

Recommandations

Jacques Joyard

En terme d'orientations scientifiques, le développement de recherches fondamentales en biologie végétale nécessite de l'ambition aussi bien dans les objectifs et les thématiques, dans les approches multidisciplinaires que dans les moyens.

- **Des objectifs ambitieux.** Afin de répondre aux besoins vitaux de l'homme et de la société, la communauté scientifique tant en France qu'en Europe ¹, s'est fixé un certain nombre d'objectifs mettant à profit le potentiel humain et technologique développé depuis des décennies. À travers des recherches fondamentales pour comprendre le fonctionnement de la plante dans son environnement, il s'agit essentiellement :
 - de **garantir la sécurité et la qualité alimentaire** et répondre à l'évolution des besoins nutritionnels des consommateurs ;
 - de **comprendre et protéger la biodiversité** ;
 - de placer le végétal au cœur des problématiques de développement des **ressources et énergies renouvelables**.

- **Des thématiques ambitieuses.** La génomique a ouvert dans les sciences végétales de nouveaux champs thématiques. Il importe désormais :

- **de poursuivre les efforts d'analyse des génomes en développant de nouveaux modèles.** Le développement de structures importantes de séquençage des premiers génomes (*Arabidopsis*, riz) et la réduction des coûts grâce aux progrès de la robotisation vont conduire à une banalisation relative de l'acquisition de données de séquence, d'abord sur des génomes modèles de plantes (la tomate, la légumineuse *Medicago truncatula*), d'algues (*Chlamydomonas*, *Laminaria*, *Fucus*, *Chondrus...*) ou de l'actinomycète fixateur d'azote *Frankia...*

1. Response of the *European Plant Science Organization* (EPSO) to the European Research Area Proposal. (2000) Securing the future of plant science in Europe. 10 Year vision for plant Science in Europe – The Healthy Plant.

puis sur des génomes plus diversifiés. Il importe d'engager une réflexion de fond sur la **pertinence des modèles biologiques** choisis aussi bien pour leur importance en terme de recherche fondamentale qu'en terme d'applications pour la santé, l'agriculture ou l'environnement ;

– **favoriser une étude plus en profondeur du fonctionnement des organismes végétaux.** Il faut sortir des thèmes et approches appliqués à court terme et repartir sur une analyse plus systématique et fondamentale du métabolisme ou du développement des plantes, toujours dans l'optique d'études de biologie intégrative. Il importe aussi de stimuler les recherches qui, par la mise en œuvre de nouveaux outils et de nouvelles méthodologies, permettront d'extrapoler ces connaissances sur les espèces modèles aux espèces sauvages ou cultivées, dans une perspective *d'analyse, de préservation et d'exploitation de la diversité biologique* ;

– **comprendre et maîtriser les mécanismes des réponses des plantes à leur environnement.** Il est important de cibler les études finalisées vers des perspectives à long terme d'importance vitale pour nos sociétés. Dans le domaine de l'environnement, les productions végétales ont des implications contradictoires. Il faut impérativement réduire les effets négatifs liés à des pratiques agricoles et industrielles encore trop souvent polluantes (engrais, pesticides, activités de transformation...) mais il faut, d'autre part, mieux valoriser l'organisme végétal dans des secteurs tels que la dépollution (phytoremédiation), les biocarburants, la réduction de l'effet de serre. De même, par souci de cohérence, apparaît la nécessité de pouvoir étudier un peuplement végétal transgénique au champ. Ainsi, les progrès récents des connaissances sur le végétal doivent permettre d'ouvrir des champs thématiques nouveaux dans le domaine de l'environnement.

• **Des approches multidisciplinaires ambitieuses.** Les outils de la génomique sont des outils permettant des analyses à haut débit. Il importe d'utiliser ces outils en synergie avec ceux qui sont apportés par l'ensemble des disciplines. Pour cela, il faut :

– **maintenir et développer des compétences de base fortes en physiologie, en biochimie, en génétique... tout en favorisant les interactions et la complémentarité entre ces approches.** La description des processus physiologiques et de développement en termes moléculaires conduit nécessairement à une approche réductionniste des problèmes, au contraire de la génétique qui par nature a une démarche intégrée. Si les approches intégrées sont bien perçues dans le monde végétal et peuvent par conséquent être facilement encouragées, elles doivent être nourries par le progrès des connaissances dans les disciplines de base, dont il faut préserver et valoriser les savoir-faire ;

– **amplifier les recherches aux interfaces avec la physique et la chimie.** L'implication des laboratoires de biologie végétale dans les

études structurales et les approches biophysiques est insuffisante et doit être stimulée. Il est important d'identifier et de **développer des outils pharmacologiques** qui permettraient d'agir avec précision sur le fonctionnement des cellules végétales. Le potentiel de compétence très important chez les chimistes devrait permettre d'identifier des molécules à action spécifique chez les végétaux dont l'intérêt ne se réduit pas à des applications dans le domaine de l'agrochimie. Tous les domaines de recherche en biologie végétale sans exception ont besoin de ce type de molécules. Une biochimie analytique de plus en plus performante devient par ailleurs incontournable pour analyser finement les profils biochimiques des plantes modifiées ou non génétiquement. On peut même à ce niveau évoquer une véritable *nanobiochimie* concernant des signaux ou messages spécifiques des végétaux intervenant à très faibles concentrations ;

– **combler le fossé entre les études réalisées à l'échelle moléculaire et celles portant sur les réactions des plantes à leur environnement.** On manque cruellement d'études physiologiques à un niveau intermédiaire (cellule, organe, plante) pour permettre une quantification des processus biologiques dans des conditions données de milieu. Si le développement de la génomique fonctionnelle, l'étude du transcriptome et du protéome, des métabolites et des autres constituants cellulaires sont censés apporter des éléments pertinents par rapport à cette question, ceux-ci devront pouvoir être mobilisés dans le fonctionnement intégré d'une plante, voire d'un peuplement. Il est donc nécessaire de développer des méthodes et des modèles permettant d'intégrer les études menées à divers niveaux. Cela a été réalisé en partie pour la photosynthèse, mais reste à faire pour le développement ;

– **développer la bio-informatique.** Cette discipline est appelée à occuper une place centrale aussi bien pour l'analyse des génomes et les études comparatives que pour permettre une analyse intégrée des produits de l'expression des gènes (ARN, protéines, métabolites...). Il importe d'identifier et de faire émerger de nouvelles problématiques à l'interface avec les mathématiques, les statistiques, l'automatique, l'informatique... Les besoins essentiels des équipes de recherche, qui émergent très rapidement, ne sont pas satisfaits faute d'un manque d'anticipation au niveau de la formation et de possibilités de rémunérations concurrentielles par rapport à celles offertes par les entreprises privées en informatique. Si ce problème n'est pas spécifique au domaine végétal, il demande que les problématiques végétales soient effectivement prises en compte.

• **Des moyens ambitieux.** Ils sont à mettre en œuvre tout d'abord au niveau des équipes de recherche, qui doivent pouvoir bénéficier d'un financement contractuel suffisant, mais aussi à travers les différents instituts nationaux et internationaux par la mise en place de réseaux tech-

nologiques. Il faut donc intégrer la dimension européenne dans la mise en place de ces moyens :

– **développer des plates-formes permettant l'analyse fonctionnelle systématique et à haut débit des modèles végétaux.** L'analyse morphologique et physiologique des mutants et des plantes transgéniques doit pouvoir être développée. Pour cela, il est essentiel d'**identifier les techniques nécessaires et les centres d'expertise.** Il importe par exemple de développer des approches impliquant les formes diverses d'imagerie, les études systématiques (et à haut débit) de l'expression des gènes (étude des transcriptomes et protéomes), l'analyse métabolique intégrée (RMN, spectrométrie de masse...) mais aussi le développement de systèmes d'expression conditionnelle adaptés à l'exploration de la physiologie de la nutrition (carbonée, azotée, minérale...) et de la réponse aux stress (environnementaux, agression par des agents pathogènes...). Alors que la biologie intégrative est seulement en train d'émerger dans le domaine animal, de puissantes plates-formes d'exploration fonctionnelle sont en train d'être mises en place sur plusieurs sites afin d'analyser, par exemple, les souris mutantes construites par transgénèse. Des investissements comparables sont nécessaires pour exploiter et interpréter avec le maximum d'efficacité les génotypes végétaux nouveaux résultant souvent d'efforts amont conséquents ;

– **repenser les processus d'innovation.** La mise en place d'équipes de recherche associant des compétences multiples, tant dans les domaines de la physiologie cellulaire et moléculaire, de la biologie de la plante entière et des peuplements que dans celui de la modélisation, est un facteur d'innovation. De la même manière, les études concernant la biodiversité, nécessitent l'association de naturalistes systématiciens à des chercheurs maîtrisant les techniques moléculaires de détermination et les études morphologiques. Enfin, les développements technologiques demandent la mise en œuvre de projets associant les sciences végétales et l'agronomie pour œuvrer dans le sens d'une diversification des modèles de production et des systèmes de culture. Il faut enfin éviter de reproduire l'erreur d'un processus d'innovation linéaire issu essentiellement de la logique de l'offre sans intégration de la demande (problème des plantes transgéniques).

En terme d'organisation et de politique de la recherche, les laboratoires effectuant des recherches en biologie végétale rencontrent des problèmes importants (dont certains sont spécifiques à la discipline) qui menacent sérieusement la compétitivité des équipes de recherche :

- au **niveau européen**, notre poids décisionnel est beaucoup trop faible. Les choix politiques ne mettent pas la recherche fondamentale à la place où elle devrait être. Ils sont trop orientés vers le très court terme et non pas sur les investissements à long terme. Les effets de cette poli-

tique sont actuellement désastreux dans notre discipline. Nous avons ainsi observé une réduction considérable (des 2/3 !) du nombre de projets sélectionnés lors du premier appel d'offre du 5e PCRDT et impliquant des modèles végétaux. De plus, après avoir investi près de 20 millions d'euros dans l'effort international de séquençage d'*Arabidopsis*, aucun financement européen n'est venu aider à poursuivre cet effort-clé dans la perspective du développement de la génomique et du post-génome. La communauté scientifique européenne (*European Plant Science Organization*) tente d'intervenir pour faire évoluer la politique actuelle. Elle a proposé à la Commission européenne un plan de 10 ans pour tenter d'organiser l'effort de recherche et rester compétitif dans le domaine.

- au **niveau national**, aux problèmes classiques de lourdeur de l'administration dans le fonctionnement de la recherche viennent s'ajouter des problèmes plus spécifiques :

- la grande difficulté à mobiliser *rapidement* les moyens nécessaires prive notre communauté (dont les effectifs, relativement modestes, offrent des marges de manœuvre réduites) d'une compétitivité certaine dans les domaines qui le justifient (ex : le choix d'*Arabidopsis* pour les aspects développement, séquençage du génome, *Génoplante*, etc.). Les seules réalisations sont souvent liées à l'initiative de chercheurs individuels ou à de petites équipes. Ce pilotage à courte vue génère une progression erratique des recherches par les moyens financiers alloués ;

- les appels d'offre financés par le Ministère ou les organismes témoignent à l'évidence d'une **orientation biomédicale** qui marginalise fortement la discipline. Cette situation démontre simplement que la demande sociale est beaucoup plus diffuse dans notre domaine que dans ceux de la santé ou de l'environnement. La seule action récente d'envergure dans le domaine végétal est **Génoplante**, programme fédérateur dans le domaine de la génomique végétale. Son organisation spécifique, en particulier en terme de propriété industrielle, ne peut cependant pas répondre à l'ensemble des besoins de la communauté scientifique et de la thématique ;

- L'**environnement réglementaire** dans lequel le chercheur opère est le fruit du travail du législateur, qu'il soit français ou européen. Il est indispensable de créer les conditions permettant à la recherche française d'opérer de manière compétitive dans des domaines sensibles, comme l'expérimentation utilisant des plantes transgéniques à *des fins de recherche* ainsi qu'à leur utilisation au champ comme outil de recherche. Dans l'état actuel, le risque est important d'une perte de compétitivité des équipes scientifiques publiques ou de délocalisation de certains travaux réalisés par les équipes privées. Or, il apparaît que les chercheurs sont en général absents du débat qui précède les évolutions réglementaires

qui détermineront le cadre dans lequel ils opèrent. La communauté scientifique et en particulier l'Académie des sciences devraient donc pouvoir être impliquées directement dans ces débats législatifs.

- La **valorisation** indispensable des recherches nécessite le soutien et le développement d'une **recherche fondamentale** de qualité. Dans de nombreuses disciplines, les industriels et les organisations caritatives interviennent de manière significative pour soutenir la recherche fondamentale, mais ce n'est pas le cas dans notre discipline :

- il faut éviter que les **collaborations recherche publique - recherche privée** ne portent que sur des programmes à objectifs trop finalisés. Les industriels de l'agrochimie et de l'agroalimentaire réellement impliqués dans la recherche (ils sont très peu nombreux dans notre discipline et les fusions actuelles amplifient considérablement le phénomène) regrettent eux-mêmes l'absence de pôles d'excellence en recherche fondamentale, seuls capables de vitaliser leur propre recherche plus finalisée. La distinction qui a été faite au sein de **Génoplande** entre les deux types de programmes, *Espèces* (à vocation nettement finalisée) et *Générique* (à vocation plus fondamentale), répond en partie seulement à cette nécessité d'un soutien par l'industrie de programmes fondamentaux ;

- les laboratoires effectuant des recherches sur les plantes **ne peuvent pas bénéficier de financements provenant d'associations caritatives** (FRM, AFM, ARC, Ligue contre le Cancer...). À côté du financement même des travaux de recherche, ceci explique en partie une désaffection marquée des jeunes vers le domaine de la recherche en végétal car le financement et la durée des thèses sont beaucoup plus aléatoires que dans les domaines touchant des thématiques dans lesquels les fondations financent largement une quatrième (voire une cinquième) année de thèse et stages post-doctoraux. Une thèse significativement plus courte a des conséquences importantes pour les étudiants en biologie végétale, en terme de publications dans des revues de haut niveau.

En terme de formation, il semble essentiel de **mettre l'accent sur le problème que pose à terme l'exclusion des modèles végétaux dans l'enseignement, du collège jusqu'à l'université**. En biologie, l'enseignement est largement dominé par les modèles animaux, ce qui pose un problème important pour la société, en particulier pour l'éducation du citoyen appelé à être acteur dans des décisions portant sur les conséquences des recherches dans le domaine végétal. Il est donc important de :

- **repenser la formation initiale et continue de l'ensemble des enseignants :**

- la plupart des *enseignants du primaire* n'ont pas reçu, aujourd'hui, la formation *minimale* concernant le monde végétal et l'enseignement

dispensé ne répondent pas aux attentes de formation des futurs citoyens. Des actions de formation *via* les IUFM doivent être envisagées pour une sensibilisation autour de quelques mots-clés : observer, décrire, nommer et enfin comprendre ; l'observation des plantes dans leur milieu naturel est indispensable aujourd'hui compte-tenu que la quasi totalité des jeunes n'ont plus aucune racine dans le milieu rural. De récentes enquêtes réalisées auprès d'enfants de l'Union européenne (niveau CM1 - CM2) révèle par exemple que la moitié d'entre eux pensent que le coton provient du mouton !

– pour les *enseignants du secondaire*, beaucoup sont restés avec les connaissances acquises lors de leur recrutement, modulées par quelques ajustements liés à de nouvelles publications de programmes ou à quelques stages, rares, de formation continue. Les programmes du secondaire sont aujourd'hui presque totalement dépourvus de mention aux plantes, à leur description élémentaire et à leur mode de vie. Une réforme des programmes doit prendre en compte les progrès de la discipline, ainsi que les problèmes socio-économiques posés. Ainsi, une enquête réalisée en 1998 dans le cadre des semaines de la Science a montré que 18 % des personnes interrogées savaient ce qu'étaient les OGM alors que 80 % d'entre elles étaient contre les plantes transgéniques !

– une mention particulière doit être faite aux *enseignements de premiers cycles universitaires* (ou des classes préparatoires dont les programmes sur le végétal sont inchangés depuis peut-être 20 ans !) dont le rôle est capital pour la formation des jeunes étudiants. Il y a une trop grande hétérogénéité des niveaux d'une université à l'autre, d'une classe préparatoire à l'autre ; l'enseignement du végétal restant souvent très descriptif, le plus souvent basé sur des manuels anciens et partiellement obsolètes. À cela s'ajoute un manque de professeurs, résultat d'une politique restrictive de formation et de recrutement dans les années passées.

• **Repenser la formation initiale des chercheurs.** Les étudiants qui arrivent dans nos laboratoires possèdent le plus souvent une formation trop spécialisée. Un déséquilibre excessif existe en faveur de la biologie et de la génétique moléculaire, au détriment de la biochimie, de la biologie cellulaire et de la physiologie (sans parler de la chimie ou de la biophysique), alors que la biologie cellulaire végétale moderne nécessite une vision intégrée des différentes disciplines. Dans certaines universités, des pans entiers de la biologie végétale ne sont pas enseignés (hormones ici, métabolisme là). Ces carences vont de pair avec l'absence quasi totale de véritables ouvrages de base du niveau de ceux qui sont publiés en langue anglaise. Il est essentiel de maintenir et de promouvoir un enseignement en biologie végétale de très haut niveau, donnant aux étudiants une vision intégrée des phénomènes et dépassant les cli-

vages des disciplines. Est-il possible de mettre en place des écoles doctorales regroupant plusieurs disciplines biologiques et greffées sur des pôles agronomiques de recherche et développement (comme aux Pays-Bas) ? C'est en tout cas un système qu'il serait souhaitable d'analyser et éventuellement de mettre en place.

En terme de réponse à la demande sociale, l'exemple des plantes transgéniques montre qu'il faut développer, au sein même des organismes, les recherches en biotechnologie. Si ce développement reste limité aux laboratoires des compagnies privées, cela peut mener à terme à une cassure entre intérêts privés et opinion du public. Le public ne comprend pas toujours l'importance d'une recherche désintéressée, mais l'implication des chercheurs dans des programmes de recherche finalisés est souvent vécue par ce même public comme une collusion avec des intérêts particuliers. Les chercheurs doivent être crédibles aussi bien vis-à-vis de leurs interlocuteurs du privé que vis-à-vis des citoyens. Tout en repensant la formation initiale pour **aider à la formation du citoyen et de son esprit critique**. Il est donc essentiel pour la communauté scientifique :

- **de s'impliquer dans les débats de société :**

- en tant que chercheur et citoyen, chacun, au sein de la communauté scientifique, doit **participer directement au débat démocratique** et répondre aux questions et interrogations. Les chercheurs peuvent aussi être un relais des préoccupations de la société en direction des partenaires industriels ;

- faire participer des **chercheurs en sciences sociales**, souvent mieux à même de prendre en compte les préoccupations de la société, aux projets de recherche et à leur évaluation. Ils peuvent aider à tirer les leçons de l'expérience de l'introduction des plantes transgéniques pour comprendre l'évolution des rapports entre les sciences du vivant et la société.

- **de montrer que les enjeux du futur sont non seulement d'ordre économique mais aussi socio-politique** : il faudra répondre à l'attente par le public de pratiques agricoles plus soucieuses de l'environnement (dans les pays développés) ou mieux adaptées aux contraintes locales (dans les pays en voie de développement). En effet, les enjeux de la discipline pour les prochaines années sont clairs :

- une agriculture diversifiée et flexible dans un environnement propre ;

- la préservation de nos ressources naturelles (biodiversité, eau) ;

- une réconciliation entre le scientifique, le public et les médias (faire la différence entre culture scientifique et ésotérisme) ;

- une meilleure synergie entre recherche fondamentale et recherche finalisée.

L'Académie des sciences se doit de jouer un rôle de conseil pour l'ensemble de ces problèmes liés aux enjeux majeurs de société (comme les plantes transgéniques, l'eau, les engrais, les pesticides, le maintien de la biodiversité...). Cette institution doit systématiquement faire une analyse approfondie des problèmes qui se posent, faire connaître son opinion de manière aussi large que possible et faire des propositions auprès des responsables politiques et socio-économiques.

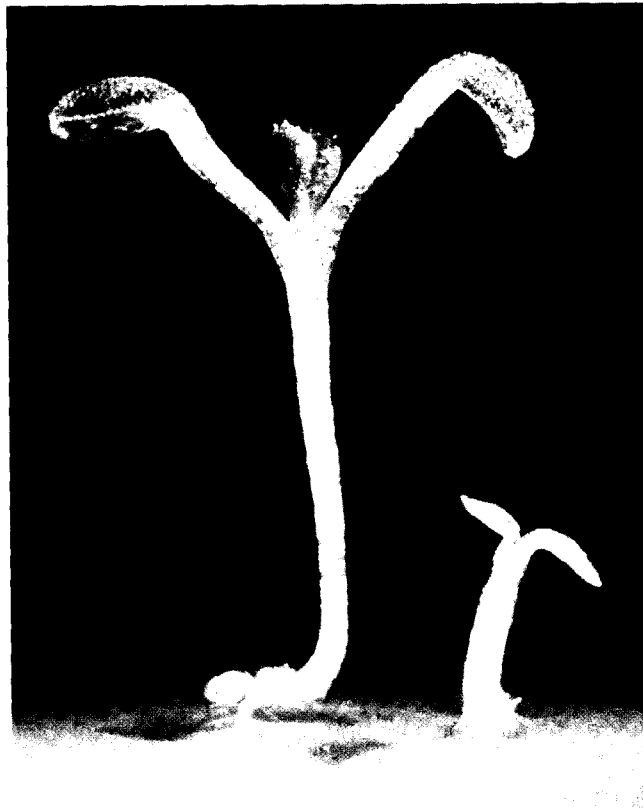


Fig. 2-4 – Le mutant *hy4* d'*Arabidopsis thaliana* (à gauche) est insensible à la lumière bleue qui inhibe l'allongement de l'hypocotyle d'une plante sauvage (à droite).