

CHAPITRE 7

La bonne santé des plantes tropicales pour atténuer les effets du changement climatique: l'exemple du caféier

*Benoît Bertrand, Pierre Marraccini, Luc Villam,
Jean-Christophe Breitler, Hervé Etienne*

Résumé. Les conséquences du changement climatique sur les caféiers sont difficiles à prévoir et dépendent du système de culture (allant de monocultures artificialisées à des associations agroforestières quasi naturelles), du sol et des ressources en eau. Ces conséquences se manifestent aussi sur les maladies et ravageurs. Les recherches portant sur l'adaptation au changement climatique concernent essentiellement les céréales, et peu d'efforts portent sur les cultures pérennes tropicales, chez lesquelles le stress peut affecter le comportement de la plante pendant plusieurs saisons. Certains parasites peuvent s'adapter plus vite que ne peut réagir la plante hôte pérenne et se repandre dans de nouveaux habitats à la faveur du changement climatique. L'objectif des travaux du Cirad en amélioration génétique du caféier est de disposer de cultures « en bonne santé », c'est-à-dire plus résilientes et plus résistantes. Nous présentons des approches intégratives portant sur le fonctionnement du génome (transcriptomique, métabolomique, génomique, épigénétique) et de la plante entière et sur la réponse adaptative aux combinaisons de stress afin de proposer des cibles pour l'amélioration variétale appliquée à la résistance à la rouille du caféier, à la lutte contre les nématodes et à l'adaptation à la sécheresse.

LE CAFÉIER, UN MODÈLE POUR ÉTUDIER LES CONTRAINTES CLIMATIQUES

Le caféier, plante pérenne tropicale, couvre environ 11 millions d'hectares de la zone intertropicale, soit sous des climats frais d'altitude (arabica, de l'espèce *Coffea arabica*), soit sous des climats équatoriaux plus chauds (robusta, de l'espèce *C. canephara*), depuis le niveau de la mer jusqu'à 2 000 mètres d'altitude. C'est donc un modèle de choix pour étudier l'impact des changements climatiques sur un arbre tropical.

Les conséquences du changement climatique sur les caféiers sont difficiles à prévoir et dépendent du système de culture (allant de monocultures artificialisées à des associations agroforestières quasi naturelles), du sol et des ressources en eau. Il est vraisemblable que des conséquences se manifestent aussi sur les maladies et ravageurs ainsi que sur les auxiliaires des cultures.

Une épidémie de rouille orangée a frappé de 2011 à 2013 la région s'étendant de la Colombie au Mexique, y compris dans des régions d'altitude jamais atteintes auparavant, provoquant des pertes de production de plus de 15 %. Ces événements épidémiologiques à répétition sont probablement liés à une forte humidité - mais pas forcément à une forte pluviométrie - et à une augmentation de la température.

Au Brésil, la sécheresse de 2014 a entraîné une baisse de la production d'arabica de 16 % et provoqué de fortes tensions sur les marchés internationaux et le doublement du cours du café. Selon une étude récente, une augmentation de la température de 2 à 2,5 °C diminuerait considérablement la superficie disponible pour la culture du caféier (Assad *et al.*, 2004).

La plupart des recherches relatives à l'adaptation au changement climatique concernent les céréales (riz, maïs, blé), et peu d'efforts portent sur les cultures pérennes tropicales, chez lesquelles le stress se manifeste de manière différente. Un stress abiotique peut affecter le comportement de la plante pendant plusieurs saisons. Certains parasites peuvent s'adapter plus vite que ne peut réagir la plante hôte pérenne et se répandre dans de nouveaux habitats à la faveur du changement climatique.

Simultanément l'agriculture contemporaine doit renoncer à l'utilisation massive de pesticides, trop longtemps utilisés sans réserves avec des conséquences sur l'écologie et la santé et coûteux pour les petits producteurs. L'objectif doit être de disposer de cultures « en bonne santé », plus résilientes et plus résistantes. Nous présentons ici les travaux du Cirad en amélioration génétique du caféier allant dans ce sens.

L'AMÉLIORATION POUR LA BONNE SANTÉ DE LA PLANTE: UN CONCEPT REVISITÉ

Dans un passé récent, la santé des plantes a souvent été réduite à la science de la protection de la plante par un parapluie phytosanitaire ou à la sélection d'un ou plusieurs gènes de résistance qui protègent la plante contre des maladies majeures.

Face au réchauffement climatique, il nous semble qu'il faut changer de paradigme et considérer la « bonne santé » de la plante. Mais qu'est-ce qu'une plante en bonne santé? C'est évidemment une plante qui n'est pas malade. C'est aussi une plante qui, subissant une attaque de parasite ou un stress abiotique, est capable de résilience.

Comment une plante parvient-elle à un équilibre qui évite l'utilisation de pesticides tout en produisant suffisamment pour les besoins économiques des producteurs? On perçoit intuitivement que cette bonne santé est la résultante d'associations entre caractères héréditaires et non héréditaires. Il revient aux généticiens et aux agronomes de distinguer ce qui est du domaine génétique ou non. Nous aborderons certaines cibles prioritaires pour les généticiens comme la tolérance à la sécheresse, et les effets des stress abiotiques

Répondre au **stress** di mati que

sur la tolérance à la rouille orangée et aux nématodes. Pour commencer, nous attirons l'attention du lecteur sur la nécessité de disposer de dispositifs durables couvrant des scénarios probables de réchauffement climatique afin de modéliser les capacités d'adaptation des arbres comme les caféiers aux stress biotiques et abiotiques. Nous aborderons ensuite brièvement le cas de la régulation par les petits ARN pour illustrer la complexité des mécanismes moléculaires en jeu et indiquer des voies de recherche à mener.

LA SPÉCIFICITÉ DES CULTURES PÉRENNES: DISPOSITIFS PARTICULIERS ET APPROCHES INTÉGRATIVES

À la différence des espèces annuelles, les arbres subissent et cumulent au cours de longues périodes les effets des stress biotiques et abiotiques. Le réchauffement climatique a commencé à modifier les interactions connues entre la plante et les différents stress. Ses effets sont multiples et difficiles à appréhender sur le long terme. Dans ce contexte, comment mettre en place des expérimentations pour prédire les capacités d'adaptation des caféiers aux stress biotiques et abiotiques couvrant des scénarios probables (encadré 7.1)?

Encadré 7.1, Étudier les capacités d'adaptation **par** des dispositifs expérimentaux adaptés aux cultures pérennes dans des environnements divers,

La plante fait face en permanence à des combinaisons de stress. On ne *peut* donc pas se limiter à l'étude d'un seul stress. Le fort développement des plantes pérennes limite les études envisageables en phytotron. Les conséquences du changement climatique ne seront pas les mêmes en fonction des environnements considérés. L'altitude, la latitude, la culture sous ombrage ou en plein soleil peuvent ainsi les tamponner ou à l'inverse les exacerber. Les dispositifs doivent prendre en *compte* l'ensemble de ces éléments. Un paramètre ne *peut* cependant être simulé dans des dispositifs plein champ, c'est l'élévation de la teneur en gaz carbonique associée au changement climatique.

Le Cirad et ses partenaires ont établi plusieurs dispositifs expérimentaux originaux au champ au Brésil, en Colombie, en Amérique centrale et au Mexique pour analyser les capacités d'adaptation de nouvelles variétés améliorées (hybrides). L'hypothèse est *que* les variétés hybrides tolèrent mieux le stress et sont mieux adaptées à la culture sous ombrage dans des systèmes agroforestiers, plus aptes à tamponner les effets du changement climatique. Pour comprendre les bases moléculaires de l'hétérosis (augmentation des capacités ou de la vigueur d'un hybride par rapport aux lignées pures), un dispositif établi en Colombie en partenariat avec la Federación de cafeteros *pennet* de comparer des hybrides et leurs géniteurs dans des conditions de plein soleil ou d'ombrage sous forte pression de rouille (figure 7.1). Un dispositif multisites au Mexique, dans l'État de Veracruz, est destiné à mimer les effets du réchauffement climatique et à analyser le *comportement* des variétés hybrides, greffées ou non, en comparaison avec des variétés traditionnelles. Le gradient d'altitude *pennet* d'obtenir un gradient de température et de pression parasitaire en rouille orangée (figure 7.2) pour étudier sur plusieurs années les mécanismes d'adaptation du caféier à une combinaison entre un stress thermique et des attaques du champignon. Au Costa Rica, les mécanismes d'adaptation du caféier à

une combinaison de stress allant de la forte production et des attaques de rouille sont étudiés en collaboration avec le World Coffee Research (Texas A&M University) grâce à la mise en place dans une région infestée par la rouille d'un dispositif expérimental dans lequel les arbres sont plus ou moins déchargés en fruits. Au Brésil, le Cirad et l'EMBRAPA (l'Entreprise brésilienne de recherche agricole) travaillent depuis de nombreuses années sur l'adaptation du caféier à la sécheresse. Les dispositifs établis dans une région semi-désertique, le Cerrado, permettent de contrôler la durée de la période de sécheresse à l'aide de pivots d'irrigation. Lorsqu'une approche mécanistique très fine est envisagée sur une courte période, le recours au phytotron s'avère toutefois indispensable pour disposer de conditions environnementales contrôlées et homogènes. L'étude se fait alors sur de jeunes plantes. Ainsi, le Cirad en partenariat avec la société Nestlé essaie de comprendre les bases moléculaires de l'hétérosis conduisant à la tolérance à la rouille. Dans ce but, des hybrides et leurs géniteurs sont placés en phytotron dans des conditions favorables ou non au développement de la rouille.



Figure 7.1. Dispositif expérimental pour comparer le comportement des hybrides d'arabica et de leurs géniteurs sous ombrage ou en plein soleil dans une zone infestée de rouille orange, à Manizales, Colombie (© Cenicafe/Cirad).

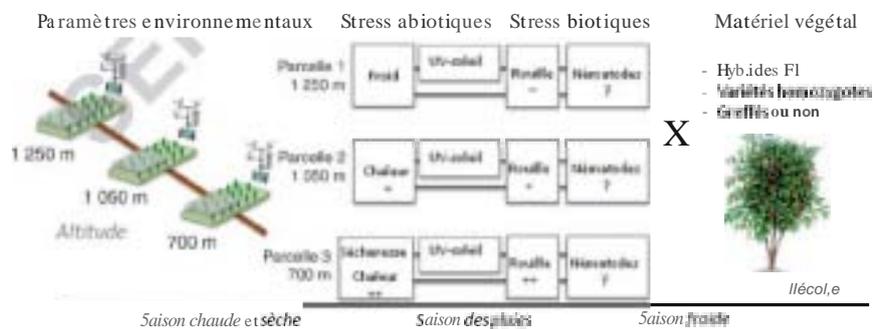


Figure 7.2. Schématisation du dispositif multisites établi en 2013 destiné à étudier l'adaptation du caféier à la rouille orange en fonction de la température, État de Veracruz, Mexique.

Une même palette variétale (hybrides vs lignée, caféiers ou non) est mise en place à trois altitudes sous ombrage ou en plein soleil pour mimer les effets de la température et de l'agroforesterie (collaboration Inecol/Colpos/Cirad).

L'ensemble des recherches que le Cirad mène en partenariat constitue un cadre pour comprendre comment les voies métaboliques, les voies de signalisation cellulaire et les processus développementaux s'articulent d'un côté avec l'expression du génome et de l'autre avec l'expression du phénotype, et ainsi caractériser les relations entre la plante et son environnement (figure 7.3). Par exemple, nous étudions les interactions entre le régime thermique ou hydrique, le niveau de production et l'intensité des attaques de la rouille foliaire (due au champignon *Hemileia vastatrix*) et des nématodes du sol (vers microscopiques) de type *Meloidogyne* sur des variétés sensibles ou résistantes. L'objectif est d'étudier, grâce à des approches intégratives portant sur le fonctionnement du génome (transcriptomique, métabolomique, génomique, épigénétique) et de la plante entière, la réponse adaptative aux combinaisons de stress afin de proposer des cibles pour l'amélioration variétale.

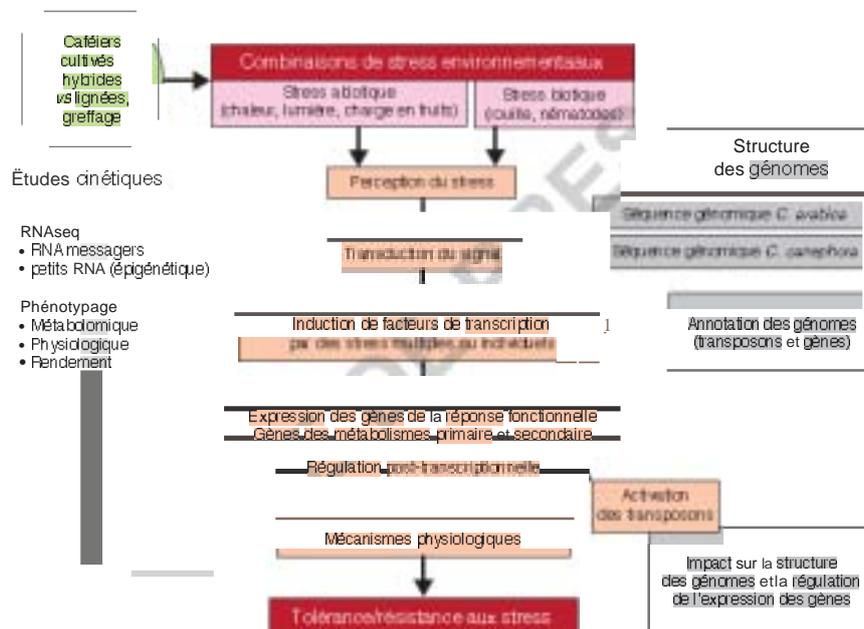


Figure 7.3. Schématisation de la voie de transduction des stress environnementaux aboutissant à l'élaboration d'un phénotype de tolérance.

Le Cirad s'intéresse à l'adaptation du caféier - spécifiquement sur des variétés améliorées hybrides ou greffées - à des combinaisons de stress biotique et abiotique. L'échelle de recherche choisie est moléculaire. L'analyse des modifications au niveau du transcriptome, de l'épigénome (miRNA, éléments transposables, méthylation de l'ADN) et du métabolome à différents moments de la voie de transduction du signal permet de comprendre les mécanismes d'adaptation aux stress.

LA ROUILLE, LES NÉMATODES ET LA SÉCHERESSE: TROIS CIBLES MAJEURES

La tolérance à la rouille orangée

La rouille du caféier (figure 7.4) peut causer de fortes défoliations entraînant des pertes de rendement. Ces dernières années, les variations de température et de

régime hydrique ont provoqué une recrudescence des épidémies. Pour lutter contre la rouille, des variétés présentant des gènes de résistance majeurs ont été sélectionnées. Le problème de ce type de résistance complète est le risque de contournement par le pathogène.



Figure 7.4.
Jeune plante de caféier infestée par la rouille (vignette: spores sur la feuille). Le changement climatique modifiera les interactions entre la plante et les bioagresseurs (© Cirad),

Les caféiers sensibles présentent spontanément une tolérance élevée si on supprime expérimentalement la production (suppression des jeunes fruits). Quelle est l'origine du phénomène? Quels sont les mécanismes moléculaires mis en jeu? Peut-on sélectionner des plantes présentant à la fois une tolérance élevée et un bon niveau de production? Depuis une vingtaine d'années, le croisement de variétés américaines *d'Arabica* avec des caféiers sauvages d'Éthiopie a révélé un fort effet d'hétérosis (40 % en moyenne) (Bertrand *et al.*, 2012). Certains de ces hybrides FI semblent présenter une plus grande tolérance à la rouille. Les progrès récents de la génomique offrent de nouveaux outils qui permettent d'appréhender les mécanismes moléculaires à l'origine de ce phénomène. Chez *Arabidopsis thaliana*, ou arabette des dames, plante modèle très utilisée dans les études de biologie moléculaire, de récents travaux ont permis de montrer que cette vigueur hybride résulte au moins pour partie d'une régulation épigénétique et transcriptionnelle de gènes clés, et notamment de gènes majeurs de l'horloge circadienne des plantes qui contrôlent en cascade un réseau de gènes considérable (Ni *et al.*, 2009). Par ailleurs, la reprogrammation des miRNA et des tasiRNA dans le génome hybride (encadré 7.2) conduirait à de nouveaux phénotypes expliquant la vigueur hybride et la bonne santé de la plante (Chen, 2010).

L'impact du changement climatique sur la relation caféier/nématodes

Les nématodes des genres *Meloidogyne* et *Pratylenchus* constituent une contrainte majeure pour de nombreux pays producteurs de café, dont les deux principaux, Brésil et Vietnam (Campos et Villain, 2005). La dégradation du système racinaire occasionnée par ces parasites engendre une perte substantielle du potentiel d'assimilation en nutriments et en eau des caféiers et les rend encore plus sensibles au stress hydrique. Ce phénomène s'intensifie quand les caféiers entrent en production et est exacerbé lorsque les caféiers sont cultivés en plein soleil.

Encadré 7.2. Épigenétique, stress et adaptation.

Pour faire face aux stress biotiques et abiotiques, les plantes reprogramment sans cesse l'expression de leurs gènes afin d'adapter leur fonctionnement à ces contraintes. Les analyses génomiques réalisées à partir de plantes stressées montrent des modifications d'expression considérables de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers de gènes aussi bien au niveau transcriptionnel que post-transcriptionnel. La quantité d'un ARN messager dans une cellule relève bien sûr de la transcription du gène dont il est issu, mais aussi de sa stabilisation, de son niveau de dégradation et de sa capacité à être traduit en protéine (Nakaminami *et al.*, 2012). Les petits ARN végétaux sont des régulateurs essentiels de l'expression des gènes liés à la croissance et au développement de la plante, mais aussi à son adaptation aux contraintes de l'environnement. Ils régulent essentiellement l'activité de facteurs de transcription qui eux-mêmes régulent l'activité de nombreux gènes (Sunkar *et al.*, 2012). L'identification des petits ARN non codants et de leur rôle permet de comprendre les mécanismes mis en jeu par les plantes pour contrôler leur développement en conditions de stress.

Il existe deux classes principales de petits ARN non codants, les miRNA, ou micro-ARN, et les siRNA, ou petits ARN interférents, qui se distinguent surtout par leur voie de biosynthèse, leur mode d'action, mais aussi leur rôle (figure 7.5) (Guleria *et al.*, 2011).

Les miRNA se révèlent des acteurs majeurs dans la réponse adaptative aux stress. Leur rôle de régulateur dans les stress liés à des carences nutritives (phosphate, sulfate, cuivre et azote), le stress oxydatif, thermique (chaleur et froid), la sécheresse et la salinité ou encore les attaques de pathogènes, est maintenant reconnu (Sunkar *et al.*, 2012). Par exemple, en cas de stress thermique, miR398 est surexprimé, notamment dans les organes reproducteurs, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'intensité du stress oxydatif (réduction des ARNm CDS, CDS2 et CCS). Cette altération du potentiel redox dans les cellules conduit à l'activation de la transcription de protéines HSF (*heat-shock factor 1*) et HSP (*heat-shock proteins*) impliquées dans les mécanismes de thermotolérance (Guan *et al.*, 2013).

Concernant les stress biotiques, l'implication des miRNA dans la lutte contre les pathogènes a aussi été démontrée. Par exemple, miR393 inhibe l'action de l'auxine et stoppe la croissance cellulaire, ce qui permet la mobilisation des ressources pour lutter contre le pathogène et active la voie de sécrétion utilisant l'appareil de Golgi pour favoriser l'excrétion de protéines de défense.

Si le rôle essentiel des petits ARN végétaux dans les mécanismes d'adaptation des plantes est maintenant bien documenté pour différents types de stress, l'étape suivante consiste à les étudier en condition de stress multiples plus proche de la réalité au champ. Dans ce contexte, ils apparaissent comme des régulateurs majeurs chargés de coordonner finement la réponse adaptative des plantes afin d'utiliser au mieux les ressources disponibles pour préserver la croissance et permettre à la plante de réaliser son programme de développement (Atkinson et Urwin, 2012). Identifier les miRNA impliqués en condition de stress multiples permettra de définir de nouvelles approches pour l'amélioration variétale des caféiers.

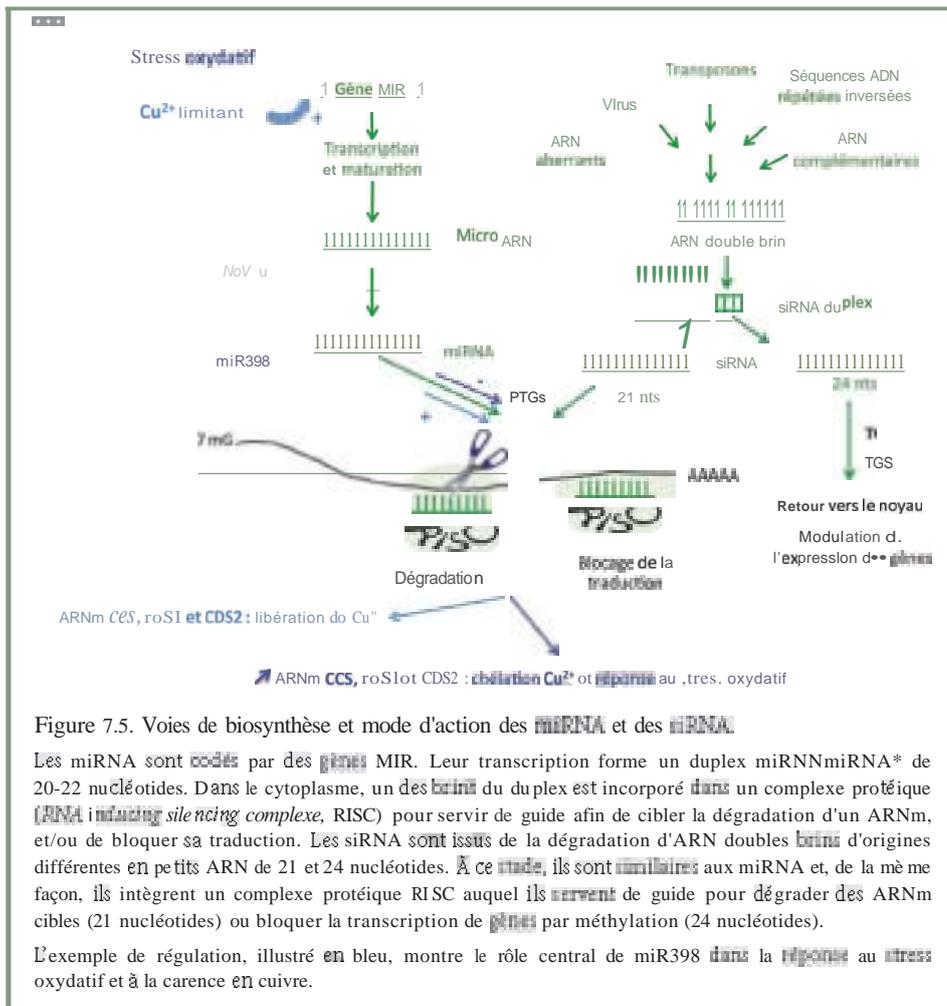


Figure 7.5. Voies de biosynthèse et mode d'action des miRNA et des siRNA.

Les miRNA sont codés par des gènes MIR. Leur transcription forme un duplex miRNA/miRNA* de 20-22 nucléotides. Dans le cytoplasme, un des brins du duplex est incorporé dans un complexe protéique (ARNi inducing silencing complexe, RISC) pour servir de guide afin de cibler la dégradation d'un ARNm, et/ou de bloquer sa traduction. Les siRNA sont issus de la dégradation d'ARN doubles brins d'origines différentes en petits ARN de 21 et 24 nucléotides. À ce stade, ils sont similaires aux miRNA et, de la même façon, ils intègrent un complexe protéique RISC auquel ils servent de guide pour dégrader des ARNm cibles (21 nucléotides) ou bloquer la transcription de gènes par méthylation (24 nucléotides).

L'exemple de régulation, illustré en bleu, montre le rôle central de miR398 dans la réponse au stress oxydatif et à la carence en cuivre.

L'augmentation de la température dans le sol dans l'agame envisagée par les différents modèles prévisionnels de changement climatique devrait favoriser le développement des nématodes en raccourcissant la durée de leur cycle biologique. Cela a été montré sur caféier au Brésil dans le cas de *M. incognita* (Ghini *et al.*, 2008). Il est également reconnu que l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique modifiera l'allocation de carbone dans les plantes en faveur des racines (Compant *et al.*, 2010). Ceci pourrait favoriser le développement des nématodes. En effet, les fluctuations annuelles de populations de *Pratylenchus* sur caféiers sont dépendantes du cycle phénologique des plants, les niveaux de populations les plus faibles étant observés lorsque l'allocation de carbone se fait au détriment des racines et en faveur des fruits lors du remplissage et de la maturation des graines (Campos et Villain, 2005).

L'expression de la résistance à *M. incognita* conférée par le gène Mi chez la tomate est inhibée au-delà de températures supérieures à 28 °C dans le sol (Dropkin, 1969). Au contraire, les résistances conférées par des gènes dominants Ma chez *Prunus cerasifera*

se sont révélées stables même à de fortes températures (Esmenjaud *et al.*, 1996). Quels seront les effets du changement climatique sur l'expression des gènes de résistance aux nématodes des caféiers qui ont été trouvés?

Le changement climatique, et en particulier les épisodes de sécheresse, auront des effets directs sur le microbiote de la rhizosphère. Compant *et al.* (2010) et Pritchard (2011) montrent à partir de méta-analyses que les effets sont complexes et variables suivant les systèmes biologiques considérés. Ces évolutions du microbiote auront des implications sur trois principaux modes d'action suppressifs des microorganismes bénéfiques du sol, à savoir l'antibiose (relation entre deux ou plusieurs organismes qui s'effectue au détriment de l'un d'eux), la résistance systémique induite chez la plante hôte et les antagonismes spécifiques vis-à-vis des pathogènes (Haas et Defago, 2005). Qu'il s'agisse d'écosystèmes naturels ou fortement anthropisés, l'influence du changement climatique sera inversement proportionnelle à la diversité spécifique présente dans les différents niveaux trophiques (Pritchard, 2011). Les modes de culture agroforestiers (chapitre 16) devraient contribuer à tamponner les effets du changement climatique et à favoriser la biodiversité de la rhizosphère. Par des études comparées sur différents modes de culture, en conditions écologiques variées et sur différentes variétés, il faut évaluer comment la communauté microbienne associée aux caféiers agit pour atténuer de manière concomitante les multiples stress biotiques, comme les nématodes ou la rouille.

Vers l'identification de gènes responsables de la tolérance à la sécheresse du caféier?

Les périodes de sécheresse prolongée sont l'un des facteurs abiotiques qui affectent le plus la croissance végétative des caféiers ainsi que la floraison, le développement des grains (figure 7.6) et par conséquent la production de café. Elles sont également connues pour augmenter les défauts des grains, modifier leur composition biochimique et réduire la qualité finale de la boisson (Silva *et al.*, 2005). Ces sécheresses observées en pleine saison des pluies sont souvent accompagnées de températures élevées (> 32 OC) et peuvent être préjudiciables à la fois pour la production de l'année en cours mais également pour celle de l'année suivante, en fonction de leur impact négatif sur la croissance végétative des rameaux. L'adaptation des caféiers à cette contrainte nécessite des changements de pratiques culturales et l'utilisation de la diversité génétique afin de créer des variétés mieux adaptées. L'exemple d'un programme de tolérance à la sécheresse mené au Brésil par l'EMBRAPA et le Cirad illustre notre propos.

Diversité génétique du caféier et mécanismes impliqués dans la tolérance à la sécheresse

Au sein du genre *Coffea*, il existe une variabilité génétique importante concernant la tolérance à la sécheresse, en particulier au sein de l'espèce *C. canephora*, offrant la possibilité d'étudier les déterminismes physiologique, moléculaire et génétique mis en jeu dans les réponses des plantes à ce stress. Des clones de *C. canephora* Conilon tolérants et sensibles à la sécheresse ont fait l'objet de plusieurs évaluations (DaMatta et Ramalho, 2006). Il ressort que la tolérance à la sécheresse pourrait être



Figure 7.6. Tests de résistance à la sécheresse près de Brasilia, Brésil (© EMBRAPA/Cirad),

une conséquence directe d'un meilleur contrôle stomatique et d'un système racinaire plus développé (Pinheiro *et al.*, 2005).

Les travaux ont montré que le contrôle de la fermeture des stomates et de la transpiration est moins efficace chez le clone sensible de Conilon que chez les clones tolérants (Marraccini *et al.*, 2012). Le clone sensible cultivé en condition de limitation en eau présente une baisse plus rapide de son potentiel hydrique foliaire de base (Ψ_{pd}) et une plus forte réduction de l'assimilation nette du dioxyde de carbone (A) que les clones tolérants. Concernant le métabolisme des sucres, qui peuvent intervenir comme composés osmoprotecteurs; le maintien de l'activité de sucrose phosphate synthase lors de la diminution du potentiel hydrique foliaire de base est observé chez certains clones tolérants (Praxedes *et al.*, 2006). Il existe donc plusieurs mécanismes biologiques mis en jeu dans la tolérance à la sécheresse.

Identification de gènes candidats

Chez les plantes supérieures, il existe deux voies connues de transduction du signal « sécheresse » impliquées dans le contrôle de l'expression des gènes répondant au stress: une dépendante de l'acide abscissique (ABA) et l'autre non (Yamaguchi-Shinozaki et Shinozaki, 2005). Ces voies, ou « cascades », impliquent l'expression de gènes codant pour des facteurs de transcription qui activent l'expression d'une batterie de gènes codant notamment pour des « protéines de protection » comme les HSP (*heat-shock proteins*) et des déhydrines. Il convient de mentionner que les stress « sécheresse » et « haute température » sont en réalité associés dans les conditions de culture au champ et font probablement appel à des mécanismes biologiques communs dans la perception et la transduction du signal intracellulaire (Fujita *et al.*, 2006).

Plus de quatre-vingts gènes candidats ont été trouvés (Marraccini *et al.*, 2012). Ces gènes sont caractérisés par des profils différentiels d'expression dans les feuilles ou les méristèmes des plantes sensibles/tolérantes ou en fonction des conditions de stress hydrique. Plusieurs d'entre eux codent pour des protéines impliquées dans la synthèse de l'ABA, des composés osmoprotecteurs ou impliqués contre les stress oxydatifs,

Répondre au stress di mati que

ainsi que pour des facteurs de transcription de la transduction intracellulaire des signaux de stress abiotiques et même biotiques. À ce titre, il est intéressant de noter que le clone de *C. canephora* Conilon tolérant à la sécheresse est également hautement résistant à toutes les espèces et populations de *Meloidogyne* (Carneiro *et al.*, 2009). Ceci suggère l'existence de « dialogues croisés » (*cross-talks*) étroits entre les voies de réponse aux stress biotiques et abiotiques chez le caféier.

Les différences quantitatives d'expression de certains gènes candidats entre les clones tolérants et sensibles à la sécheresse pourraient être dues à des mutations dans les régions promotrices qui réduisent l'expression chez les clones sensibles.

PERSPECTIVES

Le caféier est un arbuste cultivé dans des environnements très variables de la zone intertropicale. La caféiculture est déjà affectée par le changement climatique. C'est pourquoi le caféier représente un modèle pour les plantes pérennes tropicales dans l'étude des effets des contraintes climatiques. Dans ce but, des dispositifs expérimentaux originaux ont été mis en place par le Cirad et ses partenaires. Du matériel végétal sélectionné pour sa résilience et sa résistance à divers stress biotiques et abiotiques (sécheresse, chaleur, rouille, nématodes, etc.) est testé dans des environnements plus ou moins stressants. Grâce à ces dispositifs et en s'appuyant sur les progrès récents de la génomique, il est aujourd'hui possible de répondre aux questions suivantes: quels sont les gènes clés de l'adaptation aux stress? Quelles sont les caractéristiques de la régulation épigénétique de la réponse aux stress? Comment la plante subissant des stress multiples arrive à équilibrer croissance et production d'un côté avec mécanismes de défense vis-à-vis des stress de l'autre? Par quels mécanismes l'hétérosis et le greffage favorisent-ils cet équilibre et le succès de l'adaptation aux stress?

Références bibliographiques

- Assad E.D., Pinto H.S., Zullo J. Jr, Avila A.M.H., 2004. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. *Pesqui Agrop. Bras.*, 39, 1057-1064.
- Atkinson N., Urwin P., 2012. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from the genes to the field. *Journal of Experimental Botany*, 63, 3523-3544.
- Bertrand B., Montagnon C., Georget F., Charmetant P., Etienne H., 2012. Création et diffusion de variétés de caféiers Arabica : quelles innovations variétales ? *Cahiers de l'agriculture*, 21, 77-88.
- Campos V.P., Villain L., 2005. Nematode parasite of coffee and cocoa. In: *Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture* (M. Luc, R.A. Sikora, J. Bridge, eds), Wallingford, CAER Publishing, 2nd ed., 529-579.
- Carneiro R.M.nG., Costa S.B., Sousa F.R., Santos D.F., Almeida M.R.A., Siqueira K.M.S., Tigano M.S., Fonseca A.F.A., 2009. Reação de cafeeiros 'Conilon' a diferentes populações de *Meloidogyne* spp. In: *VI Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, Vitória (ES) Brésil.
- Chen Z.I., 2010. Molecular mechanisms of polyploidy and hybrid vigor. *Trends Plant Science*, 15, 57.
- Compant S., Van Der Heijden M.G.A., Sessitsch A., 2010. Climate change effects on beneficial plant-microorganism interactions. *FEMSMicrobiol. Ecol.*, 73, 197-214.

- DaMatta F.M., Ramalho J.C., 2006. Impact of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18, 55-81
- Dropkin V.H., 1969. The necrotic reaction of tomatoes and other hosts resistant to *Meloidogyne*: reversal by temperature. *Phytopathol.*, 59, 1632-1637.
- Esmenjaud D., Minot J.C., Voisin R., 1996. Effects of durable inoculum pressure and high temperature on root galling, nematode numbers and survival of Myrobalan plum genotypes (*Prunus cerasifera* Ehr.) highly resistant to *Meloidogyne* spp. *Fundamental and Applied Nematology*, 19, 85-90.
- Fujita M., Fujita Y., Noutoshi Y., Takahashi F., Narusaka Y., Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K., 2006. Crosstalk between abiotic and biotic stress responses: a current view from the points of convergence in the stress signaling networks. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 9, 436-442.
- Ghini R., Hamada E., Júnior M.J.P., Marengo J.A., Ribeiro do Valle Gonçalves R., 2008. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43, 187-194.
- Guan Q., Lu X., Zeng H., Zhang Y., Zhu J., 2013. Heat stress induction of miR398 triggers a regulatory loop that is critical for thermotolerance in *Arabidopsis*. *Plant J.*, 74, 840-851
- Guleria P., Mahajan M., Bhardwaj J., Yadav K., 2011. Plant small RNAs: biogenesis, mode of action and their roles in abiotic stresses. *Genomics Proteomics Bioinformatics*, 9 (6), 183-193
- Haas D., Defago G., 2005. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. *Nature Reviews Microbiology*, 3, 307-319, 10.1038/nrmicro1129.
- Marraccini P., Vinecky F., Alves G.S.C., Ramos H.J.O., Elbelt S., Vieira N.G., Carneiro F.A., 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, 4191-4212.
- Nakaminami K., Matsui A., Shinozaki K., Seki M., 2012. RNA regulation in plant abiotic stress responses. *Biochim. Biophys. Acta*, 1819, 149-153
- Ni Z., Kim E.D., Ha M., Lackey E., Liu J., Zhang Y., Sun O., Chen Z.J., 2009. Altered circadian rhythms regulate growth vigour in hybrids and allopolyploids. *Nature*, 457, 327-331
- Pinheiro H.A., DaMatta F.M., Chaves A.R.M., Loureiro M.E., Ducatti C., 2005. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. *Ann. Bot.*, 96, 101-108.
- Praxedes S.C., DaMatta F.M., Loureiro M.E., Ferrão M.A.G., Cordeiro A.T., 2006. Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. *kouillou*) leaves. *Environ. Exp. Bot.*, 56, 263-273.
- Pritchard S.G., 2011. Soil organisms and global climate change. *Plant Pathol.*, 60, 82-99.
- Silva E.A., Mazzafera P., Brunini O., Sakai E., Arruda F.B., Mattoso L.H.C., Carvalho C.R.L., Pires R.C.M., 2005. The influence of water management and environmental conditions on the chemical composition and beverage quality of coffee beans. *Braz. J Plant Physiol.*, 17, 229-238.
- Sunkar R., Li Y.-F., Jagadeeswaran G., 2012. Functions of microRNAs in plant stress responses. *Trends Plant Sci.*, 17, 196-203.
- Yamaguchi-Shinozaki K., Shinozaki K., 2005. Organization of cis-acting regulatory elements in osmotic- and cold-stress-responsive promoters. *Trends Plant Sci.*, 10, 88-94.