



L'AGRICULTURE ET LES SYSTÈMES ALIMENTAIRES DU MONDE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Enjeux pour les Suds

Vincent Blanfort, Julien Demenois,
Marie Hrabanski, coord.

éditions
Quæ

Chapitre 21

S'adapter et innover en matière d'espèces et de variétés cultivées : un rôle clé pour la diversité cultivée et naturelle ?

Sophie Lérant, Myriam Adam, Mathieu Gonin, Cécile Grenier, Pierre Marraccini, Fabienne Micheli, Maria Camila Rebolledo, Clément Rigal, Mohamed Lamine Tékété, Michel Vaksman, Hervé Étienne, Delphine Luquet

La valorisation de l'agrobiodiversité apparaît comme une solution particulièrement intéressante à moyen et long terme pour adapter les systèmes de culture au changement climatique de façon durable et agroécologique. Par *agrobiodiversité*, on entend la diversité des organismes vivants reconnue comme ressource par les agriculteurs, et gérée consciemment par eux. Elle se décline en trois niveaux d'organisation qui interagissent entre eux : la diversité génétique, spécifique et agroécosystémique. La valorisation de l'agrobiodiversité comprend donc la mise en place ou l'utilisation de complémentarités intra ou interspécifiques, lesquelles permettent, entre autres, d'optimiser l'usage des ressources liées au changement climatique (eau, CO₂), d'atténuer par l'ombrage par exemple certaines contraintes climatiques telles que l'évapotranspiration ou les pics de chaleur au sein de la parcelle cultivée, ou encore d'augmenter la tolérance à ces contraintes par la création de variétés résistantes (Levard, 2023). Ces complémentarités, qu'elles soient physiologiques, biophysiques ou génétiques, peuvent se jouer à l'échelle de l'individu (mélanges variétaux, hybrides ou greffage entre variétés ou espèces, associations avec le microbiote du sol), ou à l'échelle de la parcelle (agroforesterie ou systèmes vergers-maraîchers).

L'agrobiodiversité est la base, depuis des siècles, de nombreuses pratiques culturelles dans le monde entier, telles que l'agroforesterie, les associations interspécifiques ou les mélanges variétaux, l'agro-sylvopastoralisme, principalement dans le contexte des agricultures familiales tropicales (Bravo-Peña et Yoder, 2024). Sa mobilisation à grande échelle pour adapter les systèmes de culture au changement climatique s'inscrit dans une logique de souveraineté alimentaire et de durabilité des territoires : réduction de l'usage des pesticides, de l'eau, maintien de la fertilité des sols, fixation du carbone. En cela, l'utilisation de l'agrobiodiversité est partie prenante de l'agroécologie telle que définie par la FAO : une approche intégrée qui applique concomitamment des notions et des principes écologiques et sociaux pour la conception et la gestion des systèmes agricoles et alimentaires. L'agroécologie cherche à optimiser les interactions entre les plantes, les animaux, les humains et leur environnement, tout en tenant compte des dimensions sociales nécessaires pour qu'un système alimentaire soit durable et équitable¹.

1. www.fao.org/agroecology/fr; agroecology@fao.org.

Toutefois, face à la variabilité des contraintes climatiques, cette mobilisation de l'agrobiodiversité comme levier d'adaptation durable n'est possible que si l'on comprend et maîtrise les mécanismes biologiques et biophysiques à la base des interactions entre le génotype et l'environnement ($G \times E$) et des performances agronomiques et écosystémiques des agrosystèmes (Nerva *et al.*, 2022).

Ce chapitre vise à illustrer les fronts scientifiques, mais aussi les activités de recherche menées de longue date qui sous-tendent la valorisation de l'agrobiodiversité pour l'adaptation des systèmes de culture au changement climatique. En outre, il met en avant le potentiel adaptatif contenu dans la diversité cultivée ou apparentée (sauvage), intra ou interspécifique, ainsi que l'enjeu de mobiliser des approches interdisciplinaires innovantes (agronomie, physiologie, génétique, sélection, IA, modélisation) et multiacteurs (science-agriculture, approches participatives). Au travers d'exemples sur des cultures annuelles et pérennes tropicales, les résultats sont discutés au regard de l'urgence climatique, des enjeux liés à la conservation, à la caractérisation et à la valorisation de la diversité cultivée, à la résilience des agrosystèmes les plus vulnérables, dans le cadre d'une réglementation internationale et européenne en rapide évolution. Les différents exemples de systèmes de culture présentés dans ce chapitre suggèrent que, malgré les avantages incontestables que procurent les mélanges intra et interspécifiques en matière de résilience face au changement climatique et de durabilité, ils ne détrônent malheureusement pas les systèmes de monoculture plus intensifs et plus productifs.

1. La diversification des systèmes de culture comme levier durable d'adaptation au changement climatique

Le potentiel qu'offrent les systèmes de culture interspécifiques en matière d'adaptation durable au changement climatique est aujourd'hui bien reconnu. Toutefois, les processus biologiques impliqués dans la résilience et dans la productivité de ces systèmes sont complexes et encore peu compris, ce qui limite leur généralisation et leur déploiement à grande échelle dans le contexte de la transition agroécologique (Benitez-Alfonso *et al.*, 2023).

Les systèmes agroforestiers (Saf) sont connus pour leur capacité adaptative aux contraintes climatiques (températures extrêmes, déficit en eau), pour leur capacité à favoriser la santé et la fertilité des écosystèmes, et pour leur participation au maintien de la biodiversité et à la séquestration du carbone (Rigal *et al.*, 2022). Les Saf à base de café par exemple varient de configurations simples avec une seule espèce d'arbre d'ombrage, aux plus rustiques, où les caféiers sont plantés en milieu forestier. Les arbres d'ombrage jouent un rôle crucial en tempérant le microclimat, permettant un maintien de la photosynthèse aux heures les plus chaudes. Les modèles climatiques montrent que l'expansion des Saf pourrait atténuer les effets du changement climatique dans les zones de basse altitude les plus chaudes (500-800 m), préservant ainsi des conditions favorables à la caféiculture (Rahn *et al.*, 2018). Pour le cacaoyer, les systèmes de plantation peuvent présenter une grande hétérogénéité, aussi bien en matière d'espèces végétales associées que d'ombrage (Saj *et al.*, 2023). Si au niveau mondial les Saf à base de cacaoyers sont progressivement remplacés par des monocultures non ombragées (Heming *et al.*, 2022), plusieurs études montrent pourtant que les Saf traditionnels (comme le système *cabruca* au Brésil) peuvent réduire les impacts négatifs du changement climatique, et que leur conservation devrait être un objectif important des politiques agricoles régionales.

Des travaux sont en cours pour comprendre et pour optimiser la réponse du cacaoyer à la sécheresse et à l'ombrage et pour assister la coconception de Saf plus performants et durables par la modélisation (Cacao4Future²).

L'adaptation des cultures vivrières au changement climatique est devenue une réalité quotidienne dans des régions où la sécurité alimentaire est une préoccupation majeure, comme c'est le cas en Afrique soudano-sahélienne. Les cultures pluviales (céréales et légumineuses) ainsi que certaines pratiques agroécologiques traditionnelles sont de plus en plus utilisées, garantissant une récolte par an, tout en offrant des services écosystémiques : régulation des ravageurs, fertilité des sols. Malgré leurs avantages, ces pratiques agroécologiques sont peu attrayantes, car en concurrence avec des méthodes intensives plus productives. L'association de cultures est pratiquée, entre autres, avec le modèle sorgho-niébé, qui utilise une grande diversité de variétés locales ou sélectionnées pour leur adaptation aux contextes pédoclimatiques locaux (Ganeme *et al.*, 2022) (projet Oracle³). Il a été montré que les rendements sont plus stables en association qu'en culture pure et qu'une association sorgho-niébé dans le même poquet améliore la productivité. Si cette association sorgho-niébé reste la plus pratiquée, la diversification des systèmes à base de sorgho pourrait passer par l'introduction d'autres espèces, comme le haricot mungo, très bien adapté aux conditions semi-arides du Burkina Faso (Raboin *et al.*, 2023).

2. L'agrobiodiversité comme ressource pour alimenter les programmes de sélection et d'amélioration des plantes face au changement climatique

2.1. Recours à la diversité intraspécifique pour adapter les programmes de sélection aux contextes agroforestiers et à la sécheresse : cas du caféier

La plupart des variétés utilisées aujourd'hui ont été sélectionnées pour la culture en plein soleil et présentent des baisses de rendements sévères (d'environ 40 %) lorsqu'elles sont cultivées sous ombrage (Haggar *et al.*, 2011). Il est donc important de prendre en compte les composantes environnementales des Saf dans les programmes de sélection actuels (faible luminosité, compétition pour les éléments nutritifs et pour l'eau du sol). Dans le cas du caféier arabica, les sélectionneurs font face à un obstacle majeur, à savoir la très faible diversité génétique disponible au sein des variétés cultivées (Steiger *et al.*, 2002). Pour contourner ce problème, une voie d'amélioration est la création d'hybrides intraspécifiques, issus de croisements entre des variétés cultivées (dites lignées américaines) avec des individus sauvages issus du centre d'origine (Éthiopie). Ces hybrides d'arabica adaptés à l'ombrage présentent une meilleure qualité organoleptique, une productivité de 30 % supérieure aux variétés homozygotes traditionnelles et parfois une tolérance accrue à la sécheresse (projet Breedcafs⁴) (Sarzynski *et al.*, 2024); ils sont actuellement disséminés dans de nombreux pays (Turreira-García, 2022).

Pour guider les programmes de sélection chez les espèces cultivées arabica et robusta dans le choix de variétés tolérantes au stress hydrique, différentes approches ont été mises en place telles que le développement d'une méthode de phénotypage rapide

2. <https://www.cocoa4future.org/>.

3. <https://www.fondationavril.org/projects/cirad-oracle/>.

4. <https://www.breedcafs.eu>.

pour évaluer la résistance au déficit hydrique d'un grand nombre de plantes (collaboration Nestlé-Cirad-Fondation Nicafrance⁵ au Nicaragua), ou encore l'identification de gènes clés et le décryptage des mécanismes physiologiques mis en jeu pour l'adaptation aux stress abiotiques (Alves *et al.*, 2017). Une redéfinition de l'idéotype du café arabica a été proposée, prenant en compte les problématiques du changement climatique et de la culture en Saf. Cet idéotype cible permet d'orienter au mieux les futurs programmes de sélection, afin d'augmenter la rentabilité et la compétitivité des Saf à base de caféiers face à des systèmes de culture intensifs plein soleil, peu durables mais actuellement plus rentables (Breitler *et al.*, 2022).

2.2. Combinaison de méthodes de sélection modernes avec les savoirs paysans pour l'adaptation au changement climatique : cas du sorgho

Le programme d'amélioration variétale du sorgho en Afrique de l'Ouest porte essentiellement sur l'obtention de variétés résistantes à la sécheresse, et utilise l'esquive, méthode efficace et peu coûteuse, consistant à assurer la maturité de la culture avant l'apparition d'un stress hydrique sévère. Les efforts initiaux se sont concentrés sur le développement de variétés précoces, adaptées à des saisons de pluie plus courtes (Pixley *et al.*, 2023). Cependant, l'adoption de ces nouvelles variétés a été très limitée du fait d'une grande variabilité spatio-temporelle des saisons. Il a donc été privilégié de valoriser l'expertise des agriculteurs soudano-sahéliens qui, au fil des générations, ont développé des variétés plus sensibles à la photopériode, lesquelles ajustent naturellement leur maturité par rapport à la date de fin de la saison des pluies (figure 21.1) (Clerget *et al.*, 2021).

Cette sensibilité à la photopériode ainsi que le phénotype dit *stay-green* lié à la tolérance à la sécheresse (Vadez *et al.*, 2011) ont pu être intégrés dans les programmes de sélection assistée par marqueurs (SAM), accélérant ainsi le gain génétique. La combinaison de la SAM avec la modélisation des cultures permet de tenir compte des fortes interactions $G \times E$, et ainsi de concevoir des variétés spécifiquement adaptées au changement climatique (Guitton *et al.*, 2018). Enfin, le développement des variétés directement dans l'environnement cible, avec la participation des agriculteurs, a permis de produire des variétés plus adaptées aux conditions locales (Vom Brocke *et al.*, 2020).

2.3. Vers des programmes de sélection valorisant la diversité génétique pour l'adaptation des plantes au changement climatique et à son atténuation : cas du riz

La culture du riz en conditions inondées, dites en anaérobie, est actuellement controversée en raison d'une gestion de l'eau peu durable et de l'émission de gaz à effet de serre (GES), notamment les émissions de méthane par le système racinaire des plantes (Rajendran *et al.*, 2024). Cependant, ces conditions d'anaérobie génèrent de meilleurs rendements que les conditions de culture en aérobie, et demeurent majoritaires malgré la controverse environnementale (Saito *et al.*, 2018).

Dans ce contexte, la sélection de variétés adaptées aux conditions d'aérobie est un enjeu majeur (collaboration Cirad-Ciat⁶) (Châtel *et al.*, 2008). Toutefois, l'efficacité des programmes de sélection est limitée, car les caractères associés à l'adaptation aux conditions d'aérobie n'ont pas ou peu été sélectionnés jusqu'à présent. Les bases

5. <https://fundacionnicafrance.org>.

6. <https://alliancebioiversityciat.org/fr>.



Figure 21.1. Sorghos africains dits «photopériodiques», ajustant naturellement leur développement en fonction de la date de semis (semis de juin à gauche, de juillet au centre et d'août à droite). Crédit : photos de M. Vaksman.

physiologiques et génétiques de l'adaptation aux conditions d'aérobic et de sécheresse doivent alors être étudiées (Luquet *et al.*, 2016). Si des gènes ou QTL (*quantitative trait loci*) candidats pour la création de variétés adaptées à ces conditions ont déjà été mis en évidence, peu d'entre eux s'avèrent suffisamment effectifs pour la sélection assistée par marqueurs. La sélection génomique récurrente semble une option concluante (Grenier *et al.*, 2015).

L'élévation des températures est également préoccupante pour la culture du riz. Une évaluation agronomique multilocal d'un panel de cinquante lignées de riz a montré une diminution forte des rendements moyens (d'environ 40 %) dans les environnements les plus chauds (Rebolledo *et al.*, 2023). Ces résultats justifient le déploiement de méthodes de criblage pour identifier des sources de tolérance au sein de la diversité intra et interspécifique des riz des espèces *japonica*, *indica* et *glaberrima* dans le cadre des programmes de sélection (collaboration Cirad-Ciat).

2.4. Le greffage interspécifique comme solution pour l'adaptation au changement climatique : cas des agrumes

Chez la plupart des arbres cultivés, caractérisés par leur cycle biologique long et des durées de sélection de plusieurs dizaines d'années, l'identification d'espèces plus résilientes au changement climatique et aux stress abiotiques, puis leur valorisation rapide grâce à l'hybridation interspécifique ou au greffage interspécifique doivent être privilégiées.

Les agrumes cultivés et commercialisés sont issus d'hybridations interspécifiques au sein du genre *Citrus*, à partir de quatre espèces ancestrales : *C. reticulata*, *C. maxima*, *C. medica* et *C. micrantha* (Wu *et al.*, 2018). Dans la citriculture actuelle, les arbres sont presque toujours propagés par greffage de la variété commerciale sur un porte-greffe sélectionné pour ses caractéristiques de vigueur, de résistance ou de tolérance aux stress biotiques et/ou abiotiques. Plus de vingt génotypes de porte-greffes du genre *Citrus*, de genres connexes (comme *Poncirus*), ou encore des hybrides interspécifiques ou intergénériques ont été recensés dans le monde, et leur utilisation dépend de la région de production, des pratiques locales et de leurs performances agronomiques (Bowman et Joubert, 2020).

Dans les régions où la culture pluviale est courante, comme en Amérique latine, l'efficacité d'utilisation de l'eau est devenue une cible prioritaire pour la sélection de nouveaux porte-greffes (Girardi *et al.*, 2021). Ainsi, l'analyse de la production d'oranges (*C. sinensis* [L.] Osbeck var. Valencia), greffées sur vingt-trois génotypes issus d'hybridations interspécifiques, intergénériques ou de la sélection d'hybrides sur une période de dix ans en culture pluviale au Brésil (climat de type savane tropicale), a permis de sélectionner de nouveaux porte-greffes résistants au déficit hydrique. D'autre part, l'étude de différentes combinaisons interspécifiques de greffons et porte-greffes (Santana-Vieira *et al.*, 2016) a montré qu'elles pouvaient présenter des comportements adaptatifs contrastés vis-à-vis du stress hydrique (évitement vs tolérance) et bénéfiques dans le cas de zones de culture présentant des sols durs, secs et de faible profondeur.

3. Conclusion et perspectives

Le changement climatique est global, mais ses effets génèrent de plus en plus de variabilité intra et interannuelle à l'échelle locale (rapport AR6, IPCC⁷) qu'il est important de caractériser en vue d'identifier des solutions d'adaptation des agro-systèmes à ces contextes divers, actuels et futurs. Les exemples donnés dans ce chapitre soutiennent que la mobilisation de l'agrobiodiversité est un levier incontournable pour la conception de solutions d'adaptation au changement climatique diversifiées et durables (figure 21.2). Toutefois, il met en avant la nécessité de combiner des approches permettant de meilleures caractérisation et prise en compte de la variabilité des contraintes (climatiques, agroécologiques et sociétales) et une mobilisation accrue de la diversité génétique et adaptative présente au sein et entre les espèces cultivées ou sauvages.

7. <https://report.ipcc.ch/ar6syr/index.html>.

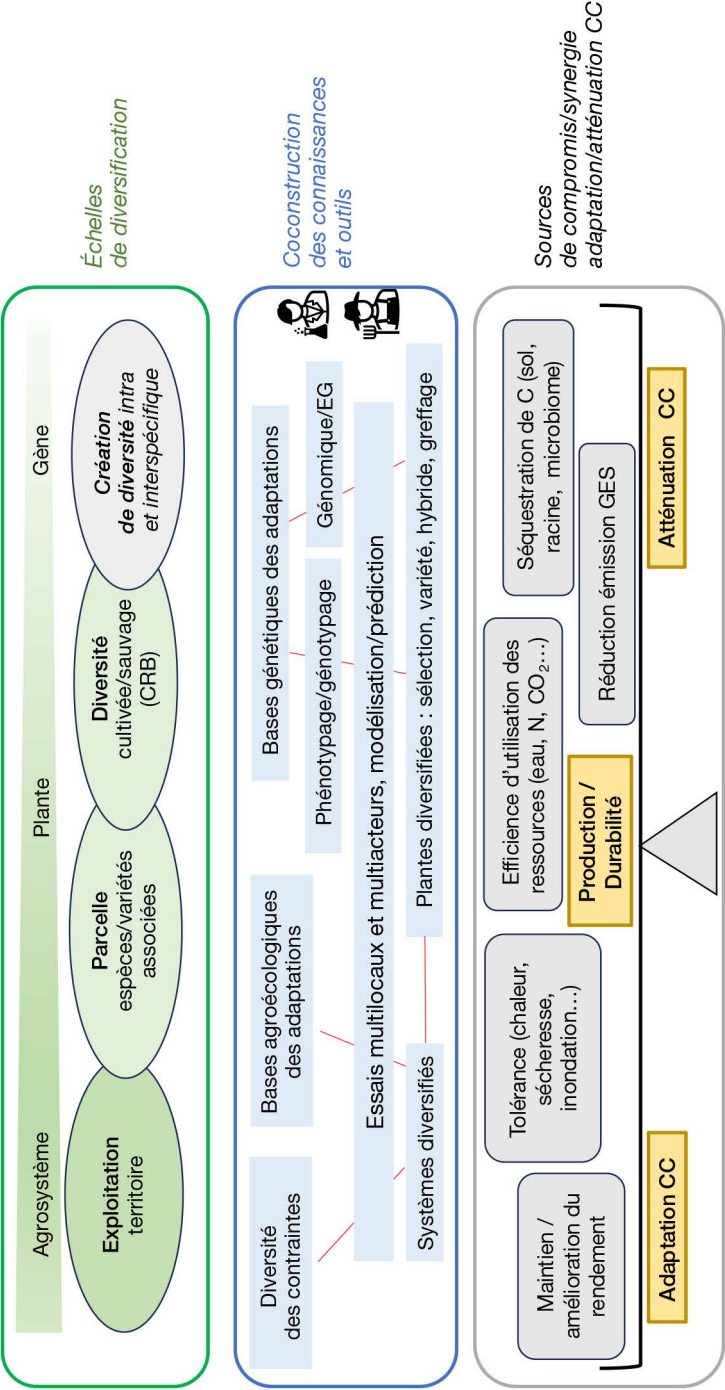


Figure 21.2. Valorisation de la biodiversité par des approches interdisciplinaires et multiacteurs, pour l'adaptation durable des systèmes de culture au changement climatique et pour son atténuation.
EG : édition du génome.

3.1. Privilégier des systèmes de culture mobilisant la diversité intra et interspécifique

Les travaux en cours pour accélérer la compréhension de ces systèmes et leur déploiement à plus grande échelle mettent en exergue le potentiel d'approches combinant les expérimentations multisites et multiacteurs, et la modélisation des systèmes de culture pour leur analyse et pour la prédiction de leurs performances (Gaudio *et al.*, 2022). En ce sens, les dispositifs *in situ* et à long terme du Cirad et de ses partenaires représentent une plus-value remarquable — comme le DP Agroforesta⁸, l'observatoire de Niakhar (Delaunay *et al.*, 2018). Elles doivent en complément s'appuyer sur des expérimentations en conditions plus contrôlées, permettant par exemple la compréhension écophysologique de l'adaptation aux changements climatiques — Abiophen⁹ et M3P (Welcker *et al.*, 2015). Un effort devra également être fourni pour mieux connaître la capacité des agrosystèmes à séquestrer le carbone et à maintenir la fertilité des sols (projet Bolero¹⁰), ainsi que le rôle des interactions plante-microbiome dans l'accès aux ressources du sol et à l'eau.

3.2. Des programmes de sélection basés sur des approches multicritères et multiacteurs

3.2.1. Vers des données de plus en plus massives et multiéchelles

Ce chapitre met en évidence que, afin de valoriser la diversité génétique des plantes cultivées ou sauvages apparentées pour l'adaptation au changement climatique, les programmes de sélection doivent générer et manipuler des jeux de données de plus en plus massifs et multiéchelles : depuis des données biologiques (physiologiques, génétiques et autres « omiques ») caractérisant des sources d'adaptation parmi des milliers d'individus composant la diversité génétique d'une espèce cible, jusqu'aux données agroclimatiques et sociétales (enquêtes) acquises dans des essais multilocaux représentatifs des jeux de contraintes auxquels il s'agit d'adapter les plantes cultivées. L'analyse intégrée de ces données représente un défi numérique dorénavant au cœur des programmes de sélection variétale et des recherches en amont qu'ils nécessitent (voir paragraphe 2.1). Des approches d'analyse de données et de modélisation (mécanistique statistique, apprentissage par les données) existent pour cela, mais doivent être optimisées et mieux mises en complémentarité pour : (1) comprendre les systèmes biologiques complexes à améliorer (Luquet *et al.*, 2016), (2) développer des « proxies » (par exemple l'utilisation de la NIRS, la spectroscopie dans l'infrarouge proche, ou de l'imagerie) permettant le phénotypage à haut débit de caractères physiologiques d'intérêt adaptatif plus compliqués à mesurer (Gano *et al.*, 2021), (3) prédire les interactions $G \times E$ et des idéotypes variétaux (prédiction génomique et phénomique) (Tong et Nikoloski, 2021), et (4) évaluer la valeur ajoutée dans des contextes agroclimatiques variés et futurs (Parent *et al.*, 2018). Le recours à l'intelligence artificielle devient incontournable dans ce contexte. Si ce type d'approche monte en puissance en soutien aux programmes de sélection pour des contextes de culture intensifiés, ce chapitre met en avant les efforts en cours pour en faire bénéficier les agrosystèmes diversifiés tropicaux.

8. <https://www.cirad.fr/dans-le-monde/dispositifs-en-partenariat/agroforesta>.

9. <https://www.cirad.fr/collaborer-avec-nous/science-ouverte/infrastructures-ouvertes-du-cirad/abiophen-et-serres-experimentales>.

10. <https://www.bolero-project.eu>.

3.2.2. Vers la prise en compte de nouveaux caractères d'intérêt pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique dans les programmes de sélection

Une part importante des interactions $G \times E$ expliquant l'adaptation des plantes aux conditions climatiques se joue au niveau du sol, entre le système racinaire, les ressources et le microbiome. Une petite fraction des microbes présents dans la rhizosphère peut être bénéfique pour la plante hôte, induisant des modifications morphologiques et physiologiques bénéfiques du système racinaire (Gonin *et al.*, 2023). Ces interactions entre les racines et le microbiote associé peuvent contribuer efficacement à une tolérance aux stress abiotiques (par exemple un enracinement plus profond, une meilleure absorption des nutriments ou de l'eau, etc.), notamment à la sécheresse, mais aussi à une augmentation de la séquestration de carbone dans le sol (De Vries *et al.*, 2020). Promouvoir la croissance de ces microbes bénéfiques grâce à des stratégies ciblées peut améliorer la santé et la productivité des cultures dans une approche biologique. Les travaux dans ce domaine sont rares et récents.

L'enjeu d'atténuer le changement climatique impose également de s'adresser à la réduction de l'émission des gaz à effet de serre et à la séquestration de carbone par les systèmes agricoles. Cet enjeu est global (voir paragraphe 2), mais concerne en particulier la riziculture inondée, à l'origine d'émissions importantes de méthane affectant l'environnement. La potentialité de mobiliser la diversité génétique du riz pour créer des variétés émettant moins de méthane en conditions inondées ou, surtout, à même de produire en condition d'aérobie à des niveaux de rendement se rapprochant des conditions inondées (Saito *et al.*, 2018) a été mise en avant dans ce chapitre. Au-delà de ces résultats, des travaux récents ont montré l'existence de diversité génétique chez le riz dans sa capacité à assimiler le CO_2 atmosphérique *via* la photosynthèse et à augmenter ainsi la production, mais aussi l'accumulation de carbone dans la plante, y compris au niveau racinaire. Ces résultats originaux ouvrent la voie à leur valorisation en sélection variétale, à la fois en matière d'adaptation et d'atténuation du changement climatique (Dingkuhn *et al.*, 2020).

3.2.3. Des nouveaux enjeux pour le greffage

Fort de l'expérience des agrumes, on peut imaginer l'utilisation d'espèces sauvages chez les plantes pérennes, combinée à la technique de greffage, comme solution rapide pour pallier les effets du changement climatique. Le genre *Coffea* ne compte pas moins de 130 espèces originaires d'Afrique de l'Ouest et centrale, dont une grande partie est conservée dans des jardins botaniques ou des centres de ressources biologiques (CRB à La Réunion, collection internationale du CATIE au Costa Rica, CRB en Guyane française). Cette diversité est actuellement explorée pour identifier des espèces plus tolérantes à la chaleur et à la sécheresse et pour les tester comme géniteurs d'hybrides ou comme porte-greffes pour maintenir la production d'arabica et de robusta (projet Bolero¹⁰).

3.3. Rôle des nouvelles biotechnologies

Bien qu'un grand nombre de gènes candidats pour améliorer l'adaptation à des stress biotiques et/ou abiotiques ait été identifié et séquencé grâce à une connaissance approfondie de la diversité génétique chez la plupart des espèces cultivées annuelles et pérennes, leur valorisation par édition du génome (avec l'outil CRISPR-Cas9 entre autres techniques) n'est encore qu'à son balbutiement. Les premières plantes éditées

proposées à la commercialisation sont modifiées pour des caractères simples, comme la qualité et la résistance aux stress biotiques (Pixley *et al.*, 2022). Chez le caféier, comme pour la plupart des arbres fruitiers tropicaux où les communautés scientifiques sont restreintes et où l'industrie semencière est absente, ces innovations destinées aux programmes de sélection se font essentiellement à l'occasion de projets rassemblant les centres de recherche, les universités, les partenaires industriels et les agriculteurs. C'est le cas de l'initiative Jardins du PEPR SVA¹¹ qui propose d'étudier la potentielle contribution de l'agrobiodiversité en zone tropicale et tempérée aux performances agronomiques, socio-économiques et écologiques des systèmes vergers-maraîchers. Ces systèmes, graduellement abandonnés au fil des siècles, demeurent toutefois bien présents dans les zones tropicales, mais sont délaissés par l'agriculture intensive. L'initiative Jardins mettra à profit les outils d'édition du génome pour la conception d'idéotypes variétaux adaptés à ces systèmes dans le contexte du changement climatique et mobilisant la diversité génétique au sein des espèces en interaction.

Chez les céréales, l'effort est plus important et continu, grâce à une grande communauté de chercheurs, une industrie semencière puissante et des centres internationaux consacrés à ces plantes (CGIAR¹²). Si l'on ajoute à cela le bénéfice d'un temps de génération court, on peut s'attendre dans les prochaines années à une arrivée sur le marché de variétés plus résilientes au changement climatique, génétiquement éditées. Des travaux de plus en plus nombreux mobilisant cette technique permettent déjà d'identifier de nouveaux gènes d'intérêt pour l'adaptation et l'atténuation, en vue de leur intégration dans les programmes de sélection (comme le projet Greener¹³ pour des gènes d'adaptation du riz aux conditions d'aérobie).

Si la montée en puissance des nouvelles technologies pour l'édition du génome est indéniable, sa mise en pratique reste moindre sur les plantes tropicales des agricultures des pays du Sud. Pour pallier cet écart, les partenaires de la recherche à Montpellier (CIRAD, IRD, INRAE, université de Montpellier) mettent en place une infrastructure mutualisée spécialisée dans l'édition des génomes des plantes tropicales et méditerranéennes (Editrop, projet PEPR SVA).

3.4. Rôle des centres de ressources biologiques

Les CRB, notamment ceux consacrés aux plantes méditerranéennes et tropicales, ont et auront un rôle majeur à jouer dans le contexte du changement climatique. La diversité génétique qu'ils contiennent offre une source d'adaptation unique à la variabilité des contraintes agroclimatiques actuelles et futures. Il s'agit de la préserver et d'en accélérer la caractérisation pour sa valorisation dans les programmes de sélection. En ce sens, les CRB se doivent de jouer de plus en plus le rôle de plateformes d'interactions entre la recherche, la sélection variétale et les acteurs des filières agricoles au Nord comme au Sud. Dans ce contexte, les échanges de ressources génétiques se font dans le plus strict respect des accords de Nagoya (2010) destinés à mieux protéger les espèces et les écosystèmes de la planète et à en partager plus équitablement les bénéfices.

11. PEPR SVA : Sélection végétale avancée face au défi climatique. Les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) constituent le volet amont/recherche des stratégies de France 2030. <https://www.pepr-selection-vegetale.fr>.

12. CGIAR : Consultative Group on International Agricultural Research.

13. <https://umr-agap.cirad.fr/recherches/projets-de-recherche/greener>.

4. Références bibliographiques

- Alves G.S.C., Torres L.F., Déchamp E., Breitler J.-C., Joët T., Gatineau F., *et al.*, 2017. Differential fine-tuning of gene expression regulation in coffee leaves by CcDREB1D promoter haplotypes under water deficit. *J. Exp. Bot.* 68, 3017-3031. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx166>
- Benitez-Alfonso Y., Soanes B.K., Zimba S., Sinanaj B., German L., Sharma V., *et al.*, 2023. Enhancing climate change resilience in agricultural crops. *Curr. Biol.* 33, R1246-R1261. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.10.028>
- Bowman K.D., Joubert J., 2020. "Citrus Rootstocks," in *The Genus Citrus*, Elsevier, 105-127.
- Bravo-Peña F., Yoder L., 2024. Agrobiodiversity and smallholder resilience: A scoping review. *J. Environ. Manage.* 351, 119882. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119882>
- Breitler J.-C., Etienne H., Lérant S., Marie L., Bertrand B., 2022. Description of an Arabica Coffee Ideotype for Agroforestry Cropping Systems: A Guideline for Breeding More Resilient New Varieties. *Plants*, 11, 2133. <https://doi.org/10.3390/plants11162133>
- Chatel M., Ospina Rey Y., Rodriguez F., Lozano V.H., Delgado H., 2008. Upland rice composite population breeding and selection of promising lines for Colombian savannah ecosystem. CGIAR database Resource.
- Clerget B., Sidibe M., Bueno C.S., Grenier C., Kawakata T., Domingo A.J., *et al.*, 2021. Crop photoperiodism model 2.0 for the flowering time of sorghum and rice that includes daily changes in sunrise and sunset times and temperature acclimation. *Ann. Bot.* 128, 97-113. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab048>
- Delaunay V., Desclaux A., Sokhna C. (éd.), 2018. Niakhar, mémoires et perspectives. Recherches pluridisciplinaires sur le changement en Afrique. Marseille et Dakar, Éditions de l'IRD et L'Harmattan Sénégal, 535 p.
- De Vries F.T., Griffiths R.I., Knight C.G., Nicolitch O., Williams A., 2020. Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production. *Science*, 368, 270-274. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5192>
- Dingkuhn M., Luquet D., Fabre D., Muller B., Yin X., Paul M.J., 2020. The case for improving crop carbon sink strength or plasticity for a CO₂-rich future. *Curr. Opin. Plant Biol.* 56, 259-272. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.05.012>
- Ganeme A., Kondombo C.P., Raboin L.-M., Dusserre J., Kabore R., Adam M., *et al.*, 2022. Characterizing sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) varieties diversity to identify those with contrasting traits of interest for intercropping systems in the Sudano-Sahelian zone of West Africa. *Plant Genet. Resour. Charact. Util.* 20, 87-97. <https://doi.org/10.1017/S1479262122000168>
- Gano B., Dembele J.S.B., Tovignan T.K., Sine B., Vadez V., Diouf D., *et al.*, 2021. Adaptation Responses to Early Drought Stress of West Africa Sorghum Varieties. *Agronomy*, 11, 443. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030443>
- Gaudio N., Louarn G., Barillot R., Meunier C., Vezy R., Launay M., 2022. Exploring complementarities between modelling approaches that enable upscaling from plant community functioning to ecosystem services as a way to support agroecological transition. *Silico Plants*, 4, diab037. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab037>
- Girardi E.A., Ayres A.J., Girotto L.F., Peña L., 2021. Tree Growth and Production of Rainfed Valencia Sweet Orange Grafted onto Trifoliate Orange Hybrid Rootstocks under Aw Climate. *Agronomy*, 11, 2533. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122533>
- Gonin M., Salas-González I., Gopaulchan D., Frene J.P., Roden S., Van De Poel B., *et al.*, 2023. Plant microbiota controls an alternative root branching regulatory mechanism in plants. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 120, e2301054120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2301054120>
- Grenier C., Cao T.-V., Ospina Y., Quintero C., Châtel M.H., Tohme J., *et al.*, 2015. Accuracy of Genomic Selection in a Rice Synthetic Population Developed for Recurrent Selection Breeding. *PLOS ONE*, 10, e0136594. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136594>
- Guitton B., Théra K., Tékété M.L., Pot D., Kouressy M., Témé N., *et al.*, 2018. Integrating genetic analysis and crop modeling: A major QTL can finely adjust photoperiod-sensitive sorghum flowering. *Field Crops Res.* 221, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.007>

- Haggag J., Barrios M., Bolaños M., Merlo M., Moraga P., Munguia R., *et al.*, 2011. Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agrofor. Syst.* 82, 285-301. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9392-5>
- Heming N.M., Schroth G., Talora D.C., Faria D., 2022. Cabruca agroforestry systems reduce vulnerability of cacao plantations to climate change in southern Bahia. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00780-w>
- Levard L. (coord.), 2023. *Guide pour l'évaluation de l'agroécologie. Méthode pour apprécier ses effets et les conditions de son développement*. Éditions du Gret, éditions Quæ, 320 p.
- Luquet D., Rebolledo C., Rouan L., Soulie J.-C., Dingkuhn M., 2016. Heuristic Exploration of Theoretical Margins for Improving Adaptation of Rice through Crop-Model Assisted Phenotyping. In: Yin X., Struik P.C. (eds), *Crop Systems Biology*, Springer International Publishing, 105-127. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20562-5_5
- Nerva L., Sandrini M., Moffa L., Velasco R., Balestrini R., Chitarra W., 2022. Breeding toward improved ecological plant-microbiome interactions. *Trends Plant Sci.* 27, 1134-1143. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.06.004>
- Parent B., Leclerc M., Lacube S., Semenov M.A., Welcker C., Martre P., *et al.*, 2018. Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115, 10642-10647. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>
- Pixley K.V., Cairns J.E., Lopez-Ridaura S., Ojiewo C.O., Dawud M.A., Drabo I., *et al.*, 2023. Redesigning crop varieties to win the race between climate change and food security. *Mol. Plant*, 16, 1590-1611. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.09.003>
- Pixley K.V., Falck-Zepeda J.B., Paarlberg R.L., Phillips P.W.B., Slamet-Loedin I.H., Dhugga K.S., *et al.*, 2022. Genome-edited crops for improved food security of smallholder farmers. *Nat. Genet.* 54, 364-367. <https://doi.org/10.1038/s41588-022-01046-7>
- Raboin L.-M., Batieno B.J., Gozé E., Douzet J.-M., Poda L., Koala W.A., *et al.*, 2023. Le haricot mungo, *Vigna radiata* (L.), une alternative à l'association sorgho-niébé pour la diversification des cultures en conditions soudano-sahéliennes? *Cah. Agric.* 32, 26. <https://doi.org/10.1051/cagri/2023019>
- Rahn E., Vaast P., Läderach P., van Asten P., Jassogne L., Ghazoul J., 2018. Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. *Ecological Modelling*, 371, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>
- Rajendran S., Park H., Kim J., Park S.J., Shin D., Lee J.-H., *et al.*, 2024. Methane Emission from Rice Fields: Necessity for Molecular Approach for Mitigation. *Rice Sci.* 31, 159-178. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.10.003>
- Rebolledo M.C., Ranaivoson L., Falconnier G., Adam M., Ibrahim A., Mallikarjuna S., *et al.*, 2023. Global Rice Field laboratory to understand rice response to climate variability. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10399125>
- Rigal C., Wagner S., Nguyen M.P., Jassogne L., Vaast P., 2022. ShadeTreeAdvice methodology: Guiding tree-species selection using local knowledge. *People Nat.* 4, 1233-1248. <https://doi.org/10.1002/pan3.10374>
- Saito K., Asai H., Zhao D., Laborte A.G., Grenier C., 2018. Progress in varietal improvement for increasing upland rice productivity in the tropics. *Plant Prod. Sci.* 21, 145-158. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1459751>
- Saj S., Jagoret P., Ngnogue H.T., Tixier P., 2023. Effect of neighbouring perennials on cocoa tree pod production in complex agroforestry systems in Cameroon. *Eur. J. Agron.* 146, 126810. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126810>
- Santana-Vieira D.D.S., Freschi L., Almeida L.A.D.H., Moraes D.H.S.D., Neves D.M., Santos L.M.D., *et al.*, 2016. Survival strategies of citrus rootstocks subjected to drought. *Sci. Rep.* 6, 38775. <https://doi.org/10.1038/srep38775>
- Sarzynski T., Vaast P., Rigal C., Marraccini P., Delahaie B., Georget F., *et al.*, 2024. Contrasted agro-nomical and physiological responses of five *Coffea arabica* genotypes under soil water deficit in field conditions. *Front. Plant Sci.* 15, 1443900. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1443900>

- Steiger L., Nagai C., Moore H., Morden W., Osgood V., Ming R., 2002. AFLP analysis of genetic diversity within and among *Coffea arabica* cultivars. *TAG Theor. Appl. Genet.* 105, 209-215. <https://doi.org/10.1007/s00122-002-0939-8>
- Tong H., Nikoloski Z., 2021. Machine learning approaches for crop improvement: Leveraging phenotypic and genotypic big data. *J. Plant Physiol.* 257, 153354. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153354>
- Turreira-García N., 2022. Farmers' perceptions and adoption of *Coffea arabica* F1 hybrids in Central America. *World Dev. Sustain.* 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.wds.2022.100007>
- Vadez V., Deshpande S.P., Kholova J., Hammer G.L., Borrell A.K., Talwar H.S., *et al.*, 2011. Stay-green quantitative trait loci's effects on water extraction, transpiration efficiency and seed yield depend on recipient parent background. *Funct. Plant Biol.* 38, 553. <https://doi.org/10.1071/FP11073>
- Vom Brocke K., Kondombo C.P., Guillet M., Kaboré R., Sidibé A., Temple L., *et al.*, 2020. Impact of participatory sorghum breeding in Burkina Faso. *Agric. Syst.* 180, 102775. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102775>
- Welcker C., Cabrera Bosquet L., Grau A., Tardieu F., Negre V., *et al.*, 2015. M3P: The "Montpellier Plant Phenotyping Platforms". EPPN Plant Phenotyping Symposium, Barcelona, Spain.
- Wu G.A., Terol J., Ibanez V., López-García A., Pérez-Román E., Borredá C., *et al.*, 2018. Genomics of the origin and evolution of Citrus. *Nature*, 554, 311-316. <https://doi.org/10.1038/nature25447>