apporter une réponse rapide à court terme, car l'hétérosis augmente l'homéostasie de la plante face aux stress environnementaux. À moyen terme il existe un réservoir génétique très important au sein du genre *Coffea* constitué par plus de 100 espèces adaptées à des écosystèmes très divers. Il est probable qu'il existe des sources de tolérance aux fortes amplitudes thermiques et à la sécheresse parmi les espèces de *Coffea*. Les gènes de tolérance de ces espèces pourront être mobilisés par croisement. À plus long terme, il faudra développer de nouveaux programmes d'amélioration basés sur l'hybridation interspécifique car il existe des gènes de résistances biotiques ou abiotiques particulièrement intéressants chez les espèces malgaches ou de l'Est africain. Certes, de nombreuses barrières existent qui se traduisent soit par une incompatibilité totale soit par des incompatibilités partielles qui aboutissent à des hybrides F1 stériles ou peu fertiles, mais les outils modernes de la génomique permettent d'envisager la maîtrise de l'introgession et ses conséquences, en

sélectionnant notamment les seuls fragments chromosomiques désirables.

## Menaces de maladies et ravageurs

Les maladies ou les insectes contre lesquels il faut lutter semblent bien identifiés (rouille du caféier, anthracnose des baies, mineuse des feuilles, scolytes du grain...). Comme nous l'avons vu, de très gros efforts ont été faits pour l'introgession de gènes de résistance de l'hybride de Timor. Plusieurs chercheurs attirent l'attention sur le fait que les résistances à la rouille issues de cet hybride sont contournées dans plusieurs pays et que ce phénomène risque de se répéter ailleurs. L'exploitation de ces sources de résistance arrive donc à son terme et peu d'efforts sont faits pour en identifier de nouvelles. L'exploita-

tion de nouvelles sources de résistance issues soit d'hybrides naturels interspécifiques comparables à l'hybride de Timor, soit d'hybrides néoformés (type *arabusta*, etc.) devrait être mise en œuvre par la recherche (figure 6).

Les résistances naturelles aux insectes sont mal connues chez *Coffea*. Les récents travaux de Guerrero *et al.* (1999) montrent qu'il a été possible d'introgesser des gènes de résistance à la mineuse des feuilles. Concernant le scolyte des baies qui ravage les vergers latino-américains, il n'a pas été possible jusqu'à maintenant d'identifier des sources de résistance.

## Hausse des prix du pétrole

Les systèmes intensifs de production sont très dépendants des prix du

pétrole car ils sont de plus en plus mécanisés, mais surtout parce que le prix de la tonne d'engrais est directement corrélé à celui de la tonne de pétrole. Pour compenser la hausse du coût, il faudra d'une part diminuer les pertes après épandage d'engrais et d'autre part augmenter l'efficacité de l'absorption. La sélection de systèmes racinaires plus efficaces pour l'absorption des éléments minéraux peut-être un des éléments de réponse. Le recours au greffage sur des porte-greffes tolérants à de faibles doses d'engrais est une solution élégante qui devrait être privilégiée (Bertrand *et al.*, 2001). En systèmes agroforestiers, où la matière organique est à la base du maintien de la fertilité et où les caféiers sont soumis à une forte compétition pour la lumière, on recherchera des idéotypes capables de mieux produire en condition d'ombrage.

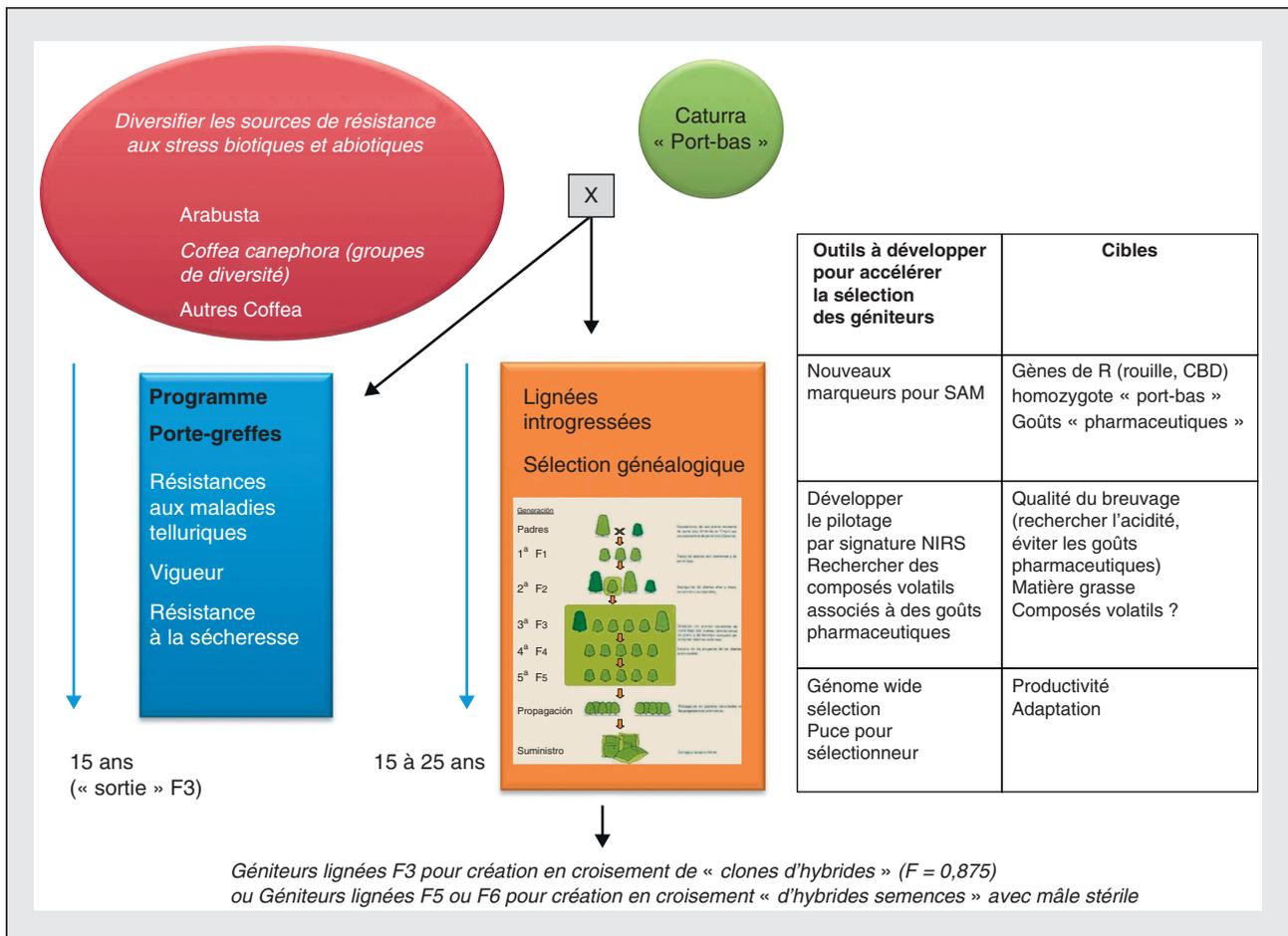


Figure 6. Perspectives pour l'utilisation de nouvelles sources de résistance par l'introgession de gènes de résistance pour le développement de lignées parentales et de cultivars porte-greffes.

Figure 6. Perspectives for using new sources of resistance-introgressing resistance genes, to develop parental lines and root-stock.

## Conclusion

Le progrès génétique a été efficace dans le passé pour adapter la plante aux systèmes de culture intensifs en agroforêts. Il devrait l'être encore pour inventer une agriculture écologiquement intensive car la diversité génétique exploitable dans l'espèce *C. arabica* ou le complexe d'espèces du genre *Coffea* a été très peu utilisée jusqu'à présent. Les nouvelles techniques de micropropagation jointes aux progrès en génomique permettent d'envisager la création variétale sur des pas de temps beaucoup plus courts. Cependant, on peut légitimement s'inquiéter de ce que les contournements de résistances à la rouille qui sont fréquemment observés depuis quelques années n'aient pas conduit à relancer rapidement des programmes d'amélioration basés sur de nouvelles hybridations interspécifiques. Aujourd'hui les producteurs des principales cultures ont accès à un progrès génétique important concrétisé par le choix dans un nombre considérable de variétés. Fernandez-Cornejo (2004), dans une étude particulièrement intéressante, note que sur les 70 dernières années les rendements ont été multipliés par 3 chez le soja, par 4 chez le coton et par 7 chez le maïs et que 50 % de ce progrès était dû à des variétés mieux adaptées. Dans le même temps cet auteur remarque que le marché des semences certifiées est passé de 500 millions de dollars par an à plus de 7 milliards (chiffre de 1997 avant la commercialisation des OGM) et que les investissements privés dans ce secteur ont augmenté de plus de 1 300 % entre 1960 et 1996. Ce n'est malheureusement pas le cas pour la caféiculture mondiale. La diffusion du progrès génétique est en général peu satisfaisante dans la plupart des pays producteurs de café. Les institutions publiques ou semi-publiques de quelques pays (Brésil, Colombie, Costa Rica, Honduras) arrivent partiellement à gérer la diffusion du progrès génétique. Mais la grande majorité des producteurs de par le monde n'a accès qu'à des semences correspondant à des variétés anciennes et d'une pureté variétale insuffisante. De façon générale, pour une culture d'une telle importance économique, la faiblesse des recherches et de l'inves-

tissement en amélioration des plantes est patente. Une des raisons en est que la production de semences améliorées n'est pas assez protégée et rentable pour que le secteur privé s'y investisse. D'autre part il faut donner aux producteurs accès à des crédits pour qu'ils achètent des variétés améliorées. Une expérience intéressante est celle menée par l'alliance Cirad-ECOM (ECOM TRADING) en Amérique centrale. Le Cirad a transféré une technique d'embryogenèse somatique qui permet la multiplication massive d'hybrides F1 à un partenaire privé, seul capable d'assurer les investissements nécessaires pour la mise en œuvre d'une structure industrielle. La commercialisation des plantes produites auprès des producteurs est facilitée par le crédit fourni par ECOM au travers d'une alliance avec l'*International Finance Corporation* (IFC-Banque mondiale). L'amélioration des caféicultures dépend dans une mesure non négligeable de politiques incitatives des gouvernements et des associations de producteurs pour amener le secteur privé à investir dans le domaine de la production de semences de qualité. Les producteurs ont déjà un besoin immense de renouvellement et d'adaptation du verger aux conditions du marché ; ce besoin sera encore plus important en cas de changements climatiques de forte intensité. ■

## Références

Anthony F, Combes MC, Astorga C, Bertrand B, Graziosi G, Lashermes P, 2002. The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Theoretical and Applied Genetics* 104: 894-900.

Bellachew B, 1997. *Arabica coffee breeding in Ethiopia: a review*. Proceedings of the 17 th ASIC International Coffee Conference, Nairobi, Kenya.

Bertrand B, Aguilar G, Santacrea R, Anzueto F, 1999. El mejoramiento genético en América Central. In : Bertrand B, Rapidel B, eds. *Desafíos de la caficultura en Centroamérica*. Coronado (Costa Rica) : Instituto Interamericano de Cooperación Agrícola (IICA) Publishers.

Bertrand B, Anthony F, Lashermes P, 2001. Breeding for resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica* by introgression of resistance genes of *Coffea canephora*. *Plant pathology* 50: 637-43.

Bertrand B, Etienne H, Eskes A, 2001. Growth, production and bean quality of *Coffea arabica* as affected by interspecific grafting: consequences for rootstock breeding. *Horticultural Science* 36: 269-73.

Bertrand B, Guyot B, Anthony F, Lashermes P, 2003. Impact of *Coffea canephora* gene introgression on beverage quality of *C. arabica*. *Theoretical and Applied Genetics* 107: 387-94.

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 Physiology* 26: 1239-48.

Bertrand B, Alpizar E, Lara L, SantaCreo R, Hidalgo M, Quijano JM, Montagnon C, Georget F, Etienne H, 2011. Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars. *Euphytica* 181: 147-58.

Bettencourt A, 1973. *Considerações gerais sobre o 'Híbrido de Timor'*. Circular n°31 of Instituto Agronomico de Campinas. Campinas (Brazil) : IAC Publishers.

Castillo Z, 1990. Mejoramiento genético del café en Colombia. In: Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE), eds. *50 años de Cenicafe, 1938-1988*. Conferencias conmemorativas, China, Colombia.

Charrier A, ed, 1978. Étude de la structure et de la variabilité génétique des caféiers. *Bulletin de l'IFCC* 14 : 1-100.

Charrier A, 1985. *Progrès et perspectives de l'amélioration génétique des caféiers*. Proceedings of the 10 th ASIC International Coffee Conference, Lomé, Togo.

Dai A, 2010. Drought under global warming: a review. *Climate Change* 2:45-65.

Daviron B, Ponte S, 2005. *The coffee paradox: global markets, commodity trade and the elusive promise of development*. Londres : Zed Books, 2005.

Delgado A, Pinto HS, Zullo J, Helminsk AM, 2004. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. *Pesquisas Agropecuárias Brasileira* 39 : 1057-64.

Etienne H, Bertrand B, Montagnon C, Bobadilla R, Dechamp E, Jourdan I, et al. 2012. Un exemple de transfert de technologie réussi dans le domaine de la micropropagation : la multiplication de *Coffea arabica* par embryogenèse somatique. *Cahiers Agricultures* 21 : 115-24. doi : 10.1684/agr.2012.0553.

Eskes AB, Kushalappa AC, 1989. *Coffee rust: epidemiology, resistance and management*. Boca Raton (Florida) : CRC Press.

Giovannucci D, Liu P, Byers A, 2008. Adding value: Certified coffee trade in North America. In: P. Liu P, ed. *Value-adding standards in the North American food market – Trade opportunities in certified products for developing countries*. Rome : FAO, 2008.

Griffon M, 2010. *Pour des agricultures écologiquement intensives : des territoires à haute valeur environnementale et de nouvelles politiques agricoles*. La Tour d'Aigues : Ed. de l'Aube.

Guerrero Filho O, Silvarolla MB, Eskes AB, 1999. Expression and mode of inheritance of resistance in coffee to leaf miner *Perileucoptera coffeella*. *Euphytica* 105 : 7-15.

Gichuru EK, Agwanda CO, Combes MC, Mutitu EW, Ngugi ECK, Bertrand B, et al., 2008. Identification of molecular markers linked to a gene conferring resistance to coffee berry disease

- (*Colletotrichum kahawae*) in *Coffea arabica*. *Plant Pathology* 57 : 1117-24.
- Krug CA, Mendes JET, 1940. Cytological observations in *Coffea*. *Journal of Genetics* 39 : 189-203.
- Kushalappa AC, Eskes A, 1989. *Coffee Rust: Epidemiology, Resistance, and Management*. Boca Raton (Florida) : CRC Press.
- Labouisse JP, Adolphe C, 2012. Conserver et gérer les ressources génétiques du caféier Arabica (*Coffea Arabica* L.) : un défi pour l'Éthiopie. *Cahiers Agricultures* 21 : 98-105. doi : 10.1684/agr.2012.0554.
- Lashermes P, Andrzejewski S, Bertrand B, Combes MC, Dussert S, Graziosi G, et al. 2000. Molecular analysis of introgressive breeding in coffee (*Coffea arabica* L.). *Theoretical and Applied Genetics* 100: 139-46.
- Lashermes P, Combes MC, Robert J, Trouslot P, D'Hont A, Anthony F, et al. 1999. Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. *Molecular and General Genetics* 261 : 259-66.
- Mendes JE, 1949. Ensaio de variedades de cafeeiros II. *Bragantia* 9:81-101.
- Pendergrast M, 2002. *El Café: historia de la semilla que cambio el mundo*. Madrid : Javier Vergara.
- Romero Joao CP, 2002. *The Coffee in the IAC*. São Paulo : Editora Agrônomico Ceres.
- Samper M, 1999. Trayectoria y variabilidad de las caficulturas centroamericanas. In : Bertrand B, Rapidel B, eds. *Desafios de la caficultura centroamericana*. San José (Costa Rica) : IICA Publishers.
- Teri JM, Kilambo D, Mtenga D, Nyange N, Nzallawahe TS, Chipungahelo GS, et al., 2004. *Improved Arabica varieties for the benefit of Tanzanian coffee growers*. Proceedings of the 20th ASIC international Coffee Conference, Bangalore, India. Paris : ASIC.
- Van der Vossen HAM, 1985. Coffee selection and breeding, In: Clifford C, Wilson J, eds. *Coffee Botany Biochemistry and production of beans and beverage*. London : Croom Helm.
- Van der Vossen HAM, 2001. Agronomy I: Coffee breeding practices. In: Clarke RJ, Vitzthum OJ, eds. *Coffee: recent developments*. Oxford : Blackwell Science Publishers.
- Van der Vossen HAM, 2009. The cup quality of disease-resistant cultivars of Arabica coffee (*Coffea Arabica*). *Experimental Agriculture* 45 :323-32.
- Vagneron I, Daviron B, 2012. Le café dans la jungle des standards de durabilité environnementale et sociale. *Cahiers Agricultures* 21 : 154-61. doi : 10.1684/agr.2012.0557.
- Walyaro DJ, 1983. *Considerations in breeding for improved yield and quality in Arabica coffee (Coffea arabica L.)*. Doctoral Thesis, Agricultural University Wageningen.