



**Séance commune de l'Académie des technologies et
de l'Académie d'agriculture de France**

L'agriculture face à ses défis techniques L'apport des technologies

Mercredi 20 novembre 2019 de 14h à 17h
Salle des séances de l'Académie d'agriculture de France
18, rue de Bellechasse, 75007 Paris

Contact : Académie d'agriculture de France
Téléphone : 01 47 05 10 37 - Courriel : contact@academie-agriculture.fr



Organisation de la séance

Bernard Le Buanec, membre de l'Académie d'agriculture de France et membre fondateur de l'Académie des technologies

Programme

- 14h Ouverture de la séance et mots de bienvenue**
Pascal Viginier, président de l'Académie des technologies
Jean-Louis Bernard, président de l'Académie d'agriculture de France
- 14h15 Introduction**
Bernard Le Buanec, organisateur de la séance, président du groupe de travail commun de l'Académie des technologies et de l'Académie d'agriculture de France « *Nouvelles technologies pour l'agriculture* »
- 14h30 Les technologies en amélioration des plantes**
André Gallais, généticien des plantes, professeur émérite d'AgroParisTech, membre de l'Académie d'agriculture de France
- 14h50 Le machinisme agricole et robotique**
Michel Berducat, ingénieur en robotique, *Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes*, IRSTEA, Clermont-Ferrand
- 15h10 La protection des cultures**
Catherine Regnault-Roger, pharmacien et biologiste en protection des plantes et en bioprotection des agrosystèmes et de l'environnement, professeur émérite à l'université de Pau et des Pays de l'Adour, membre de l'Académie d'agriculture de France et de l'Académie nationale de Pharmacie
- 15h30 Le développement du numérique**
Christian Saguez, spécialiste des technologies numériques, professeur honoraire de l'Ecole Centrale de Paris, membre de l'Académie des technologies
- 15h50 Les technologies en développement : microbiologie du sol, photosynthèse, biologie de synthèse**
Dominique Job, biologiste végétal, directeur de recherche émérite au CNRS, membre de l'Académie d'agriculture de France
François Képès, spécialiste en biologie de synthèse, co-fondateur de la société Synovance, membre de l'Académie des technologies
- 16h10 Discussion générale**
- 16h40 Conclusion**
Bernard Le Buanec, organisateur de la séance commune aux deux Académies

Biographies et Résumés



Bernard Le Buanec, ingénieur agronome, membre de l'Académie d'agriculture de France et membre fondateur de l'Académie des technologies

Ingénieur agronome pédologue ORSTOM (Office de la recherche scientifique et technique outre-mer) et docteur-ingénieur en biologie végétale, il est membre fondateur de l'Académie des technologies et membre de l'Académie d'agriculture de France. Il a été ingénieur CIRAD de 1967 à 1975, Directeur du département Production Agronomique du Groupe Limagrain de 1976 à 1980, Directeur Général de la Société Mennesson de 1980 à 1985, Directeur de la R&D et PDG de la Société Biocem (Limagrain) de 1984 à 1993 et Secrétaire Général de l'*International Seed Federation* de 1993 à 2008.

Introduction

L'agriculture française est actuellement dans une période difficile. La « ferme France » reste la première en Europe, mais sa part en valeur dans la production agricole de l'Union européenne est en recul. De même, la France n'est plus le premier exportateur agricole et agroalimentaire européen, aujourd'hui dépassée par l'Allemagne et les Pays-Bas. La précarité explose, la crise agricole française n'est pas qu'économique, elle est aussi morale. Selon une information de la Mutualité sociale agricole près de 20 % des exploitants auraient été en déficit en 2016. L'évolution des pratiques agricoles au cours des cinquante dernières années, comme celles de toute activité humaine, a soulevé au moment des analyses et bilans qui suivent les retours d'expérience des questions sociétales et environnementales.

Face à ce constat, nous nous sommes posés la question de savoir en quoi les technologies en développement pourraient permettre aux agriculteurs français de faire face à certains de leurs défis techniques. Dans cette perspective, nous avons, début 2016, établi un groupe de travail intitulé « *Nouvelles technologies pour l'agriculture* », commun à l'Académie des technologies et à l'Académie d'agriculture de France et dont les membres sont des spécialistes de différentes disciplines. Dans une première étape, en 2016, nous avons auditionné dix agricultrices et agriculteurs représentant des productions diverses et pratiquant différents modes de culture : conventionnel et biologique.

À la suite des auditions des agricultrices et des agriculteurs, nous avons présenté les défis auxquels ils nous ont indiqué devoir faire face, à des chercheurs et des industriels du secteur agricole que nous avons également auditionnés en leur demandant de nous présenter les solutions que pourraient apporter les développements récents des innovations dans leur domaine.

Nous avons ensuite discuté et analysé plus avant les technologies que nous avons retenues, à savoir la génétique et l'amélioration des plantes, la protection des cultures et le contrôle des bioagresseurs, la lutte contre les adventices des cultures, le machinisme agricole, la robotique et les capteurs ainsi que les technologies du numérique. Nous sommes également intéressés à dégager des éléments de prospective sur des thèmes pour lesquels les retombées pratiques à grande échelle sont plus lointaines : la microbiologie des sols, l'amélioration de la photosynthèse et la fixation symbiotique de l'azote par les céréales, la biologie de synthèse.

L'ensemble de ces travaux a fait l'objet d'un rapport, adopté par nos deux Académies, et qui a été publié cette année aux Editions Presses des Mines (Le Buanec et al. 2019).

Bernard Le Buanec (dir.), Pierre Bourlioux, Pierre Castillon, Yvette Dattée, Henri Delbard, Patrice Desmarest, Vera Dubeux, André Gallais, Philippe Gracien, François Gros, Bruno Jarry, Dominique Job, François Képès, Yves Lespinasse, Jean-Emile Lunel, Nahid Movahedi, Pierre Monsan, Gérard Pascal, Georges Pelletier, Jean- Claude Pernollet, Alain Pompidou, Catherine Regnault-Roger, Agnès Ricroch, Christian Saguez, Pierre Tambourin, Jean-René Trameau, Gilles Trystram (2019) *L'agriculture face à ses défis techniques - L'apport des technologies*. Editions Presses des Mines, Collection Académie d'agriculture de France, 282 p.



André Gallais, généticien des plantes, professeur émérite d'AgroParisTech, membre de l'Académie d'agriculture de France

Professeur émérite d'AgroParisTech, membre de l'Académie d'agriculture de France, André Gallais est un spécialiste de génétique quantitative et des méthodes d'amélioration des plantes. Il a enseigné ces thématiques à l'Institut national agronomique de Paris-Grignon de 1982 à 2005 et a été responsable de programmes de génétique et d'amélioration du maïs à la Station de génétique végétale du Moulon (devenue l'UMR de Génétique Quantitative et Évolution - Le Moulon, INRA / université Paris Sud / université Paris Saclay / CNRS / AgroParisTech), dont il a été le premier directeur. Il a publié de nombreux articles et ouvrages dans le domaine de la génétique quantitative et de l'amélioration des plantes.

L'apport des nouvelles technologies de l'amélioration des plantes pour résoudre les défis de l'agriculture

Le but de l'amélioration des plantes est de réunir dans un même génotype ou groupe de génotypes, la variété, le maximum de gènes favorables pour les caractères améliorés. A partir des années 1985, des outils donnant plus de puissance au sélectionneur sont apparus. Ils lui permettent d'être plus efficace dans la sélection et la recombinaison des gènes favorables et certains d'entre eux peuvent apporter des caractères nouveaux. Ils peuvent permettre de résoudre des défis à relever pour l'agriculture : la résistance aux maladies, la résistance aux insectes, la tolérance à la sécheresse, la valorisation de la fumure azotée et l'augmentation du rendement par l'action sur la photosynthèse. Au cours de cette séance je décrirai surtout les apports possibles des marqueurs moléculaires, de la transgénèse et de l'édition du génome.

Les marqueurs moléculaires, assimilables à des étiquettes en grand nombre sur la chaîne d'ADN, permettent de marquer des gènes ou des fragments chromosomiques intervenant dans la variation des caractères. Ils conduisent à la sélection assistée par marqueurs et à la sélection génomique. La transgénèse consiste en l'insertion d'un gène dans un génome par des moyens hors de la reproduction sexuée. L'édition du génome, avec plusieurs techniques, permet de modifier ou de transférer de façon précise un ou plusieurs gènes.

Par l'application de ces outils, des progrès importants sont attendus pour différents caractères agronomiques. Pour la résistance aux maladies par l'utilisation des marqueurs et l'édition génomique, il est possible de construire des résistances plus stables et d'obtenir de nouvelles sources de résistances, avec un transfert rapide et précis. La transgénèse a permis d'obtenir des résistances aux insectes mais la culture de plantes transgéniques est interdite en France. Des améliorations significatives de la tolérance à la sécheresse ont pu être obtenues par édition du génome chez le maïs. Des variétés valorisant mieux l'azote apporté pourront être créées avec ces nouveaux outils. A moyen terme, chez le blé une voie nouvelle vient d'être ouverte : la fixation non symbiotique de l'azote atmosphérique par l'utilisation des interactions entre certaines bactéries et la plante. Le potentiel de rendement peut lui même être amélioré en limitant les pertes de carbone fixé par photosynthèse.

En conclusion, ces nouveaux outils permettent :

- i) un gain de temps dans la création variétale,
- ii) un gain de précision dans le transfert de gènes,
- iii) une meilleure utilisation de la variabilité génétique,
- iv) l'acquisition de nouveaux caractères.

Ils pourraient donc contribuer à la mise au point de nouvelles variétés répondant de mieux en mieux aux attentes des agriculteurs et la société. Encore faut-il que le sélectionneur puisse les utiliser.

Ouvrages

André Gallais (2011) *Méthodes de création de variétés en amélioration des plantes. Editions Quae, Collection Savoir Faire*, 278 p.

André Gallais (2015) *Comprendre l'amélioration des plantes : Enjeux, méthodes, objectifs et critères de sélection. Editions Quae, Collection Synthèses*, 232 p.

André Gallais (2018) *Histoire de la génétique et de l'amélioration des plantes. Editions Quae, Collection Synthèses*, 286 p.



Michel Berducat, ingénieur en robotique, Directeur-adjoint du laboratoire *Technologies et systèmes d'information pour les agrosystèmes*, IRSTEA, Clermont-Ferrand

Ingénieur de Recherche, il a, depuis 1985, travaillé pour le CEMAGREF, devenu l'IRSTEA, l'Institut de recherche en sciences et technologie pour l'environnement et l'agriculture. Il a une grande expérience de la gestion de projets en automatisation et en équipement robotique. En 2007, il a introduit le concept de « troisième voie » basé sur la coopération de machines (robots) agricoles de taille moyenne travaillant en essaim ou en grappe. En 2017, il a contribué à l'animation du collectif qui a abouti au niveau national à la création de l'Association RobAgri. Aujourd'hui il porte le développement de la plateforme innovante AgroTechnoPôle au service des technologies pour l'Agriculture du futur.

Le machinisme agricole et robotique

Au cours des cent dernières années les progrès dans le domaine des machines agricoles ont accompagné les progrès dans les domaines des productions animales et végétales avec une accélération à partir des années 1970. Aujourd'hui les Agro-Eco-Technologies les plus sophistiquées sont capables de moduler leurs interventions de façon différenciée en fonction des animaux (ex : suivi individualisé de l'alimentation, du comportement) ou des parcelles (gestion des hétérogénéités spatio-temporelles). Ces équipements dont la taille ne cesse d'augmenter essayent de concilier à la fois les obligations de performances productives et économiques (en relation avec l'augmentation de la taille des exploitations agricoles en même temps que la diminution du nombre d'agriculteurs) avec les obligations de performances environnementales. Dans le domaine des productions végétales, si effectivement ces nouvelles machines permettent par exemple d'optimiser les quantités d'intrants, celles-ci sont cependant beaucoup moins vertueuses dans le domaine de la compaction des sols profonds du fait de leur poids grandissant et cela même si les machines sont équipées de pneumatiques basse pression ; la compaction des sols profonds dépendant de la charge à l'essieu et non de la pression dans les pneumatiques.

Les technologies de la robotique, en offrant comme perspectives de pouvoir associer simultanément plusieurs unités (coopération de machines en grappe), voire plusieurs dizaines de machines (coopération de machines en essaim), offrent de nouvelles alternatives au « toujours plus gros, toujours plus puissant, mais toujours plus lourd !! » et donc des possibilités de véritables ruptures face à la seule offre disponible jusqu'alors de la part des industriels des agro équipements. Différents développements R&D empruntés en différents points du monde seront présentés à titre d'illustration de ces nouvelles voies offertes par la robotique agricole.

Par « robotique » il ne faut pas comprendre « machines complètement autonomes qui remplacent l'être humain ». Par exemple, dans le domaine du désherbage des cultures, la suppression de l'usage des herbicides chimiques par les nouvelles techniques de substitution (mécanique, électrique, électromagnétique...) conduira certainement à l'augmentation des fréquences d'intervention. C'est en cela déjà que réside l'intérêt de recourir aux solutions dites « robotisées » qui, par ailleurs, pendant encore très longtemps nécessiteront la présence d'opérateurs humains pour les mettre en œuvre et les superviser à distance.

Cet exposé s'attachera ainsi à souligner les challenges qui restent à relever dans les domaines scientifiques et technologiques en termes de Perceptions / Décisions / Actions / Interopérabilités entre Robot(s) et Superviseur(s) Humain(s) ou encore entre Robot(s) et Infrastructure(s). Toujours en s'appuyant sur l'exemple applicatif de l'élimination des adventices, nous pointerons le potentiel des nouvelles techniques d'apprentissage reposant sur l'Intelligence Artificielle, mais aussi quelques conditions requises pour obtenir la pleine expression de ces outils.

L'essor de la robotique agricole n'est cependant pas seulement une question de technologie. Pour « trouver leurs marchés », les solutions robotiques proposées aux utilisateurs finaux (les agriculteurs) devront satisfaire bien d'autres points. (ex : qualité du travail réalisé, facilité de mise en œuvre, garantie de sécurité, organisation du travail, prix des dispositifs).

Pour aller plus loin

Michel Berducat (2016) *Les Projets de Robots « du futur » : Questions posées / Éléments de partage.*
<http://www.rmt-agroetica.com/wp-content/uploads/2016/11/Projet-Robot-Futur-Berducat.pdf>

Michel Berducat (2019) Some Challenges to address in order to target the second generation of agricultural robots. *3^{èmes} Rendez-Vous Techniques AXEMA-EurAgENG*, 23 février 2019, Villepinte, France, pp. 92-98. https://axema2.s3.amazonaws.com/uploads/2019/07/Book-3rd-RDV-Tech-2019_BD_ISBN.pdf.



Catherine Regnault-Roger, professeur émérite à l'université de Pau et des Pays de l'Adour, membre de l'Académie d'agriculture de France et de l'Académie nationale de Pharmacie

Professeur des universités, elle a créé, à l'université de Pau et des Pays de l'Adour, plusieurs diplômes universitaires sur les biotechnologies et la bioprotection des plantes. Au niveau de la recherche (UPPA/IPREM-UMR CNRS 5254), elle est reconnue pour ses travaux sur la bioprotection des agrosystèmes et de l'environnement et pour des recherches transdisciplinaires sur les biotechnologies et le biocontrôle. Elle est membre du Comité scientifique du Haut Conseil des biotechnologies.

La protection des cultures

Se délivrant des aléas de la cueillette et de la chasse, l'homme a inventé l'agriculture pour mieux se nourrir. Le développement des plantes cultivées s'est accompagné de celui des insectes et animaux qui s'en nourrissent et de maladies causées par des microorganismes pathogènes qui les affectent. L'agriculteur prit conscience aussi que certains végétaux (qu'il appela mauvaises herbes) entraient en compétition avec ceux qu'il voulait récolter et leur disputaient les disponibilités en eau et nutriments. Ce n'est qu'après bien des tâtonnements mêlant l'observation et l'empirisme dans un premier temps, puis avec des démarches plus rationnelles au fur et à mesure que se développaient les connaissances scientifiques et techniques, que la protection des cultures progressa. Dès le XIX^{ème} siècle, on se rendit compte que certaines formulations chimiques à base de minéraux (bouillie bordelaise), des extraits botaniques riches en nicotine ou en roténone, ou encore l'utilisation d'insectes antagonistes pouvaient lutter pour contrôler les nuisibles qui diminuent le rendement des cultures. Les solutions mises en œuvre dans ces méthodes de lutte rudimentaires n'étaient pas sans conséquence pour la santé des agriculteurs qui les utilisaient et pour celle de leurs animaux de trait (ex : l'acide sulfurique pulvérisé comme herbicide). Puis ce fut la révolution des pesticides organiques de synthèse qui arriva à la fin de la Seconde Guerre mondiale : faciles d'emploi, peu chers et efficaces. Au cours des Trente Glorieuses (1950-1980) de cette technologie de protection des cultures, ainsi qu'au cours des décennies suivantes, des progrès techniques considérables ont été réalisés (formulations innovantes, réduction des doses épandues, développement de nouvelles molécules au profil environnemental amélioré et à la biodégradabilité accrue, perfectionnement du matériel agricole d'épandage ...). Cette démarche a rendu plus performante la protection des cultures et a également amélioré les conditions de vie dans les campagnes.

Vint alors, avec la satiété qui s'installa dans des pays développés, le temps des doutes. Aujourd'hui, nous en sommes à : « et si on produisait trop ? »

Loin de la collapsologie ambiante actuelle, c'est toute une profession responsable, des industriels des produits phytopharmaceutiques aux agriculteurs, sans oublier les Instituts techniques agricoles, qui, depuis trente ans, s'est mobilisée pour développer une protection des cultures plus respectueuse de la préservation de la planète avec le développement de méthodes alternatives de lutte physique (aspiration, chaleur, UV) ; d'une approche de biocontrôle (utilisation d'organismes vivants antagonistes : insectes auxiliaires ou micro-organismes), ou d'extraits d'origine biologique ; de l'agriculture de précision numérique et connectée avec du matériel de plus en plus sophistiqué, sans oublier l'amélioration variétale avec des semences génétiquement modifiées qui répondent déjà aux objectifs de faire progresser les rendements avec une meilleure résistance des plantes cultivées aux bioagresseurs ou encore à la sécheresse.

Nous savons aujourd'hui qu'il n'existe qu'une seule santé sur terre : celle des hommes, des plantes, des animaux et de l'environnement qui sont interdépendantes (*One Health*). La santé du végétal fera l'objet en 2020 de l'année internationale décidée par la FAO.

Ouvrages

Catherine Regnault-Roger (2014) *Produits de protection des plantes : Innovation et sécurité pour une agriculture durable*. Edition Tec & Doc Lavoisier, 386 p.

Catherine Regnault-Roger, André Fougeroux (2018) *Santé du végétal : 100 ans déjà ! Regards sur la phytopharmacie*. Edition Presses des mines, Collection Académie d'agriculture France, 177 p.



Christian Saguez, spécialiste des technologies numériques de modélisation et de simulation, notamment des méthodes de calcul haute performance, professeur honoraire l'École Centrale de Paris, membre de l'Académie des technologies

Ingénieur diplômé de l'École Centrale de Paris, il a été notamment directeur des relations industrielles et internationales à l'INRIA, directeur des relations industrielles du CNES, président de l'association Teratec (pôle européen de compétence en simulation numérique haute performance).

Le développement du numérique

Le développement de l'usage des technologies numériques dans le secteur agricole et agro-alimentaire repose sur trois éléments essentiels :

- La disponibilité d'un nombre de plus en plus important de données issues des capteurs, des drones, des satellites, des robots ... et accessibles grâce à l'Internet des objets notamment.
- La mise au point de modèles numériques pour l'ensemble des composantes du système agro-alimentaire tant modèles mécanistiques que modèles par apprentissage sur les données.
- Le développement des outils de diffusion et de traitement de l'information (réseau informatique, notamment réseau base énergie, capacité de calcul, interfaces utilisateurs conviviaux ...).

Ces éléments ont permis de mettre au point maintenant de nombreux outils d'analyse, de simulation et de prévision sur l'ensemble du cycle de vie des produits de la chaîne agro-alimentaire et de rendre disponibles des logiciels d'aide à la décision, simples d'usage, pour tous les stades de culture et de transformation (sélection variétale, pilotage des cultures, gestion des ressources naturelles, prévision des récoltes, ...).

Ces outils numériques, comme cela a été le cas pour l'industrie manufacturière avec le PLM (*Product Lifecycle Management*, ou Gestion du Cycle de Vie), apportent des solutions innovantes pour répondre aux grands enjeux du secteur : enjeux économiques pour assurer la rentabilité et la durabilité, enjeux environnementaux pour garantir la qualité des productions et la pérennité des ressources naturelles, enjeux d'attractivité pour attirer les jeunes dans un domaine d'avenir de haute technologie et enjeux sociétaux tant pour fournir une alimentation de qualité avec une traçabilité garantie que pour fournir la matière première indispensable dans de nombreux usages industriels.

Ces technologies numériques associant logiciels de simulation et méthodes d'apprentissage par les données au sein de nouveaux OAD (Outils d'Aide à la Décision) permettent d'aborder de manière innovante les grands défis de l'agriculture tels que la maîtrise des maladies et ravageurs (modélisation des rotations de culture, amélioration variétale...), la maîtrise des adventices (détermination des foyers d'infestations, ...), le stress hydrique (pilotage et gestion des ressources en eau...) ou la fertilisation azotée (sélection d'espèces, ...).

Ces technologies sont à la base d'une transformation profonde du secteur. Elles vont devenir une brique fondamentale dans les différentes étapes de toutes les filières agro-alimentaires. Cependant, pour permettre leur acceptabilité par l'ensemble de la société et pour maîtriser correctement cette rapide dynamique du changement, différents problèmes importants doivent être pris en compte et résolus. En premier lieu les problèmes d'éthique autour de l'usage des données qui nécessitent une réglementation spécifique et des modèles économiques adaptés doivent être rapidement traités. En second lieu un effort considérable de formation doit être entrepris pour garantir un bon usage de ces outils numériques et leur acceptabilité.

Les technologies numériques deviennent, comme dans tous les secteurs de l'économie, indispensables au secteur agricole. La France dispose de toutes les compétences agricoles et numériques pour devenir un des leaders de ce domaine, domaine qui sera dans les années à venir, notamment au travers de la création de nombreuses start-ups mais aussi de l'implication des grands acteurs du numérique, un fort créateur de valeur et d'emplois.

Pur aller plus loin

Christian Saguez (2016) *Les clés du futur*. Edité par TERATEC Bruyères-Le-Châtel. Contact TERATEC : infos@teratec.fr

Christian Saguez (2018) *La simulation touche désormais tous les secteurs ! L'Usine Nouvelle, Rubrique TECHNOS ET INNOVATIONS, NUMERIQUE*. <https://www.usinenouvelle.com/editorial/la-simulation-touche-desormais-tous-les-secteurs-selon-le-president-de-teratec-christian-saguez.N679969>



Dominique Job, biologiste végétal, directeur de recherche émérite au CNRS, membre de l'Académie d'agriculture de France

Docteur-ès-sciences, il a été chercheur au CNRS, notamment au Laboratoire mixte CNRS/Rhône-Poulenc (devenu Bayer CropScience) à Lyon (UMR5240 CNRS / UCBL / INSA / Bayer CropScience) dont il a assumé la codirection et la direction de 1992 à 2012. Il a été président du conseil scientifique du GEVES (2009-2014), délégué scientifique de l'AERES (2012-2013). Dès les années 2000, il a participé à la promotion de la génomique végétale en France et en Europe (programme Génoplande).



François Képès, spécialiste de la biologie de synthèse, co-fondateur de la société Synovance, membre de l'Académie des technologies

Après des études à l'ENS et un doctorat d'Etat ès-sciences, il est directeur de recherche au CNRS jusqu'en 2017 puis, à partir de cette date, co-fondateur de la société Synovance (Genopole). Il a créé en 2008 l'institut de Biologie des Systèmes et de Synthèse (iSSB-Genopole, CNRS, université d'Évry) et, en 2009, le master éponyme (mSSB-université d'Évry, AgroParisTech, université Paris-Saclay). Biologiste cellulaire, ses approches mêlent la biologie moléculaire et la biologie des systèmes et de synthèse.

Les technologies en développement

Parmi les nombreux champs d'application possibles des (bio)technologies, nous en décrivons trois : la microbiologie de sol, la photosynthèse et la biologie de synthèse.

Microbiologie du sol. Les sols renferment un très grand nombre de microorganismes (bactéries et champignons), dont on met de plus en plus en évidence le rôle dans la croissance et à la santé des plantes. Des avancées spectaculaires ont été enregistrées grâce notamment à la mise en place d'approches de métagénomique pour caractériser finement ces microbiotes telluriques. Cela permettra de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les relations symbiotiques plantes-microorganismes (fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, mycorhizes). Des applications pourront concerner l'amendement des sols avec des souches bénéfiques, leur application en traitement de semences ou le contrôle chimique des interactions plantes-microorganismes avec des molécules synthétiques de communication. En amélioration des plantes, l'un des objectifs majeurs est de sélectionner des plantes qui tirent parti, de manière héritable, de cette biodiversité tellurique.

Photosynthèse. Grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour produire des molécules organiques. Toutefois, son efficacité énergétique est faible, de l'ordre de quelques %. Ceci résulte en particulier d'une réaction antagoniste de la photosynthèse, la photorespiration, processus se manifestant lorsque la transformation du CO₂ atmosphérique en O₂ est diminuée en raison d'une activité oxygénase portée par l'enzyme principale de la photosynthèse, la RubisCo (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase). Différentes approches sont mises en place pour répondre à cette question. L'une consiste à mimer la Nature. Il s'avère en effet que certaines plantes (maïs, sorgho, canne à sucre ...) développent un système particulier de concentration du CO₂ au niveau de la RubisCo, système n'existant pas chez d'autres plantes d'intérêt agronomique (blé, riz ...). Des recherches sont entreprises pour conférer ce mécanisme particulier à ces dernières. D'autres pistes sont explorées telles l'introduction chez les plantes de voies bactériennes permettant le recyclage (piégeage) des produits de la photorespiration, ou la création de carboxylases artificielles plus performantes que la RubisCo.

Biologie de synthèse. La biologie de synthèse est l'ingénierie rationnelle de la biologie et le fer de lance des biotechnologies. Plus précisément, elle a été définie par le réseau de l'espace européen de recherche en biologie de synthèse (ERASynBio) comme le design délibéré et la construction de systèmes, basés sur ou inspirés par la biologie, pour mettre en place de nouvelles fonctions à des fins utiles, en s'appuyant sur des principes élucidés en biologie et en sciences de l'ingénieur.

Or les biotechnologies entretiennent depuis longtemps de fructueuses interactions avec les travaux d'amélioration et d'adaptation dans l'agriculture. Notre propos est ici plus étroit et embrasse préférentiellement les apports de la biologie de synthèse. De nombreuses modifications pourraient en principe être apportées aux plantes dans le but d'améliorer leur photosynthèse et leur croissance, de recourir à moins de produits phytosanitaires, ou d'altérer leur composition pour faciliter leur usage. Nous distinguons ci-dessous sept cibles d'action :

1. choix et amélioration des plantes pour une croissance maximisant la biomasse ;
2. amélioration de la saccharification ;
3. amélioration du processus de photosynthèse par le photosystème de type II ;
4. modification du riz pour produire des composés photosynthétiques à 4 carbones ;
5. résistance des plantes aux parasites et à la sécheresse ;
6. fixation de carbone par une voie optimisée totalement synthétique.

Cependant, il est trop tôt pour savoir quelles seront les avancées qui mèneront à des innovations à grande échelle, parmi celles qui viennent d'être discutées ou d'autres qui n'ont pas encore percé. Mais il est déjà certain, par analogie avec le passé récent, et au vu de la situation planétaire évoquée en introduction, que les adaptations variétales des plantes, les modifications plus complexes des plantes, et l'usage raisonné de la biomasse, vont occuper dorénavant une place croissante dans les préoccupations techniques, scientifiques, énergétiques, économiques, politiques, et éthiques de l'humanité. La pression démographique rendra de plus en plus intenable les positions de principe visant à interdire les méthodes les plus efficaces pouvant être utilisées pour réaliser ces adaptations. Alors les gains en efficacité et rapidité que permet le domaine mouvant de la biologie de synthèse et ses futurs épigones ne constitueront plus un atout pour certains, mais une nécessité pour tous.

Ouvrages

Jean-François Briat, Dominique Job (dirs.) (2017) *Les sols et la vie souterraine - Des enjeux majeurs en agroécologie*. Editions Quae, Collection Synthèses, 328 p.

François Képès (2011) *La biologie de synthèse plus forte que la nature ?* Editeur Le Pommier, Collection Les petites pommes du savoir, 64p.



L'Académie d'agriculture de France descend en ligne directe de la Société d'Agriculture de la Généralité de Paris, fondée en 1761 par Louis XV. Elle a vu le jour en plein « siècle des Lumières », à un moment où il devenait essentiel de développer l'agriculture de notre Pays, en utilisant et en améliorant les techniques disponibles. Le président de la République en est son protecteur, et le Ministre de l'agriculture son président d'honneur. Vers 1785, elle adopte pour devise « *Ex utilitate decus* » (*de l'utilité vient l'honneur*). Sa mission est de contribuer, dans les domaines scientifique, technique, économique, juridique, social et culturel, à l'évolution de l'agriculture et du monde rural (<https://www.academie-agriculture.fr/#>). Elle rassemble 120 membres titulaires, 60 membres étrangers, 180 correspondants nationaux et 60 correspondants étrangers, répartis en dix sections : Productions végétales, Forêts et filière bois, Production animale, Sciences humaines et sociales, Interactions milieux-êtres vivants, Sciences de la vie, Environnement et territoires, Alimentation humaine, Agrofournitures, Économie et politique.

Contact : 18, rue de Bellechasse, 75007 Paris
Téléphone : 01 47 05 10 37
Courriel : contact@academie-agriculture.fr



Créée à l'aube du 21^e siècle, **l'Académie des technologies** est aussi héritière des Lumières. Sa devise « *Pour un progrès raisonné, choisi et partagé* » appelle un développement technologique au service de l'homme, de l'environnement et d'une croissance durable. L'Académie est un établissement public administratif national placé sous la tutelle du ministre chargé de la recherche (<https://www.academie-technologies.fr>).

Elle émet des propositions et des

recommandations sur les innovations technologiques auprès des pouvoirs publics et des acteurs socio-économiques. Elle est constituée de 320 membres français ou étrangers. Elle a créé en son sein dix pôles : Alimentation et santé, Habitat, mobilité et villes, Éducation, formation, emploi et travail, Culture, loisirs, Énergie, Sécurité et Défense, Numérique, Industrie et services, Environnement et impact du changement climatique, Technologies, économies et sociétés.

Contact : Grand Palais des Champs-Élysées - Porte C, avenue Franklin D. Roosevelt, 75008 Paris ; Téléphone : 01 53 85 44 44 ; Courriel : secretariat@academie-technologies.fr

