

être la structure la plus belle de toutes les mathématiques, le plus grand groupe de Lie exceptionnel simple, E_8 .

De la même façon que E_6 contient la structure de la théorie de grande unification Spin(10), avec ses 16 fermions, le groupe E_8 contient la structure de la théorie gravitationnelle de grande unification Spin(11,3), avec ses 64 fermions, spins compris. Ainsi, la gravité et les autres forces connues, les bosons de Higgs et une génération de fermions du modèle standard font tous partie du champ de superconnexion unifié d'un espace fibré E_8 .

Un chantier inachevé

Le groupe E_8 , avec ses 248 générateurs, a une structure riche et complexe (voir le schéma correspondant page 75). En plus de la gravité et des particules du modèle standard, E_8 inclut de nombreuses autres particules, dont certaines pourraient expliquer la matière noire cosmique, et d'autres qui pourraient rendre compte des particules des deuxième et troisième générations du modèle standard.

Cette nouvelle théorie fondée sur E_8 , groupe sur lequel plusieurs physiciens travaillent, est prometteuse, mais il reste beaucoup de travail à faire. Nous devons comprendre comment trois générations de fermions émergent, comment ils se mélangent et interagissent avec les bosons de Higgs pour acquérir leur masse, et exactement comment la théorie E_8 fonctionne dans le contexte de la théorie quantique.

Si la théorie E_8 est correcte, il est vraisemblable que le LHC détectera certaines des particules prédites. Mais si ce collisionneur détecte des particules qui ne correspondent pas au motif de E_8 , cela pourrait porter un coup fatal à la théorie. Dans un cas comme dans l'autre, les mêmes outils géométriques utilisés pour développer la théorie E_8 seront utiles pour comprendre les résultats du collisionneur. Toute particule que les expérimentateurs découvriront prendra sa place dans un diagramme de poids, et nous rapprochera un peu plus de la structure géométrique profonde de la nature. Et que la théorie E_8 soit la bonne ou pas, elle nous aura fait quand même progresser vers la théorie du Tout. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Gilmore, *Lie Groups, Physics, and Geometry*, Cambridge University Press, 2008.

A. G. Lisi, *The beauty of particle physics*, www.ted.com/index.php/talks/garrett_lisi_on_his_theory_of_everything.html

A. G. Lisi, *An exceptionally simple theory of everything*, <http://arxiv.org/abs/0711.0770>

L. Smolin, *Des atomes d'espace et de temps*, *Pour la Science*, n° 316, 2004.

H. Bernstein et A. Phillips, *Les espaces fibrés et la théorie quantique*, *Pour la Science*, n° 47, 1981.

H. Georgi, *Une théorie unifiée des particules élémentaires et des interactions*, *Pour la Science*, n° 44, 1981.



le collège universcience
à la Cité des sciences et de l'industrie

Conférences
Le mardi à 18 h 30

Les deux infinis

Entre l'infiniment petit et l'infiniment grand, physiciens des particules et cosmologistes travaillent désormais la main dans la main pour mieux comprendre la matière et l'Univers. Quatre d'entre eux nous expliquent pourquoi et comment.

—

1^{er} mars
Dans l'immensité du cosmos
Jean-Loup Puget, astrophysicien, directeur de recherche au CNRS, membre de l'Académie des sciences.

8 mars
Au plus intime de la matière
Michel Davier, physicien, professeur à l'université Paris- Sud Orsay, membre de l'Académie des sciences.

—

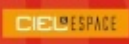
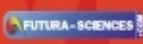
15 mars
L'infiniment petit, clé de l'Univers ?
Pierre Binétruy, directeur du laboratoire AstroParticule et Cosmologie (APC), CNRS-université Paris-Diderot.

—

22 mars
Le LHC, projection dans les infinis
Michel Spiro, président du Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN).

universcience.fr

Avec le soutien de




Le bananier, un enjeu mondial

André Lassoudière

Le bananier est l'une des principales ressources alimentaires de la planète. Depuis une vingtaine d'années, une agriculture raisonnée et durable de la banane est mise en place pour répondre à des besoins toujours croissants.

« Quel fruit se mange, produit de l'alcool, des médicaments, du papier, de la corde, de la ficelle, du fil, des objets artisanaux variés, des parapluies, des assiettes "biologiques" jetables, des contenants à cuisson, de la colle, de la teinture, du savon? » Comme le souligne ce slogan du Réseau international d'amélioration de la banane et de la banane plantain (INIBAP), le bananier est une plante dont chaque élément est utilisé. En Inde, le cultivar Kalpatharu (un cultivar est une variété obtenue à partir d'une sélection dans un champ) en est un exemple: le fruit est consommé en dessert et préparations culinaires; les feuilles servent d'assiette; le bourgeon mâle est cuit comme un légume, les racines servent en décoction médicinale, et les animaux mangent diverses parties de la plante. La sève est utilisée comme encre indélébile, les résidus de culture en compost. Les feuilles servent aussi à réaliser des produits artisanaux. Et de nouveaux usages apparaissent encore: les fibres de la tige sont un absorbant de haute porosité et capillarité, dont on développe l'utilisation dans des systèmes naturels de purification de l'eau ou pour l'absorption de l'huile.

Après le riz, le blé et le maïs, la banane est l'une des plus importantes cultures

L'ESSENTIEL

- ✓ On produit plus de 116 millions de tonnes de bananes par an.
- ✓ Entre 1890 et 1990, leur culture intensive, couplée à l'usage croissant de pesticides, a dégradé l'environnement et favorisé la résistance des parasites.
- ✓ Depuis 20 ans, biologistes et agriculteurs élaborent des stratégies de culture bananière plus respectueuses des sols et des hommes.
- ✓ Ils cherchent notamment à maintenir une diversité indispensable pour la lutte contre les parasites, mais peu favorisée par la nature : le bananier est une herbe qui se multiplie par rejets identiques au pied-mère.

Sauf mention contraire, les figures sont de A. Lassoudière

vivrières de par le monde; 90 pour cent de la production sont consommés sur place, notamment dans les pays les plus pauvres d'Afrique, d'Amérique latine et d'Asie. Dans certaines régions, la banane est même la base de l'alimentation humaine depuis des siècles. Elle a fait son apparition dans la consommation des régions tempérées beaucoup plus récemment – vers 1870 en Amérique et en Europe. Le commerce international s'est accéléré au début du XX^e siècle, avec le développement du transport maritime réfrigéré.

Pour répondre à des besoins toujours croissants, le marché de la banane a connu une expansion considérable, entraînant une culture intensive, peu soucieuse de l'environnement. Vers 1990, nous allons le voir, le constat était désastreux: dégradation des sols, pollution de l'eau, impact sur la santé... Mais depuis, s'inspirant des propriétés de cette plante étonnante – c'est une herbe géante qui produit des fruits généralement sans graines –, les chercheurs et les producteurs de différentes régions (de Martinique et de Guadeloupe, notamment) mettent au point de nouvelles stratégies favorisant une culture raisonnée, tout aussi productive, mais respectueuse de l'environnement. Ce sont ces stratégies que nous présentons ici.



© Shutterstock / AND Inc.

1. L'INFLORESCENCE du bananier présente deux parties : les fleurs femelles, précoces, donnent les bananes (*en haut*), puis suivent les fleurs mâles (ici, elles sont déjà tombées, et il ne reste que la tige dénudée), produites par le bourgeon terminal (*ci-contre*).

Mais auparavant, examinons de plus près cette plante surprenante et les contraintes liées à sa culture.

Le bananier est probablement la plus grande herbe du monde, une espèce (*Musa ingens*) pouvant atteindre 15 mètres de hauteur. Le « faux-tronc » est formé de gaines de feuilles imbriquées (*voir l'encadré page 80*). L'inflorescence – la tige qui porte les fleurs – prend naissance dans la souche et progresse au centre du faux-tronc avant d'être visible au milieu du bouquet de feuilles. Sur cette inflorescence, les fleurs les plus précoces sont femelles et leurs ovaires donnent les fruits, l'ensemble constituant le régime de bananes. Si les espèces sauvages de bananier sont séminifères (les bananes portent des graines), chez la majorité des cultivars, les fruits obtenus sont sans graines (aspermes). En outre, les ovaires de leurs fleurs femelles se développent généralement sans fécondation (fruits dits parthénocarpiques), alors que dans la plupart des espèces sauvages, ils doivent être fécondés pour se transformer en fruits. Les fleurs suivantes sont mâles. Chaque pseudotronc donne une inflorescence unique, puis meurt. La pérennité de la plante est assurée par voie végétative, les ramifications latérales (rejets) prenant la place du pied-mère.

Une herbe domestiquée très tôt

Le bananier est l'une des plantes les plus anciennement cultivées. Les premiers vestiges horticoles découverts en Papouasie-Nouvelle-Guinée datent d'environ 10 000 ans. La première domestication des bananiers sauvages – à graines – s'est faite par sélection d'hybrides portant de gros régimes : les espèces sauvages se sont croisées naturellement (le pollen des fleurs mâles d'une espèce a fécondé les graines des bananes d'une autre espèce, lesquelles, après la chute du fruit, ont pris racine et donné de nouvelles variétés hybrides), et les hommes ont cultivé les hybrides qui donnaient beaucoup de fruits (*voir l'encadré page 83*). Les fruits de ces premiers cultivars avaient peu de graines – et étaient donc stériles –, mais une pulpe abondante. De l'Asie méridionale aux Philippines, les peuples « primitifs » ont utilisé très tôt les bananiers, même séminifères. Leurs graines étant dures et non comestibles, ils auraient cultivé les bananiers pour consommer les parties les plus tendres, telles que les bourgeons et le cœur des jeunes troncs.

LE BANANIER, UNE HERBE GÉANTE

Le bananier se compose d'une tige souterraine d'où partent des racines à sa base et de larges feuilles à son sommet; elle donne naissance à une unique inflorescence, le régime. Des ramifications latérales (rejets ou rejetts) sortent de terre aux alentours, émises par la souche. Le bourgeon terminal de la tige produit des feuilles, qui apparaissent successivement en position hélicoïdale, au sommet de la tige. Leurs bases (gainnes foliaires), très développées, sont solidement imbriquées, formant

Feuille adulte
Longue et large aux limbes déchiquetés.

Feuille naissante

Feuille naissante

Régime
Jusqu'à 15 groupes (mains) de bananes peuvent se développer à partir des fleurs femelles.

Rachis de l'inflorescence
Entre les fruits et le bourgeon, les fleurs mâles tombées laissent une tige dénudée.

Bourgeon terminal
Une de ses bractées se soulève, découvrant une main de fleurs mâles (non représentée).

Faux-tronc
Gainnes foliaires imbriquées avec, au centre, la tige de l'inflorescence.

Pied-mère

Rejet fils

Rejet petit-fils

Rejeton de la 4^e génération

Souche

Racines
Elles bourgeonnent de la souche par deux, trois ou quatre.



Le faux-tronc est constitué des gainnes foliaires imbriquées, ce qui assure sa rigidité. Ces gainnes sont constituées de deux parois (parenchymes) parcourues de canaux de sève et de latex, séparées par de petits espaces lacunaires cloisonnés.

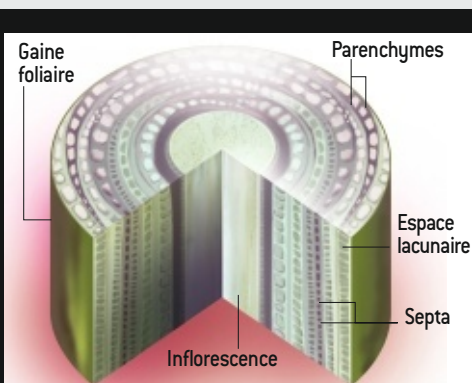
un faux-tronc droit et rigide. Ni ces gaines foliaires ni la souche ne contiennent de lignine, de sorte que le faux-tronc n'est pas en bois : c'est pourquoi le bananier est une herbe et non un arbre.

Après deux à trois mois, le bourgeon terminal de la tige cesse de produire des feuilles et déclenche la formation de l'inflorescence. Quelques semaines après, la tige de l'inflorescence s'allonge à partir de la souche à l'intérieur du faux-tronc, tandis que la jeune inflorescence se développe et grossit, pour apparaître au sommet du faux-tronc.

L'inflorescence s'épanouit alors en plusieurs stades, en se recourbant vers le sol. Les fleurs sont groupées par ensembles de deux rangées serrées, chacun étant protégé par une bractée. Les premiers groupes qui se différencient sont constitués de fleurs femelles, dont l'ovaire, très développé, deviendra une banane. L'ovaire se termine par des étamines (organe reproducteur mâle), mais, dans la plupart des variétés, l'ovaire se transforme en fruit sans fécondation.

Cinq à quinze groupes de fleurs femelles se développent ainsi, appelés mains de bananes. Les groupes suivants sont composés de fleurs mâles stériles, c'est-à-dire dont l'ovaire, atrophié, ne donne pas de fruit : les bractées se soulèvent une à une, se replient et tombent, découvrant les mains de fleurs mâles. Les jeunes bananes, qui pointent d'abord vers le bas, se redressent en quelques jours, s'allongent et s'épaississent. Il leur faudra environ dix semaines pour atteindre leur taille définitive. À l'extrémité de l'axe floral, le bourgeon terminal continue à produire des mains de fleurs mâles, qui tombent généralement en deux ou trois jours, laissant un espace dénudé entre le régime (la partie de l'inflorescence qui porte les bananes) et le bourgeon.

La récolte met fin à l'existence du bananier. Plusieurs rejets se développent à leur tour, permettant la pérennisation de la culture.



Elles forment des réservoirs d'eau pouvant contenir jusqu'à 1,5 litre pour 100 grammes de matière sèche. Les cloisons (septa) participent à la circulation de l'eau et à la rigidité de chaque feuille en évitant son écrasement.

L'évolution des espèces séminifères sauvages vers les cultivars s'est probablement faite par étapes : des hybridations naturelles ont diversifié les variétés. Parmi elles, certaines ont accumulé des facteurs de stérilité (disparition des graines) et sont devenues polyploïdes : au lieu de contenir deux exemplaires de chromosomes (variétés diploïdes), leurs cellules en contiennent trois (variétés triploïdes) ou plus, ce qui a augmenté leur taille, et donc celle des régimes. Certaines de ces variétés ont en outre acquis la capacité de produire des fruits sans fécondation des fleurs femelles. La sélection humaine a complété ce processus naturel. La connaissance des voies, périodes et moyens de dispersion est très utile pour comprendre les parentés génétiques, mais aussi les concomitances avec la dispersion du parasitisme.

Un siècle de culture intensive

La production de bananes a dépassé largement 100 millions de tonnes par an depuis 2005 (116,5 millions en 2008). Les surfaces consacrées à cette culture sont proches de dix millions d'hectares, principalement réparties dans les régions tropicales : Asie, Amérique du Sud et centrale, Afrique centrale (en 2005, les cinq premiers pays producteurs étaient l'Inde, l'Ouganda, l'Équateur, le Brésil et la Chine). On distingue les variétés dont les fruits sont consommés comme dessert de celles de bananes plantains et bananes à cuire – les bananes légume. Les bananes dessert représentent près de 60 pour cent de la production mondiale et font l'objet d'un commerce international très développé (17,3 millions de tonnes en 2008, soit environ un tiers de la production). Leur production a plus que triplé en 40 ans. Il en existe de très nombreuses variétés, mais, depuis le début des années 1960, le sous-groupe Cavendish (Grande Naine) est le plus cultivé, avec plus de 56,6 millions de tonnes produites ; ce sous-groupe représente plus de 97 pour cent du commerce international. La consommation annuelle par habitant en 2008 était de 6 kilogrammes en Russie, 9 au Japon et aux États-Unis, et 11 dans l'Union européenne.

Les bananes légume représentent environ 40 pour cent de la production totale. Les plantains (18 millions de tonnes en 2008) sont moins cultivées que les autres bananes à cuire (29,3 millions de tonnes). En fait, 98,5 pour cent sont consommés directement

dans les pays qui les produisent ; une très faible proportion est exportée (environ 690 000 tonnes). Ces bananes légume, probablement sélectionnées avant la banane dessert pour leur apport énergétique, participent à l'alimentation de base de millions d'êtres humains dans les régions tropicales humides : en 2008, par exemple, leur consommation dépasse 50 kilogrammes par an et par habitant en Côte d'Ivoire, au Costa Rica, aux Philippines et en Océanie et atteint 150 kilogrammes à Sainte-Lucie, en Ouganda ou au Samoa. Les variétés sont nombreuses et parfois liées à une utilisation particulière, telle la fabrication de bière et de vin en Afrique de l'Est.

Entre 1890 et 1990, la production bananière par hectare et par an, destinée à l'exportation, a été multipliée par cinq, passant de 15 à 70 tonnes, et la quantité prête à la commercialisation est passée de 7 à 50 tonnes. Le système de culture est devenu de plus en plus intensif, avec de graves conséquences sur l'environnement.

Entre 1870 et 1900, la mise en place de grandes surfaces de culture nécessita une multiplication intensive de bananiers provenant d'Asie du Sud-Est. Leurs prédateurs et diverses maladies n'ont pas tardé à se manifester. C'est ainsi que les bananeraies de Jamaïque et d'Amérique plantées avec le cultivar Gros Michel furent contaminées par la maladie de Panama, due à un champignon parasite (*Fusarium oxysporum f.sp. cubense*). La maladie provoqua une rapide disparition des plants atteints et s'étendit sur le continent américain. Rien qu'en Amérique centrale et du Sud, entre 1910 et 1960, plus de 45 000 hectares ont été détruits. Ce désastre marqua le début d'une collaboration étroite entre la recherche et la production : la maladie de Panama inaugura la recherche bananière à grande échelle.

Cependant, aucune lutte chimique ou physique ne fut efficace. Un programme de création d'une variété résistante dérivée de Gros Michel fut initié, mais sans résultat probant, si bien qu'un changement de variété fut mis en place à grande échelle : Gros Michel fut remplacé par des variétés très peu sensibles à la maladie de Panama, tel le sous-groupe Cavendish, mais plus exigeantes. Ainsi, à partir de 1960, toutes les plantations dans tous les pays utilisaient la Grande Naine, dans un système unique de culture toujours plus intensif avec un conditionnement des fruits en cartons.

Jusqu'en 1990, on a surtout cherché la meilleure rentabilité économique, sans trop

L'AUTEUR



André LASSOUDIÈRE a été ingénieur au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) de 1967 à 2008.

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Lassoudière, *Histoire de la culture bananière* [de la fin du XIX^e au début du XXI^e siècle]. L'importance de la recherche dans l'histoire de la production bananière d'exportation, QUÉ, à paraître, 2011.

A. Lassoudière, *L'histoire du bananier*, QUÉ, 2010.

J. M. Risède et al., *Challenging short and mid-term strategies to reduce the use of pesticides in banana production*, dans *From Science to Field, Banana Casa Study*, Guide n° 1, p. 8, ENDURE, 2010.

A. Lassoudière, *Le bananier et sa culture*, QUÉ, 2007.

K. Tomekpe, *Revue des stratégies d'amélioration conventionnelle de Musa*, *Infomusa*, vol. 13, n° 2, pp. 2-6, 2004.

se soucier des conséquences éventuelles à moyen et long termes sur l'environnement et la santé. Les traitements pesticides étaient largement utilisés. D'autant qu'outre le *Fusarium* de la maladie de Panama, d'autres parasites envahissaient les cultures bananières : depuis 1936, un champignon, *Mycosphaearella musicola*, détruisait les feuilles, provoquant la cercosporiose jaune ou maladie de Sigatoka ; depuis 1945, les larves du charançon fragilisaient les souches en y creusant des galeries et, depuis 1954, des vers microscopiques, les nématodes, tel *Radopholus similis*, l'espèce la plus dangereuse pour le bananier, s'étaient attaqués aux racines (voir la figure 2).

Pour lutter contre la cercosporiose jaune, on pulvérisa en quantité des solutions à base de cuivre (bouillie bordelaise), avec des pertes de rendement et de qualité importantes. En 1955, des chercheurs français mirent au point une méthode de traitement aux huiles minérales légères. À peine pensait-on dominer la maladie qu'une nouvelle forme plus pathogène apparaissait dans les années 1970 : la maladie des raies noires ou cercosporiose noire, causée par un autre champignon, *Mycosphaerella fijiensis*. Cette maladie atteint le feuillage non seulement des variétés commerciales déjà sensibles à la forme jaune, tel le sous-groupe Cavendish, mais aussi d'un grand nombre de cultivars vivriers qui y résistaient. Elle mettait donc en danger les moyens de subsistance de nombreuses populations rurales. Pour contrer ce nouveau fléau, on appliqua sur certaines cultures jusqu'à 50 traitements par an en Amérique centrale (contre 22 à 25 pour traiter la cercosporiose jaune).

La lutte contre le charançon noir du bananier (*Cosmopolites sordidus*) a été assurée de 1954 à 1992 par des insecticides orga-

nochlorés puissants, mais souvent toxiques pour la faune et l'environnement : l'hexachlorocyclohexane (HCH) jusqu'en 1973, puis le chlordecone (Kepone, Curlone) de 1970 à 1992. Depuis, avec la découverte d'une phéromone spécifique du charançon, la sordidine, on est revenu au piégeage : attirés par la sordidine, les charançons se noient dans un bac d'eau.

Des pathogènes du charançon – dont le nématode *Steinernema carpocapsae* – s'étaient révélés efficaces en laboratoire, mais sur le terrain, les résultats étaient peu concluants. Depuis quelques années, cependant, l'idée de combiner l'attraction par des phéromones et l'infection par des nématodes fait son chemin et permet d'envisager une lutte sans insecticide : dans le bac, on remplace l'eau par des larves d'un papillon facile à élever (*Galleria mellonella*), inoculées par le nématode. Attirés dans le bac par la sordidine, les charançons sont infectés par les nématodes après quelques minutes de contact avec les larves et, de retour dans la nature, ils contaminent leurs congénères. Les charançons infestés meurent. Ce piégeage, associé à des systèmes de culture adaptés, est un des défis du début du XXI^e siècle.

La lutte contre les nématodes fut assurée par fumigation du sol au dibromochloropropane (Némagon) de 1959 à 1970, puis à l'aide de nématocides appliqués plusieurs fois par an en fonction du nombre de nématodes dans les racines.

L'impact sur l'environnement

C'est à partir de la fin des années 1980 que les conséquences de l'utilisation de tous ces pesticides sur la qualité des ressources en eau et la santé humaine ont été



2. LES DÉGÂTS causés par les trois principaux parasites du bananier. Les larves de charançon creusent des galeries dans la souche (a) ; les nématodes détruisent les racines (b). Fragilisé dans les deux cas, le bananier

verse alors au moindre coup de vent. Enfin, les champignons responsables des cercosporioses endommagent les feuilles, diminuant leur surface, ce qui réduit les capacités de photosynthèse, donc de croissance (c).

Dans la culture bananière, tout programme de création variétale par hybridation impose au minimum deux étapes : au départ, il faut sélectionner une variété fertile, c'est-à-dire dont les fruits portent des graines, que l'on fécondera avec le pollen des fleurs d'une autre variété ; on cherche à obtenir une variété stérile (sans graines) et pathénocarpique (qui n'a pas besoin d'être fécondée pour donner des fruits), pour avoir des fruits pulpeux et plus gros. Pour réaliser ces opérations, une bonne connaissance des propriétés génétiques des Musacées – les bananiers – est nécessaire.

La famille des Musacées comporte trois genres, *Ensete*, *Musa* et *Musella*, correspondant à près de 50 espèces et plus de 1 000 variétés. La quasi-totalité des variétés cultivées présentent trois copies de leurs chromosomes (triploïdes) et sont pathénocarpiques sans graines. Elles ont pour ancêtres deux espèces sauvages diploïdes séminifères de la section des *Eumusa* (genre *Musa*) : *Musa acuminata* Colla et *Musa balbisiana* Colla. Les formes sauvages de *Musa acuminata* présentent d'amples variations de forme et de longueur des régimes et des fruits. La sous-espèce *Musa acuminata bank-*

sii est à l'origine de la plupart des variétés cultivées aujourd'hui ; c'est la seule qui présente des signes de parthénocarpiie. *Musa balbisiana* (qui n'a pas de sous-espèce) est très vigoureuse et manifeste des résistances très fortes à la plupart des maladies. Une stratégie d'hybridation consiste à repartir d'une de ces variétés séminifères.

La stérilité des variétés (ou parfois une faible fertilité) peut résulter de diverses causes. Elle peut être le fruit d'une particularité génétique : hormis dans les plantes sauvages, la méiose – division cellulaire qui donne les ovules (les graines de la banane) – se déroule rarement normalement, entraînant la formation de cellules contenant un génome variable. La stérilité peut aussi résulter de fortes variations, chez *Musa acuminata*, dans la séquence des gènes homologues situés sur deux exemplaires d'un chromosome. Enfin, elle peut être due au mélange des espèces *acuminata/balbisiana* ou à la polyploïdie. La parthénocarpiie, quant à elle, est indépendante de la stérilité : nul besoin d'une stimulation par une pollinisation réussie pour y parvenir. Elle constitue un avantage sélectif, car les fruits sont plus gros et... faciles à manger.

Pour tout programme de création variétale, il importe de disposer d'une diversité génétique la plus large possible : cette diversité est capitale dans le développement de nouveaux hybrides résistant au parasitisme tout en maintenant une diversification qualitative de la production. Cela est d'autant plus important que le bananier se multiplie par rejets, tous génétiquement identiques de génération en génération : contre un parasite, ces « clo-

nes » sont voués à disparaître. Aujourd'hui, des boutures d'une grande partie des variétés existantes sont conservées au froid, dans une collection internationale de matériel génétique de *Musa* rassemblée à l'Université catholique de Louvain, en Belgique (en association avec *Biodiversity International*). Les grandes collections sur le terrain restent cependant indispensables pour les programmes d'amélioration génétiques et les études taxonomiques.



L'HYBRIDATION DU BANANIER : après avoir supprimé, sur le bananier séminifère, les étamines (organes de reproduction mâles) des fleurs avant leur éclosion, on féconde les fleurs femelles avec les étamines d'un bananier d'une autre variété (ci-dessus).

dénoncées. En 2010, le réseau européen pour une agriculture plus respectueuse de l'environnement (ENDURE) a donné une estimation des quantités de pesticides utilisées dans divers pays exportateurs en 2006-2007 (voir la figure 4).

Parmi eux, les nématicides et les insecticides sont les plus dangereux. La Guadeloupe et la Martinique ont considérablement réduit l'utilisation de ces pesticides en quelques années : trois kilogrammes par hectare et par an de substances actives, contre dix kilogrammes en 1998, soit une réduction de 50 pour cent en huit ans, avec un rendement passant de 40 à plus de 50 tonnes à l'hectare. Ce résultat a été obtenu en partie grâce à la mise en œuvre de nouvelles pratiques culturales et méthodes de lutte développées par les chercheurs en partenariat avec les producteurs, sur lesquelles nous reviendrons. Mais d'autres pays n'inversent pas la tendance : au

Costa Rica, les évaluations ont été de 12 kilogrammes par hectare et par an en 1992, de 18 à 24 kilogrammes en 2003, et de 24 kilogrammes en 2006.

L'utilisation de fongicides pour combattre les cercosporioses, quant à elle, varie selon les conditions climatiques, la prédominance de la maladie des raies noires et le développement de résistances. En 2006, en Côte d'Ivoire, on en utilisait ainsi 4 kilogrammes par hectare, contre 42 kilogrammes au Costa Rica, du fait de la différence de climat et de la stratégie de traitement (les champignons parasites ont développé peu de résistances en Côte d'Ivoire, contrairement à ceux du Costa Rica).

En Martinique, touchée par la cercosporiose jaune, la charge de fongicide est inférieure à un kilogramme de matière active par hectare et par an. Mais la cercosporiose noire est apparue sur le territoire en septembre 2010, ce qui est très préoccupant à court terme.

Les nuisances liées à l'usage des fongicides sont notables (pollution des eaux), mais faibles devant celles entraînées par les nématicides et insecticides. La réglementation européenne interdit maintenant les traitements à moins de 50 mètres des habitations et des cours d'eau. La seule solution est la mise en culture de variétés tolérantes obtenues par sélection génétique.

Le contrôle des « mauvaises herbes », enfin, est réalisé par des herbicides (trois à huit kilogrammes par hectare et par an). Leur utilisation tend cependant à se limiter à un seul passage du fait de l'amélioration des pratiques culturales : on maintient un couvert végétal plus homogène dans le temps et l'espace (entre deux périodes de culture bananière, on cultive une autre plante), on utilise du mulch lorsque l'on replante les bananiers – treillis ou autres matériaux disposés au pied des plants pour



3. VITROPLANTS DE BANANIER cultivés en pépinière (*en haut*) après prolifération en laboratoire, puis plantés en sol sain (*en bas, deux mois après leur plantation*).

empêcher la croissance des mauvaises herbes –, on broie les plantes des jachères en cours de végétation pour nettoyer les champs. Actuellement, la recherche finalise l'utilisation de plantes « de service » qui, cultivées en même temps que le bananier, couvrent le sol en limitant le développement des mauvaises herbes.

Des plants sains sur un sol sain

Depuis 1995, dans plusieurs régions telles la Martinique, la Guadeloupe et certaines contrées du Cameroun et de la Côte d'Ivoire, la replantation des bananiers avec des vitroplants sélectionnés – des rejets « propres » cultivés hors sol – sur des terrains assainis par des jachères enherbées ou des rotations culturales a permis de rompre cette escalade de pesticides contre les nématodes et les charançons, tout en diminuant la fréquence des replantations et en améliorant les rendements. La replantation se fait en deux étapes. Après la cueillette des bananes, on crée un « vide sanitaire » : on détruit totalement l'ancienne bananeraie de façon qu'aucune repousse de bananier ne subsiste, ce qui tend à éliminer les nématodes et les larves de charançon. Puis on pratique une jachère ou une rotation culturale, ce qui enrichit la terre. Actuellement, en combinant cette pratique à la sélection de variétés de bananiers résistantes, les agronomes sont en passe d'obtenir des bananes saines, de

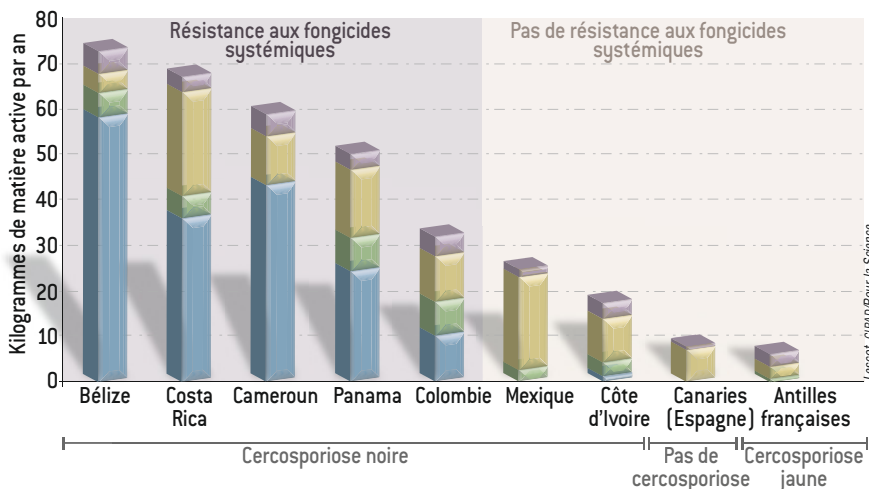
meilleure qualité, et produites dans des conditions qui préservent l'environnement et la santé humaine.

L'idée d'hybridation n'est pas récente. Dès 1922, un programme de création d'hybrides était initié en Jamaïque et à Trinidad pour créer des variétés résistant à la maladie de Panama. Des hybrides tétraploïdes (dont les cellules ont quatre exemplaires de leurs chromosomes) de Gros Michel et de l'espèce sauvage séminifère *Musa acuminata* avaient ainsi été obtenus, résistant à la maladie de Panama, mais dépourvus des qualités commerciales indispensables (*voir l'encadré page 83*). À la fin des années 1970, l'expansion rapide de la maladie des raies noires a contraint les producteurs à relancer ces recherches à l'échelle mondiale. Depuis les années 1990, les variétés résistantes ou tolérantes aux cercosporioses sont les plus prometteuses, car elles sont adaptables à toutes les conditions de production. S'ajoute à ces recherches la nécessité de disposer d'hybrides résistant aux nématodes, aux diverses formes de fusariose (maladie de Panama) et aux bactéries pathogènes apparues dans les années 1990.

L'hybridation pour lutter contre les parasites

Deux stratégies d'hybridation sont développées, l'une aboutissant à des hybrides tétraploïdes, l'autre à des hybrides triploïdes. La première consiste à améliorer une espèce intéressante, mais sensible aux parasites en la croisant avec une espèce résistante. On sélectionne, parmi les variétés existantes de l'espèce à protéger, une variété (triploïde) présentant une fertilité femelle, que l'on croise avec une variété diploïde résistante, telle l'espèce sauvage *Musa acuminata*. On obtient alors directement des hybrides tétraploïdes qui produisent de gros fruits (et d'autres variétés non viables présentant diverses ploidies). Cependant, très peu de ces hybrides présentent des fruits de qualité gustative équivalente à celle des variétés traditionnelles. De plus, ils se conservent mal après la récolte, ce qui restreint leur utilisation aux marchés locaux. Plusieurs de ces hybrides de plantains et bananes à cuire sont néanmoins cultivés.

Mise au point par le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement),



4. PESTICIDES utilisés pour la culture bananière dans quelques pays (consommation estimée en 2006). Bien que réduite dans certains pays, comme le Belize et les Antilles françaises, la consommation d'insecticides et de nématicides (*en jaune*) – les pesticides les plus dangereux – est loin d'être stoppée, notamment en Amérique centrale. Dans plusieurs pays, les fongicides de contact (*en bleu*) ont pris le relais des fongicides systémiques (agissant après absorption par le bananier, *en vert*), devenus insuffisants dans la lutte contre les cercosporioses. Les herbicides tendent en revanche à disparaître partout (*en violet*).

la seconde méthode vise à créer de nouvelles variétés améliorées. Elle consiste à utiliser des variétés diploïdes sauvages ou améliorées et à les croiser pour créer des hybrides diploïdes. Traités à la colchicine, qui bloque la division cellulaire, ces hybrides deviendront des autotétraploïdes qui, croisés avec des diploïdes, donneront des triploïdes intra- ou interspécifiques stériles et parthénocarpiques. En 2003, deux hybrides ont passé le cap de la phase d'évaluation, mais une seule variété a été retenue. Cette dernière se caractérise par des fruits courts et nombreux au goût très différent de celui des Cavendish et par un retour de cycle très rapide, de l'ordre de quatre à cinq mois. Cependant, sa grande taille et son faux-tronc grêle sont peu compatibles avec une production intensive. En 20 ans, la création variétale a largement progressé et des hybrides ayant passé le stade de sélection de la résistance aux parasites (particulièrement des cercosporioses) sont en cours d'évaluation en milieu naturel.

Enfin, depuis quelques années, afin de mieux maîtriser les infections virales (et celles du charançon), on utilise des techniques d'amélioration différentes de l'hybridation classique, les gènes de résistance à ces parasites n'étant pas connus dans le genre *Musa*. En multipliant *in vitro* des bourgeons de la souche, les chercheurs obtiennent des suspensions de cellules, à partir desquelles ils sélectionnent des clones, parfois après avoir provoqué des mutations au hasard ou transféré des gènes conférant une résistance à une maladie. En Ouganda, à Cuba, en Colombie et dans quelques autres pays, des plants résistants à la cercosporiose noire et des variétés transgéniques résistants à la maladie de Panama, aux charançons et aux nématodes seraient en cours d'évaluation en plein champ. Comme toute recherche sur les OGM, ces travaux soulèvent de nombreuses questions écologiques ; souhaitons que l'évaluation de la biosécurité soit réalisée avec rigueur et indépendance.

En Guadeloupe et en Martinique, les agriculteurs, en étroite collaboration avec les chercheurs du CIRAD, de l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), de l'IRD (Institut de recherche pour le développement), du CEMAGREF (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) et de diverses équipes universitaires, dévelop-

La banane, rites et symboles		
Depuis longtemps « au service des humains », le bananier est intégré à la culture et aux croyances de nombreuses sociétés. En Inde, il est mentionné dans divers textes sacrés dès le VI^e siècle avant notre ère. Selon les croyances chrétiennes de l'Inde et du Sri Lanka, la banane était le fruit défendu offert par Ève à Adam, et la grappe de raisin de l'histoire des Hébreux devenait un régime de bananes. La touffe de bananiers, avec son pied-mère, ses rejets fils et petits-fils, est souvent rapprochée de la famille humaine. Le juriste musulman Abu Hanifa (VIII^e siècle) fait ainsi dire à son disciple : « Pourquoi donc, mon fils, ne me ressembles-tu point ? » Son fils lui répond : « Je suis comme le bananier, qui n'est bon à quelque chose qu'après la mort de sa mère. »	Nombre d'ethnies associent le bananier à la féminité. Chez les Mélanésien, il symbolise la femme (produisant des fruits comme la femme donne naissance). Chez les Yanomami (Amazonie), la femme et l'homme occupent deux positions extrêmes, à l'image du bananier et du palmier dans le cycle agricole : le bananier est la première plante à fructifier et disparaître, alors que le palmier, dernière à fructifier, subsiste même lorsque le jardin est devenu improductif. Les Bamoun (Cameroun), quant à eux, enterrent le placenta du nouveau-né au pied d'un bananier si c'est une fille, d'un palmier si c'est un garçon. En Afrique des Grands Lacs (Ouganda, Rwanda, Burundi), le bananier est au cœur des traditions des peuples du Buganda,	du Buhaya et du Busoga. Le garçon adulte offre comme dot des bananiers de la variété « Mpolongoma » (lion). Et s'il délaisse sa femme, celle-ci recourt au cultivar Enzinga, dont les bananes disposées en spirale sont censées empêcher les maris de batifoler. Le bananier est aussi le pilier de l'économie familiale : la présence de bananiers porteurs de régimes permet d'obtenir un prêt. La bière de banane se partage dans les réunions masculines qui marquent la vie familiale et publique, ainsi que lors de diverses autres cérémonies. Dans certaines cultures, enfin, le bananier est associé à la méditation : parce qu'il disparaît après avoir porté ses fruits, Bouddha en a fait le symbole de la fragilité et de l'instabilité des choses de ce monde.

pent une démarche associant stratégie culturale, lutte biologique et utilisation de variétés résistantes : interruption des cycles de développement des pathogènes pour réduire leur dispersion (combinaisons de jachères et de rotations des cultures), création et développement de variétés résistantes compatibles avec les conditions d'exportation, développement des plantes qui assurent le couvert végétal entre deux périodes de culture bananière, amélioration des techniques de lutte contre le charançon et les maladies post-récolte.

Vers une production durable

La recherche prospective s'intéresse aussi à trois aspects très différents. D'abord, elle prend en compte les perspectives du marché. Des niches particulières de marché se développent : banane biologique, banane équitable..., mais aussi une diversification des goûts, qui appelle à développer de nouvelles variétés. Ensuite, elle étudie les risques d'évolution du parasitisme : depuis moins de dix ans, on a vu une extension inquiétante de maladies et parasites émergents, tels le flétrissement bactérien en Afrique ou la maladie

des raies noires en Martinique. Il s'agit donc de veiller à la durabilité des résistances parmi les variétés sélectionnées et d'éviter les contournements de ces résistances par les agents pathogènes.

La mise en place d'une production et d'une protection intégrées, enfin, impose l'étude des relations entre la durabilité du système de culture (notamment des résistances aux attaques de pathogènes) et l'agrodiversité qui y règne, fruit de la réintroduction d'une diversité organisée (rotation, variétés, etc.) et de la promotion d'une diversité naturelle au niveau des sols.

Avec ces nouvelles conceptions et pratiques, on peut être optimiste quant à l'avenir de la culture de la banane pour l'exportation. En revanche, les productions de bananes légume – base de la sécurité et de l'indépendance alimentaire des pays pauvres – n'ont pas bénéficié de recherches soutenues avant les années 1970. Depuis, l'impact de la cercosporiose noire sur beaucoup de ces cultures a fait émerger, au plan international, la nécessité d'une recherche spécifique, axée sur la mise au point de variétés résistantes au parasitisme, l'utilisation de pesticides – trop onéreuse – étant exclue dans les pays concernés. ■



Improbables

L'ESSENTIEL

✓ Les astronomes ont, de façon inattendue, découvert des planètes autour d'étoiles à neutrons (résidus d'explosions en supernova), de naines blanches (cadavres d'étoiles de type solaire) ou de naines brunes (étoiles avortées).

✓ Ces planètes situées dans des systèmes extrêmes témoignent de l'universalité et de la robustesse du processus de formation planétaire.

L'un des spectacles les plus poignants des cieux est celui d'une naine blanche. Un tel astre a une masse comparable à celle de notre Soleil, mais il figure parmi les moins brillants, et son éclat ne cesse de faiblir.

Il ne s'agit pas tant d'une étoile que du cadavre d'une étoile. Pendant une durée pouvant atteindre dix milliards d'années, cet astre a été très semblable au Soleil et a brillé avec le même éclat. Mais lorsqu'il a commencé à être à court de combustible, il a connu une violente agonie. Il s'est dilaté jusqu'à 100 fois sa taille actuelle et est devenu 10 000 fois plus brillant (phase dite de « géante rouge »), avant d'éjecter par bouffées ses couches externes et de se recroqueviller en une braise rougeoyante de la taille de la Terre. Pour le reste de l'éternité, la naine blanche

restera inerte, en rayonnant de moins en moins d'énergie, s'éteignant peu à peu.

Et il y a plus triste encore. Avec nos collègues, nous avons trouvé dans notre Galaxie plus d'une douzaine de naines blanches autour desquelles tournent des astéroïdes, des comètes et peut-être même des planètes ; en d'autres termes, des cimetières de systèmes stellaires entiers.

Tant que les étoiles étaient en vie, elles se levaient chaque jour sur l'horizon de ces corps célestes. Elles en réchauffaient doucement le sol et faisaient s'agiter le vent. Des organismes vivants en ont peut-être même profité. Mais quand ces étoiles sont mortes, elles ont vaporisé ou englouti leurs planètes proches (ou internes), n'épargnant que celles occupant les marges lointaines et glacées.

Au fil du temps, les naines blanches ont détruit à leur tour la plupart de ces