Biodiversité et adaptation des cultures face au changement climatique dans les Pays du Sud

Auteurs :
THUILLET Anne-Céline, Chargée de recherche à l'IRD, UMR DIADE (Diversité Adaptation et Développement des plantes)
VIGOUROUX Yves, Directeur de Recherche, Unité Mixte de Recherche DIADE, Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier

18-05-2021



Le réchauffement mondial s'est accéléré à partir des années 1970. Ce changement climatique a un impact majeur sur les cultures, et menace la production agricole. Dans les pays du Sud, déjà vulnérables du fait de conditions locales erratiques, de contextes sociaux fragiles et de moyens limités, le changement climatique menace de plus la sécurité alimentaire. Face à ce défi, plusieurs stratégies sont mises en œuvre par les agriculteurs. Des options à court terme sont déployées. Mais une adaptation à plus long terme des écosystèmes agricoles devra intégrer le maintien, la connaissance et l'utilisation raisonnée de la biodiversité des espèces cultivées. Quelle place pour l'agrobiodiversité face aux changements globaux dans les pays du Sud, et comment la valoriser au profit d'une résilience de ces systèmes agricoles ?

1. Paysages agricoles au Sud : une diversité globalement importante

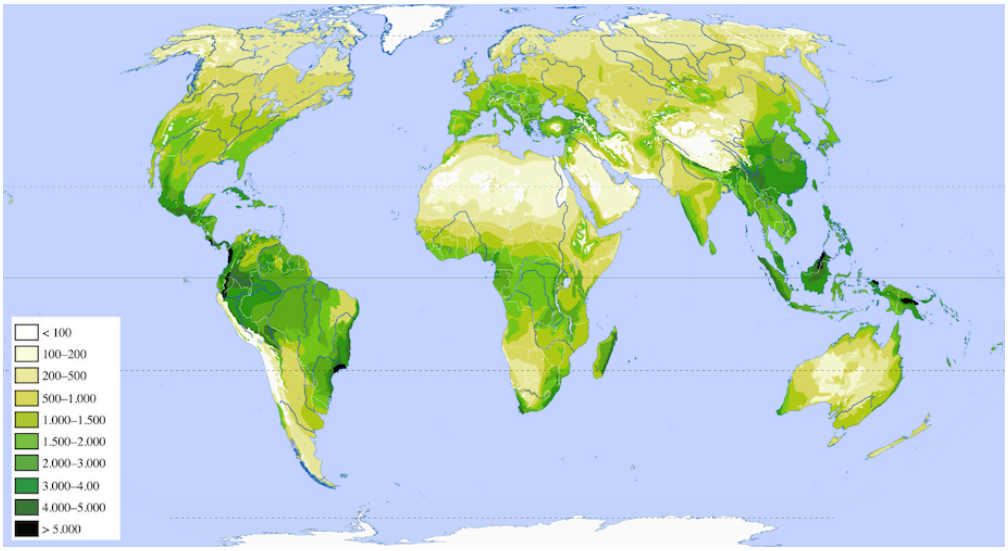


Figure 1. Répartition mondiale de la biodiversité végétale, basée sur le nombre d'espèces par 10 000 km². [Source : Fährtenleser, CC BY-SA 4.0 via Wikimedia Commons]

Les pays du Sud [1] renferment une grande biodiversité naturelle : leur géographie coïncide en grande partie avec des zones riches en termes de nombre d'espèces. Ceci est particulièrement vrai en Amérique du Sud, avec l'immense étendue amazonienne. Une biodiversité importante est aussi rencontrée en Asie du Sud Est et dans certaines régions d'Afrique (Figure 1).

D'un point de vue agricole, la production végétale mondiale ne repose que sur une faible proportion d'espèces : sur environ 391 000 plantes vascularisées connues, seulement 31 000 sont utilisées par l'Homme, et 5 000 participent à son alimentation. Mais un zoom sur les Pays du Sud révèle que les **50 pays les moins avancés concentrent 4 fois plus de biodiversité agricole** que le reste de la planète en termes de nombre d'espèces cultivées.

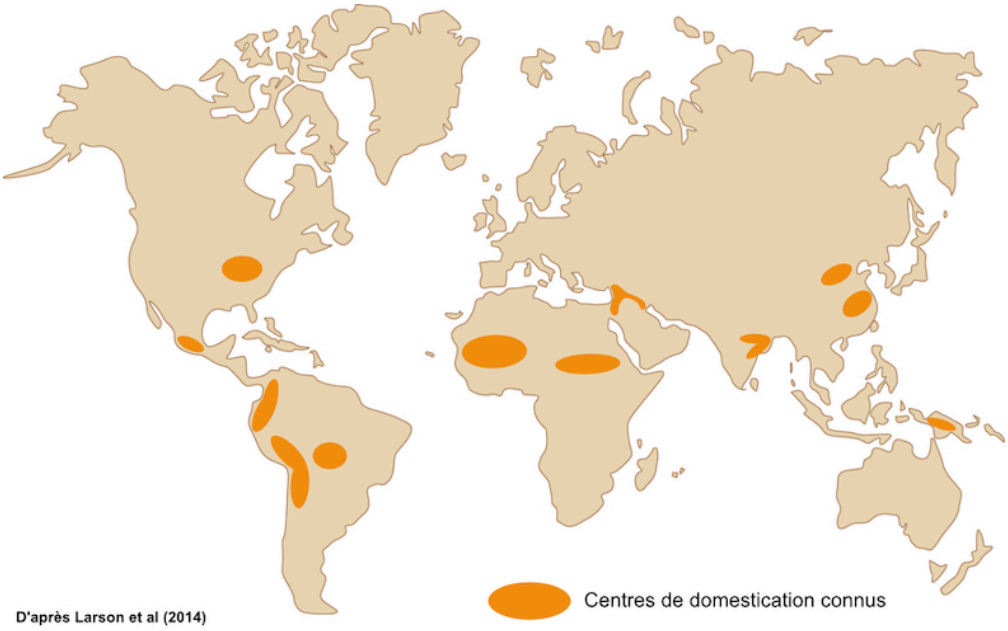


Figure 2. Répartition des principaux centres de domestication connus. [Source : adapté d'après Larson et al. réf. [2] - https://doi.org/10.1073/pnas.1323964111]

Au sein de ces zones bien diversifiées, on trouve plusieurs des **centres de domestication**, qui ont vu naître les plantes cultivées actuelles (Figure 2) [2]. Les plantes cultivées poussent à proximité de leurs ancêtres sauvages, rendant possibles des flux de gènes et maintenant localement un apport de diversité continu au sein du compartiment cultivé.

Enfin, **l'agriculture familiale joue un rôle important au Sud.** Par définition aux mains des membres d'une même famille, elle est caractérisée par des exploitations de petites tailles, et une production peu intensive. Elle permet l'autoconsommation, et est bâtie sur un capital également familial (Tableau 1). Ces petits agriculteurs dominent largement l'agriculture mondiale : 63% des

terres agricoles dans le monde sont exploitées par l'agriculture familiale. Or elles sont aussi fortement concentrées au Sud. L'agriculture familiale occupe plus de 50% de la population active en Asie et en Afrique contre moins de 5% de la population active en Europe et en Amérique du Nord.

Tableau 1. Principaux types d'exploitations agricoles. [Source : Adapté de « Les agricultures familiales du monde. Définitions, contributions et politiques publiques ». 2013. CIRAD.]

	Agricultures entrepreneuriales	
	Entreprise	**Expl**
Main d'œuvre	Exclusivement salariée	Mixte,
Capital	Actionnaires	Familial
Management	Technique	
Consommation	Sans objet	
Statut juridique	SA ou autre forme sociétaire	Statut associat
Statut foncier	Propriété ou faire-valoir indi	

2. Pourquoi la biodiversité végétale est-elle un atout pour l'agriculture face au changement climatique ?

2.1. Liens entre biodiversité et productivité

L'effet d'assurance



Figure 3. Diversité d'un jardin mélanésien au Vanuatu (a) ; système de culture plurispécifique au Kenya (b). [Source : © IRD, Stéphanie Carrière (a), © Adeline Barnaud (b)]

La biodiversité est une carte maîtresse à jouer face aux variations de l'environnement. Tout d'abord, un **effet dit « d'assurance »** peut exister au sein d'un agroécosystème par le fait de **cultiver un nombre important d'espèces** différentes (Figure 3). Cette stratégie correspond à ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier. L'idée est que les espèces ne sont pas toutes sensibles aux variations environnementales de la même façon. Un « panier d'espèces » plus diversifié pourra alors garantir un niveau de production global moins impacté par les aléas climatiques successifs, que si une seule espèce était cultivée. Une étude à échelle multinationale, basée sur 91 pays, et 5 décennies de données concernant 176 espèces en culture annuelle démontre une plus grande stabilité temporelle des rendements des nations présentant les systèmes les plus diversifiés [3].

Tirer bénéfice de niches écologiques complémentaires

Cultiver plusieurs espèces ensemble permet de plus d'optimiser l'utilisation des ressources par les plantes. La complémentarité des espèces associées peut mener à une production globale plus importante qu'au sein d'un système basé sur la production d'une seule espèce. Cette **complémentarité, dite « de niche »** [4], peut être :
- **fonctionnelle**, lorsque des espèces en association n'utilisent pas les mêmes ressources ;
- **temporelle**, lorsqu'elles bénéficient au mieux de ces ressources à des moments différents de leur développement.

Au sein des écosystèmes naturels la complémentarité de niche a montré son rôle dans le maintien de leur productivité et leur résilience.



Figure 4. L'association de l'hévéa avec le caféier permet de dégager un excédent global de 21 % en rendements cumulés par rapport à la monoculture d'hévéa. [Source : © R. Lacote/Cirad]

Au sein des agroécosystèmes, des études récentes ont commencé à démontrer des **effets bénéfiques des associations de plusieurs espèces** au sein d'une parcelle sur le niveau de production. C'est le cas par exemple de l'association hévéa-cacaoyer ou

hévéa-caféier (Figure 4).

Au niveau intra-spécifique, on observe également un **effet positif de la diversité génétique, au niveau cette fois de la stabilité du rendement**. Ceci pourrait permettre de repenser les schémas de sélection variétale. L'obtention d'une variété est en effet souvent focalisée sur la création de variétés types, génétiquement homogènes, donc renfermant peu de différences fonctionnelles. Certains auteurs suggèrent au contraire de proposer aux agriculteurs de semer des mélanges de variétés présentant de fortes différences dans leur physiologie d'acquisition des ressources (minéraux, eau, lumière...) afin de maximiser le rendement [5].

La facilitation

L'association de plusieurs espèces en culture présente un autre avantage. Un apport de nutriment bénéfique à la culture d'une plante peut être généré par la culture d'une autre plante, **un phénomène appelé 'facilitation'**. Par exemple, l'association de légumineuses, fixatrices de l'azote de l'air, permet un apport azoté dans le sol, qui peut être utilisé par des céréales. Ce type d'association permet de réduire l'apport d'engrais. Une étude de terrain à l'échelle du Malawi menée sur 10 ans montre que l'association de cultures de cacahuètes ou de soja à la culture de maïs a amélioré le rendement, en nécessitant jusqu'à moitié moins d'engrais par rapport à la monoculture pour produire des quantités équivalentes de céréales, et sur une base plus stable (variabilité du rendement réduite de 22% à 13%) [6].

2.2. L'adaptation locale

Une grande diversité génétique face à un environnement changeant est également utile à travers le phénomène **d'adaptation locale** (Lire L'adaptation des organismes à leur environnement & Adaptation : répondre aux défis de l'environnement). A l'échelle des variétés, il existe une diversité fonctionnelle susceptible de répondre à de nouvelles pressions de sélection, dont celles induites par les changements climatiques. Cette diversité fonctionnelle peut préexister au sein des variétés ou être acquise par des échanges de gènes ou par l'hybridation (croisement entre deux variétés).

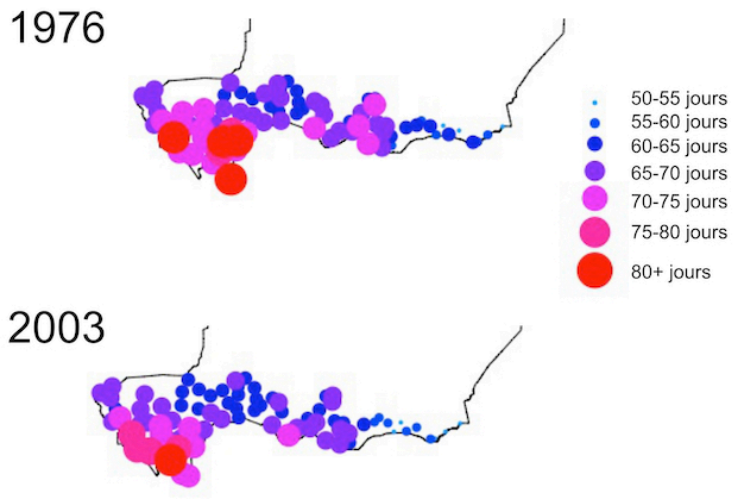


Figure 5. Temps de floraison des variétés de mil cultivées au Niger en 1976 et en 2003. [Source : Yves Vigouroux, issu de Vigouroux et al. ref. 7]

Le rôle des agriculteurs au sein des exploitations familiales est ici primordial : ils adaptent et sélectionnent les variétés, surimposant à la sélection naturelle un facteur anthropique décisif dans le maintien de la dynamique de la diversité de leurs cultures, et dans la réponse évolutive de ces cultures à l'environnement. En plein champ, une sélection environnementale et humaine s'opère donc dans le contexte des Pays du Sud, conduisant à continuellement faire évoluer les variétés. Ces processus ont conduit aux adaptations de différentes espèces à des climats très divers. Par exemple, le maïs, plante naturellement tropicale, pousse dans les tropiques à basses altitudes mais jusqu'à 4 000 m dans les Andes, et des variétés sont adaptées aux hautes latitudes tempérées (Canada, Europe du Nord). Mais on voit aussi des adaptations locales récentes, comme chez le mil au Niger, qui montre une floraison plus précoce des variétés de 1976 à 2003, en réponse à une sécheresse plus marquée sur cette période (Figure 5). [7]

2.3. L'introgression

La proximité de certaines cultures avec leurs ancêtres sauvages permet le **croisement entre espèces cultivées et espèces sauvages apparentées**. Le terme d'introgression désigne le fait qu'au cours de ces croisements, certaines zones du génome d'une des espèces parentes se retrouvent, au sein de la descendance, intégrée au génome de l'autre espèce parente. Si cette descendance est récoltée en même temps que les plantes cultivées, alors des gènes « sauvages » seront maintenus au sein du compartiment cultivé lorsque les graines seront ressemées. L'existence de tels flux de gènes entre plantes sauvages et cultivées **enrichit le fond génétique** des variétés cultivées et leur confère donc une plus grande diversité, et des possibilités d'adaptation accrues. Lorsque la diversité nouvellement acquise confère un avantage supplémentaire, on parle **d'introgression adaptative**.

Ce processus sous-tend l'évolution de nombreuses espèces cultivées au cours de leur domestication, et perdure à l'heure actuelle lors de contacts récurrents entre populations sauvages et cultivées. Chez le mil, céréale majeure cultivée notamment en Afrique de l'Ouest, des introgressions adaptatives ont été démontrées dans la zone sahélienne pour 15 « régions génomiques » de l'espèce, qui correspondent à des zones particulières au sein de l'ADN [8]. L'action des agriculteurs vient aussi favoriser l'introduction de matériel sauvage au sein des cultures via une **sélection consciente**. Ainsi au Bénin certains agriculteurs collectent des tubercules sauvages ou hybrides d'ignames en zone de pousse spontanée et les ajoutent aux cultures en champs. C'est la pratique traditionnelle de « **l'ennoblement** ».

2.4. Les espèces négligées



Figure 6. Récolte du Fonio blanc par une femme en Guinée. [Source : © IRD, Adeline Barnaud]

L'adoption d'**espèces sous-utilisées**, dites aussi « négligées » pourrait venir enrichir le panel de plantes « utiles » à l'humanité pour se nourrir. Ces espèces sont souvent difficiles à travailler et n'ont pas été laissées de côté par hasard. Elles peuvent bénéficier d'efforts de recherche et sont parfois utilisées par les agriculteurs du Sud dans des contextes dits de « soudure », pour permettre une subsistance si la réserve issue des cultures principales ne s'avère pas suffisante. C'est ainsi qu'est utilisé par exemple le Fonio blanc [9] en Guinée (Figure 6).

3. La biodiversité est-elle mobilisée au Sud ?

Face aux changements climatiques, les agriculteurs des Pays du Sud adoptent un certain nombre de stratégies, en fonction de leur situation et de leurs moyens. Ils peuvent avoir recours à des pratiques différentes, à l'irrigation, à l'utilisation de différents pesticides, ou à des orientations radicalement différentes, en faveur de l'élevage, par exemple, ou même en s'assurant une autre source de revenu via un second métier.

Mais ces stratégies sont limitées par la capacité financière de l'agriculteur. Dans ce contexte, **le recours àl'agrobiodiversité locale est privilégié par les agriculteurs du Sud** comme réponse aux changements climatiques du fait de son faible coût.

Au cours d'une enquête réalisée au Mexique auprès de 291 planteurs de café, 75% affirment par exemple avoir eu recours à des variétés différentes, ou avoir adopté de nouvelles cultures pour faire face à leur perception du changement climatique [10].



Figure 7. Champ de teff près de Mojo, Éthiopie. [Source : Bernard Gagnon, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons]

En Ethiopie, 90% des agriculteurs de céréales interrogés dans la vallée du Grand Rift, et 96% de ceux de la vallée de Kobo adoptent de nouvelles variétés ou de nouvelles cultures comme stratégie principale face au réchauffement du climat [11]. Les agriculteurs plantent d'abord un sorgho tardif à plus haut rendement qu'une variété plus précoce. Mais ce sorgho tardif présente un risque plus élevé d'échec si la saison est trop sèche. Ils s'adaptent donc en fonction de l'arrivée des pluies, en plantant soit à nouveau du sorgho, mais une variété plus précoce, soit en changeant de céréale pour planter du teff à la place (Figure 7). Un des agriculteurs interrogés raconte : « *Si vous observez 75% ou plus des champs agricoles plantés en teff [12], le début de la saison des pluies a été retardé et il était même trop tard pour les semis de sorgho. Si vous voyez des proportions presque égales de sorgho et de teff, cela signifie que la pluie était à l'heure* ».

Au Pakistan, une étude auprès de 600 agriculteurs de 4 régions différentes place à nouveau le changement de variété ou de culture en tête des choix réalisés pour contrer les effets climatiques perçus (respectivement 88 et 81% des personnes interrogées [13]). Cette enquête montre également que ces agriculteurs ne cultivent pas plus de diversité : 36% environ des agriculteurs ont recours à l'augmentation du nombre de variétés ou d'espèces.

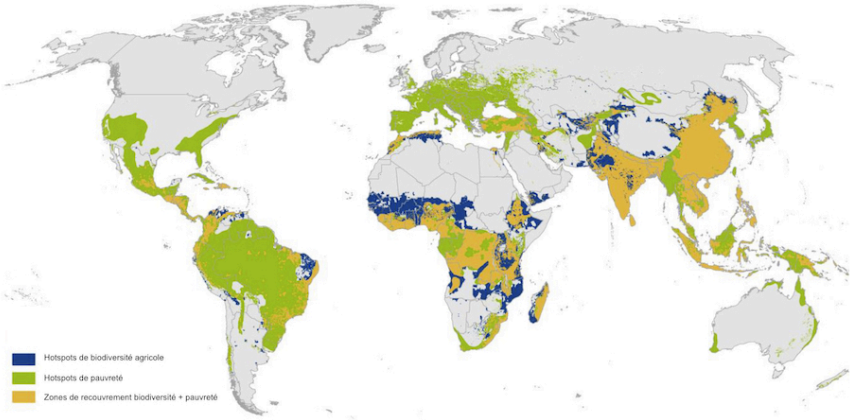


Figure 8. Zones géographiques de recouvrement entre points chauds (« hotspots ») de biodiversité et de pauvreté. [Source : © Hannes Gaisberger, voir ref. 14]

Le recours à la biodiversité disponible est donc d'ores et déjà à l'œuvre dans les champs des Pays du Sud. Les agriculteurs peuvent relativement facilement échanger des semences, et leurs savoirs leur confèrent des possibilités de choix et de décisions sur les semences à utiliser. Pourtant, un fort recouvrement entre des zones géographiques riches en biodiversité agricole et un niveau de pauvreté important montre que la présence de biodiversité ne suffit pas à assurer un meilleur rendement ni un meilleur niveau de vie aux agriculteurs (Figure 8, [14]). L'explication est que le recours à la biodiversité s'opère (i) encore trop rarement, (ii) trop lentement par rapport à la vitesse du changement climatique pour permettre aux cultures de s'adapter, et (iii) de façon inadéquate pour répondre aux contraintes imposées par l'environnement.

4. Freins et leviers pour une meilleure valorisation de la biodiversité

4.1. Le problème de l'érosion de la biodiversité

Le changement climatique, outre ses effets attendus sur le rendement des cultures, est un facteur important de **redistribution des espèces à la surface du globe**. Une étude en Afrique sub-saharienne compare les conditions climatiques actuelles aux prévisions du climat en 2070 pour 29 espèces cultivées [15]. Ces conditions climatiques vont changer significativement, jusqu'à rendre de larges espaces de la zone étudiée inappropriés pour les espèces actuelles. Par exemple, 56% de l'espace occupé actuellement par l'igname de Guinée connaîtra d'ici 50 ans des conditions climatiques auxquelles l'espèce n'a jamais été confrontée. Ceci pose la question de l'érosion de la diversité cultivée : si une culture n'est plus possible localement, elle risque fort d'être abandonnée. C'est ce qui se passe déjà, par exemple au Sénégal, où la culture du mil est progressivement abandonnée dans certains villages [16].

4.2. Trouver une biodiversité adaptée aux changements futurs

Les conditions climatiques futures de l'aire de répartition de la pomme de terre, de la courge ou du millet auront aussi beaucoup changé en 2070 [16]. Mais leurs ancêtres sauvages se trouvent actuellement dans des conditions climatiques proches de celles prévues en Africaine sub-saharienne dans 50 ans. On peut donc supposer que ces **populations sauvages apparentées aux espèces cultivées** renferment une variabilité adaptée à ces conditions futures et **serait dans ce cas une ressource utile de biodiversité**. Cette stratégie a cependant des limites : pour des espèces non originaires de la région d'Afrique où elles sont cultivées, comme la pomme de terre et la courge, les populations sauvages se trouvent en Amérique du Sud. La biodiversité intéressante n'est donc pas dans ce cas facilement et directement accessible aux agriculteurs.

4.3. Mieux valoriser la diversité intra-spécifique

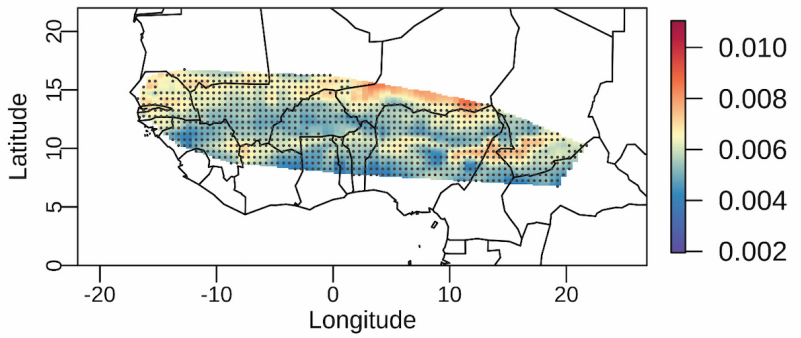


Figure 9. Vulnérabilité génomique du mil en Afrique de l'Ouest à l'horizon 2050. Les zones en rouge présentent une vulnérabilité particulièrement importante au réchauffement climatique. [Source : © Yves Vigouroux]

Au niveau intra-spécifique, des études de génétique permettent d'observer les associations entre variabilité génétique et variables environnementales. En comparant ces données aux prédictions climatiques futures, on peut prédire si les plantes, en fonction de leur bagage génétique, seront ou non vulnérables aux nouvelles conditions. Il est également possible de **déterminer si la variabilité génétique globale déjà existante permettra ou non de faire face aux conditions climatiques futures**. Une telle analyse a été réalisée sur le mil africain, dont la zone de culture située en bordure nord de l'aire de répartition actuelle serait en 2050 la plus vulnérable (Figure 9). La variabilité génétique révélée sur le reste de l'aire de répartition pourrait cependant en partie pallier à cette vulnérabilité. Mais **les variétés les mieux adaptées aux conditions futures se trouvent en moyenne à 1 000 km de leur zone cible**. La situation est donc complexe, avec une variabilité qui peut être intéressante pour l'adaptation rapide des plantes cultivées localement, mais dont l'accessibilité est freinée par de larges distances géographiques, et des barrières frontalières.

4.4. La nécessité d'une approche multi-acteurs

Une meilleure valorisation de la biodiversité pour l'agriculture doit s'appuyer sur une meilleure connaissance de la capacité de cette biodiversité à répondre aux changements environnementaux à venir. L'association entre composition génétique et adaptation au climat devra être confirmée par des essais sur le terrain. De plus, une variété ou une espèce n'est pas seulement adaptée à un climat, mais à un environnement plus global incluant le sol, et les organismes en interaction. Il ne s'agit donc pas de transplanter des variétés ou des espèces, mais bien d'inclure une variabilité a priori intéressante dans des schémas d'amélioration des plantes, qui doivent être pensés pour répondre à des environnements changeants dans les contextes agricoles du Sud.

Enfin, la question de **l'accessibilité** à une biodiversité jugée appropriée n'est pas simple. Une migration assistée, qui consisterait à amener des variétés d'un endroit à un autre, où elles seraient mieux adaptées aux changements environnementaux que les variétés locales, peut se heurter à des problèmes de frontières ou des questions politiques. De plus, deux autres obstacles de taille se superposent :

l'acceptation par les populations locales de variétés issues de zones éloignées autant géographiquement que du point de vue de leur histoire et de leurs caractéristiques socio-culturelles. L'attachement des agriculteurs à leurs semences agricoles, qui leurs sont traditionnelles et ancestrales, est en effet un sujet de recherche en soi, et doit être compris sous peine de vouer à l'échec toute tentative d'utilisation plus large de l'agrobiodiversité.

la nécessité d'un **cadre législatif** plus précis que celui existant, qui règlementerait les échanges de matériel génétique entre agriculteurs de différents pays dans le contexte d'une stratégie agricole de migration assistée au Sud. Si la migration assistée se pratique dans le cadre de programmes de conservation d'espaces naturels, les questions soulevées sont nombreuses dans le cadre de la gestion des ressources génétiques. Les réglementations autour de la question de la propriété des ressources génétiques cherchent à lutter contre la biopiraterie, c'est à dire le pillage des ressources génétiques, et à assurer un partage des avantages qui seraient issus de leur utilisation, dans des schémas de sélection par exemple. Mais ces mêmes règlementations posent le problème de l'accès aux ressources génétiques, qui si il est trop limité peut entraver des actions en faveur de la sécurité alimentaire, ou de la lutte contre le changement climatique en termes de progrès génétique. Un cadre adapté à l'éventualité de migrations assistées est donc encore à définir.

Une meilleure utilisation de la diversité planétaire au service d'une agriculture durable pourrait donc constituer une réponse clé au défi de la sécurité alimentaire au Sud face aux changements climatiques, mais devra reposer sur une approche scientifiquement intégrative et impliquer tous les acteurs.

5. Messages à retenir

L'agrobiodiversité au Sud est un atout face au changement climatique à travers (i) les associations de cultures qui permettent de profiter des effets de complémentarité de niche ; (ii) l'adaptation locale ; (iii) l'introgression ; (iv) les espèces sous-utilisées.

Elle est d'ores et déjà mobilisée par les agriculteurs pour faire face aux changements, mais plutôt en termes de remplacement de variétés ou d'espèces qu'en termes d'augmentation de la quantité de diversité utilisée.

La biodiversité locale est insuffisante face à la vitesse des changements et souvent inadaptée aux conditions futures.

De nouvelles stratégies doivent être mises en œuvre afin de valoriser au mieux la biodiversité, en intégrant la connaissance scientifique, les savoirs locaux, et la multiplicité des acteurs au service d'une agriculture durable.

Notes et références

Image de couverture. Photo de mil sauvage au Niger. [Source : © IRD, Yves Vigouroux]

[1] Les Pays du Sud désignent un ensemble de pays dont l'Indice de Développement Humain, qui représente pour un pays donné, l'espérance de vie, le niveau d'éducation et le niveau de vie, est inférieur à 0,8 (sur une échelle de 0 à 1).

[2] LARSON, G., PIPERNO, D. R., ALLABY, R. G., PURUGGANAN, M. D., ANDERSSON, L., et al. (2014). Current perspectives and the future of domestication studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111** (17) : 6139-6146; DOI: 10.1073/pnas.1323964111

[3] RENARD, D. et TILMAN, D. (2019). National food production stabilized by crop diversity. *Nature*, **571**, 257-260. < https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y >

[4] On qualifie de niche écologique l'ensemble des conditions environnementales au sein desquelles une espèce donnée pourra se développer

[5] LITRICO, I. et VIOLLE, C. (2015). Diversity in Plant Breeding : A New Conceptual Framework. Trends in *Plant Science,* **20** (10) : 604-613. < http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2015.07.007 >

[6] SNAPP, S, S., BLACKIE, M. J., GILBERT, R. A., BEZNER-KERR, R., et KANYAMA-PHIRI, G. Y. (2010). Biodiversity

can support a greener revolution in Africa. *PNAS*, **107** (48), 20840-20845. < www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1007199107 >.

[7] VIGOUROUX, Y., MARIAC, C., DE MITA, S., PHAM J.-L., GERARD, B., et al. (2011) Selection for Earlier Flowering Crop Associated with Climatic Variations in the Sahel. *PLoS ONE* **6**(5): e19563. < doi:10.1371/journal.pone.0019563 >

[8] BURGARELLA, C., CUBRY, P., KANE, N. A., VARSHNEY, R. K., MARIAC, C, et al. (2018). A western Sahara centre of domestication inferred from pearl millet genomes. Nature Ecology and Evolution, **2**, 1377–1380. < https://doi.org/10.1038/s41559-018-0643-y >

[9] Le fonio blanc est une poacée utilisée comme céréale de substitution

[10] SHINBROT, X. A., JONES, K. W., RIVERA-CASTANEDA, A., LOPEZ-BAEZ, W. and OKIMA, D. S. (2019). Smallholder Farmer Adoption of Climate-Related Adaptation Strategies: The Importance of Vulnerability Context, Livelihood Assets, and Climate Perceptions. *Environmental Management* , **63**:583–595 <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01152-z >

[11] KASSIE, B. T., HENGSDIJK, H., ROTTER, R., KAHILUOTO, H., ASSENG, S., VAN ITTERSUM, M. (2013). Adapting to Climate Variability and Change: Experiences from Cereal-Based Farming in the Central Rift and Kobo Valleys, Ethiopia. *Environmental Management* **52**:1115–1131 < DOI 10.1007/s00267-013-0145-2 >

[12] Le teff est une poaceae originaire d'Ethiopie et cultivée comme céréale secondaire.

[13] FAHAD, S., and WANG, J. (2018). Farmers' risk perception, vulnerability, and adaptation to climate change in rural Pakistan. *Land Use Policy* **79,** 301–309. < https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.018 >

[14] La figure 8 a été produite par Hannes Gaisberger à partir des données publiées par (A) Monfreda, C., Ramankutty, N., and Foley, J. A. (2008), Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000, Global Biogeochem. Cycles, 22, GB1022, doi:10.1029/2007GB002947 ; (B) Barthlott, W., Lauer, W. and Placke, A. (1996): Global distribution of species diversity in vascular plants: towards a world map of phytodiversity. Erdkunde 50, 317-328 et (C) Wood et al., 7 (2010) A Strategy and Results Framework for the CGIAR. World Bank, RIMISP, Spatial Analysis Team.

[15] PIRONON, S., ETHERINGTON, T. R., BORRELL, J. S., JUHN, N., MACIAS-FAURIA, M. et al. (2019). Potential adaptive strategies for 29 sub-Saharan crops under future climate change. Nature Climate Change, 9, 758–763, < https://doi.org/10.1038/s41558-019-0585-7 >

[16] OLODO, K., BARNAUD, A., KANE, N. A., MARIAC, C., FAYE, A., et al. (2020). Abandonment of pearl millet cropping and homogenization of its diversity over a 40-year period in Senegal. *PLoSONE* **15**(9):e0239123. < https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239123 >

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteurs :** THUILLET Anne-Céline - VIGOUROUX Yves (2021), Biodiversité et adaptation des cultures face au changement climatique dans les Pays du Sud, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=13693

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
