



COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE

Agriculture - Alimentation Environnement

SÉANCE D'INSTALLATION DU NOUVEAU BUREAU

BOIS-ÉNERGIE

DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE

ÉLICITEURS DE DÉFENSE CHEZ LES PLANTES

QUAND LES PLANTES MANQUENT D'EAU

L'ARBRE CHAMPÊTRE, PLACE ET GOUVERNANCE : QUEL
R ?

SÉCURITÉ ALIMENTAIRE DANS LES PAYS DU SUD DE LA
MÉDITERRANÉE

SÉLECTION GÉNOMIQUE

SOMMAIRE

SÉANCES DE JANVIER, FÉVRIER, MARS 2013

- 5 **INSTALLATION DU BUREAU POUR L'ANNÉE 2013**
 mercredi 9 janvier 2013
 Discours de Monsieur **Jean-François COLOMER**, Président sortant.
 Présentation du programme de travail 2013, par **Gérard TENDRON**, Secrétaire perpétuel.
- 11 **BOIS-ÉNERGIE : LES MÉGA-PROJETS DE COGÉNÉRATION CHALEUR-ÉLECTRICITÉ EN FRANCE : APPROCHE PROMETTEUSE OU PORTEUSE D'ERREURS ?**
 Séance animée par **Patrick Ollivier** (16 janvier 2013)
 La stratégie française de développement de l'utilisation du bois-énergie. Les raisons du choix de grosses installations. Les règles du jeu, par **Renaud Abord de Châtillon**.
 Les défauts du système d'appel d'offres et du gigantisme des approvisionnements nécessaires, par **Serge Defaye**.
 Les difficultés du système des plans d'approvisionnements exigés par l'État, par **Rémi Grovel**.
 La synthèse d'un investisseur industriel qui a soumis beaucoup de dossiers, par **François-Xavier Dugripon**.
 Le témoignage d'un industriel ayant concrétisé deux cogénérations CRE, par **Patrick Sombret**.
- 21 **MESURE DE LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DES PLANTES CULTIVÉES ET DES ANIMAUX DOMESTIQUES**
 Séance animée par **Louis Ollivier** et **Bernard Le Buanec** (23 janvier 2013)
 Évolution de la diversité génétique des variétés de plantes cultivées, par **André Gallais**.
 Indicateurs de diversité génétique animale, par **Louis Ollivier** et **Jean-Louis Foulley**.
- 47 **BIOLOGIE DE SYNTHÈSE : INNOVATIONS ET PERSPECTIVES**
 Séance animée par **Jean-Claude Mounolou** (30 janvier 2013)
 L'ingénierie des génomes : une clef de la biologie synthétique, par **David Sourdive**.
 La biologie de synthèse : émergence d'une entreprise, par **Dominique Thomas**.
 La biologie de synthèse : évolution naturelle ou évolution artificielle, par **Hervé Le Guyader**.
- 57 **LES ÉLICITEURS DE DÉFENSE CHEZ LES PLANTES**
 Séance animée par **Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé** et **Pierre Devaux** (1^{er} février 2013)
 Stimulation du système immunitaire des plantes : vers la mise au point d'une nouvelle stratégie de protection des cultures, par **Bernard Dumas**.
 Les rhamnolipides : des stimulateurs de défense des plantes prometteurs ?
 Conditions contrôlées du laboratoire *versus* champ, par **Fabienne Baillieul**.
 Efficacité de produits stimulateurs et état de défense de la vigne : du gène au champ.
 Quel avenir ? par **Marie-France Corio-Costet**.

Avantages pour une agriculture durable de la stimulation des défenses naturelles des plantes et défis à relever : le point de vue d'un acteur de l'agrofourniture, par **François Rollin**.

- 67 **QUAND LES PLANTES MANQUENT D'EAU : ÉCOPHYSIOLOGIE ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION**
 Séance animée par **Bernard Itier** (13 février 2013)
 Mécanismes de résistance à la sécheresse des arbres : de nouvelles pistes pour leur amélioration génétique, par **Hervé Cochard et Christophe Plomion**.
 Des génotypes tolérants à la sécheresse dans le contexte agricole français, par **François Tardieu**.
 Où en sont les semenciers quant à la commercialisation de variétés plus tolérantes à la sécheresse ? Quelle est et quelle sera la place des biotechnologies, par **Jean-Louis Prioul**.
 La réaction du sélectionneur- les attentes de la sélection, par **Jean Beigbeder**.
- 76 **L'ARBRE CHAMPÊTRE, PLACE ET GOUVERNANCE : QUEL AVENIR ?**
 Séance « table ronde » animée par **Francis Caillez et Alain Perrier** (20 février 2013)
 Arbres en agriculture, par **Denis Couvet**.
 Comment imaginer les nouvelles pistes de recherche-développement en agroforesterie ? par **Fabien Liagre**.
 L'agroforesterie de nouvelle génération, par **Alain Canet**.
 L'arbre champêtre, place et gouvernance : quel avenir ? par **Michel Ledru**.
 Les arbres de plein champ dans les systèmes herbagers : un rôle non négligeable dans la régulation des populations de campagnols terrestres, par **Yves Michelin**.
- 90 **LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE DANS LES PAYS DU SUD DE LA MÉDITERRANÉE ENJEUX ET PERSPECTIVES**
 Séance animée par **Jean-Louis Rastoin** (27 février 2013)
 Sécurité alimentaire et économie politique dans les pays du Maghreb : l'accès à l'alimentation, par **Radhi Meddeb**.
 Géopolitique de la sécurité alimentaire méditerranéenne, par **Sébastien Abis**.
 Les politiques publiques agricoles et alimentaires au Maghreb, par **Bernard Roux**.
- 102 **SÉANCE LIBRE** (20 mars 2013)
 L'irrigation, un atout pour la France, par **Jean-Paul Bonnet**.
 Le gaspillage alimentaire : comment le prévenir ? par **Patrice Robichon, Jacques Risse et Maurice-Paul Durand**.
 Bilan provisoire du groupe de travail sur les potentiels de la science pour l'avenir de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, par **Jean-Claude Pernollet**
- 111 **SÉLECTION GÉNOMIQUE**
 Séance animée par **Jean-Claude Pernollet et Christian Maréchal** (27 mars 2013)
 La sélection génomique, une innovation pour l'amélioration génétique : enjeux scientifiques et partenariaux, par **Laurence Moreau et Alain Charcosset**.
 Développement, mise en œuvre et perspective de la sélection génomique chez les bovins : impact sur l'efficacité et l'orientation de la sélection, par **Didier Boichard**.
 Implication professionnelle dans la recherche en génomique et conséquences de l'avènement de la sélection génomique sur l'activité des acteurs professionnels de la sélection, par **Maurice Barbezant**.

PUBLICATIONS

- 126 Note de conjoncture : Situation du marché avicole et enjeux pour la filière française,
par **Pascale Magdelaine**.
- 139 Analyses d'ouvrages et présentations de thèses

VIE DE L'ACADÉMIE

- 154 Nécrologies
Visites d'ISAGRI et du SIMA

INSTALLATION DU BUREAU POUR L'ANNÉE 2013

Discours de Monsieur Jean-François Colomer

Président sortant¹

UNE AGRICULTURE EN RECOMPOSITION

Messieurs les Secrétaire et Trésorier perpétuels,
Messieurs les Présidents, chères Consoeurs, chers Confrères,
Mesdames et Messieurs,

Qu'est ce qu'un agriculteur aujourd'hui et quelles sont ses perspectives pour l'avenir ? Autour de ces deux interrogations, je vais tenter de vous décrire le paysage agricole, tel que je le vois et aussi tel que je l'imagine. Et d'abord, un constat : je regrette que les agriculteurs soient si peu nombreux dans notre Compagnie. À peine 5 % en comptant les membres émérites et en congé provisoire. Je m'étonne aussi que les Français aiment l'agriculture en général, mais beaucoup moins les agriculteurs pris à titre individuel ou collectif, surtout lorsqu'ils manifestent ou habitent à proximité. Aussi, je souhaite dédier cette allocution de fin de présidence de l'Académie à tous les agriculteurs, petits ou grands, car, après tout, au travers des différents métiers que j'ai exercés, ce sont eux qui m'ont fait vivre et m'ont fait aimer l'agriculture. Et c'est pourquoi je suis très heureux que l'un d'entre eux, Michel Prugue, ait accepté d'être notre invité cet après-midi. Agriculteur et éleveur, il préside Maïsador, une coopérative polyvalente inscrite dans un territoire mais ouverte sur le monde.

En 1966, mon confrère journaliste, François-Henri de Virieu, décrivait ainsi les agriculteurs dans « La fin d'une agriculture, bilan de la Vème République » : « Voilà des hommes qui n'ont plus le poids politique qu'ils ont eu dans le passé, qui transforment des matériaux mis à leur disposition plus qu'ils ne créent réellement de biens, qui n'inventent plus rien depuis longtemps mais dépendent de la recherche ou de l'imagination de généticiens, de chimistes ou de directeurs de supermarchés... » Et il ajoutait : « La V^e République a essayé de mettre en place une politique agricole alors que le vrai problème était de définir une politique de l'économie alimentaire. Une agriculture puissante sans industrie alimentaire est un voilier sans mâture ». Près de cinquante ans après, ces propos sont toujours d'actualité, même si beaucoup de choses ont changé depuis dans la « ferme France ».

Le portrait social prospectif des agriculteurs tracé par le Centre d'études et de prospective du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt dans sa publication « Le monde agricole en tendance » fait le constat que le métier reste un des plus atypiques et complexes que l'on puisse rencontrer dans toute la population active. Un métier qui reste, malgré tout, encore très familial. Dans le même temps, la Société des Agriculteurs de France consacrait son cycle de réflexion 2011-2012 à la thématique « Agriculteur, quelle liberté d'entreprendre demain ? ». J'ai choisi de reprendre quelques éléments marquants de ces deux radioscopiques du monde agricole, un monde encore majoritaire il y a moins d'un siècle et qui est devenu aujourd'hui ultra minoritaire.

¹ Président de l'Académie d'Agriculture de France, Journaliste honoraire, président du Comité d'orientation de la Société des Agriculteurs de France (SAF).

C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 9 janvier 2013.

En premier lieu, les phénomènes d'urbanisation et de « rurbanisation » ont modifié le sens attribué à l'espace rural et les façons d'y vivre, avec l'émergence d'une agriculture périurbaine de plus en plus intégrée aux politiques des grandes agglomérations. Cette domination des populations urbaines s'accompagne d'une prise de conscience collective de l'impact des sociétés humaines sur la nature, sur la raréfaction des ressources, et avec, en particulier, l'émergence d'une revendication du bien-être animal. Ce que le sociologue René Le Guen appelle « l'écologisation de la vie économique et sociale ». D'où le constat que le monde agricole doit s'ouvrir aux aspirations de la société, s'en imprégner, alors que dans le passé il était la base des valeurs de la société.

Parallèlement, on assiste ces dernières décennies à une segmentation, à une concentration des activités agricoles et en conséquence à leur inégale répartition sur tout le territoire. Les activités animales dominent dans le Grand-Ouest et les productions végétales dans le grand Bassin parisien, avec pour effet une spécialisation des élevages et une simplification des assolements, une concentration des industries en amont et en aval, sans oublier l'action et le poids des grandes enseignes de la distribution. Mais on assiste également à un double mouvement dans les exploitations agricoles, l'un sur des systèmes de production très spécialisés avec une meilleure productivité du travail, l'autre, parfois les deux, choisissant la diversification dans des activités de service allant du tourisme ou de la production d'énergie au travail à façon en passant par la vente directe. Cette dernière a toujours existé dans les campagnes mais elle risque de se heurter à la tendance généralisée de normalisation, avec l'accentuation du processus d'industrialisation et de banalisation des produits alimentaires.

Les derniers chiffres des Comptes de l'agriculture font apparaître de très grands écarts de revenus entre les différentes productions, au point qu'un récent éditorial du journal La France Agricole évoquait le risque d'une « végétalisation du territoire ». Ce risque de déprise des productions animales ne ferait pas forcément l'affaire des filières végétales qui les approvisionnent, d'où l'effort de solidarité financière engagé par les céréaliers ces derniers mois. Il reste beaucoup à faire pour améliorer la compétitivité des filières animales et se protéger face à la volatilité des prix pour les grandes cultures. L'agriculture vit désormais dans un contexte économique incertain et doit se préparer à une diminution des aides communautaire et de l'Etat. Ainsi, par exemple, si on se réfère à la politique d'aides à l'installation des jeunes agriculteurs, elle paraît à bout de souffle. Elle a été imaginée pour transmettre des exploitations à des fils d'agriculteurs qui représentent actuellement moins de la moitié des installations ou créations d'entreprises. Le métier attire maintenant des hommes et des femmes originaires d'autres milieux sociaux. Il se féminise avec près d'un tiers de femmes chefs d'exploitation. La prochaine Loi d'avenir de l'Agriculture et la future PAC devront prendre en compte ces évolutions.

Enfin, les agriculteurs sont confrontés à une prolifération de normes, de réglementations internationales, européennes, franco-françaises qui sont souvent vécues comme une atteinte à la liberté d'entreprendre. François-Henri de Virieu, déjà cité, disait aussi que : «... tous les gouvernements qui se sont succédés ont été conduits à considérer que l'agriculture était avant tout un problème juridique, d'où une avalanche de textes de lois, règlements, circulaires... ». Le métier est devenu celui de gestionnaire, de manager afin d'optimiser le travail avec un recours croissant à de la main-d'œuvre salariée et pour mieux valoriser la production. D'où le fort développement du phénomène sociétaire en agriculture et des activités de conseils et d'accompagnement en lien avec le recours aux technologies de l'information et de la communication. Tout cela induit une nouvelle logique de coproduction de connaissances, selon Jean-Marie Séronie, en charge de la prospective chez CER France.

Pour le Centre d'études et de prospective du ministère de l'Agriculture, on assiste depuis 50 ans à une multitude de changements réguliers et continus sans véritable cassure au fil des années. Pas de brusque révolution mais un enchaînement d'évolutions au long cours, de mutations structurelles progressives. Pour Bertrand Hervieu, et cela n'est pas contradictoire, le monde agricole vit désormais une « vraie révolution », une situation de fin de cycle, et se trouve à l'aube d'une 7^e révolution agricole selon notre confrère Michel Griffon. La matrice de l'exploitation familiale à 2 UTH en polyculture-élevage a volé en éclats avec l'émergence du profil de chef d'entreprise agricole : autrement dit un métier comme un autre pour Laurent Klein, président de la SAF. Les agriculteurs vont devoir vivre plus qu'une évolution : une exigence de transformation, et donc revoir en profondeur les bases mêmes de leur activité.

Ils sont, comme tout patron de PME, à la fois responsable de bureau d'études, directeur de production, gestionnaire, en charge des relations humaines, du marketing et de la communication. Hugues de Jouvenel faisait état, lors de la présentation du prochain SIMA, du caractère hyper-moderne de l'agriculture, avec de plus en plus de tertiaire intégré en citant les recherches de plus en plus avancées sur le vivant en génomique, post-génomique, génie génétique... dans les processus de production. Mais force est de constater qu'on assiste actuellement à un palier de productivité malgré l'apport de l'informatique du champ jusqu'au bureau de l'exploitant. Un constat général que faisait Bertrand Collomb, membre de l'Institut et président d'honneur de Lafarge devant l'Académie des Technologies, en soulignant le fait que les Allemands sont plus forts que nous dans les innovations d'amélioration (comme les machines outils et agricoles) et les Américains dans les innovations de rupture comme l'électronique, les OGM ou le gaz de schiste. L'autre défi à relever selon l'américain Jeremy Rifkin sera celui de la « deuxième révolution industrielle en train de mourir ». Les conditions sont réunies, selon lui, pour enclencher la troisième révolution industrielle, avec l'essor de « l'écoconception » ou de la « bioéconomie » et l'organisation, par exemple, des flux et stocks d'énergie et de matières premières à l'échelon d'un territoire. C'est ce que nous avons découvert, il y a quelques semaines, à l'occasion de la visite de la bioraffinerie de Pomacle en Champagne, organisée pour l'Académie.

Pour gagner cette bataille de la compétitivité, il va falloir augmenter la capacité de résistance financière des entreprises agricoles avec le développement de systèmes assuranciers et au travers de la fiscalité, être en capacité de transmettre des outils de production de plus en plus importants, augmenter les compétences par la formation permanente, nouer des alliances en regroupant les moyens et les savoir-faire, maîtriser et intégrer les réglementations dans la conduite des entreprises, gérer les capitaux air, eau, sol et biodiversité, enfin mettre en place une économie contractuelle équilibrée dans les filières en mettant à plat les chaînes de valeur, mais aussi la rémunération des biens publics... avec en arrière plan le côté patrimonial de la dévolution du sol si on veut éviter le retour à une certaine forme de féodalité. Les agriculteurs, éleveurs, sylviculteurs vont devoir se construire une nouvelle identité professionnelle, mieux communiquer sur leurs itinéraires de production et la qualité des produits et services au profit de la société. Cela suppose une plus forte implication dans les démarches territoriales et de filières appuyées sur de l'audit, des contrôles et du marketing. Autrement dit, rendre plus visibles et plus transparents tous les éléments de la chaîne de production et de mise en marché jusqu'au recyclage en fin de vie des produits alimentaires dont plus du tiers en volume est actuellement non consommé.

Pendant des siècles être un agriculteur était un « état », une condition, le socle des sociétés humaines. C'est devenu progressivement un métier, avec un positionnement particulier dans l'économie moderne compte tenu de ses spécificités. Demain, son statut pourrait changer à cause des différentes fonctions que la société va lui demander d'assurer : celle de sentinelle de la terre en produisant autrement, celle d'alerte épidémiologique, celle d'expérimentateur afin de tester les nouvelles technologies du vivant, celle de passeur de savoir-faire et d'informations sur la qualité nutritionnelle et environnementale des produits mis sur le marché ce qu'ils font déjà dans certaines grandes surfaces, celle de gestionnaire d'un territoire apportant une qualité de vie à ses concitoyens, enfin celle de comptable des équilibres naturels et de la biodiversité. Je souhaite bonne chance aux chercheurs, aux dirigeants professionnels et au monde politique auxquels échoit la responsabilité, de mettre « en musique cette recomposition » de l'agriculture, sans trop d'entraves, ce qui reviendrait à décourager toute initiative innovante et la rendrait forcément inefficace.

Présentation du programme de travail 2013

par Gérard Tendron

Secrétaire perpétuel

Mesdames et Messieurs,
Chères consœurs, chers confrères,

J'ai le plaisir de vous présenter aujourd'hui le programme de travail de l'Académie d'Agriculture de France pour l'année 2013, qui constitue une innovation importante par rapport à nos pratiques antérieures. J'en avais fait un thème majeur de mes propositions avant mon élection comme Secrétaire perpétuel et cette proposition a recueilli un large consensus, puisque le Conseil de pilotage des programmes en a approuvé le principe lors de sa séance du 4 avril 2012 et la Commission académique le 20 juin 2012.

Son élaboration a suscité des débats fructueux à l'intérieur des sections et des groupes de travail qui ont été amenés à préciser les sujets sur lesquels ils souhaitaient engager des réflexions dans les mois ou les années à venir. Elle a permis au Bureau de dégager des thématiques communes sur lesquelles un travail transversal enrichira les productions. Le Conseil de pilotage des programmes les a ajustées et approuvées le 5 décembre dernier.

Le choix de ces thématiques a été guidé par les enjeux de société qu'elles représentent et par la préoccupation de notre Compagnie d'apporter sa contribution aux débats qu'elles suscitent. Elle le fait sous forme d'avis motivés et documentés, s'appuyant sur des analyses objectives et la production de synthèses des connaissances scientifiques. Ainsi, notre Académie répond à sa vocation fondamentale d'établir des passerelles entre la science, les acteurs opérationnels, les décideurs et l'opinion publique.

Quatre thématiques principales ont été retenues autour desquelles l'Académie va engager des travaux de réflexion qui mobiliseront le plus souvent plusieurs sections, voire d'autres académies. Je vais les décrire succinctement.

1. Produire mieux et plus pour nourrir les hommes

Nourrir la population de la planète qui continue à augmenter fortement, tout en respectant au mieux l'environnement, nécessite de produire plus et de réduire l'impact des cultures et de l'élevage sur l'environnement, dans un contexte de changement climatique.

Mieux préserver la biodiversité, utiliser avec discernement les intrants agrochimiques, mettre en œuvre des méthodes bio-intensives pour la santé et la croissance des plantes et des cultures, valoriser les ressources que sont les sols, l'eau et l'azote notamment, se révèlent être des enjeux qui requièrent d'adapter les cultures, les itinéraires techniques et les systèmes de production en utilisant au mieux les outils de l'agronomie et de l'amélioration des plantes. De même, devront être étudiées les évolutions souhaitables de la transformation et de la distribution des produits alimentaires afin d'assurer sur le long terme la sécurité alimentaire (produire suffisamment) et la sécurité des aliments (produire des aliments sains), aux échelles nationale, européenne et mondiale, sachant que les besoins augmentent rapidement.

Sur le plan social, il conviendra aussi d'étudier la question cruciale des évolutions quantitatives et qualitatives du marché du travail en agriculture et des exclusions paysannes à l'échelle mondiale. La pénurie mondiale d'emplois risque de s'amplifier avec une population supplémentaire de deux milliards d'hommes d'ici 2050. La majorité des 40% de la population mondiale qui se consacrent à l'agriculture est pauvre et les paysanneries sont d'ores et déjà entraînées dans des processus de paupérisation qui conduisent chaque année un grand nombre de paysans à quitter l'agriculture et venir s'entasser dans les villes dans un état de grand dénuement.

Cette vaste thématique « Produire mieux et plus pour nourrir les hommes » constituera une des priorités dans les réflexions à conduire au sein de notre Compagnie.

2. Adapter la gestion des écosystèmes agricoles et forestiers aux changements globaux

Les effets du réchauffement climatique risquent de s'accroître dans les années à venir. Des sécheresses récurrentes pendant la saison de végétation des forêts ou des cultures traditionnelles, une élévation de la température moyenne, des épisodes fréquents d'incidents d'origine climatique auront des répercussions majeures sur les écosystèmes cultivés, agricoles ou forestiers.

Identifier les facteurs de risques, prévoir les aléas et les stratégies d'adaptation des écosystèmes agricoles et forestiers et définir les modalités d'une gestion adaptative revêtent donc une importance particulière.

Les choix d'espèces ou de variétés, en fonction des sols et des ressources en eau selon les saisons, les rotations, les modes de culture, les objectifs de production, l'utilisation des terres devront, dans bien des cas, être redéfinis à différentes échelles spatiales et temporelles, en tenant compte des progrès de la sélection conventionnelle, de la génomique, voire de la transgénèse. Plusieurs sections de l'Académie peuvent apporter leur concours pour éclairer ce sujet essentiel.

De même, des réflexions prospectives devront être conduites concernant l'avenir de l'agriculture face à la limitation des ressources (énergie, eau, sols, territoires), l'impact de l'agriculture sur les changements globaux, et mettre en évidence ce que l'agriculture et la sylviculture peuvent contribuer à apporter face à l'épuisement des ressources naturelles.

L'étude des potentiels de la science pour une agriculture durable, engagée au sein d'un groupe de travail transversal, devra être finalisée et largement diffusée, afin de faire mieux connaître les découvertes les plus récentes dont les applications seront des éléments essentiels des progrès de l'agriculture et de la sylviculture de demain.

La question des ressources en eau mérite une attention particulière en termes d'accès à l'eau pour l'agriculture, d'adaptation des pratiques culturales et des systèmes de culture aux potentialités du milieu et aux ressources en eau, de réduction des impacts de l'agriculture et de l'élevage sur la qualité de l'eau. Dans un contexte de changement climatique, et de lois qui privilégient actuellement d'autres usages de l'eau au détriment de l'agriculture, une réflexion prospective est indispensable concernant les solutions alternatives et les moyens d'économiser l'eau.

Enfin l'étude des interactions entre la forêt et la ressource en eau, marquées par de fortes variabilités spatio-temporelles et soumises à d'importants effets d'échelle apparaît essentielle. Elle devrait permettre d'optimiser la gestion forestière, en diminuant la consommation nette d'eau par la forêt au bénéfice des ressources hydriques.

3. Intégrer les politiques agricoles, environnementales et territoriales

Les ressources naturelles sont indispensables à l'homme pour la satisfaction de ses multiples besoins et pour son bien-être. Il cherche à aménager les milieux pour mieux les exploiter, tout en veillant au renouvellement des ressources naturelles.

L'Académie doit chercher à définir les modes de gestion prospectifs pour tendre vers de nouveaux états réversibles, souhaités par la société d'aujourd'hui, en allant vers une biosphère mieux adaptée aux besoins et avec des potentialités plus riches pour les populations futures. La question de la biodiversité naturelle en milieu rural pose le problème de la responsabilité éventuelle de l'agriculture dans l'érosion, le maintien ou l'amélioration de la diversité biologique.

La capacité des agriculteurs et des éleveurs à satisfaire les besoins alimentaires de l'humanité au cours des prochaines décennies, tout en préservant le potentiel de production pour les années futures et en assurant un équilibre satisfaisant entre les différentes activités du milieu rural, constitue un enjeu majeur. A ce titre, les interactions entre politiques agricoles, environnementales et d'aménagement du territoire seront déterminantes. La réforme de la Politique agricole commune dans l'Union européenne devrait jouer un rôle essentiel dans ces évolutions.

L'Académie consacra ses travaux dans ce domaine aux interactions, complémentarités et contradictions entre les politiques agricoles, environnementales et territoriales, afin de proposer des évolutions de nature à assurer plus de cohérence et de complémentarité. Elle poursuivra ses réflexions sur les agricultures et les forêts en milieux périurbains. Par ailleurs, devront être abordées les questions de l'économie et de la sociologie de l'agriculture, en rapport avec les mesures de protection de l'environnement. Enfin il est proposé d'analyser la place possible du secteur agricole à partir de ses

relations avec l'économie et la société en considérant les fonctions qu'il est appelé à remplir : alimentation, entretien des milieux naturels, dynamiques territoriales, relations intersectorielles et répondant aux enjeux de notre temps : nature/culture, marchand/non marchand, individuel/collectif.

4. Contribuer au débat sur « Innovations et acceptabilité sociale »

L'acceptabilité sociale vis-à-vis des innovations techniques, technologiques ou scientifiques, voire du « progrès » dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation ou de l'environnement représente une exigence majeure. L'opinion publique peut rejeter brutalement des innovations ou revenir sur ce qu'elle avait jusqu'alors accepté. Les décideurs politiques mettent fréquemment en avant le principe de précaution pour interdire la poursuite ou l'exploitation d'innovations qui pourraient être utiles pour répondre aux besoins futurs de la société, alors même que le principe de précaution ne devrait pas être invoqué pour répondre à une réticence sociétale, idéologique ou philosophique.

La notion de Nature, au regard du monde très artificialisé dans lequel nous vivons, a aussi beaucoup évolué. La préservation de la biodiversité apparaît à beaucoup de nos concitoyens comme une priorité par rapport aux activités économiques en milieu rural et forestier. L'évolution de la perception de la nature mérite d'être approfondie, notamment en termes d'attractivité des campagnes pour les urbains, des contraintes qu'elle génère pour les ruraux et des retombées économiques qu'ils peuvent en espérer. De même le rôle des agriculteurs et des ruraux au sens large dans l'entretien de la nature et la fourniture de biens et de services aux urbains doit être mieux étudié, alors même que réhabiliter l'image environnementale de l'agriculture est une préoccupation de la profession agricole.

L'Académie va donc poursuivre ses réflexions sur les innovations et l'acceptabilité sociale en déclinant cette thématique à propos de l'alimentation humaine, l'élevage, l'éthique de l'animal et les relations homme-animal, les biotechnologies et la nature.

Il convient de souligner qu'en plus de ces quatre grandes thématiques transversales qui vont soutenir une part importante des travaux de l'Académie dans les mois qui viennent, chaque section a précisé dans un programme particulier les différents sujets sur lesquels elle compte s'investir, beaucoup débordant le cadre annuel.

De même, des groupes de travail, au nombre d'une quinzaine, vont continuer à travailler sur des sujets essentiels comme l'eau, la PAC, agricultures et forêts en milieu périurbain, potentiels de la science pour une agriculture durable, éthique de l'animal ou sur des sujets visant à améliorer l'organisation et de fonctionnement de l'Académie comme la communication, la modernisation de son site internet, la déontologie, les statuts.

Notre programme de travail va être largement diffusé. En interne, chaque membre de notre Compagnie aura ainsi connaissance de l'ensemble des travaux entrepris et pourra participer à certains d'entre eux. En externe, il contribuera à une meilleure lisibilité de notre travail et, on peut l'espérer, à une fréquentation accrue des séances publiques et du site Internet, ainsi qu'à la transformation de certaines de nos propositions en actions.

Ce programme de travail, glissant, ne doit pas constituer un carcan, mais un cadre de travail, ce qui n'interdira pas de s'en éloigner, à chaque fois que la nécessité de répondre à des questions urgentes s'imposera. Il ne doit pas entraver la souplesse d'organisation et de fonctionnement des sections dont les différences font la richesse de l'Académie. Il ne doit pas non plus constituer un frein à la créativité des sections, mais au contraire les aider à la développer, lors des mises à jour annuelles qui seront présentées lors de la séance solennelle de rentrée d'octobre.

BOIS-ÉNERGIE : LES MÉGA-PROJETS DE COGÉNÉRATION CHALEUR-ÉLECTRICITÉ EN FRANCE : APPROCHE PROMETTEUSE OU PORTEUSE D'ERREURS ?

INTRODUCTION

Présentation des appels à projet cogénération, dits CRE.

par Patrick Ollivier¹

Afin d'impulser significativement le programme national de montée de la part d'énergies renouvelables, l'État français a lancé successivement quatre appels à projets, visant à susciter l'installation d'unités consommant de la biomasse et produisant simultanément de la chaleur et de l'électricité. Le principe est que le soumissionnaire propose un projet technique bien identifié, et annonce le prix auquel il entend vendre l'électricité. Si son projet est accepté, il bénéficie d'un contrat d'achat garanti en quantités et prix, sur le moyen-long terme.

Ces appels d'offre ont recueilli un succès certain à en juger par le nombre de dossiers soumis et retenus. En revanche, ils ont procuré une certaine déception en raison de la non-réalisation de projets retenus. À ce jour, d'après nos informations :

- CRE 1 (2005): 15 projets retenus, 6 concrétisés, soit 40% de réalisation,
- CRE 2 (2006): 25 projets retenus, 5 concrétisés, soit 20% de réalisation,
- CRE 3 (2008) : 33 projets retenus, 18 concrétisés ou en cours, soit 55% de réalisation,
- ensemble des 3 première CRE : 73 projets retenus, 29 concrétisés ou en cours, soit 40% de réalisation.

(pour CRE 4, lancé en 2009, il n'y a pas encore de connaissance de l'avancement des 15 dossiers retenus).

On ne peut donc parler de succès, même si les réalisations faites sont importantes. De plus, les projets qui n'ont pas été réalisés ont sans doute bloqué l'acceptation d'autres dossiers, qui, peut-être, auraient été réalisés.

Les explications que l'on peut avancer sont multiples, et ne jouent évidemment pas toutes en même temps ; on relève par exemple :

- des exigences de puissance trop élevées, imposant des approvisionnements sur de longues distances, donc chers ;
- une certaine incohérence dans les choix géographiques des projets retenus, avec parfois de gros projets à peu de distance les uns des autres ;
- le poids économique de l'obligation d'un fort taux de plaquettes forestières (à partir de CRE 2), alors que ce produit est un des plus chers ;
- des plans d'approvisionnements s'avérant irréalistes ou insuffisamment verrouillés au moment de signer les contrats ;
- des prix de vente de l'électricité calculés trop bas, rendant *a posteriori* l'équilibre économique aléatoire ;

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, ancien président de RBM et des Forestières La Rochette. *C.R.Acad. Agric. Fr.*, 2013, 99, n°2. Séance du 16 janvier.

- des technologies envisagées intéressantes, mais incertaines ;
- la difficulté pour certains soumissionnaires de concrétiser leurs plans de financement ;

En outre, les règles encadrant ces appels à projet ont provoqué un certain nombre de critiques, en particulier sur le fait qu'elles ont changé d'un appel à l'autre, ce qui a entraîné des distorsions entre les dossiers acceptés à l'un ou l'autre appel.

Les exposés qui vont suivre seront des témoignages de professionnels qui ont été impliqués sur ces dossiers, et qui font part de leurs retours d'expériences. Ces témoignages devraient contribuer à améliorer le processus dans l'avenir.

LA STRATÉGIE FRANÇAISE DE DÉVELOPPEMENT DE L'UTILISATION DU BOIS-ÉNERGIE. LES RAISONS DU CHOIX DE GROSSES INSTALLATIONS. LES RÈGLES DU JEU

par Renaud **Abord de Châtillon**¹

Pourquoi l'État a-t-il mis en place une politique d'appels d'offre de construction de centrales de production d'électricité à partir de bois ?

1) Tout d'abord c'est une diversification des sources d'énergie électrique vers des énergies renouvelables qui s'inscrit dans la politique acceptée à Bruxelles de diversification du mix énergétique - règle des 20% de ce mix à partir d'énergies renouvelables.

2) Les diversifications énergétiques dans le domaine de la production électrique sont aisément finançables : c'est le consommateur d'électricité qui paie, à la fois pour les éoliennes –à terre ou en mer (sur appels d'offre dans ce dernier cas) – ou pour le photovoltaïque ou.... pour les centrales électriques à bois.

Ce sont des montants conséquents qui sont investis chaque année dans la production électrique à partir des renouvelables (plusieurs milliards d'€ par an, en forte croissance à l'avenir).

Tout le monde connaît le débat sur le photovoltaïque et la baisse continue des prix garantis (correspondant d'ailleurs à la baisse des prix des panneaux photovoltaïques importés) ; cette baisse a permis de desserrer un étau financier qui était en voie de devenir insupportable.

3) La mise en place de cette politique était de plus facilitée par la reprise de l'électricité produite sur le réseau qui offrait donc un débouché garanti aux quantités produites.

Si le bois énergie est très important dans les énergies renouvelables (tout comme l'hydraulique) c'est principalement dans la production de chaleur que cette énergie est utilisée.

Pour développer la production d'électricité à partir de bois, une procédure d'appels d'offre a été mise en place *via* la Commission de régulation de l'électricité ; on parle de CRE 1,2, 3... Les prix garantis sont d'ailleurs en hausse.

Ceci étant, on constate que l'intégralité des projets sélectionnés ne se fait pas ; en général ce sont les professionnels de la filière qui eux donnent suite (papeteries, scieries...) alors que de purs énergéticiens ne donnent parfois pas suite.

En effet, les membres de la filière savent approvisionner en bois ; ils ont des services d'approvisionnement et de plus tirent un bon retour financier de ces investissements qui contribuent à leur équilibre d'exploitation.

Cette présence des professionnels relativise le débat propagé par ceux qui disent : on va manquer de bois !

Soulignons d'ailleurs que l'État a essayé de mettre en place une politique de mobilisation de bois en France – discours d'Urmatt –soit +12 millions de mètres cubes en 2012 et +20 millions de mètres cubes en 2020 ; en effet, en France, des millions d'hectares ne sont pas récoltés car non "économiques".

Les résultats ne sont pas à la hauteur de l'attente.

Ce défi de la mobilisation est essentiel pour le développement du bois énergie et en particulier du bois-électricité.

Le prix payé au sylviculteur est au cœur de ce débat ; s'il reste bas – ce qui est le cas aujourd'hui – la mobilisation supplémentaire se fera mal ou ne se fera pas !

Il est paradoxal de constater qu'alors que le prix du pétrole se maintient à un niveau très élevé cela n'ait que peu de conséquences sur le prix du bois énergie.

Comment sortir « par le haut » de cette contradiction ?

1) Rechercher tous les gains de productivité (mobilisation, plans de développement de massifs tournés vers la mobilisation...).

¹ Ministère des Finances, ex Industrie.

2) Rechercher des moyens fiscaux pour que les politiques mises en place par l'État – et qui ne se mettent pas en place suffisamment rapidement (mobilisation, développement du bois énergie y compris du bois électricité, celui-ci étant déjà sous le régime du prix garanti...) – s'appliquent effectivement.

Je préconise un crédit d'impôt bois-énergie au profit du sylviculteur, fixé par exemple à 10 € par mètre cube récolté et mis dans le circuit marchand du bois-énergie.

Une mobilisation de 12 millions de mètres cubes "coûterait" 120 millions d'€. En contrepartie il y aurait des créations d'emplois à la clé et une contribution à la politique énergétique. Pour ne pas déséquilibrer le marché des papetiers et panneautiers... on pourrait généraliser ce crédit d'impôt à l'ensemble du bois de trituration, mais, à ce moment, le crédit d'impôt pourrait être fixé à un niveau moindre (5€ par mètre cube).

(Reçu le 10 janvier 2013)

LES DÉFAUTS DU SYSTÈME D'APPELS D'OFFRE ET DU GIGANTISME DES APPROVISIONNEMENTS NÉCESSAIRES

par Serge Defaye¹

La biomasse ligneuse à des usages multiples : industriels, énergétiques, agronomiques... souvent complémentaires et parfois concurrents.

D'un point à l'autre de l'hexagone, sa disponibilité et ses débouchés dépendent de nombreux facteurs, forestiers et climatiques pour les ressources, démographiques, urbanistiques et industriels pour ses applications.

La filière énergétique se découpe elle-même en quatre grandes familles :

- l'individuel domestique,
- le petit collectif en milieu rural,
- l'industrie,
- la chaufferie dédiée et le réseau de chaleur de moyenne à forte puissance.

La cogénération, c'est-à-dire la production combinée d'électricité et de chaleur, ne concerne que les deux dernières.

L'objectif de tout énergéticien doit (ou devrait) être la recherche de l'efficacité énergétique et de la performance environnementale maximale, ce qui, en général, va de pair.

Les réseaux de chaleur de puissance moyenne, notamment en basse température ce qui autorise la condensation des fumées, atteignent des rendements globaux très élevés et grâce à des traitements de fumées appropriés, des rejets particuliers et gazeux polluants extrêmement faibles.

La cogénération biomasse peut théoriquement s'envisager selon deux technologies : cycle de Rankine (vapeur ou fluide organique) et gazéification associée à un moteur ou à une turbine à gaz. Seule la première technologie a des applications industrielles nombreuses à l'échelle mondiale. Cependant, elle présente l'inconvénient, dans la gamme de puissance concernée, de ne pas permettre d'atteindre un rendement électrique élevé (15 à 25 % au maximum). Ceci veut dire que ce type d'installation délivre 3 à 4 fois plus d'énergie thermique que d'électricité, le rapport électricité/chaleur se dégradant d'ailleurs lorsque l'on veut maximiser le rendement global. Il faut donc chercher à valoriser intégralement cette chaleur (ou la vapeur basse pression), sauf à la dissiper dans l'atmosphère, ce qui est aberrant au double plan économique et environnemental. **L'existence d'un « puits de chaleur » très important est donc la contrainte principale à résoudre lorsque l'on veut mettre en place une cogénération bois dans l'industrie ou plus encore sur un réseau de chaleur.**

Les dispositifs de soutien actuellement en vigueur en France imposent des seuils de puissance électrique très élevés :

- 12 MWé pour les appels d'offre dits CRE ;

¹ Consultant cabinet DEBAT, spécialiste bois-énergie et ancien Président du CIBE.

- **5 MWé** dans le cadre de l'arrêté tarifaire du 27 janvier 2011, avec des tarifs d'achat d'électricité très inférieurs à ceux prévalant dans de nombreux autres pays européens.

Chiffres-clés de la cogénération-bois :

	Unité	Industrie	Réseau de chaleur
Puissance électrique	MWé	12	5
Puissance thermique	MWth	36	20
Fonctionnement	Heures	8 000	4 000
Énergie thermique produite	MWh	300 000	80 000
Débouchés	Eq.logements		6 400
Biomasse ligneuse "entrée chaudière"	Tonnes/an	170 000	45 000

À la lecture du tableau ci-dessus on constate que seules les très grosses industries (papeterie, chimie...) fonctionnant en continu peuvent s'équiper de ce type d'installation (12 MW électriques et plus), ce qui requiert des tonnages de biomasse de l'ordre de 200 000 t/ an, avec un rayon de collecte en conséquence et bien sûr des risques non négligeables de concurrence avec d'autres usages (industriels) ou usagers (autres débouchés énergétiques) !

L'application sur réseau de chaleur en période hivernale, quant à elle, ne peut concerner que les très grandes villes disposant de gros équipements publics et cités de logements collectifs (7 000 logements raccordés *a minima*, ce qui se trouve uniquement dans des villes d'au moins 100 000 habitants).

La déclinaison franco-française de la cogénération-bois n'a donc aucune application possible en zone rurale et forestière (à l'exception du cas particulier des papeteries).

Les seuils de puissance électrique imposés orientent donc les projets vers des sites en milieux industriels et urbains, souvent en zone portuaire, éloignés des territoires où on dispose de ressources ligneuses en abondance.

On est très loin de ce qui se pratique dans d'autres pays (comme l'Allemagne par exemple) qui ont privilégié le soutien financier aux puissances moyennes de 300 à 3 000 kW électriques.

L'actuelle option française ferme ainsi la voie à une approche raisonnable et raisonnée du développement de la biomasse ligneuse, dans une perspective d'aménagement des territoires et de développement local, visant à conforter le tissu industriel (scieries, laiteries ...), au plus près des ressources forestières et à couvrir en partie les besoins énergétiques des gros bourgs et des villes petites et moyennes des régions continentales et montagnardes du pays (Massif Central...).

C'est principalement pour cette raison et l'absence de progressivité des tarifs d'achat en faveur des installations de taille moyenne à petite, que celle-ci est très contestée par de nombreux élus locaux et les professionnels du secteur et fortement remise en question par le rapport "*Les usages non alimentaires de la Biomasse*" de septembre 2012, commandé par le ministre de l'Agriculture au Conseil général des Ponts, des Eaux et des Forêts.

(Reçu le 10 janvier 2013)

LES DIFFICULTÉS DU SYSTÈME DES PLANS D'APPROVISIONNEMENTS EXIGÉS PAR L'ÉTAT

par Rémi Grovel¹

Les plans d'approvisionnement demandés dans les soumissions de dossiers CRE, doivent permettre à l'Administration d'en appréhender la faisabilité vis-à-vis des autres consommations dans

¹ Consultant cabinet Forêt Énergie Ressources, spécialiste Bois-Énergie.

l'espace géographique concerné, et d'évaluer la capacité des soumissionnaires à réaliser ces plans dans la durée.

Ils doivent donc couvrir des points comme la structure de l'approvisionnement, les origines géographiques, les types et caractéristiques de combustibles envisagés, les prix, l'analyse des usages concurrents, les impacts environnementaux.

Les informations apportées sont soumises à une notation de laquelle dépendra en grande partie l'acceptation du projet.

Toutefois la logique des questionnements a ses limites, et le recul révèle que de nombreux points ne sont pas réellement pris en compte correctement, de même que certaines questions dépassent parfois la capacité de réponse du soumissionnaire. Par exemple : l'évaluation de la filière-bois dans la zone concernée par son projet, ou les mises en marché de bois dans les 10 voire 20 années à venir.

De même, le souci de "bien" planifier, et l'obligation ensuite de respecter cette planification, enlèveront *de facto* ultérieurement beaucoup de souplesse dans la conduite des opérations d'approvisionnement, alors que l'expérience des professionnels a montré qu'un approvisionnement bois est toujours quelque chose qui doit évoluer.

Certes nécessaire, la conception des questionnements sur les plans d'approvisionnement a donc encore bien des progrès à faire.

(Reçu le 10 janvier 2013)

LA SYNTHÈSE D'UN INVESTISSEUR INDUSTRIEL QUI A SOUMIS BEAUCOUP DE DOSSIERS

par François-Xavier **Dugripon**¹

Dans le groupe COFELY, le bois devient une source d'énergie importante : plus de 300 chaufferies fonctionnent au bois en 2012, et 210 sont approvisionnées directement par Cofely. Compte tenu des projets, la consommation devrait être multipliée par 10 entre 2010 et 2015 pour atteindre alors près de 1,5 Mt/an.

La cogénération est une technique très efficace énergétiquement et environnementalement. Toutefois un prix de rachat de l'électricité trop faible combiné avec une montée progressive des prix de l'approvisionnement en bois (de 13-17 €/MWh en 2008 à 19-23 €/MWh maintenant) rend l'équilibre économique des projets de plus en plus difficile.

Mais, pour les projets qui ont été avalisés par l'État jusqu'à présent et qui ne se sont pas réalisés, le recul de l'expérience permet de diagnostiquer d'autres phénomènes qui ont freiné les développements prévus, en particulier la rigidité des règles encadrant le fonctionnement. Il faut aussi prendre conscience que la cogénération impose une utilisation à l'aval de la chaleur, et qu'il est difficile de garantir que cette consommation sera assurée durant les 20 ans de fonctionnement de la production d'électricité, en particulier pour des installations adossées à des consommateurs industriels.

Enfin, le changement des "règles du jeu" d'un appel à projet à l'autre complexifie la mise en œuvre des projets acceptés, et on a même vu des projets acceptés dans un appel CRE être représentés dans l'appel suivant afin de bénéficier de conditions plus favorables.

En diabolisant souvent la production d'électricité à partir de biomasse, y compris en cogénération, la France est donc très en retard sur certains de ses voisins européens avec une part d'électricité produite à partir de la biomasse de seulement 0,3 %.

Pour améliorer le processus et rattraper ce retard, trois mesures sont proposées :

1. abaisser le seuil de rachat de l'électricité jusqu'aux installations de 3 MW électriques ;
2. mettre en place un tarif de rachat qui augmente quand la puissance diminue ;
3. mettre en place un fond de garantie pour sécuriser les investisseurs en cas de défaillance de l'enlèvement de chaleur.

Enfin, il serait souhaitable d'envisager un appel à projet spécifique (CRE 5 ?) pour valoriser les bois en fin de vie.

¹ Directeur des achats Énergie COFELY (groupe Suez).

(Reçu le 10 janvier 2013)

LE TÉMOIGNAGE D'UN INDUSTRIEL AYANT CONCRÉTISÉ DEUX COGÉNÉRATIONS CRE

par Patrick **Sombret**¹

Le premier appel d'offres CRE a été pour les usines de production de pâtes à papier du groupe Fibre-Excellence une réelle opportunité. En effet il a permis à ces deux pétitionnaires de valoriser des déchets de biomasse à travers un contrat à long terme de production électrique leur garantissant un nouveau revenu.

Ces investissements désormais opérationnels délivrent sur le réseau EDF une puissance de plus de 30 MW et participent significativement aux objectifs nationaux de développement des ENR.

Cependant, en renonçant à l'efficacité énergétique, la DGEC a conduit à multiplier ses appels d'offres avec pour conséquence un appel de biomasse non couvert pour les projets élus, révélant ainsi la faiblesse structurelle de la filière bois française.

La mobilisation du gisement actuel et le développement d'une nouvelle ressource constituent l'enjeu majeur pour les acteurs des filières transformant la biomasse sur le territoire national.

À ces conditions, les projets CRE trouveront leur pertinence économique environnementale et sociale.

(Reçu le 10 janvier 2013)

¹ Chief Executive Officer de FIBRE EXCELLENCE (Pâte à papier).

DISCUSSION

J.F. Bontoux¹. – Le rôle du bois-énergie consiste à produire de la chaleur et, éventuellement en complément dans les installateurs de cogénération, de l'électricité.

Le bois-énergie est idéalement utilisé pour l'alimentation des chaufferies de moyenne puissance, de 5 MW à 20 MW, dans le cadre du secteur tertiaire, avec création d'un réseau de chaleur.

Ces chaufferies peuvent quadriller parfaitement le territoire métropolitain et se trouver chaque fois près des sources d'approvisionnement en combustible.

Sylvie Alexandre². – Je signale la parution récente du rapport conjoint CGAAER/CGEDD/CGEJET « Valorisations non alimentaires de la biomasse » qui traite des polémiques suscitées sur des concurrences d'usage dans le secteur des biocarburants et dans la filière bois.

Sur les appels d'offre CRE, le rapport préconise d'abandonner la production d'électricité à titre principal à partir de biomasse, et de ne recourir qu'au dispositif du fonds chaleur de l'ADEME, dont les installations, plus modestes en taille, présentent une garantie d'usage de la chaleur cogénérée, et partant une bien meilleure performance énergétique, dans la mesure où les industries susceptibles de bien valoriser la chaleur ont déjà été retenues par la CRE.

Il faut être attentif aux filières de granulés de bois qui sont en cours de structuration en Amérique du Nord et du Sud, pour couvrir les besoins d'importation.

R. Février³. – Ces très intéressants exposés nous ont permis de mieux connaître les perspectives, mais aussi les limites et les problèmes inhérents à la cogénération « chaleur-électricité » à partir du bois, ressource renouvelable qu'il est nécessaire de mieux exploiter dans notre pays forestier.

Permettez-moi d'éluder le débat qui va s'instaurer sur les différents aspects de cette filière, pour vous faire part d'une réflexion concernant une autre façon d'envisager l'utilisation du bois, compte tenu à la fois de nos besoins croissants en autres ressources durables et des moyens que peuvent nous offrir aujourd'hui la science et la technologie.

Pendant des années, pour venir à l'Académie, je passais devant une grosse usine où l'on produisait de la chaleur et de l'électricité à partir de nos déchets domestiques. Et je ne pouvais m'empêcher de penser que brûler du bois dans nos foyers - et jadis dans nos usines - pour produire de la chaleur (et du CO₂) revenait en quelque sorte à ravalier au niveau de tels déchets le bois, ce fruit de la photosynthèse, avec la richesse et la diversité de ses molécules comme de ses « structures ».

Je comparais alors cette banale (excusez-moi) finalité – l'énergie – à tous les produits que l'homme a pu obtenir à partir du pétrole grâce aux progrès spectaculaires de la pétrochimie, ces produits dont nous disposons aujourd'hui dans toutes nos activités.

C'est pourquoi je pense – avec d'autres depuis longtemps – qu'une ambitieuse mobilisation des multiples richesses physico-chimiques du bois grâce aux progrès – nécessaires – de la xylochimie, constitue une perspective dont la mise en œuvre complèterait significativement les bénéfices tirés des progrès dans une filière énergétique rénovée, et permettrait ainsi de tirer un meilleur parti de notre richesse forestière.

Il aurait été opportun d'en faire mention dans l'introduction de notre débat.

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Président de l'AFEF, Président de FRANCILBOIS.

² Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Ingénieur général des Ponts, des Eaux et des Forêts, Directrice des pêches maritimes et de l'aquaculture.

³ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Conseiller d'État honoraire, Directeur général honoraire de l'INRA, Président honoraire de l'ONF.

BOIS-ÉNERGIE : LES MÉGA-PROJETS DE COGÉNÉRATION CHALEUR-ÉLECTRICITÉ EN FRANCE : APPROCHE PROMETTEUSE OU PORTEUSE D'ERREURS ?

CONCLUSION

par Yves **Biro**t¹

Le secteur forestier a des atouts importants pour contribuer à « décarboner » l'économie, dans le domaine de la production de matières premières et matériaux ainsi que d'énergie, basée sur des ressources biologiques renouvelables. C'est donc un pilier d'une bio-économie ou économie bio-sourcée, qui peut occuper une place notable dans le cadre des engagements européens 20-20-20 à l'horizon 2020 : 20% de progrès dans l'efficacité énergétique, 20% de réduction d'émission de gaz à effet de serre, et part des énergies renouvelables portée à 20%. Pour ces dernières, la France s'est même fixée 23%.

La biomasse ligno-cellulosique sous des formes variées (bois rond issu de plantations dédiées, taillis ou d'éclaircie, connexes de scierie, bois de recyclage en fin de vie d'un produit) occupe déjà une place importante dans le mix des énergies renouvelables (au même niveau que l'hydraulique), qui pourrait être accrue dans le futur. La France, à l'instar d'autres pays européens, a choisi de développer une stratégie centrée sur la cogénération chaleur-électricité à base de bois. Après plusieurs années de sa mise en œuvre, il était intéressant d'en tirer un bilan et de présenter les résultats obtenus.

L'Académie d'Agriculture de France, en organisant cette séance « controverse », sous une forme moins « académique » que les séances publiques traditionnelles, souhaitait donner la parole aux acteurs professionnels qui se sont impliqués dans les projets. En fournissant un cadre à l'exposé de retours d'expérience, l'idée était de faire émerger à travers les débats, des voies d'amélioration pour le futur. Les débats ont été nourris, animés et même passionnés, confirmant ainsi tout l'intérêt du concept de séances « controverse ». Ils ont permis de faire émerger de nombreux points saillants, dont je vais présenter quelques-uns.

La stratégie s'est révélée bien adaptée dans le cas de projets adossés à des industries grosses utilisatrices d'électricité et de chaleur, comme les scieries et surtout les usines de pâte à papier, et rôdées à la difficile problématique de l'approvisionnement de bois en très grande quantité. En revanche, les cas où les résultats ont déçu par rapport aux attentes sont assez nombreux. On peut l'expliquer par des raisons liées aux soumissionnaires eux-mêmes et aux procédures imposées par la stratégie choisie.

Du côté des soumissionnaires, les prix de vente de l'électricité ont été parfois sous-évalués et les « business-plans » manquaient de réalisme. Dans certains cas, les technologies avaient encore un caractère expérimental. La question de l'approvisionnement, et donc de la mobilisation des bois, s'est avérée souvent comme une pierre d'achoppement, rendue d'autant plus prégnante, que les volumes de bois à mobiliser étaient considérables. Le manque de réalisme des plans d'approvisionnement a été flagrant dans certains cas. Mais *a contrario*, il n'était pas réaliste que le cahier des charges demande au soumissionnaire d'avoir une connaissance détaillée de la ressource et de sa dynamique.

Du côté des procédures imposées, un défaut important du système a été l'exigence de puissance électrique trop élevée, conduisant à la mobilisation de gros volumes de bois, donc à des transports à longue distance, à fort coût financier et environnemental. La concomitance du démarrage des projets sélectionnés a créé une pression désorganisatrice sur les approvisionnements. Plus grave, un certain

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, [directeur de recherche honoraire de l'INRA](#).
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 16 janvier.

manque de cohérence dans les choix d'implantation géographique, a provoqué, dans certains cas, une sorte de cannibalisation entre projets, en compétition pour une même ressource. Mis à part le cas des grosses industries en zone rurale, la grande taille des unités est synonyme de production de grandes quantités de chaleur adaptées seulement au contexte de grandes villes. Ceci a fermé la porte à des unités de taille moyenne, plus adaptées au développement local. Concernant la matière première à utiliser, les cahiers des charges ont mis un poids peut-être excessif sur les plaquettes forestières, qui sont chères, alors que l'utilisation de bois recyclés, abondants et bon marché aurait pu être envisagée. On peut enfin noter des éléments d'instabilité, tels que des règles changeantes d'un appel d'offres à l'autre, des prix moyens de rachat de l'électricité fluctuants, qui ont contribué à limiter le taux de réalisation des projets.

En conclusion, la stratégie française de cogénération électricité-chaleur à partir du bois a permis d'importantes avancées, mais les options choisies devraient être significativement améliorées. Espérons que les débats d'aujourd'hui, organisés par l'Académie d'Agriculture de France, y contribueront.

MESURE DE LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DES PLANTES CULTIVÉES ET DES ANIMAUX DOMESTIQUES

par Bernard **Le Buanec**¹

Depuis de nombreuses années il y a un débat, tant au niveau national qu'international, sur l'évolution de la diversité génétique des variétés cultivées et des animaux domestiques avec souvent des résultats contradictoires. En effet, une des difficultés du débat vient du fait que les auteurs utilisent des indicateurs de diversité différents. Par exemple, les experts en sciences sociales utilisent le nombre de variétés ou le nombre de races par espèce, la proportion des surfaces plantées avec ces variétés ou des élevages utilisant ces races et le passage par les agriculteurs d'une variété à une autre ou d'une race à une autre. Les biologistes utilisent plutôt des indicateurs généalogiques, l'analyse de caractéristiques morphologiques ou des indices de fréquence allélique, de distances génétiques fondés sur des analyses de marqueurs moléculaires. Non seulement ces indicateurs sont différents, leur signification peut être discutable mais encore leurs relations sont souvent faibles.

Le nombre de variétés ou de races locales est souvent utilisé comme un critère de diversité génétique. Cependant ces variétés ou races sont rarement, dans un premier stade, analysées de façon systématique. Il apparaît souvent, par exemple pour les variétés végétales, qu'après analyse, ce nombre doit être réduit de façon drastique du fait de synonymies. De même pour les races animales, les inventaires, à part quelques informations succinctes sur leurs caractères zootechniques ne disent pas grand-chose sur leur diversité génétique.

La corrélation entre les diversités données par différents marqueurs est souvent faible comme, par exemple, dans le cas des variétés végétales, entre les marqueurs moléculaires et les marqueurs morphologiques, à l'exception de caractères simples monogéniques. Les résultats mettent en évidence des relations triangulaires entre les deux types de distance.

On peut utiliser bien évidemment beaucoup d'autres indicateurs tels que les indicateurs généalogiques, les fréquences alléliques, ou les nombreux indices de diversité moléculaire. Il y a cependant lieu d'être prudent avant de tirer des conclusions lorsque l'on parle de diversité génétique et de son évolution.

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France et membre de l'Académie des Technologies.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 23 janvier.

ÉVOLUTION DE LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DES VARIÉTÉS DE PLANTES CULTIVÉES

par André Gallais¹

1. Introduction

L'amélioration des plantes se distingue de l'amélioration des animaux domestiques par la création de populations à base génétique souvent étroite, reproductibles, appelées variétés, qui correspondent à ce que l'agriculteur cultive dans son champ. En revanche, pour les animaux domestiques comme les bovins et les ovins, ce sont les populations en cours d'amélioration, à base génétique assez large, qui sont utilisées par les éleveurs. Pour la production porcine et avicole, on fait appel au croisement de populations améliorées. Le stade population d'amélioration existe plus ou moins concrètement en amélioration des plantes, mais le sélectionneur en extrait des populations à base étroite correspondant aux variétés. L'amélioration des populations de plantes présente toutefois un intérêt pour les pays n'ayant pas une agriculture intensifiée.

La diversité génétique des espèces végétales cultivées peut alors être vue à trois niveaux : dans le champ de l'agriculteur, au niveau des listes de variétés proposées aux agriculteurs et à celui des ressources génétiques à la disposition du sélectionneur. L'histoire de la sélection, chez la plupart des espèces végétales améliorées, a conduit à une perte de diversité du peuplement végétal dans le champ de l'agriculteur en passant des variétés populations hétérogènes génétiquement aux variétés modernes souvent réduites à un génotype. Cependant, cette évolution peut être compensée par une diversité des variétés entre parcelles et une diversité des variétés dans le temps.

La question principale qui se pose est alors de savoir si la diversité des variétés à la disposition de l'agriculteur a diminué ou risque de diminuer. Quant aux ressources génétiques à la disposition du sélectionneur, elles comprennent son propre matériel amélioré mais aussi les variétés élitiques des autres sélectionneurs (dont l'utilisation comme ressource génétique est permise par la loi européenne sur les semences) auxquelles il faut ajouter des ressources génétiques plus « distantes » (banques de gènes comprenant les vieilles variétés et les populations d'autrefois). Au total, ces ressources génétiques à la disposition du sélectionneur sont encore vastes pour la plupart des espèces cultivées, si toutefois des programmes de maintien ou de gestion de ces ressources ont été mis en place. Tanksley et McCouch (1997) et Tanksley (2011) considèrent que moins de 15 % de ces ressources ont été utilisées.

Dans le cadre de cette présentation nous nous limitons donc aux deux premiers niveaux d'évolution de la diversité génétique : la diversité dans le champ de l'agriculteur et la diversité parmi les variétés à la disposition de l'agriculteur.

2. L'évolution de la diversité génétique des variétés dans le champ de l'agriculteur

2.1. De la domestication aux variétés à base génétique étroite

L'amélioration des plantes au sens large a commencé avec leur domestication lorsque, il y a 10 000 ans environ, l'homme est passé de l'état nomade à l'état sédentaire et qu'il a commencé à cultiver les plantes, c'est-à-dire à alterner semis et récolte. Il a d'abord retenu les espèces qui étaient les mieux adaptées à ses besoins (il en est résulté de fortes modifications morphologiques et physiologiques des plantes ; pour les céréales sélection de plantes à grains nus, à floraison groupée, rachis non désarticulé). L'action combinée de la sélection naturelle dans le champ de l'agriculteur et des choix de l'homme, plus ou moins conscients, a conduit, pour les espèces retenues, à des populations mieux adaptées à leurs conditions de culture et d'utilisation. Cela s'est traduit par une perte de diversité par rapport aux espèces sauvages.

La perte moyenne de diversité génétique due à la domestication est estimée à environ 30 %, mais elle peut être bien supérieure pour certaines espèces. Chez le blé, la comparaison de populations de *Triticum tauschii*, donneur du génome D, aux populations de pays montre une perte très importante de diversité génétique (perte de 2,5 allèles par locus) : 69 % de perte entre les formes tétraploïdes et les formes hexaploïdes (Reif *et al.*, 2005). De même entre des blés tétraploïdes sauvages (*Triticum dicoccoides*) et les blés tétraploïdes domestiqués, une perte de 84 % est observée (Maccaferri *et al.*, 2003). Chez le maïs, la perte de diversité génétique due à la domestication, environ 30 %, est nettement plus faible que celle observée chez le blé (Buckler, 2001).

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur émérite d'AgroParisTech.

Pendant une longue période, plusieurs milliers d'années, jusqu'à l'avènement de la sélection dirigée, la sélection a été purement massale, phénotypique (intra et interpopulations) pour les espèces retenues par la domestication. Il en est résulté une meilleure adaptation des populations à leur milieu et conditions de culture¹, mais aussi une diminution du nombre de populations cultivées, du fait des échanges de semences entre agriculteurs d'un village ou de villages voisins. Ainsi, on trouve au début du 9^e siècle des capitulaires de Charlemagne encourageant les agriculteurs à acheter sur le marché des semences de qualité. La fin de cette période est l'apparition de la sélection dirigée vers 1850 avec les travaux de L de Vilmorin.

Chez le blé, L. de Vilmorin a en effet montré que pour apprécier la valeur génétique d'une plante, il faut étudier sa descendance. L'application de ce principe aux plantes autogames, formées en fait d'un mélange de plantes homozygotes, a conduit à extraire très rapidement des populations les meilleures lignées, de sorte que dès le début du 20^e siècle, ce sont des variétés lignées pures de blé qui étaient cultivées. Elle s'est traduite par une perte de diversité du peuplement végétal dans le champ de l'agriculteur. Cependant chez le blé, des années 1900 à 1940, les agriculteurs ne renouvelaient pas souvent leurs semences et les « lignées » utilisées étaient devenues hétérogènes du fait d'un taux d'allogamie résiduelle (3 à 9 % selon les zones). Ce n'est qu'avec la mise en place d'une filière semences (de l'inscription des variétés à leur commercialisation) que le renouvellement des semences est devenu plus fréquent conduisant donc à une plus grande homogénéité génétique du peuplement végétal. Ce passage des populations aux lignées est observé pour toutes les espèces autogames sélectionnées.

La disparition de la culture des populations de maïs a été plus tardive, car il a fallu attendre les réflexions de Shull en 1908 pour que le principe de la sélection des variétés hybrides soit bien établi, principe qui revient en fait à extraire d'une population allogame le meilleur génotype possible. Cependant il n'a pas été facile de développer des hybrides simples résultant du croisement de deux lignées ; il a fallu attendre 1930 pour voir le développement des variétés hybrides de maïs aux États-Unis et 1955 en France. La faible vigueur des lignées a imposé de passer par le stade hybrides doubles ou hybrides trois voies². Ainsi aux États-Unis ces types d'hybrides ont commencé à se développer vers 1930, mais ils étaient remplacés dès 1960 par les hybrides simples. En France, les populations étaient encore cultivées après 1945-1950. Les premiers hybrides doubles ou trois voies (franco-américains) sont apparus à partir de 1955 et ils ont été remplacés par des hybrides simples (ou équivalents) à partir des années 1980. Aujourd'hui ce ne sont que des hybrides simples (ou quasi-hybrides simples³) qui sont cultivés, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un génotype dans le champ de l'agriculteur, comme pour un champ de blé.

Tableau 1. Répartition (%) des différents types d'hybrides de maïs en France en 1970 et en 2004.

	HD	HTV	HS
1970	73	21	4
2004	3	17	80

La diversité génétique dans le champ du maïsiculteur a donc diminué avec le passage des populations génétiquement hétérogènes aux variétés hybrides simples, ce passage ayant été plus progressif pour le maïs que pour le blé puisque l'on peut écrire :

diversité génétique d'une population > diversité d'un hybride double > diversité d'un hybride trois voies > diversité d'un hybride simple.

D'où plusieurs étapes dans la réduction de la variabilité au niveau du peuplement végétal : le passage du matériel sauvage aux populations, puis le passage des populations aux hybrides doubles et enfin le passage des hybrides doubles aux hybrides simples.

A noter que cette évolution décrite pour le maïs s'est produite ou se produit pour toutes les plantes allogames dès que le contrôle de l'hybridation à grande échelle est devenu possible (par exemple pour le tournesol et la betterave où il y a même eu une étape hybride entre « populations »). Si le contrôle de l'hybridation n'est pas possible, ce sont des populations « artificielles » ou variétés synthétiques qui sont

¹ On parle alors de populations de pays

² Un hybride simple est le résultat du croisement de deux lignées pures ; un hybride trois voies est le résultat du croisement d'un hybride simple et d'une lignée, et un hybride double est le résultat du croisement de deux hybrides simples.

³ Il peut s'agir en effet de pseudo-hybrides trois voies dont le parent hybride simple pris comme femelle est réalisé à partir de deux lignées apparentées, dans le but d'augmenter sensiblement la vigueur du parent femelle pour une production plus économique de semences.

développées à partir d'un nombre limité de constituants (5 à 10) mais qui sont aussi beaucoup moins variables que les populations naturelles (ex : les plantes fourragères).

Quelles que soient les espèces il y a donc eu perte de diversité génétique de ce qui est cultivé dans le champ de l'agriculteur. Une variété lignée pure ou hybride simple est réduite à un génotype. L'amélioration des plantes est donc devenue l'art et la science de la création de variétés de plantes répondant de mieux en mieux aux besoins de l'Homme, ces variétés étant en fait des populations à base étroite, voire réduites à un génotype.

2.2. Pourquoi cette évolution vers une homogénéisation des variétés ?

L'homogénéisation génétique des variétés est la conséquence d'une sélection surtout sur le rendement, mais aussi de la sélection sur de nombreux autres critères d'adaptation au milieu au sens large (incluant les techniques culturales) et de qualités des produits récoltés. Dans un milieu donné, les meilleures performances ne peuvent en effet être atteintes qu'avec des peuplements génétiquement homogènes, ou par l'association d'un nombre limité de génotypes. L'homogénéisation des variétés était aussi indispensable pour la standardisation des techniques culturales et la mécanisation des cultures afin d'intervenir à des stades optimaux pour toutes les plantes du peuplement végétal. L'inconvénient de l'homogénéisation est de faire perdre en stabilité des performances par rapport à un peuplement hétérogène ; mais un tel peuplement fait perdre en performance du point de vue du rendement. Cependant, il apparaît possible de sélectionner des génotypes homozygotes pour leur stabilité, grâce à l'association dans un même génotype du maximum de gènes d'adaptation à différents milieux (Gallais, 2011).

Le risque pour un peuplement génétiquement homogène peut être la sélection de souches de parasites qui vont contourner une résistance aux maladies. La culture d'une même variété homogène, parce que très performante, sur une large surface dans une même région par différents agriculteurs, et cela pendant un certain temps, augmente le risque de contournement. Cela peut être résolu de différentes façons, soit par la culture de différentes variétés dans une même zone, soit par l'association de variétés, mais aussi par le *turn-over* des variétés. Ainsi, l'inconvénient de la perte de diversité au niveau du champ peut être compensé par une diversité entre champs (d'où l'intérêt de la diversité des variétés performantes proposées à l'agriculteur). De plus, une variété de plantes de grande culture, aujourd'hui, ne vit guère plus de 5-7 ans. Cette durée de vie des variétés s'est d'ailleurs raccourcie avec l'intensification de la sélection chez différentes espèces puisqu'elle était de 10-15 ans vers les années 1970. On peut donc espérer que le changement de variétés intervienne avant le contournement (ce qui n'est pas toujours le cas) ; cependant, pour qu'il soit efficace il faut qu'il se traduise par de nouveaux fonds génétiques (d'où l'importance de considérer l'appareillement des variétés, et plus généralement leurs distances génétiques).

La disparition de la diversité génétique dans le champ de l'agriculteur n'est donc pas nécessairement synonyme de perte de diversité au niveau d'un territoire ou d'un espace de temps donné. Pour avoir une vision complète de la diversité du point de vue de l'agriculteur, il faut en avoir une véritable vision spatio-temporelle.

3. Évolution de la diversité génétique des variétés à la disposition de l'agriculteur

Après l'effet de la domestication, pour étudier l'évolution de la diversité génétique des « variétés » à la disposition de l'agriculteur, il faudrait pouvoir considérer l'évolution de la diversité génétique à deux périodes : lors du passage des populations aux variétés à base étroite, et depuis la mise en oeuvre de la sélection de variétés à base étroite. Il est rare d'avoir des études qui pour une même espèce ont considéré ces deux aspects. La plupart des études réalisées portent sur l'évolution de la diversité des variétés cultivées sur une période assez récente, sans comparer à la diversité des populations. Les études portent le plus souvent sur les variétés inscrites au catalogue ou commercialisées, donc sur ce qui est à la disposition de l'agriculteur. De plus, un certain nombre d'études ne font pas intervenir suffisamment de matériel aux différentes époques considérées, et les indices de distances considérés ne sont pas toujours très pertinents pour une étude de la diversité génétique à un niveau global.

Nous allons considérer trois types d'indices : d'abord le nombre de variétés et leur appareillement puis nous détaillerons surtout les études avec les marqueurs moléculaires (microsatellites essentiellement), les plus pertinentes pour caractériser l'évolution globale de la diversité génétique, avec deux indices, l'indice de diversité de Nei et le nombre d'allèles⁴. Nous limiterons notre présentation aux résultats obtenus pour

⁴ Au niveau d'un ensemble de lignées, l'indice de Nei représente la probabilité moyenne sur l'ensemble des locus marqueurs considérés, de tirer des allèles différents chez deux lignées prises au hasard. Il donne une information assez différente du nombre moyen d'allèles par locus. En particulier, il est peu sensible aux allèles présents à faible fréquence.

quelques plantes de grande culture, le blé tendre, le blé dur, l'orge et le maïs et nous ne ferons qu'évoquer les résultats pour d'autres espèces : le pois, le tournesol et la pomme de terre.

3.1. Évolution du nombre de variétés et de leur apparentement

B. Le Buanec a déjà souligné dans son introduction, la limite de ce critère. Le nombre de variétés n'a de sens qu'après le passage des populations aux variétés à base étroite. De 1960 à 2004, le nombre de variétés inscrites au catalogue français, pour les plantes de grande culture, est passé d'environ 500 à 4178 (Cadot et Le Clerc, 2010 ; Silhol, 2010). Pour le maïs on dénombre actuellement, en 2012, 1108 variétés inscrites au catalogue officiel des variétés et pour le blé 303. Pour une espèce donnée il y a eu diversification des types de développement, diversification des usages et qualités des variétés, et sans la création variétale, des gènes très intéressants auraient sans doute été perdus par dérive ou sélection naturelle dans les populations. Certes la sélection élimine des gènes défavorables (comme des gènes de sensibilité aux maladies) mais cela ne doit pas être considéré comme une perte de diversité génétique. Il serait sans doute préférable de parler de diversité utile à la disposition de l'agriculteur et cette diversité là a bien augmenté. La diversité des établissements de sélection y contribue. Malheureusement elle peut être réalisée par un certain apparentement des variétés (surtout lorsque le nombre d'établissements de sélection est faible), ce qui n'est pas sans risque (risque pathologique en particulier chez le blé, par exemple) (voir figure apparentement).

Cependant, si le nombre de variétés à la disposition de l'agriculteur est trop réduit (à une ou deux variétés utilisables dans une région donnée), cela traduit bien un manque de diversité. Ainsi pour le maïs, durant les années 1960-1965, au nord de la Loire, 75 % des surfaces étaient cultivées avec la variété INRA 258, seule variété performante à la disposition des agriculteurs (l'INRA était le seul établissement de sélection). Quelques années plus tard, de 1970 à 1980 c'était la variété LG11 qui dominait le marché dans cette zone. A partir de 1980 une variété DEA a pris le relais dans cette zone et a réalisé jusqu'à 24 % du marché des semences de maïs. Mais, depuis 1990, le nombre de variétés a fortement augmenté et les meilleures variétés occupent aujourd'hui seulement 2-5 % du marché des semences. Si les hybrides précoces ont été très apparentés entre 1985 et 1995 (du fait de l'utilisation de la lignée F2, 85% des hybrides en 1985 faisaient intervenir cette lignée), aujourd'hui on observe une plus grande diversité parmi ces hybrides. Cela a été le résultat d'un investissement dans les ressources génétiques pour diversifier suffisamment la création de variétés et d'une certaine diversification des établissements de sélection. Cet exemple montre que ce qui est important à considérer ce n'est pas tellement la diversité des variétés en elle-même, mais la diversité des variétés performantes cultivables dans une zone donnée.

En fait, le nombre de variétés est un facteur à considérer dès qu'il y a un goulet d'étranglement comme celui de la précocité chez le maïs (autres exemples : recherche d'une paille courte chez le blé, colza 0-érucique). Ensuite, il y a toujours eu augmentation du nombre avec des variétés plus ou moins apparentées puis diversification génétique des variétés selon la diversité de la population de sélectionneurs. Il faudrait pouvoir tenir compte de leur apparentement, ce qui n'est pas connu avec assez de précision (cas de la lignée F2 chez le maïs). Une étude chez le blé, réalisée en Hongrie, montre un coefficient de parenté faible du début des années 1950 jusque vers 1970, mais qui augmente nettement à cette période avec la recherche des blés à paille courte, puis rediminue à partir de 1980 suite aux efforts de sélection qui ont diversifié les variétés à paille courte (Le Buanec, 2010).

3.2. Évolution de la diversité moléculaire.

3.2.1) Espèces autogames : blé tendre et autres céréales à paille.

Il s'agit d'espèces pour lesquelles la sélection développe aujourd'hui des variétés lignées pures. Le blé tendre est sans doute l'espèce qui a été la plus et la mieux étudiée dans différents pays, surtout en Europe.

En passant des populations de pays aux variétés lignées, une diminution de diversité est en général observée. Roussel *et al.* (2004) montrent, en France, avec l'étude de 559 populations ou variétés françaises utilisées entre 1850 et 2000, une perte de 25 % de richesse allélique en passant des populations de pays aux variétés lignées (figure 1). Les populations contiennent de nombreux allèles spécifiques (à faible fréquence). Une part importante de cette perte serait due à l'élimination de gènes défavorables. Van de Wouw (2010) par une méta-analyse regroupant une trentaine d'études, essentiellement européennes, pour des périodes allant de 1900 et 2000, montre que la diversité génétique passe par un minimum dans les années 1960-1970. Pour Reif *et al.* (2005), ce minimum est plutôt vers 1985. Goffaux *et al.* (2011), avec 1104 « variétés » étudiées, observent aussi ce minimum dans la période 1960-1975, avec une perte progressive⁵ en passant des populations aux variétés lignées pures, ce qui serait dû à un passage en transition des populations au lignées,

⁵ Ce qui apparaît plus nettement par l'indice de Nei corrigé pour tenir compte de la diversité intra-population.

avec une structure intermédiaire, des « lignées » anciennes, génétiquement hétérogènes, suite au non renouvellement des semences par l'agriculteur (tableau 2). Le renouvellement des semences est devenu plus fréquent à partir des années 1965. Le minimum de diversité observé correspond au début de l'intensification de l'agriculture, et serait dû à la fois à l'adoption des variétés homogènes et à la faible diversité entre variétés proposées à cette époque, suite à l'introduction des gènes de nanisme (révolution verte) et au nombre limité de géniteurs résistants aux maladies ; il y avait alors peu de variétés performantes, par exemple Cappelle, au nord, et Etoile de Choisy dans le sud, ou des variétés qui en dérivait.

Tableau 2. Répartition (%) des types de variétés de blé tendre cultivées en France au cours du temps (Goffaux *et al.*, 2011)

Année	Populations de pays	Lignées « anciennes »	Lignées modernes
1912	57,2	42,8	
1950	7,9	90,1	1,9
1952	6,1	80,7	13,2
1964		5,2	94,8
1972			100

Après cette période, il y a eu plus d'investissements dans la sélection et diversification des croisements, ce qui a entraîné une augmentation, puis une stabilisation de la diversité génétique des variétés. De nouveaux allèles apparaissent régulièrement, signature de nouvelles introductions. Selon Goffaux *et al.* (2011), dans les années récentes (2000), il y aurait tendance à une diminution de variabilité due à des variétés « nationales » à grande aire de culture (mais qui durent moins longtemps).

D'autres études ne mettent pas en évidence de diminution de diversité dans les variétés commercialisées (peut être parce qu'elles intègrent plus le temps en travaillant par période). Ainsi Donini *et al.* (2000, 2005) en Grande-Bretagne n'observent pas de diminution de la diversité entre 1934 et 1995: la diversité intra-période reste assez comparable. Manifesto *et al.* (2001) arrivent aux mêmes conclusions en Argentine entre 1932 et 1995. Selon Goffaux *et al.* (2011) sur vingt études « pertinentes » dix concluent à une stabilité et dix concluent à une tendance à la diminution, mais aucune situation ne montre une diminution très significative sur les 50-60 dernières années, c'est-à-dire depuis le début de la sélection intensive.

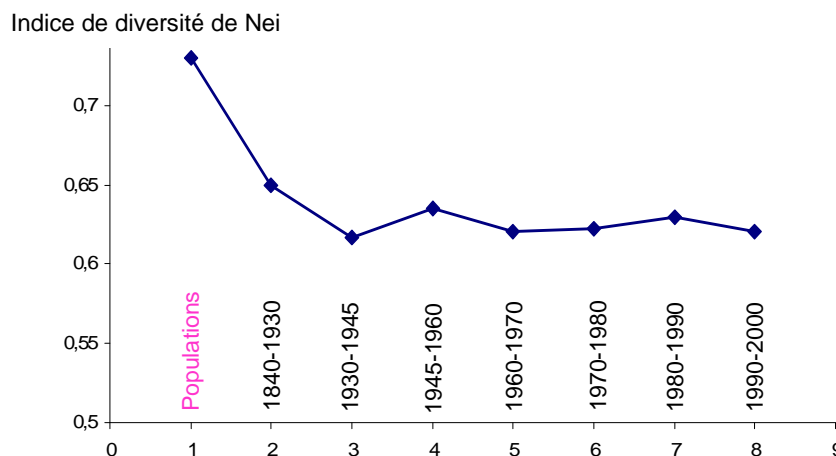


Figure 1. Evolution de la diversité génétique des variétés de blé tendre, en France, de 1800 à 2000. (d'après Roussel *et al.*, 2004)

Autres céréales à paille.

Chez le blé dur Maccaferri *et al.* (2003) avec du matériel de 1915 à 1995, d'Italie, d'Espagne, de France, de Tunisie et des USA, ne montrent pas de diminution de la diversité génétique, avec même une augmentation dans les deux dernières décennies. Dans le matériel moderne, la présence de nombreux allèles

rare attesté des introgressions ayant fait intervenir du matériel d'origine assez variée. De même Fu *et al.*, (2005), avec du matériel entre 1845 et 2004, au Canada, concluent à une tendance à la diminution de la diversité génétique, avec un passage d'un indice de diversité de 0,65 en 1910-1929 à 0,498 en 1990-2004 (dû à l'histoire de la sélection à partir de quelques génotypes de qualité ou de résistance). Cependant 87 % des loci ne montrent pas de changement significatif de fréquence.

Chez l'orge Koebner *et al.* (2003) en Grande Bretagne, avec 134 variétés entre 1925 et 1995 ont obtenu des résultats analogues à ceux du blé tendre (quasi-stabilité de la diversité). Russell *et al.* (2000) en Grande-Bretagne ont observé une perte de diversité en passant des populations aux variétés avec un indice de diversité qui passe de 0,597 à 0,484 ; mais ensuite, au niveau des variétés, une variation allélique importante est observée par période avec une quasi-stabilité de la diversité génétique. Le fort pourcentage d'allèles rares, 34 % parmi les lignées, témoigne des introgressions qui ont été réalisées. Une étude européenne (Gediflux) montre une stabilité de la diversité des variétés d'orge avec plus de diversité pour les variétés les plus commercialisées (Reeves *et al.* 2004).

3.2.2) Espèces allogames avec développement de variétés hybrides simples

L'exemple qui a été le plus étudié est celui du maïs.

En Allemagne, Reif *et al.* (2005) montrent que les populations ont de nombreux allèles spécifiques (non présents dans les lignées) 28 %, mais présents à faible fréquence. Dubreuil et Charcosset (1999) et Camus *et al.* (2006) ont aussi montré la perte d'allèles en passant des populations aux hybrides, avec des allèles spécifiques aux populations, mais un indice de Nei assez comparable. Dans l'étude de Reif *et al.* (2005), le nombre d'allèles par locus chez les hybrides passe de 5,9 (1951-1976) à 4,7 (1996-2001) (perte de 1,2 allèle par locus) ; cependant, il est assez stable pour les lignées dentées, alors qu'il diminue pour les lignées cornées (de 5,1 à 3,4) ce qui s'explique par l'histoire de la sélection : diversité forte du matériel denté, faible diversité du matériel corné et utilisation importante de seulement quelques géniteurs. L'indice de diversité génétique de Nei diminue régulièrement : cette diminution régulière traduit surtout le passage des hybrides doubles aux hybrides simples.

En France, des études ont été réalisées par Le Clerc *et al.* (2005) à partir de 133 variétés cultivées et 51 locus microsatellites, correspondant à quatre périodes (de 1950 jusqu'en 2001) et Le Clerc *et al.* (2006) sur 1990 lignées et avec 17 systèmes enzymatiques. Pour les études de diversité avec les microsatellites, là encore, il y a diminution du nombre d'allèles par locus (passage de 4,5 à 3,6). Cependant la diminution de diversité (10 % environ) se fait essentiellement de 1950 à 1970, les périodes suivantes présentant des diversités comparables, ce qui confirme l'effet du passage des hybrides 3 ou 4 voies aux hybrides simples. L'indice de diversité génétique de Nei passe de 0,61 à 0,56, soit une assez faible différence mais qui est significative et qui traduit bien une tendance à la réduction de la diversité génétique. Le plus grand nombre d'allèles rares dans les variétés récentes témoigne des introductions de nouveaux matériels, mais l'indice de différenciation entre périodes est très faible voire non significatif.

Aux États-Unis, Feng *et al.* (2006) avec le matériel des établissements Pioneer (88 lignées parents d'hybrides développées de 1934 à 2004), montre aussi une diminution du nombre d'allèles (qui passe de 4,3 à 2,8 entre 1934 et 1950-55), mais une stabilité apparente depuis 1955. On retrouve donc encore l'effet du passage des hybrides trois ou quatre voies aux hybrides simples, plus précoce aux États-Unis qu'en Europe. L'indice de diversité de Nei montre une tendance à la diminution de 0,59 en 1930 à 0,48 en 2000. Mais, il y a nombreux allèles nouveaux (29,7 %) dans les lignées récentes et pas seulement à faible fréquence, ce qui témoigne d'introductions importantes de nouveaux matériels. Cependant, 47 % des allèles restent communs aux différentes périodes. Lu *et al.* (2001) ont confirmé une diminution du nombre d'allèles chez les lignées modernes (passage de 4,9 à 3,2).

Tableau 3. Évolution de la diversité génétique dans le matériel maïs (parents d'hybrides) sélectionné par l'entreprise Pioneer de 1930 à 2000

Décennie	Nombre moyen d'allèles	Diversité de Nei
1930	4,3	0,59
1940	3,7	0,57
1950	3,2	0,53
1960	4,0	0,57
1970	3,5	0,55

1980	2,9	0,50
1990	3,3	0,51
2000	2,8	0,48

En conséquence et globalement, il y a bien une diminution de la diversité génétique en passant des populations aux hybrides, mais depuis la création d'hybrides simples, il n'y a pas diminution de la variabilité génétique des variétés à la disposition de l'agriculteur. A noter que la gestion de la variabilité génétique en groupes hétérotiques permet sans doute de mieux maintenir un niveau de diversité génétique au niveau des hybrides. Il y a cependant des risques. Ainsi en 1999 78 % des lignées disponibles aux États-Unis (dans les « *foundation seeds* ») dérivait de huit lignées. En France, en 1985, 85 % des hybrides étaient développés avec la lignée F2 : plusieurs hybrides commercialisés étaient en fait des demi-frères.

3.2.3) Autres espèces

Chez le pois, espèce autogame, la diversité génétique est assez faible, et il y a eu peu de changements en 60 ans (Le Clerc *et al.*, 2006).

Chez le tournesol, espèce allogame chez laquelle on est passé des populations aux hybrides entre lignées, Tang *et al.* (2003) montrent une perte de diversité au cours de ce passage.

Chez la pomme de terre, plante à multiplication végétative pour laquelle ce sont des clones qui sont commercialisés, il n'a été observé aucune perte d'allèles sur 60 ans et, au contraire, sont apparus des allèles nouveaux (Programme européen Gediflux, Reeves *et al.*, 2004).

Conclusions

Il y a finalement très peu de contradictions entre les études de la diversité génétique à la disposition de l'agriculteur dès que l'on considère celles portant sur une gamme assez large de matériel pour les différentes périodes considérées et avec un marquage moléculaire sur un assez grand nombre de marqueurs. Les conclusions sont pratiquement les mêmes pour toutes les études : il y a diminution de la diversité génétique des variétés en passant des populations aux variétés à base étroite (lignées pures ou hybrides simples), mais ensuite, en moyenne, il y a maintien de la diversité au niveau des variétés à base étroite. En fait, toutes les situations sont attendues et sont observées, de l'augmentation à la diminution en passant par la stabilité, puisqu'il s'agit d'un système de flux ouvert, avec des introductions extérieures permanentes, attestées par les allèles spécifiques des lignées modernes. Il y a des changements qualitatifs (allèles différents) mais pas quantitatifs de diversité génétique.

En passant des populations aux lignées il y a eu élimination des allèles défavorables, mais aussi sans doute perte d'allèles favorables ; le plus important est qu'il y a eu « fixation » d'allèles favorables qui auraient été perdus sans le développement de nombreuses variétés à base étroite et assez indépendantes entre elles. La sélection peut ainsi être vue comme une forme de gestion de la diversité génétique. Le maintien de la diversité génétique depuis le début de la sélection de variétés à base étroite s'explique par l'investissement important dans la sélection, la diversité des établissements de sélection qui conduisent à réaliser de nombreux croisements de départ, avec des introgressions nouvelles, montrées par les allèles rares, spécifiques. L'homogénéisation des variétés n'est pas un problème, l'important est qu'il y ait une distribution possible de la diversité génétique dans l'espace d'un territoire, ou dans le temps, avec des variétés les moins apparentées possible.

On peut se demander si la situation de quasi-stabilité de la diversité génétique des variétés à la disposition de l'agriculteur se maintiendra. A un niveau supérieur, plus large, englobant plusieurs pays, voire au niveau de la planète, la sélection se traduira, à long terme, par une diminution de la diversité totale à la disposition du sélectionneur et donc par un risque de diminution de diversité génétique entre variétés à la disposition de l'agriculteur. Il y a cependant encore une réserve importante de variabilité génétique. La gestion des ressources génétiques est une activité importante de tout établissement de sélection. Chez une espèce comme le maïs, les études de diversité montrent que les populations peuvent en effet être à l'origine de nouveaux allèles. Les programmes actuels n'ont cependant que peu recours à ce type de matériel mais plutôt à des croisements entre matériels élite d'origines différentes tant que cela est possible... Mais il y aura une limite, d'où l'importance du maintien et de l'accès aux ressources génétiques. De ce point de vue, il faut souligner l'intérêt du système européen qui permet à un sélectionneur d'utiliser les variétés d'un autre sélectionneur comme ressource génétique. Le risque de perte de diversité dans les variétés à la disposition de l'agriculteur existe aussi avec la concentration des entreprises de sélection. La diversité des établissements de sélection est une sorte garantie de diversité au niveau des variétés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) CADOT V., LE CLERC V., 2011. – Étude de la diversité des variétés inscrites au catalogue français des espèces agricoles cultivées de 1950 à nos jours : exemples du pois et du maïs. *Le Sélectionneur Français* **61**, 15-32.
- (2) CAMUS-KULANDAIVELU L., VEYRIERAS J.B., MADUR D., COMBES V., FOURMANN M., BARRAUD S., DUBREUIL P., GOUESNARD B., MANICACCI D., CHARCOSSET A., 2006. – Maize Adaptation to Temperate Climate: Relationship Between Population Structure and Polymorphism in the Dwarf8 Gene. *Genetics* **172**, 2449-2463.
- (3) DONINI P., LAW J.R., KOEBNER R.M.D., REEVES J.C., COOKE R.J., 2000. – Temporal trends in the diversity of UK wheats. *Theor. Appl. Genet.* **100**, 912-917.
- (4) DONINI P. *et al.*, 2005. - The impact of breeding on genetic diversity and erosion in bread wheat. *Plant Genetic Resources* **3**, 391-399.
- (5) DUBREUIL P., CHARCOSSET A., 1999. – Relationships among maize inbred lines and populations from European and North American origins as estimated using RFLP markers. *Theor. Appl. Genet.*, **99**, 473-480.
- (6) FENG L., SEBASTIAN S., SMITH S., COOPER M., 2006. – Temporal trends in SSR alleles frequencies associated with long-term selection for yield of maize. *Maydica* **51**, 293-300.
- (7) FU Y.B., *et al.*, 2006. Impact of breeding on genetic diversity of the Canadian hard red spring wheat germplasm as revealed by EST-derived SSR markers. *Theor. Appl. Genet.* **112**, 1239-1247.
- (8) GALLAIS A., 2011. – Homogénéité vs hétérogénéité et performances des structures variétales en amélioration génétique des plantes. *Le Sélectionneur Français* **61**, 61-74.
- (9) GLEMIN S., BATAILLON T., 2009. – A comparative view of the evolution of grasses under domestication. *New Phytologist* **183**, 273-290.
- (10) GOFFAUX R., GOLDRINGER I., BONNEUIL C., MONTALENT P., BONNIN I., 2011. – Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées ? Le cas du blé tendre cultivé en France depuis un siècle. Rapport FRB, Série Expertise et Synthèse, 44 p.
- (11) HUANG X.Q. *et al.*, 2007. – Did modern plant breeding lead to genetic erosion in European winter wheat varieties? *Crop Sci.* **47**, 343-349.
- (12) KOEBNER R.M., DONINI P., REEVES J.C., COOKE R.J., LAW J.R., 2003. – Temporal flux in the morphological and molecular diversity of UK barley. *Theor. Appl. Genet.*, **106**, 550-558.
- (13) LE BUANEC B., 2010. – Évolution de la diversité génétique des variétés commercialisées chez différentes espèces de grande culture. *Le Sélectionneur Français* **61**, 7-14.
- (14) LE CLERC V. *et al.*, 2005. – Assessing temporal changes in genetic diversity of maize hybrid varieties using microsatellite markers. *Theor. Appl. Genet.*, **110**, 294-302.
- (15) LU H., BERNARDO R., 2001. – Molecular marker diversity among current and historical maize inbred. *Theor. Appl. Genet.*, **103**, 613-617.
- (16) MACCAFERRI M., SANGUINETTI M.C., DONINI P., TUBEROSA R., 2003. – Microsatellite analysis reveals a progressive widening of the genetic basis in the elite durum wheat germplasm. *Theor. Appl. Genet.* **107**, 783-797.
- (17) MALYSHEVA-Otto L. *et al.*, 2007. – Temporal trends of genetic diversity in European barley cultivars. *Mol. Breed.* **20**, 309-322.
- (18) REEVES J.C. *et al.*, 2004. – Changes over time in the genetic diversity of four European major crops. A report from the Gediflux Framework 5 project. Proceedings of the 17th EUCARPIA general Congress, Vollmann, Grausgruber & Ruckebauer, Boku, Vienna, pp 3-7.
- (19) REIF J.C., HAMRIT S., HECKENBERGER M., SCHIPPRACK W., MAURER H.P., BOHN M., MELCHINGER A.E., 2005. – Trends in genetic diversity among European maize cultivars and their parental components during the past 50 years. *Theor. Appl. Genet.*, **111**, 838-845.
- (20) REIF J.C., ZHANG P., DREISIGACKER S., WARBURTON M.L., VAN GINKEL M., HOISINGTON D., BOHN M., MELCHINGER A.E., 2005. – Wheat genetic diversity trends during domestication and breeding. *Theor. Appl. Genet.* **110**, 859-864.
- (21) ROUSSEL V., KOENIG J., BECKERT M., BALFOURIER F., 2004. – Molecular diversity in French bread wheat accessions related to temporal trends and breeding programmes. *Theor. Appl. Genet.* **108**, 920-930.

- (22) SILHOL P., 2010. – Indicateurs de biodiversité : flux variétal, segmentation et concentration du marché pour huit espèces de grande culture de 1985 à 2007. GNIS, Economie et Statistiques.
- (23) TANKSLEY S.D., McCOUCH S.R., 1997. – Seed banks and molecular maps : unlocking genetic potential from the wild. *Science* **277**, 1063-1066.
- (24) TANKSELY S.D., 2011. – Assessment of genetic diversity and native trait discovery. Communication à l'Académie d'Agriculture de France, séance du 19/10/2011.
- (25) Van de WOUW M., VAN HINTUM T., KIK C., VAN THUREN R., VISSER B., 2010. – Genetic diversity trends in twentieth century crop cultivar: a meat analysis. *Theor. Appl. Genet.* **120**, 1241-1252.

INDICATEURS DE DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE ANIMALE¹

par Louis Ollivier² et Jean-Louis Foulley³

RÉSUMÉ

La caractérisation des ressources génétiques animales est une condition indispensable à leur bonne gestion. À cet effet, plusieurs indicateurs de diversité génétique sont couramment utilisés. Nous présentons ici trois types d'indicateurs, qui sont les inventaires de races, les mesures de consanguinité et les marqueurs génétiques. Des inventaires de races au niveau mondial, appuyés sur des informations fournies par chaque pays, ont été organisés depuis le début des années 1980. Le système d'information en ligne mis en place par la FAO depuis 1993 répertorie aujourd'hui environ 14000 races de mammifères et d'oiseaux, réparties dans 182 pays. Les composantes nationale, régionale et interrégionale de cette diversité raciale représentent respectivement 1, 26 et 73 % de la diversité raciale totale. Les mesures de consanguinité, basées sur des pedigrees ou sur les effectifs de reproducteurs en service, offrent le moyen de suivre et de contrôler l'évolution de la diversité interne à chaque race, de manière à minimiser les effets dépressifs de la consanguinité sur les performances et l'érosion de la variabilité génétique des caractères sélectionnés. Les marqueurs génétiques offrent aujourd'hui des évaluations objectives de la diversité des génomes animaux de nature à compléter les indicateurs précédents. On évalue ainsi à la fois la diversité génétique *stricto sensu* (basée sur les hétérozygoties dans l'approche de Nei) et la diversité allélique (basée sur le nombre d'allèles différents dans chaque race et sur l'existence d'allèles spécifiques à certaines races). Ces deux types de diversité sont indépendants et méritent d'être tous les deux considérés dans le choix des priorités de conservation. L'article met l'accent sur des principes généraux d'analyse de diversité, communs aux indicateurs passés en revue, et sur leurs complémentarités.

1. Introduction

La diversité génétique peut se replacer dans le contexte plus général de la diversité biologique, telle qu'elle s'exprime, par exemple, en nombre d'espèces. Historiquement d'ailleurs, c'est la diversité des espèces qui a été le premier champ d'investigation des auteurs qui ont cherché, dès les années 1960, à définir des indicateurs de diversité biologique. Mais, s'agissant de diversité animale domestique, force est de reconnaître le faible nombre d'espèces que l'Homme a réussi à domestiquer. Les « 5 grands » sont le Bœuf, la Chèvre, le Mouton, le Porc et la Poule, dont les effectifs dans le monde sont de l'ordre du milliard d'individus pour les 4 premiers et approchent les 30 milliards pour la Poule. À ces cinq s'ajoute une trentaine d'espèces de mammifères et d'oiseaux (FAO, 2007 ; tableaux 6 et 7). C'est la diversité intra-spécifique que nous allons privilégier dans cet article.

La question est de définir ce qu'est la diversité génétique animale et de savoir comment on la mesure. En général, on s'intéressera à la diversité en termes d'éléments différents dans un ensemble, comme des *races* d'une espèce dans une région donnée, ou encore des *gènes* dans une race donnée, ces éléments étant caractérisés, soit par leur abondance (ou fréquence) soit plus simplement par leur incidence (présence/absence), la diversité étant dans ce cas mesurée par le nombre d'éléments différents observés, ce qu'on appelle aussi une « richesse ». Quel que soit l'indice de diversité retenu, il sera généralement possible de décomposer la diversité en une diversité *intra*, par exemple intra-race ou intra-région, et une diversité *entre*, et ces deux composantes devront être prises en compte conjointement pour quantifier la diversité

¹ Cet article est dédié à la mémoire de François Grosclaude, décédé le 3 octobre 2012. François Grosclaude a lancé les recherches en diversité génétique animale à l'INRA, au début des années 1960, à partir de la caractérisation du polymorphisme biochimique (groupes sanguins, caséines). Il a animé ces recherches infatigablement tout au long de sa carrière, en tant que directeur du laboratoire de génétique biochimique à Jouy-en-Josas, puis comme chef du département de génétique animale, et ensuite comme directeur scientifique du secteur des productions animales de l'INRA.

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France. E-mail: louis.ollivier@free.fr

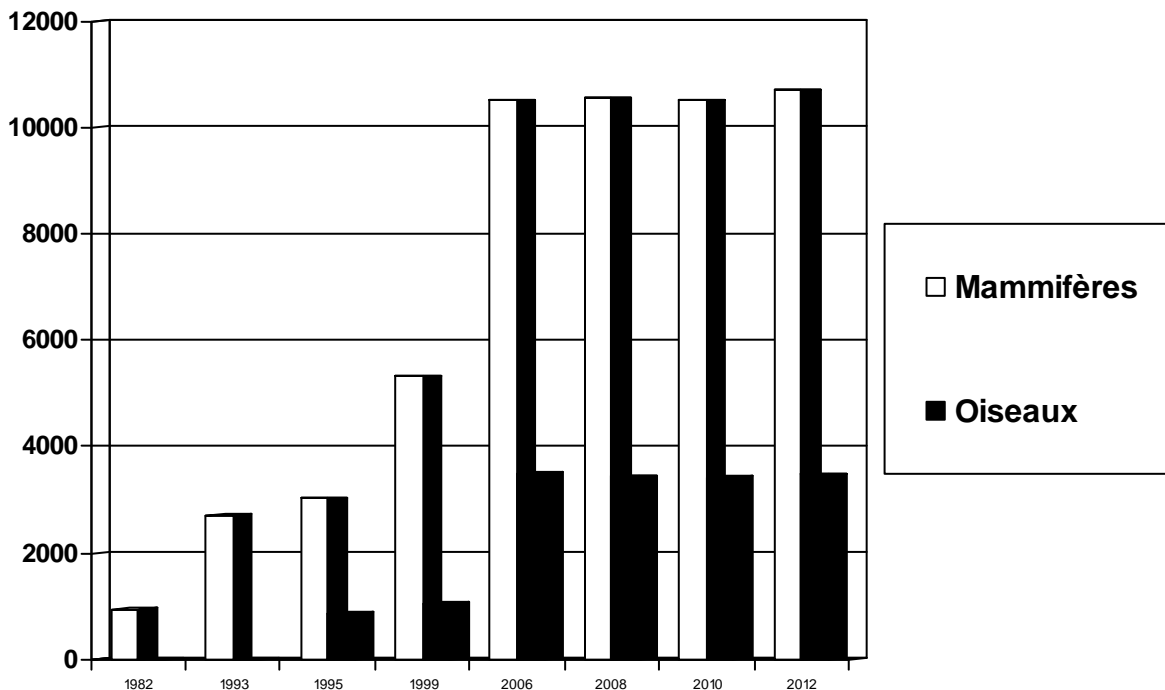
³ Institut de Mathématiques et Modélisation de Montpellier, UMR-CNRS 5149 Université de Montpellier II, 34095 Montpellier Cedex 05, France. E-mail: Jean-Louis.Foulley@math.cnrs.fr

totale. Le principe de cette décomposition, établi par MacArthur *et al.* (1966) dans une étude sur la diversité des espèces, s'énonce comme suit. La diversité *entre* deux échantillons (appelée β en écologie) est la diversité combinée des deux échantillons (qui est aussi la diversité *totale*, appelée γ) moins la diversité moyenne des deux échantillons (qui est la diversité *intra*, appelée α), de telle sorte que $\alpha + \beta = \gamma$. Ce principe se généralise facilement à un nombre quelconque d'échantillons. Dans ce cadre général s'insèrent les divers indicateurs de diversité génétique animale que nous allons passer en revue dans cet article.

2. Les inventaires de races

Un premier niveau d'évaluation de la diversité est à l'évidence la race. Depuis le *Dictionnaire des races de bétail* de Mason (1951), les inventaires de races rassemblent des informations visant à couvrir l'ensemble des races de chaque espèce. Les inventaires sont aujourd'hui réalisés et mis en base de données, à des échelles nationale, régionale ou mondiale. Le recueil des informations au niveau mondial a été lancé par la Fédération européenne de zootechnie au début des années 1980, et poursuivi ensuite à partir de 1993 sous l'égide de la FAO, dans le prolongement de la Conférence de Rio sur la Biodiversité de 1992. La FAO a mis en place progressivement un système d'information sur la Diversité animale domestique (appelé DAD), consultable en ligne sur <http://dad.fao.org/>. Les races animales domestiques peuvent être classées selon une typologie évolutive, qui distingue quatre catégories de populations, des populations sauvages, des populations primaires (ou traditionnelles), des races standardisées et des lignées sélectionnées (Lauvergne, 1982). Ces deux dernières catégories constituent la majeure partie de l'ensemble. Au total, environ 14 000 races sont aujourd'hui répertoriées à travers le monde par le système DAD. Ce total recouvre 37 espèces de mammifères et d'oiseaux exploitées par l'Homme. La figure 1 indique l'évolution du nombre des races recensées au niveau mondial au cours des 30 dernières années. On peut voir que, depuis la mise en place du système DAD par la FAO en 1993, ce nombre a été multiplié par 11 pour les races de mammifères et par 4 pour les races aviaires. On note aussi un doublement du nombre total de races inventoriées entre 1999 et 2006, ce qui correspond au lancement par la FAO, en 1999, de la préparation d'un rapport sur l'état des ressources génétiques animales dans le monde, qui fut publié en 2007 (FAO, 2007).

Figure 1 : Évolution du nombre des races de mammifères et d'oiseaux recensées dans le monde de 1982 à 2012



Sources :

- 1982 : Majjala *et al.*, 1984
- 1993-2012 : FAO, 2012a

Cette richesse raciale est décomposable en une diversité nationale (intra-pays), une diversité régionale (intra-région du globe), et une diversité interrégionale (entre les 7 régions du globe définies par la FAO), dont le total représente le nombre de *racés différentes* répertoriées dans le monde. Cette décomposition prend en compte l'existence de races dites transfrontalières, qui sont communes à plusieurs pays, à l'exemple de la race bovine Charolaise que l'on trouve représentée dans 69 pays, ou encore de la race bovine Holstein qui est quasi-universellement distribuée puisque son existence est signalée dans 160 pays (selon DAD). Le principe de décomposition décrit dans l'introduction doit ici être étendu au cas de deux niveaux de hiérarchie, soient la région du globe et le pays intra-région. La composante intra-pays (α) est le nombre moyen de races par pays, et la composante entre pays (β) se répartit en une composante entre pays intra-région (β_1) et une composante entre régions (β_2), de telle sorte que $\alpha + \beta_1 + \beta_2 = \gamma$, où γ représente le nombre total de races. La procédure est décrite en détail par Veech *et al.* (2002, voir notamment la figure 4 de l'article). Sur l'ensemble des mammifères et oiseaux répertoriés dans DAD (FAO, 2012a), les composantes nationale (α), régionale (β_1) et interrégionale (β_2) représentent respectivement 1 %, 26 % et 73 % de la diversité raciale mondiale. Il vaut d'être noté que des décompositions similaires s'obtiennent pour chacune des grandes espèces traitée séparément (tableau 1). On peut donc dire que la diversité en nombre de races animales domestiques s'exprime pour près des trois quarts sous la forme d'une diversité entre les grandes régions du globe.

Tableau 1 : Analyse de la diversité des races animales domestiques recensées dans 182 pays et 7 régions du globe (situation 2012)

(Source : FAO, 2012a)

ESPÈCE	Bœuf	Cheval	Chèvre	Mouton	Porc	Poule	Toutes espèces
Nombre de races	3080	1442	1200	2416	1293	2371	14194
Nombre de races locales	1004	618	557	1106	556	1269	6581
Nombre de races régionales	99	62	47	128	28	48	504
Nombre de races internationales	107	63	38	101	30	106	549
Nombre de races différentes * (γ)	1210	743	642	1335	614	1423	7634
Diversité intra pays (α)	17	8	7	13	7	13	78
Diversité intra région (β_1)	423	198	165	332	178	326	1950
Diversité entre régions (β_2)	770	537	471	990	429	1084	5606
α/γ	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
β_1/γ	0,35	0,27	0,26	0,25	0,29	0,23	0,26
β_2/γ	0,64	0,72	0,73	0,74	0,70	0,76	0,73

*Ce nombre est la somme des nombres de races locales, régionales et internationales

3. La caractérisation des races

Les inventaires comportent le recueil d'informations sur chaque race pour une *caractérisation phénotypique* dont le but est d'évaluer les différences entre races et de déceler, si possible, la part d'origine génétique de ces différences (FAO, 2012b). Les caractères considérés sont d'abord les caractères visibles et généralement qualitatifs, comme la couleur de la robe ou du plumage, et de nombreux caractères morphologiques. Il s'agit souvent de caractères dont le déterminisme génétique est assez simple et qui sont peu influencés par le milieu. À l'opposé, les performances zootechniques sont des caractères quantitatifs très dépendants du milieu. L'estimation des différences génétiques entre races pour ces caractères requiert la mise en œuvre de protocoles expérimentaux rigoureux, dont le coût devient vite rédhibitoire à mesure que le nombre des races à évaluer augmente et que leur dispersion à travers le monde s'élargit.

La diversité en nombre de races reste malgré tout un indicateur de diversité génétique, puisque l'isolement géographique et reproductif des races implique de la dérive génétique et que s'y ajoutent les changements génétiques induits par la sélection des éleveurs pour des objectifs différents selon les régions, ou qui résultent de l'adaptation des races à leur environnement de production et au milieu naturel propre à chaque région. Mais si on mesure la diversité génétique sur la base du nombre de races, on s'expose à la

surévaluer dans les régions ayant une longue tradition de sélection organisée pouvant aboutir à distinguer des races très apparentées, et inversement à la sous-estimer dans les pays à sélection peu structurée où les races peuvent recouvrir une diversité de sous-types non encore identifiés (voir FAO, 2007, 5^e partie, section A). Les bases génétiques de la diversité raciale devront être précisées, comme nous le verrons plus loin, par l'étude des marqueurs génétiques.

4. Parenté, consanguinité et démographie

La diversité génétique intra-race conditionne l'efficacité de tout programme d'amélioration génétique, puisque la variabilité génétique de la population est la matière première qu'exploite le sélectionneur. Le paramètre de base est le *coefficient de consanguinité* f d'un individu, défini, selon Malécot (1948), comme la probabilité pour que deux gènes du même locus soient identiques, *i. e.* dérivent par descendance mendélienne d'un même gène ancêtre. Comme l'un des gènes de l'individu provient de son père et l'autre de sa mère, f est aussi le *coefficient de parenté* de ses parents. Rappelons la définition classique et le mode de calcul de f , pour un individu dont les parents ont un ancêtre commun A, lui-même consanguin à hauteur de f_A , et que n_1 et n_2 générations séparent respectivement des parents de l'individu considéré, soit $f = (1 + f_A)(0,5)^{n_1+n_2+1}$. En totalisant les f obtenus pour chacun des ancêtres communs des parents de l'individu, on obtient sa consanguinité.

La connaissance des pedigrees permet de calculer à tout instant la consanguinité moyenne de la population et ainsi de suivre son évolution au cours du temps. Des logiciels bien adaptés existent pour réaliser ces calculs (Boichard, 2007 ; Colleau, 2002). En plus de la consanguinité classique, ces programmes de calcul permettent des analyses plus poussées en évaluant des caractéristiques telles que l'*intervalle de génération*, sur la base des dates de naissance, les *probabilités d'origine des gènes* permettant de déduire les contributions relatives de différents ancêtres à la population présente, le nombre d'ancêtres de chaque individu, et un *nombre efficace d'ancêtres fondateurs* dont la population présente dérive.

Une belle illustration de ces concepts nous est fournie par le pedigree du cheval *Pur-Sang* analysé par une équipe de chercheurs irlandais (Cunningham *et al.*, 2001). Le *Pur-Sang* est sans doute la race animale la plus ancienne pour ce qui est de la tenue de pedigree, puisque son pedigree remonte à 1791 et que, de plus, la race est considérée comme pratiquement fermée depuis cette date. Le pedigree étudié par les Irlandais comporte près de un million de chevaux et peut être considéré comme complet, ce que tend à confirmer par ailleurs la relation quasi-linéaire entre les coefficients de parenté d'un échantillon de quelques 200 chevaux contemporains pris deux à deux et la proportion d'allèles qu'ils ont en commun. Le nombre d'ancêtres fondateurs des chevaux actuels est de 158, mais leurs contributions très inégales font que le nombre efficace n'est que de 28, ce qui montre la base génétique exceptionnellement étroite de cette race. Sur l'ensemble des races domestiques, les méthodes modernes de sélection tendent à accélérer le mouvement général d'accroissement de consanguinité en fonction du temps, un mouvement qui est considéré comme néfaste, du double point de vue de la réduction potentielle de la diversité sélectionnable et des effets dépressifs de la consanguinité sur les performances. Un historique des méthodes de gestion de ce risque à l'aide des pedigrees pour plusieurs espèces animales domestiques a été présenté par Colleau *et al.* (2007).

En l'absence de pedigrees bien tenus, la consanguinité ne peut évidemment pas être directement mesurée. Le nombre des reproducteurs en service devient alors le meilleur indicateur de diversité. Le critère le plus utilisé est la *taille efficace* de la population, qui a été définie par Wright (1931) comme $N_e = 4MF/(M + F)$, expression qui combine le nombre des reproducteurs mâles (M) et femelles (F) de la population. On voit en faisant $M=F$ que N_e équivaut à une population constituée de $N_e/2$ reproducteurs de chaque sexe. L'évolution attendue de la consanguinité moyenne en fonction de N_e et du numéro de génération g s'écrit $f_g = 1 - e^{-g/2N_e}$, d'où un accroissement de consanguinité approximatif par génération $\Delta f = 1/2N_e$.

Les prédictions de consanguinité basées sur la taille efficace supposent cependant que les reproducteurs soient accouplés au hasard et qu'il n'y ait aucune sélection. Ces prédictions sous-estiment en général la consanguinité réelle des populations sélectionnées, puisque la sélection entraîne un supplément de consanguinité (Robertson, 1961). Notons aussi que, à nombre de reproducteurs constant, des paramètres démographiques comme l'âge des reproducteurs à la naissance de leur premier descendant et le taux de leur renouvellement exercent des effets sur l'accroissement de consanguinité. Par ailleurs, les mutations et les migrations peuvent jouer en sens inverse en freinant les augmentations de consanguinité. Les paramètres de génétique des populations à prendre en considération sont alors $4N_e\mu$ et $4N_e m$, μ et m étant les taux respectifs de mutation et de migration par génération (voir Hartl et Clark, 1997). Pour ce qui est des mutations, leur

rôle dans le maintien de la variabilité génétique dans un contexte de sélection naturelle au sein de populations de petite taille est maintenant bien établi (Houle *et al.*, 1996), et il n'est pas exclu qu'elles puissent jouer un rôle similaire dans un contexte de sélection artificielle (Hill et Zhang, 2009). Quant aux migrations, les races animales n'étant généralement pas strictement fermées, les échanges entre races jouent un rôle voisin de celui des migrations dans les populations naturelles, dont les effets dans le maintien de la diversité sont connus pour être significatifs, même pour des taux de migration m modérés. Slatkin (1985) a montré la relation inverse qui existe entre $N_e m$ et la proportion des allèles présents dans une seule race sur l'ensemble des allèles présents, que depuis Neel (1973) on appelle des allèles « privés ». Sur cette base, les valeurs assez faibles des richesses alléliques privées (voir plus loin § 5.2) indiqueraient des valeurs non négligeables de $N_e m$ et donc un rôle significatif des migrations dans le maintien de la diversité.

L'intérêt de ce paramètre de taille efficace est aussi de fournir une base objective pour évaluer le risque d'extinction d'une race, qu'on sait être lié à sa consanguinité et aux effets dépressifs de celle-ci, et pour choisir les races justiciables en priorité d'un programme de conservation. Une taille critique peut ainsi être définie par exemple sur la base d'une consanguinité à ne pas dépasser au bout d'un temps t . A titre d'exemple, 3 étalons suffisent pour assurer une consanguinité ne dépassant pas 25 % au bout de 50 ans, alors qu'il faut 36 coqs pour obtenir le même résultat, compte tenu des longueurs de génération de ces espèces (Ollivier, 1998). Dans le même ordre d'idées, des règles fondées sur des valeurs minimales de N_e ont été édictées comme signal d'alarme sur un danger de mise en péril voire d'extinction de certaines espèces. Un exemple en est fourni par la règle des 50/500 (Franklin, 1980 ; Jamieson et Allendorf, 2012). Notons cependant que l'évaluation du risque d'extinction d'une race doit prendre en compte d'autres facteurs que sa diversité génétique, notamment sa démographie et les conditions socio-économiques de son élevage. C'est un sujet que nous ne pouvons détailler ici et pour lequel nous renvoyons à une étude de Gandini *et al.*, (2004), qui analyse l'évolution de la taille de 110 races bovines européennes et les facteurs susceptibles d'influencer cette évolution, comme par exemple la taille des troupeaux. Notons que l'un des objectifs des inventaires de races décrits précédemment est précisément de recueillir le maximum d'information sur ces facteurs pour une évaluation pertinente des risques d'extinction.

5. Les marqueurs génétiques: d'autres inventaires

Face à la difficulté évoquée plus haut d'estimer la part génétique des différences phénotypiques entre races, les marqueurs génétiques offrent l'avantage d'une estimation objective de la diversité des génomes, totalement indépendante des conditions de milieu. Les *groupes sanguins* et les *polymorphismes biochimiques* des animaux domestiques sont étudiés depuis le début des années 60 et ils ont dès cette époque été utilisés pour comparer des races et étudier les relations entre elles (Grosclaude *et al.*, 1990). Ce n'est cependant qu'à partir des années 1990, avec le développement de la cartographie génétique et des *marqueurs moléculaires* tels que microsatellites et AFLP, que des marqueurs ont pu être *localisés avec précision* sur les chromosomes, et en *nombre suffisant* pour réaliser une couverture adéquate des génomes et assurer ainsi la représentativité des marqueurs choisis. Enfin, une étape importante a aussi été franchie avec la mise au point de *procédures automatiques* permettant le recueil à moindre coût d'une vaste information, tant en nombre de marqueurs qu'en nombre de populations examinées. En France, la première application de ces techniques est l'étude des races bovines de Moazami-Goudarzi *et al.*, (1997) utilisant les microsatellites. La mise en pratique du marquage moléculaire à grande échelle a favorisé le lancement de nombreux projets internationaux, notamment des consortiums financés par l'Union européenne concernant les principales espèces animales domestiques (voir des références à ce sujet dans Ollivier et Foulley, 2009).

La pertinence des marqueurs moléculaires dans l'évaluation de la diversité a été mise en cause du fait de la neutralité supposée de certains types d'entre eux (microsatellites par exemple), leur diversité pouvant ne pas refléter celle des gènes d'intérêt zootechnique. Mais nous savons par ailleurs que des gènes neutres peuvent être affectés par la sélection qui s'exerce sur des gènes voisins, ce qu'on appelle *l'effet d'entraînement* (Maynard-Smith et Haig, 1974). De cette manière la diversité génétique aux locus sélectionnés « entraînerait » une diversité corrélative de gènes neutres voisins. Ce phénomène peut être vu comme la situation exploitée en sens inverse dans la sélection assistée par marqueurs, où la sélection sur des marqueurs neutres affecte les locus de caractère quantitatifs (QTL) voisins. Le recensement des QTL dans les espèces animales montre en effet que des marqueurs liés à des caractères zootechniques sont aujourd'hui identifiés sur toute l'étendue des génomes (Hu *et al.*, 2013). Une couverture adéquate du génome par un ensemble de marqueurs doit donc, en théorie, assurer une corrélation de la diversité-marqueur avec au moins quelques performances.

Nous distinguerons dans ce qui suit les deux types de diversité que les marqueurs génétiques peuvent mesurer, soit la diversité génétique *stricto sensu*, soit la diversité allélique. La première, qui est la plus

classiquement utilisée, se rattache à la catégorie générale des diversités basées sur l'abondance (évoquée dans l'introduction), alors que la seconde peut être vue comme une diversité d'incidence.

5.1 Diversité génétique *stricto sensu*

La méthode classique de mesure de la diversité génétique des populations est celle des indices de fixation (F) proposée par Wright en 1943. Wright définit ainsi un F_{ST} qui mesure le degré de différenciation entre des sous-populations (S) résultant du fractionnement d'une population totale (T). Cet indice de différenciation, qui était vu par Wright comme une généralisation du concept de consanguinité, peut aussi se rattacher au concept de diversité selon l'approche de Nei (1973), la diversité étant assimilée à l'hétérozygotie moyenne (H) attendue à plusieurs locus sous l'hypothèse de l'équilibre de Hardy-Weinberg. H est donc une quantité mesurable connaissant les fréquences alléliques p_i , puisque $H = 1 - \sum_i p_i^2$. Nei montre que la diversité totale (H_T) se décompose en une diversité intra-sous-population (H_S) et une diversité entre sous-populations (D_{ST}). On a $H_T = H_S + D_{ST}$, et Nei définit ainsi un coefficient de différenciation génique entre les sous-populations tel que $G_{ST} = D_{ST}/H_T = 1 - H_S/H_T$, équivalent au F_{ST} de Wright. La confrontation des valeurs observées et espérées de cet indice sous certaines hypothèses génétiques permet de tester la vraisemblance de ces hypothèses : par exemple neutralité vs sélection (Lewontin et Krakauer, 1973 ; Gautier *et al.*, 2010).

Une autre méthode de mesure de la différenciation entre populations (ou races) est basée sur les distances génétiques de ces populations entre elles deux à deux et sur le principe selon lequel l'ajout d'une population i à un ensemble (R) de populations doit augmenter la diversité (V) de cet ensemble d'une quantité au moins égale à la distance entre la population i et l'ensemble R , soit $d(i,R)$. L'application de ce principe conduit à définir la diversité V d'un ensemble R de populations comme le maximum, sur toutes les populations de l'ensemble, de la distance entre une population i donnée et l'ensemble R privé de cette population, soit $d(i, R \setminus i)$, plus la diversité de l'ensemble R privé de cette population. La diversité de R s'écrit alors : $V(R) = \max_{i \in S} [d(i, R \setminus i) + V(R \setminus i)]$ (Weitzman, 1992). La méthode, à l'origine proposée pour l'étude de la diversité des espèces, est facilement transposable aux races animales, comme cela a été montré par Thaon d'Arnoldi *et al.* (1998) avec une application à un ensemble de races bovines. L'utilisation de cette fonction de diversité dans la gestion de la diversité génétique animale est décrite en détail par Foulley et Ollivier (2007), qui référencient également les nombreuses applications auxquelles la méthode a donné lieu dans ce secteur.

L'établissement d'une fonction de diversité ouvre la voie à des analyses plus fines en vue de mesurer les *contributions individuelles* de races animales à la diversité d'un ensemble de races, puisque la fonction de diversité est applicable à n'importe quel sous-ensemble. Weitzman (1993) a sans doute été le premier à recommander l'usage de ces contributions pour définir des politiques rationnelles de conservation. C'est ainsi qu'en utilisant la fonction $V(R)$ définie plus haut, la contribution d'une race i quelconque à la diversité d'un ensemble de races R peut s'écrire $CB_i = 1 - V(R \setminus i)/V(R)$, une quantité qui mesure en quelque sorte l'originalité génétique de la race i par rapport à l'ensemble. Petit *et al.* (1998) ont proposé une approche similaire pour les diversités de Nei (1973), qui consiste à remplacer V dans la formule précédente par les quantités H_T , H_S , ou D_{ST} définies plus haut, de manière à définir des contributions C_T , C_S , ou C_D , selon que l'intérêt se porte sur la diversité totale ou sur ses composantes.

5.2 Diversité (richesse) allélique

Le nombre d'allèles par locus est un indicateur de diversité d'un grand intérêt en sélection. Alors que l'hétérozygotie est liée à la réponse immédiate à la sélection, la réponse à long-terme dépend plutôt du nombre des allèles par locus (Barker, 2001). La richesse allélique est aussi un critère utile dans la pratique de la conservation puisque la maximisation assistée par marqueurs de la richesse allélique se révèle efficace dans la conservation d'un maximum d'allèles aussi bien neutres que non neutres (Bataillon *et al.*, 1996). Mais le nombre d'allèles observé dans une race tend à augmenter avec la taille de l'échantillon examiné, ce qui oblige à tenir compte de celle-ci dans les comparaisons entre races. C'est un problème que l'on rencontre aussi en écologie dans l'évaluation du nombre d'espèces. La correction par *raréfaction*, proposée par El Mousadik et Petit (1996), consiste à définir la richesse allélique à partir du nombre d'allèles manquants attendus par rapport au nombre total d'allèles observés, dans l'hypothèse où l'échantillon serait d'une taille inférieure à celle de l'échantillon réel. On choisit généralement comme taille de référence (g) à un locus donné le nombre minimum de gènes examinés par race sur l'ensemble des races examinées à ce locus. Un

allèle k , observé N_k fois parmi les N gènes de la race examinée, a une probabilité de manquer dans un échantillon de taille $g < N$ qui est égale à $P_k^{(g)} = C(N - N_k, g) / C(N, g)$, expression dans laquelle $C(N, g)$ représente le nombre de combinaisons de N objets pris g à g (ou $N - N_k$ objets dans le cas du numérateur). L'allèle k considéré a donc une probabilité $1 - P_k^{(g)}$ d'être présent dans un échantillon de taille g . En sommant

sur les K allèles observés dans une race on obtient sa richesse allélique $r^{(g)} = \sum_{k=1}^K (1 - P_k^{(g)}) = K - \sum_{k=1}^K P_k^{(g)}$. Une

autre méthode de correction consiste à ajouter au nombre d'allèles observés le nombre d'allèles qu'on s'attend à voir manquer du fait de la taille limitée de l'échantillon. C'est la méthode d'*extrapolation* proposée par Foulley et Ollivier (2006a), que ces auteurs ont appliquée et comparée à la méthode de raréfaction sur des échantillons de l'espèce porcine et de l'arganier marocain.

De la richesse allélique on passe à la diversité allélique en définissant une *diversité allélique intra-race* et une *diversité allélique totale*, selon le principe exposé dans l'Introduction et appliqué plus loin à la diversité des races. Si les échantillons raciaux sont de taille égale, la diversité totale est le nombre total d'allèles observés sur l'ensemble des races et la diversité intra-race est la moyenne des nombres d'allèles observés dans chaque race. La *diversité allélique entre races* s'obtient par différence entre les deux composantes ainsi définies et on en déduit un coefficient de différenciation allélique, analogue au G_{ST} de Nei. Les nombres d'allèles observés devront être corrigés par les méthodes indiquées plus haut en cas de taille inégale des échantillons raciaux.

Les contributions individuelles des races à la diversité allélique reposent sur l'existence d'allèles spécifiques à certaines races que, depuis Neel (1973), on appelle des allèles « privés » (voir *supra*). La contribution d'une race à la diversité allélique d'un ensemble de races se définit comme le nombre d'allèles privés par locus observés dans la race. Elle se décompose, comme pour la diversité génétique *stricto sensu*, en une contribution à la diversité allélique intra-race et une contribution à la diversité allélique entre races. Dans le cas le plus général d'échantillons raciaux de taille inégale, la contribution de chaque race à la diversité allélique se définit comme l'espérance du nombre d'allèles présents dans cette race et absents dans toutes les autres (Kalinowski, 2004). Sur la base de la probabilité d'absence $P_k^{(g)}$ définie plus haut pour un allèle k donné, la contribution de la race i est donc $(1 - P_i^{(g)}) \prod_{j \neq i} P_j^{(g)}$ pour cet allèle, quantité qu'il suffit de sommer sur les allèles de la race pour obtenir sa contribution au titre du locus considéré. La contribution totale est la moyenne des contributions sur l'ensemble des locus considérés.

Cette méthodologie d'analyse de la diversité allélique a maintenant été appliquée dans plusieurs espèces animales et végétales (références dans Ollivier et Foulley, 2013). Les études réalisées jusqu'à présent montrent que diversité génétique *stricto sensu* et diversité allélique sont deux formes différentes de diversité, quasi-indépendantes entre elles. La Figure 2 illustre cette situation dans une analyse de microsatellites sur 10 races bovines (Foulley et Ollivier, 2006b). Les exemples abondent de races représentant une part importante de diversité sans qu'elles aient le moindre allèle spécifique, tout autant que de situations inverses. Aucun de ces indicateurs de diversité ne doit donc être négligé quand on définit des priorités de conservation.

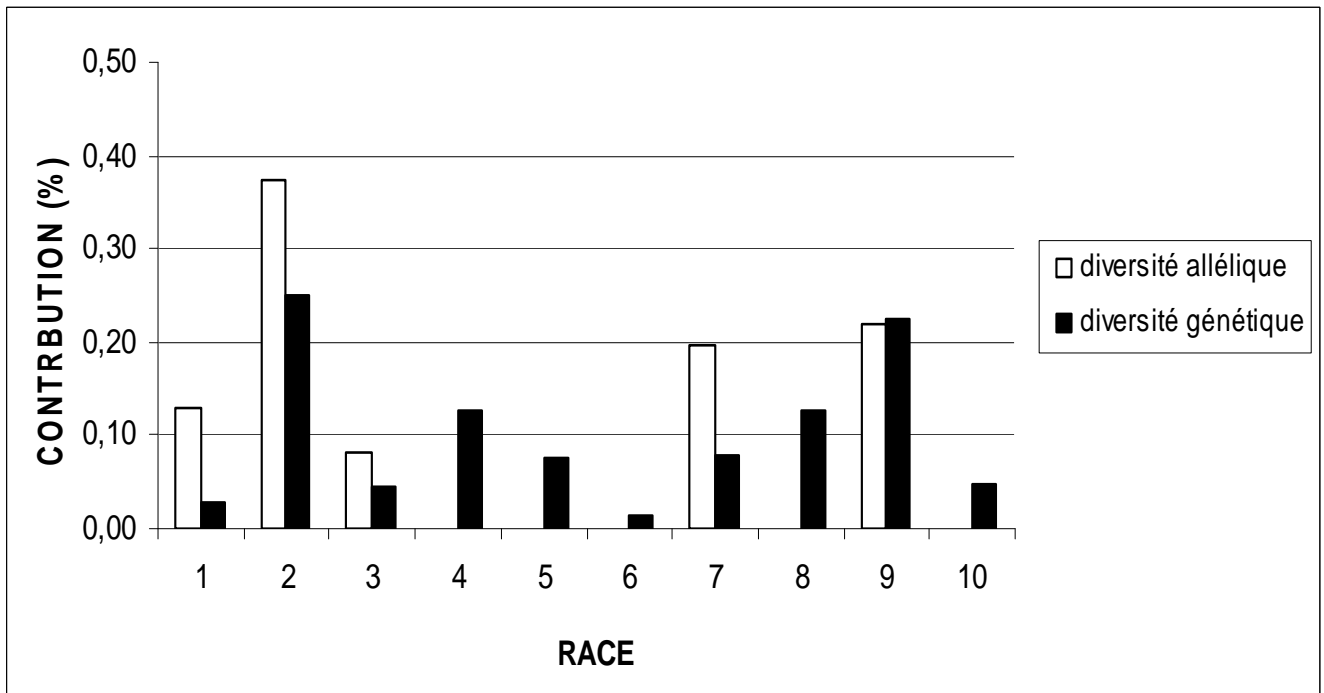


Figure 2 : Analyse de la diversité génétique de 9 locus de microsatellites sur 10 races bovines françaises : contributions raciales à la diversité exprimées relativement à la diversité totale (données analysées dans Foulley et Ollivier, 2006b)

(Voir texte pour la définition des contributions à la diversité allélique et à la diversité génétique *stricto sensu*).

Les races sont : 1 Bretonne Pie Noire ; 2 Charolais ; 3 Holstein ; 4 Jersey ; 5 Limousin ; 6 Rouge des Prés (anciennement Maine-Anjou) ; 7 Montbéliard ; 8 Normand ; 9 Parthenais ; 10 Vosgienne.

6. Conclusion

Les indicateurs de diversité génétique que nous avons passés en revue nous disent, chacun à leur façon, quelque chose qui a trait à la diversité génétique, mais aucun d'eux n'est tout à fait exempt de critiques. Le flou qui entoure le concept de *race*, notamment selon la région du globe considérée, enlève beaucoup de valeur au critère du nombre de races. L'utilité des *pedigrees* pour suivre la diversité génétique intra-race est très dépendante de la qualité et de l'exhaustivité des informations recueillies. Les *marqueurs moléculaires* sont réputés neutres et leurs relations avec les gènes d'intérêt zootechnique restent encore à évaluer avec précision. Il s'ensuit qu'il n'est pas facile de se prononcer sur l'état de la diversité génétique animale à un moment donné, et qu'il est encore plus difficile d'avoir une vue rétrospective de son évolution dans le temps, même si des pedigrees bien tenus sur de longues périodes offrent un suivi des diversités internes aux races.

Un intérêt pour la diversité génétique animale domestique n'est en fait apparu qu'assez tardivement, et avec un décalage notable par rapport au domaine végétal. C'est à partir des années 1960 que s'est manifestée une inquiétude sur le maintien de la diversité génétique animale face à une tendance générale à l'abandon des races les moins productives et, au sein des grandes races, à l'utilisation intensive de l'insémination artificielle. Nous avons vu qu'il a fallu cependant attendre une bonne vingtaine d'années pour que des actions concrètes soient prises pour mieux connaître et mieux gérer les ressources génétiques animales. Un aspect important a aussi été le renforcement de la coopération internationale, dont témoigne l'énorme travail d'évaluation de l'état de ces ressources à travers le monde (FAO, 2007).

La caractérisation moléculaire des ressources est aujourd'hui reconnue comme un outil essentiel dans leur gestion. Les marqueurs moléculaires offrent à l'évidence un moyen d'objectiver le concept de diversité, et, à ce titre, ils contribuent souvent à dissiper le flou entourant l'idée de race et à préciser les liens existant

entre diverses races. Ils permettent même d'inférer une structure raciale latente dans des populations n'offrant aucune apparence de subdivision en races (Pritchard *et al.*, 2000). Ces marqueurs pourront aussi, à l'avenir, servir à suivre l'évolution de la diversité génétique animale dans le temps, ce qui jusqu'à présent n'a pas été possible, faute de disposer du recul nécessaire dans la constitution de stocks de matériel biologique (sources d'ADN), contrairement au secteur végétal (Gallais, 2013). De ce point de vue, les centres de ressources biologiques génomiques qui se mettent en place, à côté des ressources reproductives des cryobanques (Danchin-Burge, 2012), devraient contribuer utilement à la coordination des échantillonnages et à la conservation sur le long terme des matériels récoltés. Sur un plan plus général, l'étude des marqueurs moléculaires offre des perspectives pour une meilleure connaissance des génomes animaux et pour élucider les bases génétiques des divergences adaptatives des races animales à travers le monde.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) BARKER, J.S.F., 2001. – Conservation and management of genetic diversity: a domestic animal perspective. *Can. J. For. Res.* **31**, 588-595.
- (2) BATAILLON T.M., DAVID J.L., SCHOEN D.J., 1996. – Neutral genetic markers and conservation genetics : simulated germplasm collections. *Genetics* **144**, 409-417.
- (3) BOICHARD D., 2007. – Pedig : a Fortran package for pedigree analysis suited to large populations. (http://www-sgqa.jouy.inra.fr/rubrique.php?id_rubrique=5)
- (4) COLLEAU J.-J., 2002. – An indirect approach to the extensive calculation of relationship coefficients. *Genet. Sel. Evol.* **34**, 409-421.
- (5) COLLEAU J.-J., REGALDO D., PALHIÈRE I., TRIBOUT T., MOUREAUX S., FRITZ S., BARBAT A., DE PREAUMONT H., TUAL K., MATTALIA S., 2007. – Gestion optimisée de la variabilité génétique dans les populations sélectionnées. Académie d'Agriculture de France, Séance du 7 mars 2007. (http://www.academieagriculture.fr/mediatheque/seances/2007/0702007/20070307communication1_integral.pdf)
- (6) CUNNINGHAM E.P., DOOLEY J.J., SPLAN R.K., BRADLEY D.G., 2001. – Microsatellite diversity, pedigree relatedness and the contributions of founder lineages to thoroughbred horses. *Anim. Genet.* **32**, 360-364.
- (7) DANCHIN-BURGE C., 2012. – Gestion durable de la variabilité génétique des ruminants domestiques : approches *in situ* et *ex situ*. Thèse AgroParisTech.
- (8) EL MOUSADIK A., PETIT R.J., 1996. – High level of genetic differentiation for allelic richness among populations of the argan tree (*Argania spinosa* L. Skeels) endemic to Morocco. *Theoret. Appl. Genet.* **92**, 832-836.
- (9) FAO, 2007. – The State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture. Rischkowsky B. and Pilling D. (Eds), FAO, Rome, 511 p.
- (10) FAO, 2012a. – Status and trends of animal genetic resources. Document distribué à la 7e séance du groupe de travail technique intergouvernemental sur les ressources génétiques animales pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 24-26 octobre 2012, 40 p.
- (11) FAO, 2012b. – Phenotypic characterization of animal genetic resources. FAO Animal Production and Health guidelines No 11. Rome, 142 p.
- (12) FOULLEY J.-L., OLLIVIER L., 2006a. – Estimating allelic richness and its diversity. *Livest. Sci.*, **101**, 150-158.
- (13) FOULLEY J.-L., OLLIVIER L., 2006b. – Diversité génétique et richesse allélique : concepts et application à des races bovines. Journées 3R, Paris, 4 p.
- (14) FOULLEY J.-L., OLLIVIER L., 2007. – Mesure de la diversité génétique : l'apport de Martin Weitzman. Académie d'Agriculture de France, Séance du 7 mars 2007. (http://www.academie-agriculture.fr/mediatheque/seances/2007/07-03-2007/20070307communication2_integral.pdf)
- (15) FRANKLIN I.R., 1980. – Evolutionary change in small populations. In *Conservation Biology: an Evolutionary–Ecological Perspective* (Soulé M.E. and Wilcox B.A., eds), pp. 135–150, Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, USA.
- (16) GALLAIS A., 2013. – Évolution de la diversité génétique des variétés de plantes cultivées. Académie d'Agriculture de France, Séance du 23 janvier 2013. (http://www.academie-agriculture.fr/mediatheque/seances/2013/20130123_resume2.pdf)

- (17) GANDINI G.C., OLLIVIER, L., DANELL, B., DISTL, O., GEORGOUDIS, A., GROENEVELD, E., MARTYNIUK, E., VAN ARENDONK, J.A.M., AND WOOLLIAMS, J., 2004. – Criteria to assess the degree of endangerment of livestock breeds in Europe. *Livest. Prod. Sci.* **91**, 173-182.
- (18) GAUTIER M., HOCKING T. D., FOULLEY J.-L., 2010. – A Bayesian outlier criterion to detect SNPs under selection in large data sets. *PLoS One* **5**, Issue 8, e11913.
- (19) GROSCLAUDE F., AUPETIT R.Y., LEFEBVRE J., MERIAUX J.C., 1990. – Essai d'analyse des relations génétiques entre les races bovines françaises à l'aide du polymorphisme biochimique. *Génét. Sél. Evol.* **22**, 317-338.
- (20) HARTL D.L., CLARK A.G., 1997. – *Principles of Population Genetics* (3e ed). Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, USA, 542 p.
- (21) HILL W.G., ZHANG X.S., 2009. – Maintaining genetic variation in fitness. In: van der Werf, J., Graser, H.-U., Frankham, R. and Gondro, C. (Eds) *Adaptation and Fitness in Animal Populations*, Springer, Berlin, pp. 59-81.
- (22) HOULE D., MORIKAWA B., LYNCH M., 1996. – Comparing mutational variabilities. *Genetics* **143**, 1467-1483.
- (23) HU Z.-L., PARK C. A., WU X.-L., REECY J. M., 2013. – Animal QTLdb: an improved database tool for livestock animal QTL/association data dissemination in the post-genome era. *Nucleic Acids Res.* **41**, Database issue D871–D879.
- (24) JAMIESON I.G., ALLENDORF F.W., 2012. – How does the 50/500 rule apply to MVPs? *Trends Ecol. Evol.*, **27**, 578-584.
- (25) KALINOWSKI S.T., 2004. – Counting alleles with rarefaction: private alleles and hierarchical sampling designs. *Conserv. Genet.* **5**, 539-543.
- (26) LAUVERGNE J.J., 1982. – Genética en poblaciones animales después de la domesticación: consecuencias para la conservación de las razas. *Proceedings of the 2nd World Congress on Genetics Applied to Livestock Production* **6**, 77-87.
- (27) LEWONTIN R.C., KRAKAUER J., 1973. – Distribution of gene frequency as a test of the theory of the selective neutrality of polymorphisms. *Genetics* **74**, 175-195.
- (28) MACARTHUR R., RECHER H., CODY M., 1966. – On the relation between habitat and species diversity. *Am. Nat.* **100**, 319-332.
- (29) MAIJALA K., CHEREKAEV E.V., DEVILLARD J.M., REKLEWSKI Z., ROGNONI G., SIMON D.L., STEANE D.E., 1984. – Conservation of animal genetic resources in Europe. Final report of an EAAP working group. *Livest. Prod. Sci.* **11**, 3-22.
- (30) MALÉCOT G., 1948. – *Les mathématiques de l'hérédité*. Masson, Paris, 64 p.
- (31) MASON I.L., 1951. – *A World Dictionary of Livestock Breeds Types and Varieties*. Commonwealth Agricultural Bureaux, Slough, G.B., 270 p.
- (32) MAYNARD SMITH, J., HAIG, J., 1974. – The hitch-hiking effect of a favourable gene. *Genet. Res.* **23**, 23-35.
- (33) MOAZAMI-GOUDARZI K., LALOË D., FURET J.P., GROSCLAUDE F., 1997. – Analysis of genetic relationships between 10 cattle breeds with 17 microsatellites. *Anim. Genet.* **28**, 338-345.
- (34) NEEL J.V., 1973. – “Private” genetic variants and the frequency of mutation among South American Indians. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **70**, 3311-3315.
- (35) NEI M., 1973. – Analysis of gene diversity in subdivided populations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **70**, 3321-3323.
- (36) OLLIVIER L., 1998. – Results and prospects of reproductive technologies for (sustainable) breeding and conservation in farm animal species other than cattle. *Acta Agric. Scand., Suppl.* **29**, 115-120.
- (37) OLLIVIER L., FOULLEY J.-L., 2009. – Managing genetic diversity, fitness and adaptation of farm animal genetic resources. In: van der Werf, J., Graser, H.-U., Frankham, R. and Gondro, C. (Eds) *Adaptation and Fitness in Animal Populations*, Springer, Berlin, pp. 201-227.
- (38) OLLIVIER L., FOULLEY J.-L., 2013. – A note on the partitioning of allelic diversity. *Conserv. Genet.* (sous presse)
- (39) PETIT R.J., EL MOUSADIK A., PONS O., 1998. – Identifying populations for conservation on the basis of genetic markers. *Conserv. Biol.* **12**, 844-855.
- (40) PRITCHARD J. K., STEPHENS M., DONNELLY P., 2000. – Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics* **155**, 945–959.
- (41) ROBERTSON A., 1961. – Inbreeding in artificial selection programmes. *Genet. Res.*, **2**, 189-194.
- (42) SLATKIN M., 1985. Rare alleles as indicators of gene flow. *Evolution* **39**, 53-65.
- (43) THAON D'ARNOLDI C., FOULLEY, J.-L., OLLIVIER, L., 1998. – An overview of the Weitzman approach to diversity. *Genet. Sél. Evol.* **30**, 149-161.

- (44) VEECH J.A., SUMMERVILLE K.S., CRIST T.O., GERIN J.C., 2002. – The additive partitioning of species diversity: recent revival of an old idea. *Oikos* **99**, 3-9.
- (45) VEECH J.A., CRIST T.O., 2010. – Toward a unified view of diversity partitioning. *Ecology*, 1988-1992.
- (46) WEITZMAN M.L., 1992. – On diversity. *Quart. J.Econ.* **107**, 363-405.
- (47) WEITZMAN M.L., 1993. – What to preserve? An application of diversity theory to crane conservation. *Quart. J. Econ.* **108**, 157-183.
- (48) WRIGHT S., 1931. – Evolution in Mendelian populations. *Genetics* **16**, 97-159.
- (49) WRIGHT S., 1943. – Isolation by distance. *Genetics* **28**, 114-138.

DISCUSSION

D. Planchenault¹. – La France est signataire de la Convention sur la diversité biologique (CDB). Des indicateurs apparaissent indispensables aux pays pour montrer le respect de leurs engagements vis à vis de la CBD. L'indicateur "nombre de races présentes" établi à partir des données FAO apparaît pertinent et simple à établir. Cependant, la France, dans son arrêté du 6 avril 2012, déclare 46 races bovines et 30 races porcines. Une interrogation simple de la base FAO donne les effectifs respectivement de 51 et 61. De plus, suite aux travaux de correction que vous avez effectués sur cette base, notamment dans le domaine porcin, il apparaît que 20 races porcines ont disparu en France. Avec un taux de disparition de ses races porcines de l'ordre de 30 %, la France apparaît comme le mauvais élève de la CDB. Il semble ici que cet indicateur pénalise les pays qui réalisent un inventaire de leurs races. Qu'en pensez-vous ?

L. Ollivier. – Vous posez la question de la fiabilité des inventaires de races réalisés en collaboration avec les pays signataires de la CDB. Il faut souligner que ces inventaires reposent sur les informations recueillies dans les pays concernés et transmises à la FAO par un organisme désigné dans chaque pays pour effectuer cette tâche. De plus, au niveau régional (la région étant entendue par la FAO comme étant un continent) une coordination des inventaires nationaux est réalisée par l'un des pays de la région, qui est actuellement l'Allemagne pour l'ensemble de l'Europe. Tous les pays respectent cette obligation et la qualité des inventaires reflète donc nécessairement les efforts de chaque pays dans ce domaine. La question se pose également de la régularité des mises à jour faites. Par ailleurs, la signification du nombre de races peut varier d'une espèce à l'autre. Chez le porc par exemple, les races incluent les lignées spécialisées utilisées dans des systèmes de croisement par diverses firmes privées de sélection. Sur l'ensemble du continent européen, la France arrive largement en tête pour le nombre des races dans la plupart des espèces, et des programmes de conservation sont également appliqués dans toutes les espèces. Notre pays serait donc plutôt un bon élève CDB de ce point de vue.

J.C. Mounolou². – Au-delà des connaissances qu'ont apportées les conférences et le débat, je me propose de tirer trois petites leçons personnelles. La première est que l'évolution de la diversité génétique chez les espèces domestiques (maïs, porc...) n'a rien de commun avec celles de certaines espèces sauvages menacées par l'urbanisation (petits oiseaux...). La seconde concerne les inventaires des races et variétés. Ces inventaires n'ont de sens que si les identifications sont contrôlées et faites de façon semblable. S'il n'en est pas ainsi, l'hétérogénéité peut être source d'imposture scientifique et politique. Troisième et dernière leçon à propos de biodiversité : il apparaît clairement que, dans la multiplicité des situations très différentes observées, en choisir une plutôt qu'une autre pour traiter de façon générale de biodiversité tient de la conviction idéologique plus que de la science.

M. Petit³. – Quelle est la portée des efforts faits par les sélectionneurs pour diversifier les géniteurs, allusion à une présentation du CIMMYT (Centre international d'amélioration du maïs et du blé) il y a déjà quelques années ?

Ayant visité un établissement Monsanto dans l'Iowa, il y a quelques années, j'avais été frappé par la sophistication des techniques employées pour « cibler » la production de variétés nombreuses, adaptées à des environnements spécifiques variés. N'est-ce pas une bonne voie pour lutter contre les pertes de diversité ?

A. Gallais. – Tous les sélectionneurs de plantes investissent dans les ressources génétiques, avec un passage assez continu entre les ressources génétiques « sauvages » et les ressources « élites », comprenant les variétés des concurrents, qui grâce au système européen de protection des obtentions végétales peuvent

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Inspecteur général de la santé publique vétérinaire, Ministère de l'Agriculture, CGAAER, 251, rue de Vaugirard, 75732 Paris cedex 15

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur honoraire de l'Université Paris-Sud.

³ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur honoraire à AgroParisTech, ancien Directeur de l'agriculture à la Banque mondiale.

être utilisées comme ressources génétiques par tout sélectionneur. Chaque année, un sélectionneur d'une plante annuelle réalise plusieurs centaines, voire milliers, de croisements de départ. Dans ces croisements, il cherche toujours à introduire du matériel nouveau.

Oui, comme je l'ai souligné, la sélection de variétés adaptées à différents types d'utilisation et de milieux est une façon de maintenir une diversité, et explique le maintien de la diversité des variétés à la disposition de l'agriculteur.

D. Couvet⁴. – Quelles sont les potentialités de l'amélioration des plantes pour mieux gérer le risque épidémique ?

Vaut-il mieux : 1) multiplier le nombre de variétés ayant des résistances différentes ?

2) Augmenter la diversité au sein des variétés ?

3) Favoriser le *turn-over* de variétés, en accordant des autorisations de cultures pour des périodes limitées ?

A. Gallais. – Chez les plantes, la stabilité des résistances dépend en partie de leurs bases génétiques. Les résistances contrôlées par un grand nombre de gènes, dites polygéniques, sont en général plus stables que les résistances contrôlées par un seul gène. Il faudrait donc favoriser les résistances polygéniques. Pour gérer les résistances facilement contournables par le pathogène, résistances dites verticales, les trois solutions que vous proposez peuvent être utilisées.

La diversification des variétés pour les gènes de résistance s'impose. Chez une céréale comme le blé, le contournement a souvent lieu au bout de 4-5 ans, ce qui correspond à la durée de vie d'une variété. Le *turn-over* des variétés permet donc dans une certaine mesure de répondre à l'évolution du pathogène. Il semble difficile de gérer ce *turn-over* au niveau national ou d'un territoire : toutefois, au niveau de son exploitation, l'agriculteur peut avoir, et a recours à cette solution. L'hétérogénéité des variétés ralentirait l'évolution du pathogène, mais aux dépens de leur rendement. Chez le blé, il vaut alors mieux associer trois ou quatre lignées, choisies pour leurs résistances à différentes races du pathogène et pour leurs caractéristiques agronomiques.

P. Devaux⁵. – Je voulais prolonger ce qui vient d'être dit par notre confère André Gallais à savoir que le « *pre-breeding* » représente une activité à part entière en amélioration des plantes. Celui-ci permet effectivement d'intégrer une variabilité génétique nouvelle et originale dans les géniteurs utilisés pour la création variétale.

La faible corrélation constatée entre les marqueurs morphologiques et les marqueurs moléculaires par Alain Charcosset dont notre Confrère Bernard Le Buanec s'est fait l'écho n'est pas surprenante dans la mesure où l'étude, qui date de quelques années, repose sur des marqueurs moléculaires de type RFLP dont la plupart ont été développés à partir de séquences génomiques pour lesquelles une large proportion était non codante. Actuellement, et grâce à l'alignement de séquences transcriptomiques, des marqueurs moléculaires tels que les EST-SSRs ou les SNPs sont développés dans les séquences codantes et l'on peut s'attendre à ce que de pareilles études menées avec des marqueurs de séquences codantes puissent révéler de meilleures corrélations entre les deux types de marqueurs.

C. Sultana⁶. – Ma question a un côté pratique et elle est un peu en marge de l'objet principal de la séance. L'augmentation du nombre de variétés de blé et la réduction de leur durée d'exploitation commerciale ne posent-elles pas problème à la meunerie pour fournir des farines de qualité constante en fonction des usages auxquels elles sont destinées ?

B. Le Buanec. – Je n'ai pas eu communication d'un tel problème ces dernières années. De toute façon ce risque est, me semble-t-il, à minimiser car, d'une manière générale et sauf contrats particuliers, les récoltes de plusieurs variétés sont stockées en mélange dans les silos des organismes stockeurs. Ceci a d'ailleurs été un frein pour le développement de caractères spécifiques de qualité par les sélectionneurs, cette qualité spécifique étant difficile à valoriser.

⁴ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur à l'École polytechnique et au MNHN.

⁵ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Directeur des biotechnologies, Maison Florimond-Desprez Veuve et Fils, 59242 Cappelle-en-Pévèle.

⁶ Vice-trésorier de l'Académie d'Agriculture de France, ancien directeur de l'Institut technique du Lin.

E. Choné⁷. – L'idée de l'érosion de la biodiversité trouve un large écho dans l'opinion publique ; idée ou question ou inquiétude : c'est selon le point de vue auquel on se place. Notre séance répond-elle aux interrogations du public ?

B. Le Buanez. – En fait c'est surtout à vous de nous le dire. Tout d'abord, il faut bien comprendre que notre séance n'adressait pas la question de la biodiversité en général mais de la diversité génétique des variétés cultivées et des races d'élevage. Ce que j'ai voulu montrer pour ma part c'est qu'il fallait d'abord se mettre d'accord sur des indicateurs de diversité génétique avant de parler d'évolution de cette diversité. Il me semble que les exposés d'André Gallais et de Louis Ollivier ont ensuite montré que, même s'il faut rester vigilant, il n'y a pas lieu d'être inquiet pour le moment.

A. Gallais. – Il ne faut en effet pas confondre biodiversité et diversité génétique des variétés végétales et des races animales. Cette diversité génétique est une composante de la biodiversité, mais celle-ci est bien plus vaste puisqu'elle comprend aussi la diversité des écosystèmes. Pour les variétés végétales, nous montrons bien qu'il y a eu perte de diversité depuis la domestication, mais que depuis la sélection dirigée la diversité des variétés à la disposition de l'agriculteur tend à se maintenir, avec des variations, diminution suivie d'augmentation, souvent dues à l'introduction de nouveaux gènes à forts effets, comme les gènes de nanisme chez les céréales.

J.F. Colomer⁸. – En matière de sélection génétique, principalement dans le domaine animal, si on prend en exemple le cheval qui évolue vers un « cheval de loisir », est-il possible d'intégrer la « réversibilité », et donc revenir en arrière sur des races « disparues » ?

L. Ollivier. – La réversibilité de la sélection ne peut pas être mise en doute, car les mécanismes génétiques qui expliquent l'évolution des populations sont les mêmes dans les deux sens. Pour prendre l'exemple du porc, c'est une espèce qui a d'abord été considérée comme une source de matière grasse et a donc été sélectionnée dans ce but. Depuis une soixantaine d'années on est passé au porc maigre. Sans aucun doute, si on voulait revenir au porc gras, rien ne s'y opposerait. De même pour le cheval, mais ce serait certainement plus long et difficile, compte tenu de l'intervalle de génération de l'espèce.

P. Cagnat⁹. – Est-ce que l'avenir n'est pas dans l'ouverture des banques de gènes grâce aux nouvelles technologies ?

A. Gallais. – Aujourd'hui, chez les plantes, ce que l'on appelle « banques de gènes » correspond en fait à la conservation statique d'un grand nombre d'échantillons de graines, d'origines très variées, d'une espèce. Les nouvelles technologies, en particulier le marquage moléculaire, permettent d'aller à la recherche de nouveaux gènes dans ces collections. Nous ne sommes pas encore au stade où ces ressources génétiques seraient suffisamment caractérisées pour les gènes, en fait les allèles, qu'elles peuvent apporter.

⁷ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, ancien directeur d'AGROPOL.

⁸ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, président du Comité d'orientation de la Société des Agriculteurs de France (SAF).

⁹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, ancien président du SYRPA et du festival Agri-Cinéma.

MESURE DE LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DES PLANTES CULTIVÉES ET DES ANIMAUX DOMESTIQUES

CONCLUSION

par Étienne Verrier¹

Dans son introduction, Bernard **Le Buanec** nous rappelle l'importance qu'il y a à évaluer la diversité génétique des plantes cultivées et des animaux domestiques et la difficulté de dégager des conclusions générales d'études reposant sur des indicateurs différents de diversité. Inutile en effet de s'appesantir sur l'intérêt de la diversité génétique : c'est elle qui conditionne les possibilités d'évolution des populations d'élevage ou de création de nouvelles variétés de plantes, pour répondre à des besoins mouvants, dans un monde changeant et dans un contexte de compétition accrue pour l'accès aux ressources telles que le sol et l'eau.

Établir des bilans suppose de disposer d'indicateurs, dont Louis **Ollivier** présente plusieurs types, fondés sur différents types d'information. L'intérêt comparé de ces indicateurs dépend à la fois de leurs propriétés intrinsèques et de la facilité d'accès aux informations requises. De ce second point de vue, des indicateurs simples, comme le nombre de races ou de variétés différentes, ont l'avantage d'être faciles d'accès et de se prêter à des comparaisons à grande échelle, dans l'espace comme dans le temps. Une vision plus détaillée des choses requiert l'usage d'indicateurs plus élaborés. L'expérience montre que, quand cela est possible, il est utile et nécessaire d'employer une large gamme d'indicateurs de diversité car, même si ces derniers ne sont pas totalement indépendants entre eux, ils ne donnent pas à voir la même chose : les indicateurs fondés sur les généalogies nous parlent d'une diversité neutre anonyme (c.à.d. à un endroit quelconque du génome) ; les marqueurs moléculaires nous parlent de diversité en des endroits précis du génome, diversité neutre ou liée à une diversité fonctionnelle selon le cas, etc. En un mot, il est important de mettre de la diversité dans les indicateurs de diversité.

J'ajoute que les bilans de diversité qui peuvent être établis ne le sont pas dans un but contemplatif, mais pour apporter une aide à la décision et à l'action, qu'il s'agisse de mettre en œuvre des mesures de préservation (conservation *sensu stricto*) ou de valorisation de la diversité (sélection, création variétale). Il est donc nécessaire de compléter ces bilans de diversité par des informations sur la manière dont les ressources génétiques sont gérées et par qui : quelle communauté d'éleveurs se reconnaît dans une race donnée et préside à son évolution, et dans quelle dynamique ? Existe-t-il des échanges organisés de semences (végétales) ou de reproducteurs (animaux) ? Combien d'entreprises de sélection animale ou de création variétale conduisent des programmes sur une espèce donnée, et quelles sont leurs stratégies ? Etc.

Dans son exposé, André **Gallais** fournit, pour le cas des plantes cultivées, un panorama détaillé et illustré de la situation de la diversité génétique, et de son évolution dans le temps. Il nous propose tout d'abord trois niveaux d'observation de la diversité : le champ, les variétés proposées aux agriculteurs et les ressources génétiques disponibles chez le sélectionneur. À quelques adaptations près, liées à des différences d'organisation de la sélection et au fait que les variétés végétales à génotype unique n'ont pas d'équivalent en élevage, ce cadre d'analyse est pertinent dans le cas des animaux. André **Gallais** indique que l'essentiel de la perte de diversité génétique des plantes cultivées s'est produit suite à de forts goulets d'étranglement au moment de la domestication. Cette situation tranche avec celle des animaux, où la domestication est reconnue pour avoir favorisé l'émergence d'un foisonnement de diversité, comme l'a souligné Charles Darwin lui-même dans le premier chapitre de son ouvrage fondateur de 1859 (les goulets d'étranglement sont intervenus bien plus tard).

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, professeur à AgroParisTech, UFR Génétique, Élevage et Reproduction, 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris 05.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 23 janvier.

Bien évidemment, le développement des variétés à génotype fixé a conduit à une réduction de la diversité à l'échelle du champ, et ce mouvement nous est décrit pour quelques espèces de grande culture. Il faut alors souligner l'intérêt d'une diversité dans l'espace (d'un champ à l'autre) et dans le temps (renouvellement des variétés). Récemment, plusieurs études à grande échelle, valorisant différents types d'informations dont des informations moléculaires, ont permis d'apprécier l'évolution dans le temps de la diversité génétique de certaines espèces de grande culture. Elles mettent en évidence des périodes de diminution de diversité suivies de périodes d'augmentation puis de stabilité.

André **Gallais** attire également notre attention sur les conséquences possibles en matière de diversité de la concentration des entreprises de sélection et des stratégies de ces dernières (cf. plus haut l'intérêt des indicateurs « sociaux »). Il est ici intéressant d'apporter quelques informations relatives à la sélection animale, secteur aujourd'hui largement internationalisé et où la concentration des entreprises est une réalité pour certaines filières. Si l'on considère l'aviculture hors-sol (à l'exclusion des filières sous signes de qualité ou d'origine et, par nature, de l'aviculture fermière ou villageoise), à l'échelle mondiale, deux entreprises (firmes privées) assurent 90% du marché du poulet de chair, deux autres 95% du marché de la poule pondeuse et deux autres 100% de celui de la dinde. L'élevage porcin hors-sol présente une concentration moindre mais, sur 24 opérateurs recensés (firmes privées ou coopératives), 4 détiennent la moitié du marché mondial. La gestion des ressources génétiques ne peut pas se raisonner sans tenir compte de ce « paysage » des entreprises et de leurs stratégies, ce qui ne dispense pas de se préoccuper de la gestion des ressources génétiques détenues et exploitées en dehors des filières approvisionnées par ces entreprises.

En conclusion, les bilans de diversité génétique sont plus que nécessaires. Il est utile et important de les établir à intervalles réguliers afin d'avoir une vision dynamique des choses. Ils ne doivent pas nous faire verser dans le catastrophisme, et donc dans l'inaction. Ils ne doivent pas non plus servir de simple caution. Ils doivent permettre aux gestionnaires de ressources génétiques et à ceux qui valorisent celles-ci, quel que soit leur statut, de mettre en œuvre les mesures requises pour une gestion durable de ces ressources. Ils doivent aussi éclairer les décideurs publics, à l'échelle des collectivités territoriales, aux échelles nationale, européenne et mondiale, pour une mise en place de mesures incitatives favorables à cette gestion durable.

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE : INNOVATIONS, PERSPECTIVES

INTRODUCTION

par Jean-Claude **Pernollet**¹

Avant de répondre aux questions « Qu'est-ce que la biologie de synthèse ? », « En quoi se démarque-t-elle du génie génétique ? », il est nécessaire de faire deux remarques.

Première remarque : le terme n'est pas encore définitivement fixé et l'on emploie alternativement celui de biologie synthétique.

Seconde remarque : certains emploient ces mots pour désigner un concept moins novateur, celui d'obtention de nouvelles molécules originales par voie biologique, ce que fait l'ingénierie des protéines depuis déjà belle lurette.

Nous nous en tiendrons à la définition suivante : *La biologie de synthèse est un domaine scientifique en pleine émergence combinant biologie et principes d'ingénierie dans le but de concevoir et construire de nouveaux systèmes et fonctions biologiques*. C'est l'ingénierie rationnelle de la biologie vers laquelle tendent désormais les biotechnologies.

La génétique a été au bout du réductionnisme avec la manipulation du gène isolé, initiant ainsi le génie génétique. Partant de ce point ultime, la biologie de synthèse consiste en une démarche intégrative qui peut aller, cas extrême, jusqu'à la construction d'un génome synthétique entier.

On est donc passé à une étape supplémentaire du génie génétique en étant capable de construire tout ou partie d'un génome nouveau par assemblage de nombreux gènes, éventuellement produits par des voies chimiques et biochimiques, et en incluant leurs régulateurs, et de faire fonctionner des voies métaboliques originales dans des organismes qui en étaient dépourvus. Cette approche a ainsi permis à Craig Venter et son équipe⁽¹⁾ de créer *de toute pièce* un nouveau génome bactérien complet et fonctionnel assemblé sous forme d'un chromosome synthétique qui fonctionne dans une mycobactérie dont le propre chromosome avait été supprimé, il y a maintenant deux ans et demi.

On en arrive ainsi au mythe de Prométhée, dont le nom signifie « le Prévoyant », ce qui anticipait peut-être la notion de principe de précaution bien avant l'heure. C'est, dans la mythologie grecque, un Titan qui est surtout connu pour avoir créé les hommes en modelant de l'argile, ainsi que pour le vol du « savoir divin » (le feu sacré de l'Olympe) qu'il rendit aux humains. Courroucé par sa ruse qui avait donné aux hommes le pouvoir des dieux, Zeus, leur roi, le condamna à avoir le foie dévoré quotidiennement par un aigle et à être enchaîné sur le Mont Caucase. Il fut délivré de ce supplice qui recommençait éternellement par Hercule, en marge de ses douze travaux.

Sera-ce le cas des scientifiques qui développent les nouvelles biotechnologies ? Peut-être pas, s'ils savent mieux gérer socialement ces ultimes progrès qu'ils ne l'ont fait jadis avec les OGM. C'est ce que cette séance devrait révéler, notamment au cours de la discussion, car en matière d'OGM on se rend bien compte que leur réhabilitation dans l'opinion publique est un nouveau travail d'Hercule.

En effet, quand les progrès de la biologie de synthèse auront fait progresser les connaissances du monde du vivant pour permettre de développer de nombreuses applications industrielles dans les domaines de la santé, de l'énergie, des matériaux, de l'environnement et de l'agriculture, on pourra alors espérer un apaisement des relations entre le génie biotechnologique et les citoyens. Ce qu'il faut en attendre ce sont des thérapies plus efficaces, des médicaments plus actifs et moins chers, de nouveaux matériaux facilement recyclables, des biocarburants, des bactéries capables par exemple de dégrader les substances toxiques qui polluent l'environnement, etc. Pour ce qui touche à notre Compagnie, on peut en attendre des plantes

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 30 janvier 2013.

cultivées, des animaux domestiques et des micro-organismes plus performants, tant en matière de productivité que de durabilité.

J'en viens à la présentation de cette séance.

De nombreuses réunions et débats ont déjà récemment abordé la question de la biologie de synthèse, notamment à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST)⁽²⁾. Il ne s'agissait donc pas de recommencer une nième réunion, avec les mêmes objectifs de nature essentiellement scientifique et technologique, mais de mettre en avant comment des entreprises nouvelles et innovantes développent des applications fondées sur la biologie de synthèse, d'une part, et, de l'autre, quelles sont les questions philosophiques, éthiques et sociétales que la biologie de synthèse soulève.

David **Sourdive**, vice-président exécutif et cofondateur de Collectis, une entreprise de biotechnologie parlera de l'« *Apport de l'ingénierie des génomes à la biologie de synthèse* ». Il mettra l'accent sur l'existence de deux démarches dans la biologie de synthèse. L'une est l'approche *a minima*, telle que la pratique Craig Venter, où une ingénierie métabolique est conçue à partir d'objets (gènes déjà identifiés) que l'on associe dans une construction (génome) abritée dans un organisme déjà maîtrisé (*e.g.* bactérie, levure). La seconde démarche part du génome d'un organisme d'intérêt que l'on souhaite "domestiquer". Elle consiste à travailler les séquences régulatrices *sensu lato* (séquences non-codantes, signaux de régulation et de transcription, séquences génératrices de petits ARN) pour développer simultanément une fonction et une domestication, les deux à vocation industrielle. David **Sourdive** mettra l'accent sur la seconde, qui est celle que développe Collectis, considérant que la première est connue (il en sera un peu question dans l'intervention suivante de Dominique **Thomas**). En bref, David **Sourdive** traitera d'enjeux de connaissances et d'enjeux de communication.

Dominique **Thomas** (directeur de la société Alderys) fera une communication intitulée « *La biologie de synthèse : émergence d'une entreprise* » au cours de laquelle il traitera des initiatives et des responsabilités d'un "jeune" directeur qui monte une *start-up*. Quelle *start-up* (projet scientifique, projet industriel, évaluation, transfert concret dans l'action, acceptation et diffusion du produit) ? Comment se fait l'amorçage et l'installation (investisseurs, recrutements, structure, installation, échéances et évaluations, partenariats et concurrences, fiscalité, succès ou échec) ?

Le troisième intervenant sera Hervé **Le Guyader**, professeur à l'université Pierre et Marie Curie, Paris VI. Il traitera de l'évolution des représentations de la nature et de la vie jusqu'à l'envol de la biologie de synthèse. Il évoquera ses réflexions sur l'éthique de cette démarche. Le titre de sa conférence est « *La biologie de synthèse : évolution naturelle ou évolution artificielle ?* ».

Après la discussion qui regroupera les trois exposés, Jean-Claude **Mounolou** tirera les conclusions de cette séance.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) GIBSON DG, *et al.*, 2010. – *Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome*. *Science*, **329**(5987) 52-56.
- (2) FIORASO Geneviève, députée, 15/02/11. – Les enjeux de la biologie synthétique - Présentation de l'étude de faisabilité, Sénat, OPECST.

L'INGÉNIERIE DES GÉNOMES : UNE CLEF DE LA BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE

par David Sourdive¹

Le vivant est devenu un objet d'ingénieur.

A l'instar de la chimie au 20^e siècle, la biologie connaît en ce début du 21^e siècle une véritable révolution. La faculté d'assembler atomes et molécules de façon systématique et prévisible avait permis l'essor de grands ensembles industriels de la chimie déployant ces capacités dans de nombreux domaines d'activité (énergie, pharmacie, agriculture, matériaux, etc.). De même, la capacité de façonner de manière précise, rationnelle et maîtrisée les systèmes biologiques (microorganismes, cellules ou organismes animaux ou végétaux) amorce l'émergence d'ensembles industriels déployant ces capacités dans de multiples secteurs : énergie, agriculture, biotechnologies de la santé, matériaux etc. Le vivant devient un objet d'ingénieur, qui le conçoit, le façonne, l'éprouve et l'adapte à un usage particulier.

Un changement de paradigme est à l'œuvre.

Un des principaux moteurs de cette transition réside dans l'ingénierie rationnelle des génomes. L'écriture, ou la ré-écriture, précise, robuste, reproductible des génomes s'appuie, d'une part, sur une connaissance toujours plus fine et accessible des séquences d'ADN qui les composent, et, d'autre part, sur des technologies permettant leur modification ciblée.

La transgénèse classique insère au hasard dans un génome un fragment génétique aux propriétés variables selon où il se retrouvera intégré et jamais de façon reproductible. Cette approche historique requiert un crible de multiples événements de transgénèse en espérant que l'organisme receveur voit sa physiologie ou sa morphologie peu ou pas affectée par le ou les multiples transgènes qui lui sont ajoutés. Son fond génétique (plante de rente, souche microbienne de production, lignée cellulaire industrielle, etc.) est, par ailleurs, usuellement domestiqué et amélioré par évolution graduelle et aléatoire (son génome dérivant par accumulation de mutations et les meilleures variétés étant sélectionnées).

Une nouvelle approche réside à présent dans l'ingénierie du génome lui-même. En ré-écrivant précisément des régions ou portions du génome, cette démarche relève d'une domestication accélérée et guidée. Adressant un spectre très large de souches ou d'organismes vivants (en théorie n'importe quelle espèce), elle permet d'utiliser rapidement les plus prometteurs ou les plus pertinents pour une application donnée (e.g. souches microbiennes « sauvages » plutôt que des objets de laboratoire, cellules humaines primaires plutôt que des lignées cancéreuses, etc.). En outre, cette approche permet le développement de traits qui ne résultent pas simplement de l'adjonction aléatoire d'un transgène, mais littéralement du façonnage d'un comportement programmé de l'organisme (souvent lié à de multiples facteurs génétiques). Enfin, elle adresse également l'adaptation de la physiologie et de la morphologie de l'espèce à l'usage qui lui est destiné.

L'ingénierie ciblée des génomes pour une domestication raisonnée des espèces biologiques

La capacité à dessiner puis façonner précisément le génome d'une espèce ou de cellules vivantes est central dans l'avènement de la révolution à l'œuvre, pratiquement toutes les espèces utilisant l'ADN comme support de leur programme génétique. Les outils existent aujourd'hui qui nous permettent de cibler et modifier n'importe quelle portion de n'importe quel élément génétique dans n'importe quel génome de n'importe quelle espèce. La précision, la robustesse, la reproductibilité de cette « chirurgie » génomique sont pratiquement et conceptuellement très distantes des contraintes inhérentes à la transgénèse aléatoire. En revanche, elles reviennent à ajouter un caractère maîtrisé voire guidé à l'amélioration et l'évolution des variétés et espèces.

Il faut escompter et espérer que l'ingénierie rationnelle des génomes se déploie pleinement pour libérer le potentiel du vivant dans de multiples secteurs d'activité. Elle constitue l'un des grands gisements de croissance des décennies à venir.

(Reçu le 13 janvier 2013)

¹ Vice-président exécutif et cofondateur de la Société Collectis.

LA BIOLOGIE DE SYNTHÈSE : ÉMERGENCE D'UNE ENTREPRISE

par Dominique **Thomas**¹

Alderys SAS est une entreprise de chimie biologique spécialisée dans le design et le développement de nouveaux procédés pour produire par voie biologique des molécules traditionnellement issues de la pétrochimie.

La société développe des nouveaux procédés de synthèse de composés destinés à l'alimentation animale, à la nutrition humaine, et au traitement de l'eau potable. Pour atteindre ces objectifs, Alderys a développé EvoLev®, une plateforme intégrée de création et de sélection de microorganismes dédiés à la production industrielle de composés chimiques par voie biologique.

Alderys a été créée par Dominique Thomas et Philippe Marlière, deux spécialistes du métabolisme intermédiaire des micro-organismes, qui possèdent également une grande expérience entrepreneuriale et industrielle.

Les procédés développés par Alderys sont une alternative aux synthèses pétrochimiques actuellement utilisées par l'industrie. Ils sont plus économiques, plus sûrs, et plus respectueux de l'environnement. Alderys s'inscrit pleinement dans une logique *greentech* : « *Produire mieux, plus propre et moins cher, dans une logique d'utilisation raisonnée des ressources* » : telle est la principale ambition de la société.

Alderys s'appuie sur une démarche rationnelle de biologie synthétique. Grâce à la sélection de nouveaux catalyseurs enzymatiques et à l'évolution robotisée de souches microbiennes, Alderys conçoit de nouvelles voies de biosynthèse, qui sont implémentées dans des souches optimisées pour garantir de forts rendements de production. Alderys a fait le choix stratégique de la levure pour implémenter ces tracés métaboliques innovants. L'objectif d'Alderys est d'appliquer cette démarche intégrée, fusionnant chimie et biologie, pour créer et domestiquer de nouvelles souches microbiennes, puis les adapter aux habitats industriels, de façon à rendre possible le développement industriel de nouveaux procédés à des coûts raisonnables. Pour atteindre de tels objectifs, seule une approche radicale de biologie synthétique, qui permet de dépasser les contraintes résultant de l'histoire naturelle des microorganismes, est aujourd'hui envisageable.

En effet, une caractéristique des systèmes vivants, souvent négligée par les biologistes eux-mêmes, est qu'ils sont constitués de plusieurs composants qui agissent ensemble suivant des procédés souvent imparfaits. La sélection naturelle promeut en effet des variants maximisant une caractéristique donnée à un moment donné, sans considération des améliorations ultérieures qui pourraient être apportées, de manière itérative et « aveugle ». Ainsi, la sélection naturelle suivant laquelle se sont développées les structures et fonctions biologiques, peut s'appréhender comme ayant donné naissance à des solutions suboptimales, notamment dans le domaine du métabolisme intermédiaire. Par ailleurs, il est certain que malgré l'extraordinaire diversité des organismes, certains mécanismes catalytiques n'ont pas été découverts au cours de l'évolution. Par conséquent, il est souvent possible de tracer des voies métaboliques améliorées (en nombre d'étapes, consommation énergétique...) par rapport aux voies naturelles.

Guidée par une vision rationnelle de chimie organique, Alderys met donc en œuvre une démarche radicale de biologie synthétique qui lui permet de dépasser les contraintes résultant de l'histoire naturelle des microorganismes, pour implémenter de nouveaux schémas réactionnels permettant la production à volonté de composés d'intérêt.

L'approche de biologie synthétique d'Alderys est soutenue par l'application de méthodes d'ingénierie rationnelles à la construction de nouvelles fonctions biologiques, de manière à en contrôler, de la manière la plus stricte, les étapes de construction et leur utilisation opérationnelle. Cette approche est aujourd'hui rendue possible par le développement conjoint de plusieurs techniques, dont le séquençage à grande échelle des génomes, la synthèse à façon et à faible coût de l'ADN, et le développement exponentiel de l'informatique et des techniques de robotique.

Alderys vend ses nouveaux procédés de production à des industriels de la chimie. Dès sa création, la société a convaincu le leader mondial d'un marché de plusieurs milliards d'euros de la qualité de sa R&D, et a déjà signé un premier contrat commercial de plusieurs millions d'euros sur les prochaines années.

¹ Directeur de la Société Alderys.

Créée à la fin de l'année 2010, Alderys a réuni une équipe de 25 personnes, chercheurs et ingénieurs, pour développer sa plateforme technologique et exécuter ses premiers projets de développement de procédés. Depuis sa création, la société a conclu trois contrats avec des partenaires industriels leaders sur leurs marchés et a consolidé sa structure financière en réalisant une levée de fonds auprès d'un investisseur institutionnel à la fin de l'année 2011.

(Reçu le 13 janvier 2013)

LA BIOLOGIE DE SYNTHÈSE : ÉVOLUTION NATURELLE, OU ÉVOLUTION ARTIFICIELLE ?

par Hervé Le Guyader¹

Tout semble avoir été dit sur la biologie de synthèse, présentée par certains comme technique magique apte à résoudre de nombreux problèmes actuels (nutrition, énergie, pollution...), par d'autres comme source d'un danger planétaire imminent, menaçant l'humanité dans son ensemble. Pour tenter de sérier les questions entre approche scientifique et diabolisation aux confins de l'irrationnel, il convient de replacer la réflexion sur cette technique dans un cadre évolutif, afin d'aider à éclairer ce conflit.

On proposera tout d'abord une rapide approche historique portant sur la compréhension du transformisme, et on rappellera les étapes indispensables au propos : échelle des êtres, sélection artificielle, sélection naturelle, variation, problèmes du progrès et de la finalité.

Le cadre étant tracé, le sujet sera approché par touches successives et, paradoxalement, ce n'est pas sur la biologie de synthèse qu'il convient de se focaliser en premier lieu, mais sur son acteur, l'homme. Au-delà des données de la biologie et de la paléontologie, la manière dont chacun imagine sa situation personnelle – et par là-même la projection qu'il réalise sur les autres – paraît être une clé du problème : est-il le sommet de l'échelle des êtres, ou le résultat de processus évolutifs naturels ? Possède-t-il des gènes particuliers, ou les partage-t-il avec d'autres organismes ? Ces questions, *a priori* banales, prennent sens quand on se rend compte qu'elles ne soulignent pas la distinction biologistes / non biologistes, mais traversent abruptement ces catégories.

Il convient alors de replacer dans ce même cadre la biologie de synthèse, en tant qu'action de l'homme, mais, bien sûr, en tenant compte de la situation supposée de ce dernier. Nous ne sommes plus alors à réfléchir de manière manichéenne uniquement sur la démarche, mais à souligner les multiples paramètres nécessaires à la réflexion, dont, par exemple, l'attitude prométhéenne ou l'attitude orphique, au sens de Pierre Hadot.

Mais ne nous y trompons pas : la situation est encore plus complexe, si on constate que tous ces systèmes – en particulier les systèmes cellulaires et les couples acteur / technique – sont bouclés. Or l'ensemble de ces processus récursifs constitue un système imprédictible... Paradoxalement, et malgré le dire de certains, on retrouve une fois de plus le célèbre aphorisme d'Héraclite : « la Nature aime à se voiler ».

En guise d'illustration, quelques exemples seront rapidement traités, comme les réalisations de Drew Endy ou de Craig Venter. Ils devraient mener à des suggestions d'approches nouvelles du problème de l'acceptabilité (ou non...) de la biologie de synthèse, et, au-delà, de la science du vivant.

(Reçu le 13 janvier 2013)

¹ Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie.

DISCUSSION

C. Lévêque¹. – Peut-on par assimilation à la biologie synthétique parler d'écologie synthétique. Les jardiniers, par exemple brassent des plantes venues du monde entier et reconstituent des écosystèmes artificiels.

H. Le Guyader. – Cette analogie me paraît bien intéressante. Au premier abord, on pourrait penser qu'il existe une différence importante, étant donné que dans un cas on manipule des gènes, dans l'autre des organismes. Or, quand on importe des plantes d'autres contrées, on importe en même temps tout un cortège d'organismes unicellulaires (bactéries, archées, ciliés...) ou pluricellulaires (champignons mycorhiziens, nématodes...) pour lesquels les transferts horizontaux de gènes surviennent fréquemment. Donc tous les niveaux de la biodiversité se trouvent concernés. Néanmoins, il semble que par la pratique, les jardiniers ont su minimiser les problèmes.

D. Sourdive. – Le travail que fait l'Homme sur les espèces ne se limite pas à des situations « isolées » (i.e. clonales ou axéniques). En fait, l'ingénierie d'éco-systèmes peuplés de multiples espèces est déjà à l'œuvre depuis des millénaires. L'ingénierie rationnelle de combinaisons ou « mélanges » d'espèces passera, sans doute, par une étape d'ingénierie de symbiotes, dans laquelle l'interdépendance et les échanges entre les espèces cohabitant seront élaborés pour stabiliser ces premiers éco-systèmes.

P. Devaux². – Vous avez une collaboration avec « l'University college » de Londres sur la modification des lymphocytes T en vue de lutter contre certaines maladies cancéreuses. Vers quelle échéance voyez-vous les essais cliniques ?

Quel est le statut légal des plantes modifiées par recombinaison homologue avec les méganucléases par exemple ?

D. Sourdive. – Nous sommes effectivement en collaboration sur ce projet, avec l'UCL, grand acteur académico-clinique dans les leucémies. L'horizon retenu pour aller chez l'homme est, sous toutes réserves, 2014-2015.

Pour connaître la réponse à cette question, nous nous sommes rapprochés des autorités de régulation, notamment aux États-Unis. Celles-ci nous ont indiqué que les plantes ayant des modifications précises (ponctuelles) de leurs propres gènes ou séquences résultant de l'utilisation de nos nucléases ne feraient pas (hors cas particulier théoriquement toujours possible) l'objet d'une régulation. En outre, une classification en « mutagenèse ciblée » des approches par nucléases vient de faire l'objet d'une publication co-signée par la Commission européenne.

B. Saugier³. – Comment voyez-vous la gestion du risque chez des organismes dans lesquels vous modifiez de 5 à 15 gènes sans être certains des conséquences sur le fonctionnement d'ensemble de l'organisme ?

Rappel : pour des réalisations technologiques complexes comme l'EPR de Flamanville ou le dernier avion de Boeing, les ingénieurs connaissent quelques déboires.

D. Sourdive. – Il faut, tout d'abord, rappeler que le risque fait l'objet d'une mesure toujours relative. On compare le risque de deux (ou plusieurs) scénarii pour déterminer, dans un ensemble de conditions données, le(s)quel(s) sont davantage ou moins risqués. Les pratiques ne sont pas « risquées ou non risquées » dans l'absolu, mais « davantage ou moins risquées les unes par rapport aux autres dans les conditions données ». En particulier, tenter une approche innovante ou se cantonner à une pratique établie sont deux scénarii dont on doit simplement mesurer le risque relatif global.

¹ Président de l'Académie d'Agriculture de France, Directeur de recherche émérite de l'IRD (ex ORSTOM).

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Directeur des biotechnologies, Maison Florimond-Desprez Veuve et Fils, 59242 Cappelle-en-Pévèle.

³ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur honoraire de l'Université Paris-Sud.

Les méthodes « classiques » procèdent par accumulation de multiples mutations dans le génome d'organismes vivants, allant même jusqu'à la mutagenèse « massive » (plusieurs plantes de rente aujourd'hui largement cultivées descendent de souches irradiées ou exposées à de puissants mutagènes). Elles impliquent l'introduction de mutations nombreuses, aléatoires, et, pour l'essentiel, non-contrôlées ni même connues. Ce processus d'accumulation de mutations, pratiqué depuis des milliers d'années, n'est pas ciblé.

A l'inverse, le scénario où quelques cibles sont modifiées dans le génome de façon précise est mathématiquement plus sûr (l'incertain – et donc l'aléa – est réduit). L'effet possible (ou probable) sur la physiologie de l'organisme est plus certain qu'avec l'accumulation de mutations aléatoires pratiquée par ailleurs.

Savoir précisément ce que l'on fait varier est évidemment plus sûr que de faire les choses au hasard...

En l'absence d'analyse détaillée, je ne saurais me prononcer sur les dossiers que vous évoquez.

D'une manière générale, l'élaboration d'un produit sophistiqué passe souvent par des versions qui s'améliorent à chaque fois. C'est le travail des ingénieurs que d'incorporer ce savoir et cette expérience dans les versions successives. Le cas de Boeing est intéressant. Pour mémoire, lorsque le quadriréacteur 747 « jumbo-jet » a été lancé, il connaissait régulièrement des pannes de moteur qui lui valait le surnom ironique de « meilleur tri-réacteur du monde ». Depuis, un travail remarquable a été accompli et des versions toujours plus sûres sont mises en service.

Une leçon que l'on pourrait en tirer tient à ce que le processus d'amélioration itératif (« essai-erreur ») est essentiel et nous a permis, au cours de l'histoire, d'améliorer nos vies (par exemple la santé, mais aussi la sécurité alimentaire, et bien d'autres points). Il est donc capital de s'autoriser à essayer, innover, tenter et recommencer encore et encore pour avancer.

Une autre simple leçon que nous pourrions en tirer tiendrait en ces quelques points :

- toute activité humaine (même le seul fait de vivre) est toujours risquée. Chaque jour des milliers de personnes innovent, créent, changent une habitude ou une pratique et, par là-même, perturbent un ordre établi ;
- quelle qu'elle soit, par essence, l'innovation (scientifique, sociétale, commerciale, administrative, etc.) emporte une part d'inconnu. Tant que cet inconnu n'a pas été levé par la mise en œuvre effective de cette innovation, il demeure un aléa et donc un risque relatif au scénario (ou cette innovation n'est pas mise en œuvre) ;
- il n'est donc pas question de supprimer le risque, vision illusoire et stérilisante (une société sans risque serait aussi une société sans liberté), mais bien de le reconnaître comme partie intégrante de l'activité humaine, et de le mesurer pour ce qu'il est.

H. Le Guyader. – Les expériences de Dew Endy sur le phage T7 montrent que les régulations ultérieures à la transformation sont imprédictibles. Nous sommes dans le cas de systèmes non linéaires d'une grande complexité dont les bassins attracteurs sont inconnus. La comparaison avec la technique (EPR et Boeing) va encore plus dans ce sens, car cette fois-ci le système est totalement artificiel, *a priori* connu et maîtrisé pas à pas ; dans le cas de la biologie de synthèse, on fait comme si on avait une connaissance complète de l'organisme sauvage et des gènes ajoutés.

D. Thomas. – Comme l'a rappelé M. Sourdivé, la notion de risque est relative. En ce qui concerne les modifications ciblées que nous apportons au génome de la levure, ces modifications ne concernent que des fonctions métaboliques de base et visent à rediriger des voies du métabolisme intermédiaire, en s'inspirant souvent de tronçons métaboliques qui préexistent soit de manière latente, soit dans des organismes naturels. Par ailleurs, il est important de noter que les levures qui sont employées depuis des centaines d'années par l'homme de manière industrielle sont souvent des « monstres » génétiques. Ainsi la levure de boulangerie, dont la production annuelle dépasse le million de tonnes, est une levure tétraploïde aneuploïde, qui présente des capacités de croissance largement supérieures, et de très loin, à celles de ses cousines naturelles « sauvages ». De même, les apports de la génomique ont révélé que la plupart des levures employées pour les fermentations alcooliques sont des souches hybrides dans lesquelles cohabitent des génomes différents. Ainsi, une bière célèbre produite par un brasseur du nord de l'Europe est obtenue grâce à l'emploi d'une levure qui s'est avérée contenir deux génomes fonctionnels indépendants, l'un provenant de la lignée *Saccharomyces cerevisiae*, le second de la lignée *Saccharomyces monacensis*. Les modifications ciblées que nous apportons au génome de la levure par ingénierie restent donc largement en deçà des bouleversements

géniques résultant des brassages génomiques naturels ou des domestications des levures opérées par l'homme depuis des centaines d'années.

Contrairement aux approches décrites par M. Sourdive, l'approche d'ingénierie génomique mise en œuvre chez Alderys, repose sur la notion qu'une unité génique est une entité indépendante, tant au niveau structural que fonctionnel. Les outils moléculaires développés par notre société tirent parti de cette indépendance et ont permis de démontrer, qu'au moins chez un organisme eucaryote « simple » comme la levure, cette notion reste opérationnellement valable. Il est possible que l'efficacité de cette approche chez la levure provienne pour partie de la forte compacité de ce génome dont l'évolution aurait en conséquence favorisé une organisation globale dépourvue de supra-domaines analogue à ce qui est identifié chez les métazoaires.

BIOLOGIE DE SYNTHÈSE : INNOVATIONS, PERSPECTIVES

CONCLUSION

par Jean-Claude **Mounolou**¹

La biologie de synthèse intéresse la Compagnie. Cette biologie associe étroitement l'action à la recherche. La connaissance scientifique s'y développe parallèlement à son appropriation par la société au lieu de la précéder. Cela va même plus loin : Pour répondre à leurs attentes et faire face à leurs responsabilités, consommateurs et entrepreneurs interpellent les chercheurs et exigent des informations et des techniques nouvelles. Leurs demandes précèdent ainsi certaines acquisitions de connaissance. En bref une appropriation sociale de la biologie de synthèse se réalise avant même que l'essentiel du potentiel de la discipline soit exploré !

Trois types d'acteurs coexistent dans le domaine.

Les chercheurs s'efforcent de mettre des connaissances nouvelles à la disposition de leurs concitoyens. Dans le droit fil de la tradition, les institutions scientifiques publient des articles, organisent des conférences et écrivent des rapports d'« experts » pour le pouvoir politique. Les entrepreneurs et les investisseurs produisent des objets commerciaux originaux. Les consommateurs utilisent ces objets et la société en apprécie l'intérêt éventuel.

Par ailleurs, certaines associations, convaincues de l'existence d'une « crise du progrès scientifique », mobilisent leurs militants. Fortes de leurs idéaux et des principes de responsabilité et de précaution, elles exigent des pouvoirs publics et des consommateurs un encadrement ferme de la discipline... si possible avant même que les connaissances soient acquises et les usages mis en œuvre !

Ce contexte a incité l'Académie à aller au-delà d'une confrontation entre tenants et adversaires de la biologie de synthèse. La parole a été donnée aux véritables acteurs, ceux qui sont la réalité de la relation entre les trois types d'acteurs.

Le titre de « biologie de synthèse » est parfaitement explicite. Il s'agit de concevoir et de réaliser une synthèse, i. e. de construire un individu vivant original qui n'a pas de passé mais est susceptible d'avoir un avenir. Actuellement la biologie de synthèse est une discipline foisonnante. Elle associe recherche biologique, ingénierie et politique. La définition donnée par M. Pernollet laisse bien entrevoir de nombreux objectifs : de la création de molécules informationnelles inédites à l'élaboration à partir d'« espèces sauvages » d'individus « domestiqués », de la cellule vivante minimale à des voies métaboliques ignorées. Dans cet élan, le vivant existant sert de modèle au vivant imaginable. La complexité, qui était un obstacle dans la biologie classique, est ici une source d'émotions, d'innovations, de conjectures et d'expériences.

Ainsi David **Sourdive** a exposé comment l'ingénierie des génomes génère de nouvelles connaissances moléculaires et prépare des usages nouveaux, allant jusqu'à la domestication d'espèces encore inexploitées.

Dominique **Thomas** a montré comment émerge dans la société actuelle une petite entreprise qui vise à répondre à des attentes spécifiques en usant des moyens institutionnels et financiers disponibles, et en se pliant aux nécessités sociales. L'exposé explique comment se concrétise un projet d'ingénierie métabolique et de production.

Enfin Hervé **Le Guyader** a discuté en quoi la biologie de synthèse constitue une rupture intellectuelle quand elle vise à élaborer et user d'organismes vivants qui n'ont pas de passé mais sont susceptibles d'avoir un avenir.

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur honoraire de l'Université Paris-Sud.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 30 janvier.

Chacun peut maintenant retirer un message particulier de chacune des trois conférences. M. **Le Guyader** nous rappelle que l'on ne saurait cependant demander à la science de servir sur commande une posture philosophique. Nous avons besoin d'espaces, de temps et de liberté pour exprimer nos différentes attentes et émotions. M. **Thomas** nous fait prendre conscience du rôle de l'ingénieur pour fonder et nourrir une relation entre ces espaces et la science. Enfin M. **Sourdive**, dans un entretien particulier, expliquait à propos des génomes, de leur connaissance et de leurs usages, que la société devait se doter de forums pour mener un débat ouvert sur les choix et les procédures sans empêcher *a priori* les décisions.

Permettez-moi pour conclure par deux commentaires plus personnels.

Le premier est à l'adresse de l'Académie : en s'installant dans la modernité la Compagnie pourrait avoir l'ambition d'être un tel forum.

Le second est à l'adresse des jeunes : par son potentiel et sa capacité d'associer attentes des citoyens et avancées de la connaissance, la biologie de synthèse est susceptible de devenir un champ de grande activité. Elle assemble un potentiel intelligent, une complexité technique, une intensité capitalistique, une multiplicité d'acteurs aux compétences différentes. Elle retient l'attention des medias et des idéologies. Elle interpelle les pouvoirs publics. C'est un domaine où des carrières nouvelles sont à créer.

LES ÉLICITEURS DE DÉFENSE CHEZ LES PLANTES

INTRODUCTION

par Pierre **Devaux**¹

La production végétale mondiale connaît chaque année des pertes de rendement importantes dues aux agents pathogènes. Celles-ci sont contrôlées, en partie, par l'utilisation massive de pesticides, fongicides et insecticides, lesquels représentent plus de 50% du marché des produits phytopharmaceutiques. L'utilisation systématique de ces produits est, cependant, de plus en plus contestée en raison de leurs impacts négatifs sur l'environnement. La mise en place de nouvelles réglementations a conduit au retrait de nombreuses molécules actives. La prise en compte des problèmes environnementaux et la diminution du nombre de produits autorisés renforcent l'intérêt de méthodes de lutte déjà établies telles que la résistance génétique, et requièrent le développement de nouvelles méthodes contre les agents pathogènes.

La voie génétique s'est dotée d'outils très performants de phénotypage et de génotypage. Par exemple, des différences de vitesse de diffusion d'un champignon rendu fluorescent dans des épillets de blé peuvent être visualisées puis, par l'utilisation de marqueurs moléculaires, il est possible de sélectionner les individus les plus résistants. Il y a un an, Claude **Fauquet** témoignait, à cette même tribune, de l'intérêt du génie génétique comme seule possibilité pour obtenir des maniocs résistants à la maladie des striures nécrotiques. Pas plus tard que la semaine dernière, dans la séance sur la biologie de synthèse, David **Sourdive** de Collectis montrait les potentialités extraordinaires de la recombinaison homologue induite par les méganucléases.

La séance de cet après-midi est réservée à une autre voie nouvelle et originale, celle des éliciteurs, molécules qui induisent une réaction de défense des plantes vis-à-vis des agents pathogènes. Il nous a semblé important, avec notre consœur Marie-Thérèse **Esquerré-Tugayé**, de faire le point des avancées dans ce domaine, tant sur les stratégies nouvelles et à haut débit d'identification de ces molécules que sur les expérimentations en serre et au champ jusqu'à leur homologation et leur développement commercial.

Pour ce faire, nous avons convié quatre spécialistes à venir présenter l'état d'avancement de leurs travaux.

1. Stimulation du système immunitaire des plantes : vers la mise au point d'une nouvelle stratégie de protection des cultures
Bernard **Dumas**, Directeur de recherche CNRS, UMR 5546 CNRS – Université Paul Sabatier, Toulouse.
2. Les rhamnolipides : des stimulateurs de défense des plantes prometteurs ? Conditions contrôlées du laboratoire *versus* champ
Fabienne **Baillieul**, Professeur, EA 4707, Université de Reims Champagne Ardenne.
3. Efficacité de produits stimulateurs et état de défense de la vigne : du gène au champ. Quel avenir ?
Marie-France **Corio-Costet**, Directeur de recherche INRA, UMR Santé et Agroécologie du Vignoble, Bordeaux.

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, directeur des biotechnologies, Maison Florimond-Desprez Veuve et Fils, 3, rue Florimond Desprez, BP 41, 59242 Cappelle-en-Pévèle.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 6 février.

4. Avantages pour une agriculture durable de la stimulation des défenses naturelles des plantes et défis à relever : le point de vue d'un acteur de l'agrofourniture François **Rollin**, Directeur des Affaires techniques et réglementaires, Groupe De Sangosse, Agen.

Marie-Thérèse **Esquerré-Tugayé** tirera les conclusions de cette séance.

STIMULATION DU SYSTÈME IMMUNITAIRE DES PLANTES : VERS LA MISE AU POINT D'UNE NOUVELLE STRATÉGIE DE PROTECTION DES CULTURES

par Bernard **Dumas**¹

Les plantes ont développé au cours de l'évolution un système immunitaire leur permettant de résister efficacement aux attaques des microorganismes pathogènes. L'induction de ce système repose sur la perception précoce de composés générés lors de l'interaction qu'ils soient d'origine microbienne ou végétale. Bien que ces composés, appelés éliciteurs, aient été mis en évidence il y a une trentaine d'années, ce n'est que récemment que des avancées majeures ont été réalisées concernant la compréhension des mécanismes moléculaires impliqués dans leur perception. Ces découvertes ont eu des répercussions immédiates sur les stratégies visant au développement de nouveaux produits phytosanitaires contenant des éliciteurs. En effet, l'utilisation des éliciteurs pour des applications agronomiques était régulièrement confrontée à des problèmes d'efficacité qui pouvaient être liés à un manque de connaissances sur le mode d'action des produits. Il est désormais acquis que les éliciteurs, autrefois appelés « éliciteurs généraux », ne fonctionnent pas sur toutes les espèces végétales et ne sont pas efficaces contre toutes les maladies. Ceci implique qu'il est nécessaire de prendre en compte à la fois le capital génétique des plantes ciblées et des microorganismes pathogènes pour que le traitement fonctionne. Ce changement de paradigme, basé sur des résultats obtenus avec des plantes modèles comme *Arabidopsis thaliana*, doit maintenant être validé pour des plantes d'intérêt agronomique. Néanmoins, les phases de mise au point et de développement des produits devront prendre en compte ces nouvelles données afin d'optimiser les chances d'obtenir des solutions efficaces.

Au cours de cet exposé, j'illustrerai les stratégies utilisées par notre équipe afin d'identifier de nouveaux composés éliciteurs. Des tests de criblage haut-débit ont été mis au point, basés sur le suivi de marqueurs moléculaires et de plantes modifiées exprimant un gène rapporteur placé sous le contrôle de séquences régulées lors de l'induction du système immunitaire. Le mode d'action des candidats est ensuite étudié par des approches globales, en particulier d'étude du transcriptome. L'ensemble de ces outils devraient permettre, non seulement d'identifier de nouveaux composés éliciteurs, mais également de prédire plus efficacement le spectre d'activité du produit final.

(Reçu le 6 février 2013)

LES RHAMNOLIPIDES : DES STIMULATEURS DE DÉFENSE DES PLANTES PROMETTEURS ? CONDITIONS CONTRÔLÉES DU LABORATOIRE VERSUS CHAMP

par Fabienne **Baillieu**²

La stimulation de l'immunité des plantes par un traitement avec un éliciteur constitue une stratégie de protection des plantes alternative à la lutte chimique. Le potentiel éliciteur de rhamnolipides (RL) a été évalué chez différentes plantes dans les conditions contrôlées du laboratoire et au champ.

Les RL sont des tensioactifs constitués d'une chaîne d'acide gras couplée à un ou deux rhamnoses. Ils sont produits par des bactéries du genre *Pseudomonas* et *Burkholderia*. Chez ces bactéries, ils peuvent être impliqués dans la motilité, la formation de biofilms, l'assimilation et la dégradation de composés peu

¹ Directeur de recherche CNRS, UMR 5546 CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse.

² Professeur des Universités, EA 4707, Université de Reims Champagne Ardenne.

solubles. Les RL présentent également des propriétés antimicrobiennes. A ce titre et en tant que tensioactifs, les RL ont de nombreuses applications pratiques en agro-industrie, détergence, environnement, hygiène et beauté. Biodégradables à 100%, les RL utilisés comme éliciteurs de l'immunité des plantes pourraient constituer une alternative de protection des plantes plus respectueuse de l'environnement que les pesticides actuellement utilisés.

Dans les conditions contrôlées du laboratoire, les RL stimulent différents événements typiquement impliqués dans l'immunité des plantes lorsqu'ils sont vaporisés sur des plants de vigne, de tabac, de blé ou sur la plante modèle arabelle. Ils protègent également les plants de vigne et d'arabelle contre la pourriture grise et le mildiou. Appliqués sur des plants de tomate, ils protègent les feuilles contre la pourriture grise.

Si les propriétés antimicrobiennes des RL peuvent intervenir dans l'effet de protection observé, il a été démontré, grâce à des mutants d'arabelle, que les propriétés élicitrices jouent elles aussi un rôle dans la protection observée.

L'application des RL au champ n'a, jusqu'alors, pas permis de reproduire les résultats probants obtenus en laboratoire. Une légère protection a été observée contre la septoriose du blé et aucune protection n'a pu être décelée vis-à-vis du mildiou et de la pourriture grise chez la vigne. De même, l'effet de protection a été inexistant contre la pourriture grise touchant les plants de tomate cultivés sous serre.

La mauvaise performance observée avec les RL au champ n'est malheureusement pas un cas isolé concernant les éliciteurs et pose la question de l'optimisation des conditions de traitement au champ et d'une meilleure compréhension des verrous entre les expériences en conditions contrôlées versus champ. De manière plus large, elle pose la question du développement effectif de la stratégie des éliciteurs comme alternative de protection à la lutte chimique. Plusieurs hypothèses expliquant le manque de performance au champ ont été émises et méritent d'être étudiées.

(Reçu le 6 février 2013)

EFFICACITÉ DE PRODUITS STIMULATEURS ET ÉTAT DE DÉFENSE DE LA VIGNE : DU GÈNE AU CHAMP. QUEL AVENIR ?

par Marie-France **Corio-Costet**¹

L'agrosystème viticole, sous forte contrainte culturale, est menacé par de nombreux bio-agresseurs. En l'absence de résistance variétale exploitée en France, cette culture est essentiellement sous protection chimique, en particulier face aux deux principaux ravageurs de la vigne (oïdium et mildiou), dont les traitements représentent plus de 60% des intrants chimiques. Devant la nécessité de préserver le patrimoine viticole, de mieux contrôler les intrants et leurs effets sur l'environnement, le plan Ecophyto vise une réduction d'emploi de 50%. Pour y parvenir, outre l'utilisation d'outils d'aide à la décision, la recherche de méthodes dites « alternatives » ou « complémentaires » est indispensable. C'est dans ce cadre, que les produits stimulateurs des défenses des plantes prennent toute leur importance.

Depuis la découverte des premiers éliciteurs, les expériences réalisées au laboratoire conduisent à d'excellents résultats, mais les résultats au vignoble sont souvent décevants. La variabilité observée *in natura* résulte de l'interaction de plusieurs paramètres mal connus et peu maîtrisés, à savoir : la variabilité génétique des populations de pathogènes et leur agressivité, la génétique, l'organe considéré et l'état physiologique de la plante, et bien évidemment les paramètres environnementaux qui influenceront les épidémies, la croissance de l'hôte, mais aussi la biodisponibilité des molécules élicitrices.

C'est pourquoi, nous avons développé une méthode appelée « BioMolChem » qui nous permet aujourd'hui d'appréhender l'état de défense de la vigne *via* une triple approche, biologique, moléculaire et

¹ Directeur de recherche INRA, UMR Santé et Agroécologie du Vignoble, Bordeaux.

biochimique. Ainsi, avons-nous montré que les voies de défense de la vigne, bien que déclenchées lors d'une attaque de pathogène, sont rapidement réprimées par ces derniers (oïdium et mildiou). Toutefois, l'utilisation de molécules stimulant les défenses de la vigne, conduit généralement à une surexpression des gènes impliqués dans les voies de défense, qui s'accompagne d'une accumulation spécifique de certaines phytoalexines, potentiellement impliquées dans la lutte contre les agents pathogènes.

À l'aide de ces différents marqueurs, l'état de défense de la vigne au vignoble après stimulation avec des molécules potentiellement élicitrices, peut être observé et montre qu'il est possible de protéger une plante *in natura* y compris sous de très fortes pressions épidémiques d'oïdium et de mildiou. De plus, des éliciteurs ajoutés à des fongicides au cours de programmes expérimentaux peuvent conduire à une diminution des intrants fongicides, tout en conservant un bon niveau de protection. Force est de constater cependant, que selon l'éliciteur, le cépage ou l'organe considéré, les effets peuvent être différents et qu'il est donc important de disposer de marqueurs et de méthodes capables de nous renseigner sur le statut de résistance de la plante afin de mieux évaluer l'efficacité de ces stimulateurs et leur potentiel de protection dans le cadre du développement de nouvelles stratégies de lutte. Il paraît probable, que les stimulateurs de défense des plantes, ne seront pas une alternative à la lutte chimique, mais plutôt une méthode complémentaire, lors de forte pression épidémique ou de remplacement en cas de faible pression parasitaire, voire un soutien à des variétés partiellement résistantes. Force est de constater qu'au niveau appliqué, de nombreuses questions demeurent si nous voulons une pleine maîtrise de ces nouvelles méthodes de lutte.

(Reçu le 6 février 2013)

AVANTAGES POUR UNE AGRICULTURE DURABLE DE LA STIMULATION DES DÉFENSES NATURELLES DES PLANTES ET DÉFIS À RELEVER : LE POINT DE VUE D'UN ACTEUR DE L'AGROFOURNITURE

par François **Rollin**¹

Afin de répondre à une demande croissante de nourriture et à une raréfaction des terres cultivables, le marché de l'agrofourmiture au niveau mondial ne connaît pas la crise : l'industrie phytosanitaire (\$ 50 milliards), des semences conventionnelles et OGM (\$ 34 milliards) et de la fertilisation (\$120 milliards) affiche une excellente santé.

Dans le marché de la protection des plantes, l'utilisation de moyens de lutte alternatifs d'origine naturelle (micro-organismes, macro-organismes, extraits de plante, médiateurs chimiques) ne représente en volume et en valeur qu'un faible pourcentage des utilisations (\$2 milliards environ), mais connaît une croissance spectaculaire, notamment en Amérique du Nord et en Europe. Ce développement du biocontrôle suscite l'engouement des grandes multinationales de l'agrochimie, qui se livrent une bataille acharnée pour prendre le contrôle des pionniers du développement des méthodes alternatives.

Sur le continent européen, de multiples produits visant à améliorer la santé des plantes en utilisant des propriétés élicitrices supposées ou avérées, sont mis à la disposition des agriculteurs. Le flou actuel existant entre les réglementations fertilisation et protection des plantes a stimulé l'inventivité de metteurs en marché, attirés par des coûts de développement inférieurs à ceux de l'agrochimie conventionnelle.

Néanmoins, plusieurs produits phytosanitaires, avec des propriétés de stimulations des défenses naturelles des plantes, ont reçu des autorisations de mise sur le marché et ont trouvé leur place dans des programmes de traitement de maladies nécessitant des interventions répétées durant la saison (par exemple, pour lutter contre le mildiou de la vigne ou celui de la pomme de terre). Parmi ces produits, on peut citer notamment les spécialités commerciales à base de laminarine, fenugrec, benzothiazole ou phosphite de potassium.

De nombreux textes réglementaires ont été publiés au cours de ces dernières années pour encourager le développement de solutions alternatives à l'agrochimie conventionnelle : par exemple le règlement CE

¹ Groupe de Sangosse, Directeur des Affaires techniques et réglementaires, Agen.

1107/2009 encadrant la mise sur le marché des produits de protection des cultures ou la directive CE 2009/128 sur l'utilisation durable des pesticides.

Pour répondre à cet objectif, le gouvernement français a mis en place le plan ECOPHYTO 2018 visant à réduire l'utilisation de 50% des produits phytosanitaires conventionnels, sous réserve de la mise au point de moyens de lutte alternatifs. De nombreuses initiatives ont été développées, décrites notamment dans le rapport du député Antoine Herth (avril 2011).

Enfin, des collaborations entre la recherche académique et l'industrie françaises ont vu le jour dans le cadre des appels d'offre du Fonds unique interministériel, afin de permettre la mise sur le marché de stimulateurs de défenses naturelles (Projet NEOPROTEC).

(Reçu le 6 février 2013)

DISCUSSION

H. Blanc¹. – Au sujet de l'Esca, maladie du bois qui résiste à tous les traitements, peut-on espérer une solution par l'emploi d'éliciteurs ?

Marie-France Corio-Costet. – Quelques essais de prétraitements avec un éliciteur sur des boutures ont été réalisés, avant d'effectuer des inoculations artificielles avec des agents des maladies du bois, qui semblent montrer que les plantes prétraitées avec l'éliciteur sont moins sensibles à la maladie, avec des tailles de nécrose dues à la présence du champignon qui sont plus petites. Cette piste est intéressante mais nécessite d'être explorée plus avant et de confirmer les résultats obtenus. Ceci pourrait être une piste pour protéger les plants, en pépinière, des maladies du bois. L'utilisation des éliciteurs ouvre un champ intéressant pour augmenter le niveau de défense des plantes qu'elles soient sensibles ou partiellement résistantes à des maladies. Toute la difficulté résidera dans les doses à appliquer, et à quel stade de développement les appliquer, sachant qu'un éliciteur ne conduit pas forcément à un niveau de protection identique sur tous les organes, comme je vous l'ai montré.

Paul Vialle². – Merci de ces exposés très complémentaires, très pédagogiques. Une suggestion : même si c'est une expérimentation assez longue, il paraît souhaitable d'associer recherche sur les éliciteurs et amélioration variétale.

Une question : on a eu des solutions que l'on a crues « miracles » lors de leur mise en œuvre :

- produits phytopharmaceutiques jusqu'à la découverte de l'écotoxicologie ;
- détection variétale et génétique jusqu'au contournement de résistances ;
- OGM jusqu'au rejet par l'opinion publique ;
- nouvelle agronomie et lutte biologique, mais problème d'efficacité ?

Si on arrivait à résoudre par une plante la question d'efficacité des éliciteurs, où serait selon vous le point faible : durabilité ? toxicité ? acceptabilité sociétale ou économique ?

B. Dumas. – Les éliciteurs, comme les autres produits, sont susceptibles de poser des problèmes de durabilité, de toxicité ou d'acceptabilité, cependant moins aigus que dans le cas des fongicides de synthèse. Cela dépendra i) de leur intégration dans les itinéraires techniques et de leur association avec d'autres méthodes de lutte, ii) de leur origine (naturelle ou de synthèse), et iii) de la mise sur le marché de produits réellement efficaces et correctement évalués.

Luc de Capeyre³. – Compte tenu de la spécificité de la réponse des éliciteurs (ex : Athaliana), quel est l'intérêt du choix des plantes modèles pour le criblage de SDN ? Quelle peut-être la généralité de ces résultats ?

B. Dumas. – Le recours à des plantes modèles (*Arabidopsis*, *Brachypodium*, *Medicago*...) est encore essentiel pour progresser rapidement sur l'identification de molécules actives et la compréhension de leur mode d'action. Le problème de la spécificité n'est pas aussi important que lorsqu'on étudie les systèmes de type "gène pour gène" et on observe généralement des variations quantitatives de réponse aux éliciteurs et plus rarement des situations de tout ou rien. Il n'en reste pas moins que la notion d'éliciteur « général » a vécu, et qu'il est donc impossible de généraliser *a priori* les résultats obtenus sur une espèce végétale (modèle ou non).

J.L. Bernard⁴ – Le modèle *Arabidopsis* a toute sa valeur pour mettre en évidence l'intérêt potentiel d'un mécanisme physiologique ou d'un éliciteur donné. Cela étant, passer d'un végétal herbacé élevé en

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, ancien Directeur du Service des Haras, des Courses et de l'Équitation, ingénieur général honoraire du GREF.

² Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, vice-président honoraire du CGAAER, ancien Directeur de l'INA P-G, ancien Directeur général de l'INRA, ancien Président de l'AFSSA et de l'AFSSET, Président du CTPS.

³ CIRAD.

⁴ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Consultant Agriculture-Protection des plantes-Environnement.

conditions contrôlées à une vigne en plein champ soumise aux stress naturels est un exercice bien difficile. Ne croyez-vous pas que la mise au point d'indicateurs de qualité physiologique des plantes cultivées permettrait de mieux cibler l'état de réceptivité de la culture aux apports d'éliciteur exogène ? Y-a-t-il des recherches en ce sens ?

B. Dumas. – Il serait important de développer des projets visant à étudier l'importance de stress abiotiques (sécheresse, température) sur la réponse aux éliciteurs. Les résultats obtenus pourraient servir de base pour optimiser l'application des éliciteurs au champ. A ma connaissance, il n'y a pas de recherches sur ce thème, mais des études ont déjà montré que la résistance des plantes aux microorganismes pathogènes est liée aux stress abiotiques.

Marie-France Corio-Costet. – Des indicateurs de la qualité physiologique existent pour différentes plantes d'intérêt et en particulier pour la vigne, au travers des niveaux d'expression de gènes impliqués dans le métabolisme primaire, ou encore dans les défenses de la vigne. Ce qui permet, entre autres, d'évaluer l'état de défense de la plante, ou son activité photosynthétique, ou encore certaines activités hormonales. Force est de constater que le lien entre état physiologique et niveau de réponse de la plante est loin d'être connu et maîtrisé. L'utilisation de variétés résistantes ou partiellement résistantes est un outil très utile pour comprendre comment allier l'état physiologique et le développement d'une plante avec les défenses. C'est un thème à développer si nous voulons comprendre pourquoi la mise en place de ces défenses est si variable en conditions naturelles sans oublier qu'il sera toujours délicat de concilier métabolisme primaire et secondaire de manière concomitante.

B. Le Buanec⁵. – Ma première question sera brève car elle a déjà été évoquée par Paul Vialle. Elle s'adresse à Bernard Dumas. Vous nous avez dit que l'efficacité des éliciteurs dépendait du génotype de la plante à laquelle il était appliqué, en prenant l'exemple de différentes lignées d'*Arabidopsis thaliana*. Or, pour la plupart des espèces cultivées, il y a des centaines de variétés. Cette dépendance au génome va donc poser un très gros problème de criblage.

B. Dumas. – L'approche idéale consisterait à identifier de façon conjointe les produits éliciteurs les plus "généralistes" et les variétés les plus aptes à répondre aux traitements. L'exemple montré sur *Arabidopsis* avait pour but d'illustrer les variabilités observées au sein d'une espèce sauvage qui pouvait expliquer le manque d'efficacité d'un produit. En ce qui concerne le criblage, il est probable que des outils performants seront disponibles à l'avenir sur les espèces d'intérêt agronomique permettant de réaliser des criblages haut-débit directement sur des variétés sélectionnées.

B. Le Buanec. – Ma deuxième question va à François Rollin. Vous nous avez dit que les éliciteurs étaient une solution providentielle pour l'agriculture biologique. Or, dans la plupart des exemples donnés, ils sont utilisés avec des fongicides de synthèse. Ceci n'est donc pas applicable à l'agriculture biologique.

F. Rollin. – Effectivement, les produits de protection des cultures utilisables en agriculture biologique sont soumis à un cahier des charges très précis et sont listés dans l'Annexe II du Règlement européen 889/2008. Parmi les produits listés, on trouve principalement des produits d'origine naturelle ou des produits de synthèse mimant ou se rapprochant de substances existantes dans la nature : c'est le cas par exemple des médiateurs chimiques. Le point présenté dans l'exposé reprend l'idée que le nombre de solutions pour lutter contre les maladies des plantes est, pour certains usages (parasite * culture), très limité en agriculture biologique : le développement de nouveaux produits de biocontrôle en général, et d'éliciteurs en particulier, peut, dans certains cas, résoudre des impasses techniques pour les producteurs en production biologique.

É. Choné⁶. – A l'occasion de cette séance nous assistons à l'émergence de techniques de protection des plantes qui répondent à une attente forte du public. J'aimerais susciter l'enthousiasme de notre Compagnie et suggérer qu'elle émette un avis aux pouvoirs publics pour que cette nouvelle filière des techniques de bio contrôle soit encouragée par tous les moyens à la disposition de la puissance publique, depuis la recherche jusqu'aux mises en marché.

⁵ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, membre de l'Académie des Technologies.

⁶ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, ancien Directeur d'AGROPOL.

CONCLUSION

HIER, AUJOURD'HUI, DEMAIN : LES ÉLICITEURS DE DEFENSE DES PLANTES

par Marie-Thérèse **Esquerré-Tugayé**¹

« Éliciteur » n'est pas un mot de la langue française ; il dérive d'« *elicitor* », terme introduit pour la première fois dans la littérature scientifique par le professeur Noël Keen en 1972 pour désigner des composés de microorganismes pathogènes de plantes, capables d'induire, comme le parasite lui-même, des réactions de défense chez l'hôte (1). C'est ainsi qu'il montra la présence, chez *Phytophthora megasperma*, de composés élicitant dans le soja la synthèse de phytoalexines, parmi lesquels le mycolaminarane, un polymère ramifié de β -D-glucose apparenté à la laminarine (2).

Mais la percée la plus remarquable dans la décennie qui a suivi fut accomplie par le professeur Peter Albersheim et son équipe qui étendirent la notion d'éliciteur et, surtout, furent les premiers à isoler à l'état pur à partir du même *P.megasperma* un hepta- β - glucane actif à très faible concentration, sans doute l'éliciteur le plus actif jamais isolé (3,4).

Durant ces années-là, plusieurs équipes avaient aussi engagé des travaux sur les éliciteurs, leur diversité, leur structure, notamment en France (5,6), parfois en collaboration (7) avec des industries agrochimiques (Rhône-Poulenc, Monsanto...). Il était alors apparu que les éliciteurs sont de nature chimique diverse, impliquant aussi bien des oligosaccharides, des peptides, des protéines, des lipides, provenant de microorganismes mais aussi de plantes. Bien que des essais de transposition au champ eurent lieu, c'est surtout en tant que révélateurs du potentiel de défense des plantes qu'ils furent utilisés en laboratoire.

Le regain d'intérêt auquel on assiste actuellement pour ces molécules, est porté par plusieurs faits marquants qui ont jalonné ces trente dernières années, parmi lesquels :

- la remarquable accélération de la recherche et des connaissances en biologie, permise par l'avènement de la biologie moléculaire et par les apports conjoints de la génétique, du génie génétique, du séquençage des génomes, de la génomique fonctionnelle, de l'imagerie ;
- l'avancement concomitant des connaissances dans le domaine des interactions entre les plantes et les microorganismes, qui a mis en lumière la place centrale de motifs éliciteurs (dénommés PAMP, MAMP, DAMP) dans le déclenchement de l'immunité innée (8), de manière analogue à ce qu'il en est chez les animaux (9) ;
- l'augmentation de la population mondiale, supérieure à 2 milliards d'habitants entre 1975 et 2013, d'où des besoins alimentaires accrus, actuellement et dans la perspective de la croissance démographique à venir ;
- la prise de conscience qu'il faut désormais produire davantage et mieux, tout en préservant la biodiversité, l'environnement, et en réduisant les intrants ;
- la résurgence de maladies récurrentes, telles le mildiou de la pomme de terre ou la graphiose de l'orme, et l'apparition de maladies émergentes dont le chancre coloré du platane dans le Midi de la France est emblématique, provoquées par l'introduction de nouvelles souches ou espèces de parasites, souvent liée aux migrations humaines, et contre lesquelles on ne dispose pas ou que peu de lutte chimique appropriée.

Dans ce contexte, l'échéance 2018 accentue l'intérêt porté aux éliciteurs de défense des plantes dont l'utilisation permettrait, conjointement à d'autres pratiques agronomiques, sinon de se substituer totalement, du moins de réduire l'utilisation des pesticides. Cependant, il apparaît à travers les présentations de ce jour que, malgré la compréhension avancée du mode d'action des éliciteurs et leur efficacité éprouvée en laboratoire, le succès au champ n'est pas toujours garanti. Parmi les questions posées par l'auditoire, sont notamment revenues celles concernant : la transposition sur plantes de grande culture de résultats obtenus sur plantes modèles en conditions contrôlées ; l'apport potentiel du choix d'indicateurs de réceptivité de telles cultures aux éliciteurs ; l'existence d'effets sélectifs en fonction des génotypes ; leur utilisation conjointe à celle de fongicides de synthèse ; la durabilité de leur activité voire leur toxicité éventuelle...

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur de physiologie-microbiologie végétales à l'Université Paul Sabatier-Toulouse III.

Pour répondre à ces interrogations, il est nécessaire de multiplier les essais « au champ » sur diverses cultures, intégrant divers éliciteurs dans des itinéraires agro-écologiques, impliquant aussi le secteur de l'amélioration des plantes ; en France, des réseaux associant des laboratoires publics et privés sont constitués en ce sens. Il est également indispensable de renforcer la recherche fondamentale en génétique et en phytopathologie, et d'identifier de nouveaux éliciteurs. A cet égard, on peut concevoir un apport de la chimie basé sur la structure 3D de molécules élicitrices actives et de structures apparentées afin de dégager des motifs pouvant servir de modèle pour la chimie de synthèse de molécules innovantes, comme cela est décrit dans d'autres domaines (10). L'exploration de nouvelles sources naturelles est également très prometteuse, et peut servir à valoriser une biomasse par ailleurs indésirable : ainsi en est-il des ulvanes, oligosaccharides dérivés des algues vertes *Ulva armoricana* (11).

Enfin n'oublions pas que c'est à la recherche sur les défenses des plantes que l'on doit d'avoir montré que la « bouillie bordelaise », premier produit phytosanitaire à effet antifongique introduit par Pierre Millardet à la fin du dix neuvième siècle, possède également un effet éliciteur.

Monsieur le Président, Monsieur le Secrétaire perpétuel,

La séance de ce jour concerne à la fois les scientifiques, les acteurs économiques, et les attentes de la société civile. Sous ses différents aspects, elle s'inscrit dans les axes du programme de travail désormais fixé pour l'Académie d'Agriculture.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) KEEN N.T., 1972. – Specific elicitors of plant phytoalexin production : determinants of race specificity in pathogens, *Science* **187**, 74-75.
- (2) YOSHIKAWA M., KEEN N.T. and WANG M.C., 1983. – A receptor on soybean membranes for a fungal elicitor of phytoalexin accumulation. *Plant Physiol.* **73**, 497-506.
- (3) SHARP J.K., MCNEIL M. and ALBERSHEIM P., 1984. – Host-pathogen interactions. XXVII. The primary structures of one elicitor-active and seven elicitor inactive hexa (β -D-glucopyranosyl)-D-glucitols isolated from the mycelial walls of *Phytophthora megasperma* var. *glycinea*. *J. Biol. Chem.* **259**, 11321-11336.
- (4) ALBERSHEIM P. and DARVILL A., 1985. – Oligosaccharins. *Sci. Am.* **253**, 58-64.
- (5) TOPPAN A. and ESQUERRÉ-TUGAYÉ M.T., 1984. – Fungal glycopeptides which elicit the synthesis of ethylene in plants. *Plant Physiol.* **75**, 1133-1138.
- (6) RICCI P., BONNET P., HUET J.C., SALLANTIN M., BEAUVAIS-CANTE J.M., BRUNETEAU M., BILLARD V., MICHEL G. and PERNOLLET J.C., 1989. – Structure and activity of proteins from pathogenic fungi *Phytophthora* eliciting necrosis and acquired resistance in tobacco. *Eur. J. Biochem.* **183**, 555-563.
- (7) PELISSIER B., ROBY D., TOPPAN A. and ESQUERRE-TUGAYE, 1985. – Effets des éliciteurs fongiques sur les plantes. Colloque « Recherche en Agrochimie à l'interface Chimie-Biologie », Rhône-Poulenc Agrochimie, Lyon.
- (8) BOLLER T. and FÉLIX G., 2009. – A renaissance of elicitors : perception of microbe-associated molecular patterns and danger signals by pattern-recognition receptors. *Ann. Rev. Plant Biol.* **60**, 379-406.
- (9) ESQUERRE-TUGAYE M.T., and HOFFMANN J., 2011. – L'immunité innée chez les plantes et les animaux, Séance commune Académie d'Agriculture-Académie des sciences du 14 décembre 2011. *C. R. Acad. Agric. Fr.* **97**, n°3, 149-154.
- (10) SANZ G., THOMAS-DANGUIN T., HAMDANI E.H., LE POUPON C., BRIAND L., PERNOLLET J.C., GUICHARD E. and TROMELIN A., 2008. – Relationships between molecular structure and perceived odor quality of ligands for a human olfactory receptor. *Chem. Senses* **33**, 639-653.
- (11) JAULNEAU V, LAFITTE C, CORIO-COSTET M.F, STADNIK M.J, SALAMAGNE S., BRIAND X., ESQUERRÉ-TUGAYÉ, M.T., DUMAS B., 2011. – An *Ulva armoricana* extract protects plants against three powdery mildew pathogens *Eur. J. Plant Pathol.* **131**, 393–401.

QUAND LES PLANTES MANQUENT D'EAU ÉCOPHYSIOLOGIE ET PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION

INTRODUCTION

par Bernard **Saugier**⁶

L'eau est nécessaire à la vie sur Terre. Ses molécules sont fortement polaires et donc très liées entre elles sous forme liquide ou solide, d'où une forte chaleur latente de fusion de la glace et d'évaporation de l'eau liquide, qui interviennent dans la régulation du climat. La vie a commencé dans l'eau et a évolué en milieu aquatique pendant plus de 3 milliards d'années avant de coloniser les continents il y a moins de 500 millions d'années, développant diverses astuces pour s'adapter au manque d'eau, en particulier chez les plantes qui n'ont pas la capacité de se déplacer vers des points d'eau.

La force osmotique induit une pression de l'eau dans les cellules vivantes. Faible dans les cellules animales, elle peut atteindre 5 à 10 bars dans les cellules végétales dont la paroi empêche la cellule d'exploser, comme un pneu protège une chambre à air.

Les plantes ont besoin d'avoir un épiderme poreux pour pouvoir absorber le dioxyde de carbone présent en faible concentration dans l'atmosphère (0,04 % en volume). Les feuilles sont ainsi couvertes de stomates d'ouverture variable, qui laissent passer les gaz entrant ou sortant. Comme l'air interne aux feuilles est très humide, il en résulte une sortie d'eau vapeur, ou transpiration. Ainsi, toute entrée de CO₂ dans la plante s'accompagne d'une perte en eau, conduisant à un dessèchement local des cellules foliaires. Ce dessèchement entraîne une diminution de potentiel hydrique, provoquant un mouvement d'eau liquide du sol vers les feuilles à travers les vaisseaux des racines et des tiges. L'eau est sous tension (pression négative) dans ces vaisseaux, et supporte cet état grâce aux forces de cohésion entre ses molécules. Lorsque l'eau devient rare, cette tension augmente et il peut se former une bulle d'air dans le vaisseau : c'est le phénomène de cavitation qui stoppe la montée de sève dans le vaisseau correspondant. Si trop de vaisseaux sont affectés, il en résulte une chute de l'absorption d'eau qui peut conduire à la mort de la plante.

Bien avant cela, un déficit hydrique modéré affecte la croissance en diminuant l'expansion des cellules et leur division. Les espèces y sont plus ou moins sensibles. Lorsque le déficit augmente, il y a fermeture partielle des stomates, ce qui diminue l'entrée de CO₂ et donc la photosynthèse. Nous allons entendre parler de ces processus, de leur variabilité et de la possibilité d'utiliser cette variabilité en sélection, avec quatre présentations.

Hervé **Cochard** (INRA, Clermont-Ferrand) est un spécialiste de la cavitation chez les arbres, sa présentation associe un généticien de Bordeaux, Christophe **Plomion**. François **Tardieu** (INRA Montpellier) nous parlera de la recherche de génotypes tolérants à la sécheresse pour les plantes de grande culture dans le contexte agricole français. Jean-Louis **Prioul** (Université Paris-Sud Orsay) discutera les approches des semenciers américains pour commercialiser des variétés plus tolérantes à la sécheresse, en incluant les biotechnologies. Enfin, Jean **Beigbeder** (Vice-Président de Pro-Maïs) nous donnera le point de vue d'un sélectionneur.

⁶ Membre de l'Académie d'Agriculture de France et ancien Président, Professeur honoraire de l'Université Paris-Sud. **C.R.Acad. Agric. Fr.**, 2013, 99, n°2. Séance du 13 février.

MÉCANISMES DE RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE DES ARBRES : DE NOUVELLES PISTES POUR LEUR AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE ?

par Hervé **Cochard**¹ et Christophe **Plomion**²

Améliorer la tolérance à la sécheresse des arbres et des écosystèmes boisés est un enjeu majeur pour la filière forestière et l'arboriculture. On le sait, la disponibilité en eau est déjà l'un des principaux facteurs qui limite la production de ces écosystèmes. On le sait également, les différents scénarios climatiques s'accordent à prévoir une augmentation de l'aridité moyenne du climat et surtout une amplification du risque d'événement de sécheresses extrêmes. Dès lors, deux défis sont à relever. Le premier est commun aux plantes de grandes cultures : il s'agit de maintenir une productivité élevée sous un climat plus aride. Le second est plus spécifique aux plantes pérennes : il consiste à assurer la survie jusqu'à récolte de la plantation, et en particulier à permettre la résilience à des sécheresses extrêmes. Compte tenu de la durée d'une rotation forestière (de la décennie au siècle et plus) et de la rapidité annoncée des perturbations climatiques, les arbres plantés aujourd'hui subiront très probablement les effets néfastes du climat avant leur exploitation. Il devient alors nécessaire de proposer dès maintenant des pistes pour garantir la productivité et la résilience de ces cultures face à une ressource en eau en diminution pendant la période de croissance.

Une partie de la solution se trouve certainement dans la définition de nouveaux itinéraires techniques (par exemple : amélioration du bilan hydrique par contrôle de l'indice foliaire des peuplements), mais les espoirs portent aussi sur les possibilités d'amélioration génétique des essences forestières qu'elles soient indigènes ou exotiques. Une amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse des ligneux requiert au préalable l'identification de critères pertinents et opérationnels pour l'évaluation du matériel végétal. Les recherches récentes menées sur les mécanismes de tolérance à la sécheresse des arbres ont mis en évidence deux paramètres majeurs de fonctionnement qui semblent satisfaire à ces critères. Le premier concerne l'utilisation de la discrimination isotopique du carbone comme marqueur de l'efficacité d'utilisation de l'eau des arbres, et donc, potentiellement, de leur capacité à produire de la biomasse en conditions plus arides. Le second paramètre est la résistance à la cavitation des vaisseaux conducteurs de sève brute, un trait fortement corrélé à la capacité de survie des espèces à des sécheresses extrêmes. Des travaux en cours sur la variabilité intra/interspécifique et les bases génétiques de ces traits permettent maintenant de préciser leur utilisation potentielle dans des programmes d'amélioration génétiques qu'ils soient 'classiques' ou qu'ils reposent sur des perspectives ouvertes par les biotechnologies.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) CHOAT B., JANSEN S., BRODRIBB T.J., COCHARD H., DELZON S. *et al.* 2012. – Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* **491**, 752–755.
- (2) LAMY J-B, BOUFFIER L, BURLETT R, PLOMION C, COCHARD H, DELZON S 2011. – Uniform selection as the primary evolutionary force of cavitation resistance across a species range. *PloS One* **6** : e23476.
- (3) BRENDEL O., COCHARD H., 2011. –Comment les espèces végétales s'adaptent au stress hydrique. In « *L'eau pour les Forêts et les Hommes en Région méditerranéenne: un équilibre à trouver* ». Y BIROT, C GRACIA, M PALAHI (ed). European Forest Institute, p 84-89.

(Reçu le 4 février 2013)

¹ INRA, UMR-PIAF, Clermont-Ferrand.

² INRA, UMR-BIOGECO, Bordeaux.

DES GÉNOTYPES TOLÉRANTS À LA SÉCHERESSE DANS LE CONTEXTE AGRICOLE FRANÇAIS ?

par François **Tardieu**¹

Les plantes ont évolué en environnements secs pour garantir leur survie et leur reproduction. Ceci se produit souvent au détriment de la production de biomasse, par exemple *via* une réduction de surface foliaire (transpiration mais aussi photosynthèse réduites) ou de nombre de grains (semences moins nombreuses mais viables). Dans un contexte agricole, on cherche des stratégies moins conservatrices qui maintiennent les rendements dans les conditions de déficit généralement modéré observé en parcelles cultivées. Des caractères comme la vitesse de croissance foliaire, la sensibilité à l'avortement des grains ou l'efficacité de l'eau peuvent alors avoir des effets opposés suivant le scénario climatique (Tardieu, 2012). En agriculture, la tolérance à la sécheresse n'implique donc pas de mécanismes de résistance à proprement parler, mais l'optimisation de la stratégie de la plante par rapport aux scénarios climatiques. Il importe donc de distinguer, d'une part, l'analyse de la variabilité génétique des caractères impliqués et, d'autre part, le pronostic sur leurs conséquences sur le rendement qui dépendent du scénario climatique considéré (Tardieu et Tuberosa, 2010).

La sélection pour la tolérance à la sécheresse se heurte à la diversité des scénarios climatiques possibles, même dans une région donnée. Un dispositif expérimental comprenant quelques dizaines d'essais peut être considéré comme un tirage aléatoire, parmi beaucoup d'autres, des scénarios pouvant se produire dans la région. La fixation d'allèles d'intérêt « oscille » alors suivant les années (Chapman *et al.*, 2003; Hammer *et al.*, 2006). Plusieurs groupes et sociétés semencières ont recours à la modélisation pour mieux gérer la variabilité des climats et sélectionner *in silico* pour les climats futurs (Messina *et al.*, 2011).

Une large variabilité génétique de réponse de la croissance foliaire au déficit hydrique existe chez plusieurs céréales. Chez le maïs, certaines lignées poursuivent leur croissance à un potentiel hydrique du sol de -1.3 MPa alors que d'autres la cessent à -0.6 MPa. Ce caractère est contrôlé par une vingtaine de régions génomiques, dont la plupart ont également un effet sur la croissance de plantes irriguées soumises à une demande évaporative élevée (Welcker *et al.*, 2011). Les polymorphismes causaux et les mécanismes impliqués sont de mieux en mieux connus. Les processus hydrauliques semblent avoir une place prépondérante dans cette variabilité génétique.

La sensibilité à l'avortement des grains a également une large variabilité génétique. Sauf pour des stress intenses et plutôt tardifs, elle ne dépend pas de l'état carboné des organes reproducteurs, mais correspond à un processus développemental actif et contrôlé par la plante.

Les régions génomiques qui contrôlent la croissance d'un organe (ex. : les feuilles) affectent d'autres organes comme les racines, le jeune épi ou la tige (Dignat *et al.*, 2013). En particulier, une partie au moins du contrôle génétique de l'avortement est commun avec celui de la sensibilité de la croissance foliaire. Il s'ensuit des corrélations entre la sensibilité de la croissance foliaire mesurée en plateforme de phénotypage et celle du nombre de grains au champ (Chapuis *et al.*, 2012).

Les éléments ci-dessus ont des conséquences importantes pour la conception de génotypes tolérants :

- une stratégie fondée sur l'exploitation des ressources génétiques naturelles est crédible étant donnée la variabilité génétique existante (allèles tropicaux en particulier) ;
- une combinaison d'essais en plateformes de phénotypage et en champs instrumentés est une voie prometteuse pour identifier les polymorphismes causaux (ou les formules de sélection génomique) associés aux caractères d'intérêt. Ceci permet de « disséquer » les phénotypes en variables plus héréditaires et prédictives du comportement des plantes, par rapport à un simple réseau multi local d'essais ;
- l'intérêt agronomique des allèles ou formules génomiques ainsi déterminés peut être analysé de façon

¹ INRA, LEPSE, 2 place Viala, [Montpellier. francois.tardieu@supagro.inra.fr](mailto:francois.tardieu@supagro.inra.fr)

fréquentielle en utilisant une combinaison de modèles de culture (Hammer *et al.*, 2010) et de réseaux d'essais au champ ;

- il en va de même pour le processus de sélection lui-même, où le poids d'expérimentations, de traitements expérimentaux ou de QTLs peut être pondéré par la fréquence à laquelle ils se produisent (Cooper *et al.*, 2009).

Cette stratégie est testée par plusieurs compagnies semencières. Elle est la base de projets comme le projet (JE FP7 DROPS) centré sur la tolérance à la sécheresse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) CHAPMAN S., COOPER M., PODLICH D., HAMMER G., 2003. – Evaluating Plant Breeding Strategies by Simulating Gene Action and Dryland Environment Effects. *Agronomy Journal* **95**, 99, 1-13.
- (2) CHAPUIS R, DELLUC C, DEBEUF R, TARDIEU F, WELCKER C., 2012. – Resiliences to water deficit in a phenotyping platform and in the field: How related are they in maize? *European Journal of Agronomy* **42**, 59-67.
- (3) COOPER M., VAN EEUWIJK F.A., HAMMER G.L., PODLICH D.W., MESSINA C., 2009. – Modeling QTL for complex traits : detection and context for plant breeding. *Current Opinion in Plant Biology* **12**, 231-240.
- (4) DIGNAT G., WELCKER C., SAWKINS M., RIBAUT J.M., TARDIEU F., 2013. – The growths of leaves, shoots, roots and reproductive organs partly share their genetic control in maize plants. *Plant, Cell & Environment*: n/a-n/a.
- (5) HAMMER G., COOPER M., TARDIEU F., WELCH S., WALSH B., VAN EEUWIJK F., CHAPMAN S., PODLICH D., 2006. – Models for navigating biological complexity in breeding improved crop plants. *Trends in Plant Science* **11**, 587-593.
- (6) HAMMER G.L., VAN OOSTEROM E., MCLEAN G., CHAPMAN S.C., BROAD L., HARLAND P., MUCHOW R.C., 2010. – Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany* **61**, 2185-2202.
- (7) MESSINA C.D., PODLICH D., DONG Z.S., SAMPLES M., COOPER M., 2011. – Yield-trait performance landscapes: from theory to application in breeding maize for drought tolerance. *Journal of Experimental Botany* **62**, 855-868.
- (8) TARDIEU F., 2012. – Any trait or trait-related allele can confer drought tolerance : just design the right drought scenario. *Journal of Experimental Botany* **63**, 25-31.
- (9) TARDIEU F., TUBEROSA R., 2010. – Dissection and modelling of abiotic stress tolerance in plants. *Current Opinion in Plant Biology* **13**, 206-212.
- (10) WELCKER C., SADOK W., DIGNAT G., RENAULT M., SALVI S., CHARCOSSET A., TARDIEU F., 2011. – A Common Genetic Determinism for Sensitivities to Soil Water Deficit and Evaporative Demand : MetaAnalysis of Quantitative Trait Loci and Introgression Lines of Maize. *Plant Physiology* **157**, 718-729.

(Reçu le 4 février 2013)

OÙ EN SONT LES SEMENCIERS QUANT À LA COMMERCIALISATION DE VARIÉTÉS PLUS TOLÉRANTES À LA SÉCHERESSE ? QUELLE EST ET QUELLE SERA LA PLACE DES BIOTECHNOLOGIES?

par Jean-Louis Prioul¹

Pour les semenciers, l'amélioration de la tolérance à la sécheresse est un enjeu considérable face à l'augmentation des événements climatiques extrêmes observée ces derniers dix à quinze ans, de par le monde. Du point de vue agronomique c'est aussi un défi qu'il n'est pas aisé de relever à la fois en raison du caractère aléatoire du déficit hydrique en fréquence, en durée et en intensité, et du déterminisme multifactoriel des réponses adaptatives des plantes.

L'optimisation des pratiques agronomiques (sans labour, évitement des périodes critiques par décalage des dates de semis...) couplée à l'amélioration génétique (sélection pour la précocité, ou la tardivité, essais multilocaux...) a permis d'offrir des collections de variétés à la fois plus productives et plus résilientes dans des environnements très variés. Ceci est particulièrement vrai chez le maïs, espèce très économe en eau pendant sa phase végétative mais très sensible à la sécheresse au moment de la floraison. Pour cette raison, et aussi parce que l'investissement en recherche publique et privée est considérable dans cette espèce, des efforts très importants sont entrepris pour tirer parti des progrès récents dans la connaissance des mécanismes moléculaires mis en place par la plante pour faire face au déficit hydrique. Ces mécanismes sont d'une grande complexité et c'est dans ce domaine que l'approche biotechnologique a apporté des avancées considérables.

Les techniques de transcriptomique, protéomique et métabolomique ont, en particulier, montré la multiplicité des gènes impliqués et les interactions entre les chaînes de transduction depuis la perception du signal "sécheresse" jusqu'aux réponses phénotypiques. La confirmation du déterminisme plurigénique des réponses conduit à penser que même en utilisant les techniques les plus puissantes comme la sélection assistée par marqueurs et/ou la transgénèse, on ne peut espérer qu'une amélioration incrémentale, c'est-à-dire pas à pas. C'est ce que confirme l'examen de la stratégie affichée par les semenciers et les résultats qu'ils obtiennent présentement, à l'issue de nombreuses années de recherche.

Ainsi deux grands groupes de semenciers américains viennent de mettre récemment sur le marché deux nouvelles familles de variétés de maïs, transgéniques ou non, dont les performances peuvent être comparées. Pioneer a sorti en 2011 les hybrides non-transgéniques nommés Optimum® AQUAmax™ qui procurent un avantage moyen de rendement de +7,1% en conditions sèches (700 fermiers dans l'Ouest des États-Unis) et présentent en conditions favorables un rendement supérieur de +3,4% aux meilleurs hybrides (7 000 comparaisons). Du côté de Monsanto les variétés transgéniques porteuses du gène CspB (MON 87460) sont commercialisées aux États-Unis et au Canada depuis novembre-décembre 2012 pour la saison 2013 sous le nom commercial "DroughtGard™" avec la promesse d'un gain de rendement de 6 à 10 % en conditions de sécheresse sans que les rendements soient affectés en conditions hydriques normales. Ces valeurs proviennent des nombreux essais multilocaux. Le marché visé est principalement celui des grandes plaines de l'Ouest (South Dakota, Nebraska, Kansas, Colorado, Western Missouri, Oklahoma et Texas). L'absence chez Pioneer ou la présence de transgénèse chez Monsanto ne signifie pas que l'une des approches est privilégiée par rapport à l'autre ; les deux sociétés insistent sur le fait d'une amélioration plus classique consistant à adapter au mieux chaque variété au contexte climatique de chaque région en s'aidant des marqueurs aussi précis que possibles, cela étant mené de pair avec l'ajout de transgènes.

(Reçu le 4 février 2013)

¹ Professeur honoraire de l'Université Paris-Sud, Orsay.

LA RÉACTION DU SÉLECTIONNEUR – LES ATTENTES DE LA SÉLECTION

par Jean **Beigbeder**¹

Sélectionneur de maïs depuis 34 ans, j'ai pratiqué la sélection en conditions de stress de sécheresse divers, principalement en Vallée de l'Ebre, Vénétie, Hongrie, Ukraine. Retraité depuis trois ans, je participe aux travaux de Pro-Maïs. J'accompagne en particulier le projet « Diversité Zea » qui comporte un important volet sur la tolérance à la sécheresse. (Désolé Monsieur Cochard, je n'ai jamais sélectionné d'arbres mais je sais maintenant grâce à vous que mes pommiers Toulousains passent l'été au bord de l'embolie gazeuse !

Grand merci à Messieurs Tardieu, Prioul et Cochard pour leurs apports aux connaissances des sélectionneurs sur ce difficile sujet ; nous essayons d'utiliser toutes les « pistes » identifiées dans notre sélection phénotypique : ASI, croissance foliaire, résistance à l'avortement. Merci aussi d'insister sur la nécessité de l'utilisation de bases génétiques larges... quand la mode est aux solutions locales.

Je suis en accord complet avec vous sur la complexité extrême des mécanismes génétiques développés par les plantes pour faire face à la multiplicité des scénarios de sécheresse.

Tous les résultats (inespérés à mon avis) obtenus au cours des 50 dernières années sur le maïs, 0.8 à 1.2 qx/ ha x an du à la génétique, (y compris en conditions de stress hydrique) l'ont été par ce que j'appelle « la grosse artillerie de la sélection classique » et que mentionne Monsieur Prioul : grands réseaux d'essais multilocaux , multiannuels, multidensités, sélection généalogique à haute densité, pépinières à irrigation limitée, le tout aidé par l'informatique pour de vastes « analyses de stabilité » des variétés.

La grande attente actuelle des sélectionneurs est le développement des nouveaux outils de la sélection assistée par marqueurs, de la transgénèse et de la génomique en général. Nous voulons mieux comprendre et accélérer encore l'amélioration de cette tolérance afin de répondre aux nouveaux défis de l'agriculture mondiale: pénurie de terres bien arrosées à l'avenir, renchérissement de l'irrigation, déplacement des cultures vers des zones à été plus sec et besoin d'y sécuriser les rendements: Ouest « *corn belt* » États-Unis, Nord-Ouest Chine, centre et Est de l'Europe, Afrique sub-saharienne.

Les sélectionneurs qui auront de « nouveaux outils » face à ces « nouveaux défis » auront la possibilité, à long terme, de dominer les grands marchés des plantes d'été : maïs, riz, soja. A court terme, la complexité que vous avez décrite retardera l'arrivée d'outils efficaces (je suis encore sceptique sur les Aquamax, Droughtgard, Artezian), mais ensuite ?

Les sélectionneurs espèrent des pôles d'innovation multiples et diversifiés... et ont peur de la monopolisation de ces nouveaux outils par quelques-uns. J'espère que de nombreux acteurs publics et privés seront capables de cibler des scénarios de sécheresse précis et stratégiques, intégrant climat, agronomie et économie, et de fournir de nouvelles armes à tous les sélectionneurs.

(Reçu le 11 février 2013)

¹ Vice-Président de Pro-Maïs.

CONCLUSION

par Bernard **Itier**¹

Quelques mots pour conclure et ouvrir sur une ou deux séances à venir

Nous avons abordé dans ces exposés deux types de plantes : les annuelles et les pérennes.

Il y a entre elles des similitudes et des différences. Dans les deux cas, on s'intéresse à la productivité mais seules les plantes pérennes sont concernées par la question de la résilience à la sécheresse.

Nous avons pu vérifier l'importance de la pertinence du « trait » retenu pour caractériser l'influence de la sécheresse.

Le problème n'est pas simple car d'une part l'amélioration de la tolérance à la sécheresse met en jeu un grand nombre de gènes, d'autre part, il n'y a pas d'amélioration universelle, tel effet bénéfique ici pouvant être négatif ailleurs.

Pour ce qui concerne les annuelles, pour lesquelles les exposés se sont fortement concentrés sur le maïs, on a pu voir comment la modélisation appuyée sur le couplage « trait-paramètre » pouvait être articulée avec le phénotypage à haut-débit et l'expérimentation au champ pour tester différents génotypes dans différents contextes pédoclimatiques. Des perspectives intéressantes ont été affichées tout en retenant l'idée qu'il ne peut s'agir que d'amélioration incrémentale. Des propositions commerciales s'appuyant sur cette démarche sont effectuées par des firmes privées et actuellement en cours de test.

Pour les pérennes, les choses semblent moins avancées alors que ce sont celles que l'on plante aujourd'hui qui subiront, en 2050 et au-delà, les effets éventuels de changements climatiques annoncés ! Si la sensibilité à la cavitation semble bien le trait pertinent pour la résilience à la sécheresse, des travaux de fond restent à approfondir pour la caractérisation de l'incidence de la sécheresse sur la productivité.

La discussion qui a suivi les exposés a permis d'aborder les alternatives possibles en matière de systèmes de culture. A ce propos, je me permettrai de réitérer ici le souhait de faire avancer en parallèle l'amélioration de la tolérance du maïs à la sécheresse avec celle de la productivité du sorgho qui, pour le coup, est déjà tolérant à la sécheresse.

Enfin, derrière l'amélioration de la tolérance intrinsèque des plantes se profilent les pratiques agronomiques destinées à atténuer les effets d'une sécheresse sur un génotype donné. Il sera intéressant de développer ici, dans le futur, les thèmes qui s'y rapportent comme l'évitement agronomique (en termes de taille et de densité), l'agriculture de conservation dans ses aspects hydriques et, pourquoi pas, l'aridoculture.

C'est donc à une suite que je vous invite en remerciant nos conférenciers pour la qualité de leurs présentations et toute l'assistance pour l'intérêt des débats.

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Directeur de recherche à l'INRA.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 13 février.

« Table Ronde »

Séance présentée par Francis **Cailliez** (Section 2) et Alain **Perrier** (Section 7)

L'ARBRE CHAMPÊTRE, PLACE ET GOUVERNANCE : QUEL AVENIR ?

Objectifs de la séance

Les raisons très diverses pour lesquelles l'arbre champêtre s'est maintenu à travers les âges sont liées à ses fonctionnalités et usages sociaux multiples. C'est pourquoi nous avons choisi d'organiser cette séance sous la forme d'une table ronde pour permettre des regards croisés entre scientifiques et professionnels de l'arbre sur les divers modes de gouvernance de cette multifonctionnalité dans l'espace rural.

Il s'agit de permettre des échanges en développant en particulier les aspects suivants :

- la production de services agro-écologiques et, entre autres, celle des infrastructures favorables dans une vision de développement durable ;
- la production marchande des arbres champêtres;
- la production de services culturels, sociaux et esthétiques.

Ces divers points de vue de la société sur ces arbres seront analysés, et plus spécifiquement confrontés avec les besoins des nouveaux habitants et acteurs des espaces qu'ils soient agriculteurs, forestiers, industriels ou élus.

Les multifonctionnalités des arbres champêtres, des haies notamment, comme de toute autre forme d'occupation de l'espace, résultent d'interactions souvent positives (synergie), parfois négatives (antagonisme). Parmi elles notons le rôle majeur des milieux arborés sur le climat et le microclimat, sur les ressources en eau et en sol, sur la biodiversité et ses ressources génétiques, végétales, animales et cynégétiques, mais également sur la qualité du cadre de vie des habitants. Ces divers aspects incitent-ils : (1) à promouvoir l'intérêt de systèmes agroforestiers et sylvopastoraux en vue de productions à moindres intrants (microclimat, érosion, eau, sols, plantes) ? (2) à valoriser la gestion du bois matériau et énergie ? (3) à gérer l'arbre pour ses aménités écologiques (biodiversité, auxiliaires, faune cynégétique) et socioculturelles (cadre de vie comme espace arboré des loisirs, du tourisme et de l'habitat) ?

Globalement aujourd'hui, la perception de l'arbre dans l'espace agricole est contrastée puisque, selon les lieux, les habitants aspirent en général :

- soit, dans les paysages agricoles totalement ouverts, à promouvoir plus d'arbres, à la fois sous forme de bois, de bosquets, de haies, de ripisylves, ou d'arbres isolés, en vue de satisfaire le maximum de fonctionnalités positives ;

- soit, dans les zones de déprise agricole (en particulier en zones de moyenne montagne), à promouvoir l'ouverture des paysages pour lutter contre la couverture boisée croissante du territoire.

Dans tous les cas, l'arbre fait partie des enjeux sociaux territoriaux et joue un rôle dans la qualification du cadre de vie qui est projetée par les habitants. Qu'apportent ces arbres aux espaces agricoles ? Quels en sont les fonctions, les usages et les aménités, à la fois vis-à-vis des milieux qui composent le territoire, mais aussi pour les ressources qui s'y développent et pour les habitants qui y vivent, qu'ils soient agriculteurs ou urbains à la campagne ? Sans oublier une question essentielle en cette période de crise : où trouver les fonds nécessaires à une politique de l'arbre champêtre ? C'est le cadre principal dans lequel ce débat s'inscrit.

Notre objectif est, à travers cette table ronde, de permettre de relier les divers regards des acteurs présents dans un territoire pour induire des modes de gestion qui optimisent les diverses occupations de l'espace, réduisent les compétitions, et valorisent les complémentarités et les synergies. Ces différents regards devraient permettre d'établir des choix plus ou moins porteurs, ceux qui devront être à la base de la construction d'une vision commune utile à tous sur le long terme (durabilité). Dans cette perspective de long terme, le débat devrait asseoir des faits dont la convergence permettrait de mieux adapter, selon les territoires, l'évolution actuelle de l'arbre champêtre, en particulier en fonction de la diversité des milieux géographiques .

Malgré de grandes similitudes et une continuité certaine entre tous les espaces, ce débat exclura en grande partie les espaces urbains, ou périurbains denses, car cette séance fait suite à deux séances de la section 7 au cours de l'année 2012, celle de « L'arbre dans la ville » (11 avril) et celle sur « Ville et campagne à la croisée de nouveaux chemins – Vers un nouveau contrat ville-campagne » (23 mai, Toulouse).

Animateurs de la table ronde

- Francis **Cailliez** (membre de l'AAF)
- Alain **Perrier** (membre de l'AAF)

Introduction :

Yves **Luginbühl** (Directeur de recherche CNRS, Agro-géographe)

Regards croisés sur « l'arbre champêtre, place et gouvernance : quel avenir ? »

Débats entre les participants à la table ronde

- Denis **Couvet** (Directeur de recherche, MNHN)
- Alain **Canet** (Président de l'Association « Arbres et paysages »)
- Michel **Ledru** (Agriculteur, Maire, ancien président de « Sol et Civilisation »)
- Fabien **Liagre** (Professionnel : projets d'agroforesterie- Directeur d'AGROOF)
- Yves **Michelin** (Enseignant-chercheur, ENITA Clermont Ferrand)

Puis les débats auront lieu avec la salle et les participants.

Conclusions : Pierre **Donadieu** (Professeur à l'ENSP Versailles -Marseille).

L'ARBRE CHAMPÊTRE, PLACE ET GOUVERNANCE : QUEL AVENIR ?

INTRODUCTION

par Yves **Luginbühl**¹

Une situation très diverse

Un examen des évolutions sur quelques décennies des arbres champêtres révèle une multitude de formes et d'agencements et une très grande diversité d'espèces ; par ailleurs, il montre une forte évolution depuis les années 1950 et sans doute avant également, avec disparitions, apparitions, changements d'usages et d'acteurs gestionnaires. Cette situation n'est pas spécifique à la France, mais générale en Europe. L'exposé fera l'objet de quelques exemples d'évolution des arbres champêtres.

L'arbre champêtre s'inscrit dans une histoire multiséculaire, et a joué un rôle économique et social, dès l'âge préhistorique (pour la fourniture de bois de chauffe, d'œuvre, d'outillage, corrélative d'une grande diversité des formes, notamment avec l'émergence de l'émondage, mais peu d'entre eux servent les chantiers navals qui demandent de grandes quantités de grumes de grande taille ; ils sont vraisemblablement réservés à des usages plus modestes). L'arbre a également joué un rôle symbolique inscrit au cœur des croyances et des usages, représenté notamment par les arbres des religions païennes (l'arbre à palabre, l'arbre des druides...) et ceux des religions monothéistes (le Mont des oliviers, le Chêne de la justice...) et un rôle esthétique variable dans l'histoire, allant de l'arbre émondé à l'arbre majestueux élevant son houppier dans le ciel.

Une évolution récente drastique : elle s'est manifestée par la disparition des arbres isolés et des bosquets, dont les données précises manquent, en raison d'un moindre intérêt que l'arbre forestier. Les raisons de cette évolution sont diverses : régression de l'agriculteur polyculteur/éleveur, arbres obstacles à la mécanisation. Les haies ont tout d'abord montré une forte diminution des linéaires que révèlent les données de l'exemple des Côtes d'Armor : 1283 km de haies plantées entre 1989 et 2000 et 14000 km de talus plantés arasés entre 1981 et 1995 sur les 78000 km existants en 1981, 135 km de haies plantées par an entre 1993 et 2000 alors que 870 km ont été arasés par an entre 1981 et 1993. Mais cette diminution n'est pas confirmée par les chiffres à l'échelle nationale qui montrent une augmentation de 19,75% entre 1992 et 2004. Cette augmentation est certainement due à la création de haies « domestiques », car les haies agricoles ne sont pas en augmentation comme le montre l'exemple des Côtes d'Armor, même si des programmes de replantation ont modifié le rythme des arasements. Entre 1992 et 2004, Les arbres épars subissent une forte diminution (-41,53%) et les bosquets également, bien que moindre (-15,08%). Enfin les prés vergers ont été marqués par une diminution également forte (-23,26%), remplacés par les plantations en lignes palissées et la délocalisation des plantations, elles-mêmes en diminution mais de façon moins importante (-4,14%). Il serait intéressant d'affiner les rythmes d'évolution selon les périodes, mais les données disponibles ne le permettent pas toujours ; la solution serait d'analyser en profondeur les séries de photographies aériennes en se fondant sur les plus anciennes (années 1940) pour en tirer des extrapolations régionales, mais cette tâche est d'une très grande ampleur. Les données les plus fiables sont issues des enquêtes TERUTI, mais les séries ne sont pas toujours aisément disponibles et ne fournissent que des chiffres en hectares, valeur peu pertinente pour les arbres isolés ou épars et discutable pour les haies.

Enjeux des arbres champêtres

Ils concernent tout d'abord **la production marchande des arbres champêtres**, très ancienne, destinée au bois de chauffage, à l'outillage, la menuiserie, la construction et l'ébénisterie. Quel avenir pour cette production marchande ? Il s'agit d'une ressource renouvelable qui donne déjà lieu à la production de

¹ Directeur de recherche émérite au CNRS, UMR LADYSS.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 20 février.

plaquettes, de granulés, etc. Il faut s'attendre à un développement indéniable (chaudières adaptées) qui peut être envisagé comme un moyen de gérer les arbres champêtres restants ou à venir.

Les problèmes à affronter sont alors :

- le remplacement des arbres qui pose la question de la nature des acteurs, des financements, des espèces des formes et des organisations ;
- la gestion des arbres, qui se manifeste par un transfert de la gestion des agriculteurs à des agents privés ou publics extérieurs, et interroge la nature des filières pour la commercialisation des productions et des marchés.

Le second enjeu des arbres champêtres concerne **la production de services environnementaux** (climatiques et agroclimatiques, régulation du cycle de l'eau, fertilisation, lutte contre les pollutions...) **et de services agroécologiques** et en particulier la contribution à la biodiversité, au maintien d'insectes pollinisateurs, aux flux de biomasse. Quel avenir alors pour les arbres champêtres : favoriser la diversité des espèces, alimenter les insectes pollinisateurs, établir des relais pour les flux de biomasse ?

Les problèmes à affronter sont alors :

- 1°) la perte de la diversité spatiale des espèces, qui impose de passer de la notion de quantité à celle de distribution spatiale des espèces ;
- 2°) la répartition des bosquets et des haies dans l'espace pour freiner le ruissellement des lisiers d'élevage vers les cours d'eau, les arbres pouvant absorber les excédents d'azote ;
- 3°) les interactions entre espèces endémiques et espèces importées : si l'on envisage de planter, quelles espèces privilégier ? Quels effets génétiques des espèces importées sur les espèces endémiques ?
- 4°) la protection des flux et habitats d'espèces ainsi que les sources alimentaires des insectes pollinisateurs, en analysant les effets de l'environnement sur la source d'aliments et les risques de contiguïté avec un environnement contaminé.
- 5°) le fonctionnement surfacique des flux de biomasse, en s'interrogeant sur la pertinence des corridors et des îles et en raisonnant plutôt en termes de connectivité biologique surfacique.

Le troisième enjeu des arbres champêtres concerne **la production de services culturels, sociaux et l'esthétique**. L'arbre a souvent été placé à la cime de la nature : il vit plus longtemps que l'homme, il transmet la mémoire, l'arbre est un abri. L'arbre est une république (Bernardin de Saint-Pierre ; vision organiciste de la nature), l'arbre est un ami (Jules Michelet). Quel avenir pour les arbres champêtres ? Quels rôles dans les relations sociales ? L'arbre peut-il être un médiateur dans les relations sociales à la nature ? Quelles fonctions dans les représentations sociales des paysages ? Quelle esthétique dans les rapports sociaux à la nature ? Où en est le rapport des sociétés au vivant ?

Les problèmes à affronter sont alors : la confrontation des représentations collectives de l'arbre, entre arbre forestier et arbre champêtre, entre arbre espèce naturelle et arbre symbole de la beauté naturelle, entre les représentations de l'arbre des citadins et celles des agriculteurs. Ils concernent alors les rôles des acteurs pour une politique de revalorisation des arbres champêtres ; les agriculteurs : quelles stratégies à leur égard ? les collectivités locales : comment les mobiliser ? le milieu associatif : quel rôle peut-il jouer ?

Pour une vision globale des arbres champêtres :

Elle exige une réflexion selon les paysages où les insérer, mais également selon leurs caractéristiques spécifiques, un raisonnement des interactions entre les espèces et les hôtes potentiels (insectes pollinisateurs, oiseaux...), une implication des acteurs concernés (agriculteurs, habitants, associations, collectivités locales) dans la gouvernance territoriale et écologique, l'analyse prospective des débouchés et l'instauration de marchés spécifiques.

ARBRES EN AGRICULTURE

par Denis Couvet¹

La place de l'arbre dans les espaces agricoles dépend de facteurs à la fois écologiques et sociaux. Elle s'inscrit aussi dans un débat plus vaste, concernant le devenir de la production agricole, et la minimisation de ses effets environnementaux. L'extension des arbres champêtres pourrait faire partie des mesures agro-écologiques combinant production et protection de l'environnement.

Ces arbres peuvent se présenter sous au moins sous trois formes différentes, l'arbre isolé, les haies (notamment bocages), et l'agroforesterie, dont les avantages et les inconvénients sont sensiblement différents.

Les deux premières formes sont en régression notable, que ce soit le bocage, ou les grands et vieux arbres. Ces derniers offrent des habitats remarquables, pour le pique-prune, divers oiseaux ; jusqu'à 30 % des mammifères peuvent en dépendre. Ils ont été en déclin accéléré durant les dernières décennies, jusqu'à 90 % dans certaines régions (Lindenmayer *et al.*, 2012). Ces régressions ont diverses causes ; ont été invoquées la suppression des quelques effets climatiques parfois défavorables, la diminution de la lumière incidente notamment, l'augmentation de la productivité du travail humain, à l'aide d'une utilisation plus poussée du machinisme agricole, mais ce peut être simplement par méconnaissance des fonctions écologiques assurées par ces arbres.

L'arbre, espèce ingénieur

La notion d'espèce ingénieur, espèce qui modifie l'environnement physicochimique d'un écosystème, permet d'inventorier les nombreux avantages des arbres. Les arbres sont incontestablement des espèces ingénieurs, par leurs effets physicochimiques directs, mais aussi à travers leurs effets indirects, sur les autres espèces, leurs interactions.

La notion de service écosystémique, ou fonction des écosystèmes dont bénéficient les sociétés humaines, catégorisée par le *Millenium Ecosystem Assessment* (2005), permet une analyse comparative générale des bénéfices associés à l'arbre espèce ingénieur.

La prise en compte des services écosystémiques assurés par les arbres pourrait avoir un impact très significatif sur le devenir de l'arbre champêtre. Ainsi, l'état de l'Oregon a contractualisé un programme de 6 millions d'euros de replantation d'arbres sur plus de 50 km de berges de la Tualatin, afin d'assurer le refroidissement nécessaire des rivières, solution la moins coûteuse (Scarlett and Boyd, 2011).

1. L'arbre et les services écosystémiques

Ces services doivent être envisagés à différentes échelles spatiales, parcelle, exploitation agricole, paysage, petite région agricole, biosphère. Ils peuvent concerner d'autres secteurs économiques que l'agriculture, par exemple l'industrie (voir exemple ci-dessus).

En reprenant la typologie du *Millenium Ecosystem Assessment* (2005) on peut distinguer plusieurs types de services écosystémiques, au-delà des avantages directs pour l'agriculture en termes de production (bois, fruits -noix...), largement documentés par ailleurs :

- régulation du climat, de la température, de l'hygrométrie. À l'échelle de la parcelle, ces services sont documentés depuis fort longtemps avec les brise-vents. Ils sont présents à l'échelle du paysage, du bassin-versant, facteurs de maintien des conditions microclimatiques. À échelle mondiale, le stockage du carbone est un enjeu majeur ;

- fertilité des sols, structure physique, rétention des nutriments. Quelques exemples quantitatifs peuvent être cités. Des allées d'aulne rouge peuvent apporter près de 50 % de l'azote nécessaire au maïs ; la réduction des nitrates peut être de 70 % à 1 m de profondeur. Les bandes enherbées permettent 20% de plus de rétention des nitrates avec des arbres (José, 2009) ;

- régulation des flux hydriques. Purification des eaux. Le rôle des arbres quant à ces deux types de services est sans doute d'importance majeure, mais demande à être précisé ;

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, professeur au Muséum national d'histoire naturelle.

- contrôle de l'érosion. Il importe particulièrement dans certaines conditions topographiques et dépend de l'état des sols ;

- contrôle biologique, notamment des ravageurs, mais plus généralement de toute espèce susceptible de proliférer. Les effets bénéfiques des arbres sur les communautés assurant ce contrôle biologique, oiseaux, chiroptères, insectes parasitoïdes, carabes... ont été largement documentés. L'efficacité du contrôle biologique diminue rapidement avec la distance, ex. : de 50 % à 300 m des haies en Suisse dans une culture de trèfle rouge ;

- pollinisation. Les arbres sont des habitats majeurs pour les pollinisateurs, dont l'abondance et la diversité sont essentielles pour un certain nombre de cultures. Ainsi le melon d'eau est pollinisé par plus de 30 espèces différentes, en plus de l'abeille domestique. Le taux de pollinisation chute rapidement lorsque l'on s'éloigne des arbres, encore plus rapidement en termes de visites. Une méta-analyse suggère qu'en moyenne une diminution de 50 % est observée, à 1500 m. pour la pollinisation, à 600 m pour le taux de visites. La chute se fait plus rapidement en région tropicale, et pour les abeilles sociales (Ricketts *et al.*, 2008).

Enfin, notons qu'une logique « service écosystémique » ne considérant qu'un nombre restreint de services pourrait ne pas être à l'avantage de l'arbre champêtre. Ainsi l'agrovoltaïque, en remplaçant des arbres par des panneaux photovoltaïques, assure la fonction de production en énergie, mais ne remplace pas de nombreux autres services éco-systémiques, discutés ci-dessus. Il importe sans doute de réfléchir en termes de bouquet (ou ensemble) de services écosystémiques pour bénéficier de tous les avantages de l'arbre champêtre.

2. Importance des essences, de leur diversité dans les paysages

Les essences déterminent l'importance, la qualité des services écosystémiques. Ainsi, l'abondance des chiroptères varie fortement entre résineux et feuillus (Kerbirou *et al.*, 2010).

Lorsque l'on discute ces questions, il peut être utile de distinguer au moins deux dimensions de la biodiversité associée à ces services éco-systémiques :

- la biodiversité planifiée (diversité des cultures, rotations, arbres, bandes enherbées...)
- la biodiversité associée, celle qui résulte de la précédente (elle concerne notamment les espèces associées au contrôle biologique, des oiseaux aux parasitoïdes, les chiroptères, les pollinisateurs, les carabes...). Elle concerne notamment les micro-habitats offerts par les arbres, et dont la diversité est associée à plusieurs caractéristiques des communautés d'oiseaux et de chiroptères, diversité, spécialisation, ou encore niveau trophique (Regnery *et al.*, 2013).

De par son rôle d'ingénieur, l'arbre champêtre a un impact majeur sur la biodiversité associée.

Pour quantifier ces effets, il faut tenir compte de multiples paramètres : adaptation au climat local, présent et futur, résistance aux pathogènes, qualité d'hôtes des espèces pollinisatrices et prédatrices... Et qualité patrimoniale !

Les données quantitatives, répétables, résultant de protocoles expérimentaux prenant en compte les facteurs de variation majeurs sont difficiles à obtenir, et il est donc souvent nécessaire d'en rester à quelques recommandations générales. La diversité semble un objectif. Elle doit favoriser l'adaptabilité, multipliant les options face à la diversité des facteurs de changements globaux, et aussi la résistance aux épidémies, qui ont fait des ravages.

3. Mesures d'accompagnement de l'extension de l'arbre en paysage agricole

Au-delà de mesures immédiates et directes, il importe de créer un climat socio-économique favorable à l'extension des arbres champêtres. La trame verte du Grenelle de l'environnement fournit des opportunités institutionnelles intéressantes. Il serait néanmoins nécessaire de préciser les objectifs environnementaux poursuivis, et élargir les entités biophysiques concernées.

On peut distinguer deux types de mesures.

Dans le domaine agronomique, il s'agit de développer des variétés végétales adaptées à ces nouvelles conditions édaphico-climatiques (et non aux conditions environnementales des grandes plaines non arborées de l'Europe et de l'Amérique du Nord). Il s'agit aussi d'améliorer l'adéquation entre l'arbre champêtre et le machinisme agricole.

Le type de mesures de type socioéconomique devrait dépendre de l'échelle spatiale des avantages fournis par l'arbre champêtre. L'échelle du paysage semble primordiale. Les enjeux liés à une gestion à cette échelle sont considérables pour l'agriculture, et dépassent largement le cas de l'arbre. Ils concernent le

développement de l'agroécologie, sa poursuite de différents objectifs, sécurité alimentaire, revenu agricole, maintien des services écosystémiques et/ou la durabilité des pratiques : gestion des rotations, de la diversité des cultures à l'échelle du paysage, de la mosaïque arborée, voire forestière, des habitats pour les pollinisateurs, le contrôle biologique, la qualité de l'eau, les effets climatiques locaux...

Une possibilité d'élargir le champ de la compensation écologique semble intéressante, prenant en compte les impacts des pratiques sur la qualité de l'eau et la biodiversité ordinaire. Enfin, dans le domaine de l'incitation, les paiements pour services écosystémiques (PES), fournissent des opportunités intéressantes (voir exemple plus haut), ex. : la rémunération à venir du stockage du carbone. De manière plus immédiate, les PES pourraient faire partie des outils incitatifs proposés par la PAC.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) JOSÉ S. 2009. – Agroforestry for ecosystem services and environmental benefit : an overview. *Agroforest. Syst.* **76**, 1-10.
- (2) KERBIRIOU C., JULIEN JF., DEGUINES N., GASC A., LORILLIERE R., LOÏS G., JIGUET F., JULLIARD R. et COUVET D. 2010. – Suivi temporel des chauves-souris communes, premiers resultats et perspectives. *Symbioses*, **25**, 1-7.
- (3) LINDENMAYER D.B. *et al.*, 2012. – Global Decline in Large Old Trees. *Science* **7**, 338 pp. 1305-1306.
- (4) RICKETTS T.H. *et al.*, 2008. – Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecology Letters* **11**, p. 499–515.
- (5) SCARLETT Lynn and BOYD James W., 2011. – Ecosystem Services : Quantification, Policy Applications, and Current Federal Capabilities, Discussion Papers, Resources For the Future.

COMMENT IMAGINER LES NOUVELLES PISTES DE RECHERCHE DÉVELOPPEMENT EN AGROFORESTERIE ?

par Fabien Liagre¹

Le monde agricole vit de profonds bouleversements : changement climatique, stagnation des rendements, hausse du coût des intrants, érosion, perte de la biodiversité, problèmes environnementaux, nous engageant à repenser nos modèles. Les principes de « durabilité des systèmes » se font jour aux côté de *l'agroécologie, l'agriculture écologiquement intensive, l'écoagriculture, l'agriculture à valeur environnementale...* etc. Dans ce mouvement de réflexions et d'expérimentations, **l'agroforesterie**, ou la réintroduction des arbres dans les systèmes de production, intéresse.

Si l'agroforesterie définit un système de production ancien remontant jusqu'au néolithique, le sujet a longtemps été ignoré de la recherche et des services de développement. Dans ce contexte, la France compte parmi les pionniers de la recherche développement en agroforesterie.

L'année 1988 marque la mise en place des premiers réseaux de parcelles expérimentales axés sur le sylvopastoralisme. D'abord en Auvergne (16 parcelles), puis dans le Pas-de-Calais (8 parcelles) grâce au Cemagref (aujourd'hui IRSTEA) et enfin, en 1989, dans le Languedoc-Roussillon et Midi-Pyrénées avec 13 parcelles sous l'impulsion de l'INRA et du CRPF. Les agriculteurs volontaires mettent à disposition leurs parcelles, mais ne sont pas associés aux protocoles, ni aux mesures, ni au suivi.

Il faut attendre 2006 pour que le projet national CASDAR AGROFORESTERIE 2006/2008, coordonné par AGROOF et les Chambres d'Agriculture, propose une action de mise en place d'un réseau de parcelles expérimentales, associant les agriculteurs aux protocoles. Ces 42 nouvelles parcelles expérimentales ne feront cependant l'objet que d'un suivi de biodiversité fonctionnelle, dans le cadre d'un second projet CASDAR, pour lequel les agriculteurs ne seront pas vraiment associés...

¹ AGROOF.

En marge de ces projets, des agriculteurs s'organisent en réseaux, organisent leur formation, acquièrent connaissances et compétences et mettent en place leur propres parcelles expérimentales (on peut notamment nommer le réseau BASE, un des plus actifs qui soit).

Aujourd'hui, le réseau des parcelles pilotes en agroforesterie en France compte environ 100 parcelles, âgées de 1 à 25 ans, ce qui constitue le premier réseau européen. En parallèle, de plus en plus de projets de recherche développement incluent l'agroforesterie dans les thématiques ou les actions entreprises.

L'étude de ces programmes de recherche constitue une ressource unique pour guider les acteurs du développement dans leurs actions, les agriculteurs dans la transition de leurs pratiques et la recherche dans la mise en œuvre de projets en lien direct avec le terrain.

Avec la réforme des réglementations qui aujourd'hui permettent une meilleure intégration de l'agroforesterie dans le paysage réglementaire et fiscal, c'est également une nouvelle période qui s'annonce avec la question des politiques et outils à mettre en œuvre pour accompagner correctement le développement de ces pratiques originales, à contre-courant de la pensée des 50 dernières années, et qui s'inscrivent sur du long terme. Il s'agit aujourd'hui, à partir de cette expérience agronomique et sociale, vieille de 25 ans, qui a conduit un nombre croissant d'agriculteurs à réfléchir, s'organiser, se former et agir au changement de leurs pratiques, de se poser les bases d'une plateforme d'échange au service de la recherche et de la connaissance.

L'AGROFORESTERIE DE NOUVELLE GÉNÉRATION

par Alain Canet¹

L'agroforesterie telle qu'elle est développée aujourd'hui fait appel à toutes les formes d'association entre arbres et cultures (ou animaux) sur une même parcelle (alignement, haies, bords de route ou de rivière, sylvopastoralisme, pré-vergers...) et favorise une approche systémique de l'exploitation. Une agroforesterie de nouvelle génération voit le jour, qui s'inspire directement du fonctionnement naturel des prairies ou des forêts : des arbres qui poussent seuls, sans apport d'eau, des sols vivants toujours couverts, pour fournir de nombreux produits et services environnementaux. Lorsque l'on parle d'arbres, on entend ceux qui sont plantés, comme ceux qui sont régénérés à partir de l'existant. Arrêter de tondre ou de broyer les bords de cours d'eau ou de voiries, c'est aussi laisser la possibilité de produire de la biomasse et d'autres services avec un gain de temps et d'espace considérable.

Opérer un changement d'échelle pour le développement des pratiques :

Construire une agriculture performante et durable, maximiser la production tout en préservant les ressources naturelles, assurer la viabilité des exploitations sont les enjeux de l'agriculture de demain. L'agroforesterie fait partie des options agroécologiques les plus prometteuses pour relever ce défi. Pour assurer le développement de ces pratiques à grande échelle, un travail important est mené par les différents partenaires nationaux.

→ Informer, concerter les acteurs à tous les niveaux :

Répandues sont les idées reçues sur l'arbre champêtre, souvent perçu comme une gêne et une contrainte par l'exploitant. C'est pourquoi il est nécessaire d'informer tous les types de publics (agriculteurs, collectivités, sphères décisionnelles) et à toutes les échelles sur le principe de l'agroforesterie et l'intérêt qu'elle peut avoir pour l'exploitant comme pour la collectivité, au regard des multiples services fournis. Un travail de fond en région comme au niveau national est effectué, pour positionner l'agroforesterie dans les programmes de développement des territoires (Ministères de l'Agriculture MAAF et de l'Ecologie MEDDE, Agences de l'Eau, collectivités territoriales...).

→ Développer une offre de formation sur tout le territoire.

De nombreuses régions sont encore totalement dépourvues d'agroforesterie. Ce manque repose essentiellement sur une absence d'information mais surtout de conseil technique disponible. Par ailleurs, le métier de conseiller agroforestier n'existe pas. Aussi un travail est mené en régions pour favoriser

¹ Président de l'Association « Arbres et paysages ». a.canet@arbre-et-paysage32.com

l'émergence de l'agroforesterie au niveau local et mettre en place des cadres de formation pour les futurs conseillers agroforestiers. Une démarche nationale pour la création d'un « Référentiel métier » du conseiller agroforestier.

→ Faire évoluer les réglementations.

Le contexte politique est plus favorable aux arbres champêtres depuis 2006 : les parcelles agroforestières sont reconnues comme des parcelles agricoles, bénéficiant ainsi de l'éligibilité aux aides PAC des premier et second pilier. Une mesure de soutien à l'investissement est également disponible depuis 2007 à l'échelle européenne (article 44 RDR) et depuis 2010 en France. Cependant, ces dispositifs actuels ne répondent pas aux besoins du terrain et peuvent parfois être un frein au développement des pratiques. Aussi, les différents opérateurs de l'arbre champêtre travaillent pour faire évoluer les cadres réglementaires et favoriser le retour de l'arbre en agriculture, et faire passer le message positif qu'aujourd'hui, l'agroforesterie répond de façon optimale aux objectifs de verdissement de la PAC : produire de la biomasse tout en recréant de la biodiversité au sein des parcelles, recapitaliser du carbone dans les sols.

Cette démarche porte sur des rencontres régulières avec les décideurs politiques au niveau européen (en collaboration avec l'EURAF), et sur un travail aux échelles nationale et régionale pour la déclinaison des cadres européens (parlementaires, services déconcentrés de l'État).

L'ARBRE CHAMPÊTRE, PLACE ET GOUVERNANCE : QUEL AVENIR ?

par Michel Ledru¹

Département : Seine-Maritime avec une longue façade maritime ventée. Région naturelle près de la mer : le pays des eaux, pas très boisé mais typé par ses corps de ferme appelés « clos mesures » entourés d'une double rangée de hêtres plantés sur talus. Leur fonction : abriter du vent les habitations et bâtiments autrefois couverts de chaume.

À l'est du département, le Pays de Bray : Pays autrefois très herbagé : haies clôtures – 1 sur 20 ou 1 sur 10 – essences diverses, structure de jalons croisés (branches de noisetiers fendues). Haies hautes – brise vent – bois de chauffage, un peu partout dans le département : des alignements d'arbres pas très serrés avec les branches coupées tous les 8 à 12 ans ; fourniture importante de bois de chauffage. Pour mémoire, mais pas « champêtres », les millions de pommiers et poiriers disparus (600 sur notre ferme).

Évolutions : Beaucoup de corps de ferme disparus et avec eux la totalité ou une partie des hêtres les entourant ; beaucoup de têtards disparus – non remplacés et haies-clôtures supprimées ou maintien en « brise vent » faute de taille. L'agrandissement du parcellaire, la suppression des prairies, la moindre utilisation du bois de chauffage (fuel) ont contribué à la réduction du bois champêtre.

Avenir qui se dessine : Reprise de l'utilisation du bois de chauffage – coût pétrole en hausse très nette, amélioration et innovation dans le chauffage bois, poêles performants – diversité d'utilisation (bûches, plaquettes, granulés...) ; les haies brise-vent bien exploitées et création de haies arbustives pouvant avoir plusieurs fonctions en bordure de plateau, dans les valleuses. Important pour la lutte contre l'érosion et les inondations, amélioration de la biodiversité – intérêt cynégétique. La création de haies arbustives ou de bandes arbustives séparant de grands parcellaires ont un intérêt évident.

Avec les règles d'urbanisme : Préservation d'alignements boisés et utilisation des essences locales. Obligation, lors de construction, d'implantation d'arbres de haut jet (fonction des surfaces). Les nouveaux habitants s'empressent de se clore, de se « protéger des voisins » (question de vue). Instaurer une règle interdisant sur la voie publique des plantations de plus de 1,50 m. de haut (aujourd'hui on peut traverser un village où, en dehors des entrées, on passe entre des « murs » de thuyas).

¹ Ancien agriculteur – maire de Bosc-Guérard Saint Adrien (bosc = bois). Commune de 1 000 habitants – 1/3 de bois sur les pentes en bordure de plateau agricole. L'exploitation comprenait 1 ha de bordure de bois.

L'agriculteur et l'arbre : L'arbre était une nécessité pour le chauffage et le bois de travail ; aujourd'hui ces fonctions ont disparu. Le cultivateur – le laboureur – n'aime pas l'arbre, si l'un avance, l'autre recule et l'ombre a tendance à faire une plante veule et peu productive. L'éleveur a une attitude différente : la haie avec les moyens mécaniques d'aujourd'hui peut ne plus régresser et démontrer son utilité (abri et production). L'arbre produit, fait de l'ombre et est utile suivant son orientation, mais le grossissement des troupeaux provoque, assez souvent trop de piétinement et de boue.

Le financement : Il ne me paraît pas être un point de blocage ; un financement interactif bien ciblé peut permettre une politique réaliste. Une étude faite par AgroParisTech sur l'avenir de la filière laitière en Normandie avait trouvé intéressant de mieux valoriser le lait haut normand en lui associant des éléments patrimoniaux avec des vaches de race normande et des prés peuplés de pommiers. Il y a là effectivement un thème de discussion : l'arbre n'a pas seulement une fonction écologique mais peut être un élément d'un « panier patrimonial » permettant de mieux valoriser des productions standardisées.

LES ARBRES DE PLEIN CHAMP DANS LES SYSTÈMES HERBAGERS : UN RÔLE NON NÉGLIGEABLE DANS LA RÉGULATION DES POPULATIONS DE CAMPAGNOLS TERRESTRES

par Yves **Michelin**¹

Introduction

Depuis près de 40 ans, on assiste à une augmentation de la fréquence et de la sévérité des pullulations de campagnols terrestres dans les zones herbagères d'altitude, avec des conséquences désastreuses pour les exploitations agricoles (réduction de la production d'herbe et nombreux *tumuli* de terre évacuée des galeries qui engendrent des pertes ou des manques à gagner importants). Avec 5 à 6 portées par an, 4 à 8 petits par portée et une maturité sexuelle à deux mois, un couple de campagnols peut engendrer 100 campagnols adultes en moins d'un an. Or, dès 200 campagnols à l'hectare, les dégâts sont sensibles. Les pullulations peuvent ainsi sembler apparaître de manière spontanée et imprévisible, ce qui renforce le stress chez des agriculteurs dont les exploitations n'ont pas toujours la capacité à encaisser leur impact.

Les arbres (de plein champ) jouent un rôle non négligeable mais ambivalent dans la régulation de ces populations

On peut se demander en quoi les arbres de plein champ interviennent dans le processus de pullulation puisqu'ils ne sont pas consommés par ces petits rongeurs. Ils occupent pourtant une place centrale.

D'une part, ils contribuent à réguler leurs populations en favorisant la circulation des prédateurs le long des haies. Lorsque le maillage est dense et connecté, alors les prédateurs généralistes tels que le renard, peuvent explorer l'ensemble du territoire. Ils interviennent préférentiellement là où la population augmente soudainement, ce qui freine les démarrages de pullulation. Les arbres isolés sont aussi très utiles car ils permettent aux rapaces de se poser, d'observer l'activité des campagnols et de les chasser plus facilement. Lorsque la connectivité est rompue, que la maille bocagère s'agrandit et que les arbres isolés disparaissent, certaines portions de l'espace ne sont plus fréquentées par ces prédateurs, laissant le champ libre au démarrage des pullulations.

D'autre part, ils jouent aussi un rôle indirect favorable aux pullulations, surtout les lisières de bosquets, très fréquentées par les taupes. En effet, ce petit insectivore qui pourtant ne pullule pas, creuse ses galeries beaucoup plus facilement que le campagnol et celui-ci en profite. E, basse densité, il cohabite avec les taupes et il les chasse lorsque les populations de campagnols augmentent, profitant d'un vaste réseau de galeries déjà constitué. Cependant, la balance entre avantages et inconvénients des arbres de plein champ penche notablement du côté de leur rôle régulateur. Il n'est pourtant pas si évident de les réintroduire dans le paysage.

Comment réincorporer les arbres (de plein champ) dans le fonctionnement des

¹ VetAgroSup et UMR Métafort (AgroParisTech, INRA, IRSTEA, VetAgroSup).

exploitations d'élevage pour lutter contre le campagnol ?

Les arbres de plein champ pourraient jouer un rôle utile aux exploitations spécialisées en élevage tout herbe de moyenne montagne. Les haies comme les arbres isolés ou les bosquets offrent un abri contre le mauvais temps en début et en fin de saison et contre les chaleurs estivales. En outre, certaines essences ont un feuillage qui a une véritable valeur fourragère très appréciée lors des sécheresses. Plusieurs éleveurs nous ont assuré avoir pu sauver leurs troupeaux en donnant les feuilles de leurs frênes lors des sécheresses de 1976 et de 2003. Enfin, ils assurent une production de bois de chauffe et d'œuvre très intéressante. Mais leur maintien et leur réintroduction se heurtent à plusieurs obstacles de natures différentes.

D'un point de vue juridique, la gestion des arbres de plein champ reste une prérogative du propriétaire et non du fermier, or comme les exploitations se sont beaucoup agrandies ces dernières années, une bonne partie de la SAU est en fermage. Même si l'éleveur est motivé, il lui faut convaincre le propriétaire, ce qui n'est pas toujours évident.

D'un point de vue technique, ces arbres peuvent aussi présenter des inconvénients, en particulier pour les parcelles récoltées car leur ombre contribue à rendre la prairie plus hétérogène et les branches peuvent gêner le mouvement des engins, par exemple dans les chantiers d'ensilage. Ces arbres nécessitent aussi de disposer de temps pour les entretenir et du matériel adapté. On ne peut plus, comme par le passé, envisager d'élaguer les branches en montant dans les arbres et en les taillant à la serpe. Les éleveurs de l'Aubrac l'ont bien compris en proposant une MAET (Mesure agrienvironnementale territorialisée) qui leur a permis d'acheter des fourches télescopiques et des tronçonneuses adaptées. C'était pour eux le seul moyen de continuer à entretenir ce paysage auquel ils étaient par ailleurs très attachés.

DISCUSSION

J.M. Boussard¹. – Je vais me faire l'avocat du diable. J'ai eu l'occasion, au cours de ma carrière, de parcourir quelquefois la Pampa argentine, un pays où les conditions naturelles sont en gros comparables à celles de l'Europe. Or, dans la Pampa, il n'y a plus d'arbre depuis le 19^e siècle, parce que, selon une théorie largement répandue, à cette époque, les méchants Indiens se cachaient derrière les arbres pour faire leurs mauvais coups. On a donc abattu les arbres pour tuer les indiens, et on ne les a pas replantés quand tous les Indiens ont finalement disparus. Ce qui nous intéresse ici, dans cette histoire, c'est que cette situation ne semble gêner personne : on se passe apparemment très bien d'arbres dans cette région du monde, par ailleurs plutôt prospère... Ma question est donc : quelle leçon peut-on tirer de cette occasion d'observer une situation extrême ?

D. Couvet. – Si l'on veut estimer les avantages de l'arbre champêtre pour l'agriculture argentine, il est nécessaire de disposer d'une référence ou de construire une expérience avec le système classique actuel et le même système adapté à un aménagement avec arbre champêtre. Il s'agirait alors de comparer leurs performances. Avec abondance de sols, on est plutôt en extensif et sans trop de soucis de rendement maximum et de pérennité du système. Mais il reste évident que les rôles de ces aménagements se feraient sentir : rôle sur la demande climatique, sur le cycle de l'eau, sur l'entretien du sol, sur la production de bois énergie et matériaux.

Néanmoins, il ne serait pas forcément évident de tirer une leçon générale d'une telle comparaison, et pour la raison suivante : l'agriculture argentine est sans doute encore dans la phase dite 'minièrè', de début de la mise en culture des sols, exploitant la matière organique accumulée dans les sols au cours des millénaires. Durant cette phase « minièrè », le problème du renouvellement de cette matière organique, d'autres questions écologiques ne se posent pas. En d'autres termes, l'arbre champêtre, les services écosystémiques, ne prennent de l'importance que lorsqu'ils deviennent limitants, ce qui n'est généralement pas le cas durant la phase minièrè et extensive de l'agriculture.

¹ Vice-Président de l'Académie d'Agriculture de France, directeur de recherche à l'INRA, Laboratoire de politique économique, CIRAD, 45bis, avenue de la Belle-Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne.

Andrée Corvol². – Quel est le niveau actuel des aides à la reconstitution des massifs linéaires (Europe / France / État et départements)

A. Canet. – Grâce à un important travail de fond et de discussions menées par les acteurs de terrain (agriculteurs, associations de l'arbre champêtre, chercheurs, etc.), une mesure sur l'agroforesterie* (dite Mesure 222) est valable « pour une première installation de systèmes agroforestiers sur des terres agricoles ». Elle est aujourd'hui mobilisable par les agriculteurs et est cofinancée par les collectivités territoriales (Régions et Départements) ; elle peut prendre en charge jusqu'à 80 % de la dépense éligible, à savoir 12,64 € / arbre. Au niveau des plantations de haies champêtres, selon les politiques locales des Régions et des Départements, un appui des collectivités est également possible.

Des discussions sont en cours pour améliorer et amplifier ces dispositifs.

(* *Alignements d'arbres intra-parcellaires associés à une culture ou à un parcours d'élevage*)

J.P. Lanly³. – Il y a un sujet que l'on n'a pas évoqué aujourd'hui, et qui mériterait sans doute une séance à lui tout seul. C'est celui de l'allélopathie, c'est-à-dire de la difficulté de la coexistence ou de la cohabitation, physiologiquement parlant, entre arbres et cultures.

Un commentaire : est-ce que dans les réponses qui ont été faites à la question de Francis Caillez sur les coûts et les payeurs, il n'y a pas l'hypothèse que les externalités seront financées ? ceci peut avoir été le cas en matière de plantes agricoles, mais l'est très rarement pour les arbres.

F. Liagre. – Il existe à l'échelle européenne une mesure de subvention à la plantation (mesure 222) qui couvre de 70 à 80 % des coûts de plantation et de suivi pendant 3 ans (cela va passer à 5 ans à partir de 2014). Cette mesure d'inspiration française n'a pas été adoptée immédiatement en France en 2009 mais activée à mi-parcours. Aujourd'hui, plus de la moitié des régions l'ont activée avec des financements de collectivités ou d'Agences de l'eau.

En revanche, je ne parle pas de massif linéaire mais simplement d'arbres. Ce n'est pas une mesure de reboisement... mais bien d'agroforesterie.

M. Hadley⁴. – La PAC va être renouvelée fin 2013, est-ce qu'il y a des implications pour l'arbre champêtre ? Est-ce qu'il y a beaucoup de différences entre les pays européens vis-à-vis de l'arbre champêtre ?

F. Liagre. – Nous espérons que dans la prochaine PAC, la mesure 222 soit reconduite. *A priori*, ce sera le cas, mais nous espérons surtout qu'elle concerne l'agroforesterie au sens large : alignement, trognes, prés-vergers ou haies. Ce qui n'est pas encore le cas. Une mesure unique arbre champêtre serait un pas énorme dans la simplification de l'administration des projets.

Dans le premier pilier, nous souhaitons que l'agroforesterie soit reconnue comme un système agricole à part entière. Pour qu'une parcelle agroforestière soit entièrement éligible, et sous toutes ces formes agroforestières. La France fait figure de pionnière en ayant validé l'éligibilité des parcelles pour moins de 200 arbres. Il faut aller plus loin et surtout le faire valider à l'échelle européenne, ce qui serait plus simple pour tout le monde. D'autre part, avec l'association BASE, nous demandons que la conditionnalité évolue et qu'on aille vers une obligation de résultats (par exemple, améliorer la qualité biologique des sols) plutôt que de moyens comme c'est le cas actuellement en obligeant les agriculteurs à avoir un certain pourcentage d'éléments topographiques qui n'ont pas de cohérence agroécologique. A quoi sert de planter 3 % de sa SAU sans remettre en cause le système globalement ? De plus, un objectif de résultat permet à l'agriculteur de choisir le moyen d'y arriver (agriculture de conservation, agriculture « bio », agroforesterie, etc.). Dans cette configuration, on travaille en partenariat avec l'agriculteur et on ne le place pas dans une situation infantilissante comme c'est le cas de la conditionnalité actuelle.

G. Tendron⁵. – Cette séance a été particulièrement intéressante et il convient d'en féliciter les organisateurs.

² Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, directeur de recherche au CNRS, présidente du Groupe d'Histoire des forêts françaises, 45, rue d'Ulm, 75005 Paris.

³ Trésorier perpétuel de l'Académie d'Agriculture de France, ingénieur général honoraire du Génie rural, des Eaux et des Forêts.

⁴ Ancien fonctionnaire principal, division des Sciences écologiques, UNESCO-Paris.

Cependant les problématiques concernant les arbres isolés, les haies, le sylvopastoralisme et l'agroforesterie sont assez différentes et auraient mérité des approches plus ciblées afin de préciser les attentes sociales et les préoccupations des agriculteurs et des éleveurs.

Les expériences rapportées ont mis en évidence que le succès des projets requiert un accompagnement par des spécialistes pour monter les projets et aider les agriculteurs à les mettre en œuvre et en assurer le suivi par un appui technique qualifié et de la formation.

Par ailleurs, on a bien perçu que le développement d'actions en faveur des arbres champêtres résulte largement d'initiatives locales. Une véritable politique nationale en la matière, déclinée régionalement, en fonction des réalités locales, apparaît dès lors indispensable. D'autant que, traditionnellement, en région d'élevage, l'arbre est généralement considéré comme un allié et les haies, par exemple, ont toujours été entretenues par les éleveurs, alors qu'en région de culture, l'arbre a été longtemps éliminé pour faciliter le travail des champs.

Enfin, il convient de souligner l'importance qui s'attache sur ce type de sujet à confronter les connaissances des scientifiques et l'expérience des acteurs locaux afin de promouvoir la mise en œuvre de solutions réalistes, acceptables par les agriculteurs.

⁵ Secrétaire perpétuel de l'Académie d'Agriculture de France, ingénieur général honoraire du Génie rural, des Eaux et des Forêts, Président de l'Association professionnelle des ingénieurs du Génie rural, des Eaux et des Forêts, Président de la Commission d'orientation de la formation des ingénieurs forestiers.

CONCLUSION DE LA TABLE RONDE : L'ARBRE CHAMPÊTRE : QUEL AVENIR ?

par Pierre Donadieu¹

Les réponses à trois questions ont été débattues :

- Qu'est ce qu'un arbre champêtre ?
- Quels rôles joue l'arbre champêtre ?
- Pourquoi et comment agir sur l'évolution des paysages arborés champêtres et au bénéfice de qui ?

D'abord il faut distinguer en France deux types d'arbres :

- celui qui est un outil direct de production et de profit pour les agriculteurs : l'arbre **producteur** de fruits, de bois (les peupliers, les résineux, les eucalyptus) ou de médicaments (gingko) : c'est un **arbre de monoculture à fonction financière** qui disparaît quand cette rente disparaît ;
- celui qui, **voulu ou non, accompagne** les systèmes de production agricole dans ou au bord de l'espace cultivé ou pâturé : l'arbre des haies (libres, émondées), des prairies (prés-vergers), des parcours arborés, des bords des cours d'eau ; et l'arbre agroforestier associé aux cultures (céréaliculture avec jeunes peupliers, merisiers et noyers, pâturage sous/avec les résineux ou les feuillus, etc.).

Celui qui nous intéresse directement est le second, l'arbre d'accompagnement ; il est soumis à quatre dynamiques :

- *soit il disparaît ou est menacé* parce que les acteurs agricoles n'en ont plus besoin et il les handicape (ombre, coût de l'entretien) ; c'est le cas des cultures de céréales et d'oléoprotéagineux,
- *soit il s'étend aux dépens des terres agricoles* quand la déprise agricole s'installe durablement, notamment dans les régions de montagne (les accrus forestiers) ou de zones humides (boisement spontané),
- *soit il subsiste* car il est entretenu et apporte plus d'avantages économique-écologiques que de préjudices ou handicaps aux systèmes de production agricole (arbre des bocages, agroforesterie, notamment les arbres des cultures intercalaires),
- *soit il est réimplanté* par les agriculteurs dans le cas de politiques publiques de néobocages, agroforestières ou de réponses d'aménagement de l'espace aux demandes sociales (accès plus confortable des promeneurs à la campagne).

Ces dynamiques sont possibles en tout lieu d'un territoire, et les conflits latents sont fréquents et difficiles à arbitrer entre les élus, les agriculteurs et les habitants. Comment peut-on éclairer les acteurs agricoles et les élus des communes en fonction des rôles que jouent les arbres ?

Trois interprétations de leurs rôles sont possibles :

- **Avec une lecture seulement économique** : les arbres ne sont plantés et ne sont entretenus que s'ils représentent des sources de revenus, principales et/ou complémentaires, significatives pour les agriculteurs. Ce qui dépend de la complémentarité arbres/cultures/prairies (ex. des céréales associées aux noyers ou aux merisiers) et des marchés :
 - sources directes : vente de bois de chauffe, d'emballage ou d'œuvre sous des formes diverses, de fruits, etc ;
 - sources indirectes : miel des acacias, abris pour le gibier de chasse, abris pour le bétail, etc.

Dans le cas contraire : pas de revenus, ils sont alors abandonnés, supprimés ou non plantés.

- **Avec une lecture seulement environnementale (écocentrée)** : les arbres d'accompagnement sont maintenus, plantés, entretenus s'ils procurent des services écosystémiques aux agrosystèmes (au

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur à l'ENSP (Versailles –Marseille).
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 20 février.

milieu physique : fertilité accrue et fixation des sols, dénitrification des sols et de l'eau, microclimatisation, stockage du carbone, ou biologique : biodiversité accrue, pollinisation, réduction de l'eutrophication des eaux, avec des bénéfices écologiques et financiers supérieurs aux inconvénients ou difficultés rencontrés par les exploitants (coûts, gestion collective à échelle spatiale variable)

- soit par des associations mutualistes sur la parcelle : arbre/culture, arbre/prairie/animal, arbre/eau,
- soit par des associations mutualistes en limite de parcelles (Haie/culture, haie/prairie, cultures/bandes enherbée/ripisylve).

Si les services écosystémiques des arbres agricoles et para-agricoles ne sont pas convaincants, et si aucune injonction juridique ne les impose, ils n'entrent pas en général à ce titre dans le projet des agriculteurs. Dans tous ces cas, les résultats de la recherche en agroécologie et en écologie du paysage sont essentiels, car le dispositif législatif existe à l'échelle nationale et européenne pour les maintenir ou les renouveler.

Cependant, les actions publiques territoriales (trames vertes et bleues) doivent être cohérentes avec les pratiques que mettent en œuvre les agriculteurs (néobocages, bandes enherbées, agroforesterie). Quelle largeur des corridors de connexion ? Quelle densité des arbres et arbustes au sein des corridors ? Quels objectifs locaux et territoriaux de biodiversification ? Quelles techniques agricoles (rotation, diminution des entrants, variétés, etc.) peuvent être cohérentes avec les dispositifs techniques environnementaux ? Les dispositifs d'observation et d'expérimentation semblent encore insuffisants en France.

- Avec une lecture seulement sociétale (sociocentrée)

Les arbres champêtres sont des marqueurs importants des paysages ruraux et leur dynamique (disparition, maintien, extension) des repères essentiels pour les habitants comme pour les visiteurs. L'appréciation des milieux ruraux ou périurbains, avec ou sans arbres, dépend des regards qui attribuent des valeurs esthétiques et éthiques à ce qui est perçu. Cinq catégories de valeurs regroupant des valeurs d'usage, fonctionnelles et économiques des milieux cultivés arborés peuvent être mobilisées et ne s'excluent pas (ce sont des postures) chez la même personne, agriculteur ou non :

- *la valeur économique* : productive, c'est celle de la vente des produits de l'arbre sur un marché (bois, fruits, feuilles, etc.) et de ses sous-produits (gibier, champignons). La valeur paysagère marchande est celle du paysage (avec arbre) comme élément de marketing territorial (les châtaigniers de l'Ardèche, les mirabelliers de Lorraine),
- *la valeur biologique et plus largement naturaliste*, est celle accordée à la diversité des espèces, à l'intérêt pour la résilience possible des milieux agricoles arborés (lutte contre l'érosion, le vent, la pollution des eaux, etc.), ex : les ripisylves à aulnes et frênes,
- *la valeur identitaire et patrimoniale* accorde à l'arbre une symbolique identitaire et de transmission individuelle et collective (nos noyers, nos platanes, nos cyprès, nos haies, nos ragosses, disent les Normands, les Bretons ou les Provençaux),
- *les valeurs d'habitat et de loisir* sont associées d'une part à des pratiques sportives et de loisirs (un cadre agréable d'activités), et d'autre part à un cadre de vie (le confort, la distinction) où la présence d'arbres (parfois décoratifs et/ou économiques) peut être essentielle, ex : Les tilleuls des Baronniees,
- *les valeurs esthétiques et de sacralité* font du rapport à l'espace perçu des campagnes, avec arbres ou sans, une expérience recherchée (beauté, symbolique, mystique) irremplaçable. Ex. : les cyprès de Provence ou les chênes centenaires des prairies du Perche. Ce qui n'exclut pas la reconnaissance des plaines de Beauce sans arbres.

Du point de vue de la société de culture urbaine, les campagnes avec arbres (mais selon la nature des essences, leurs formes et leur importance) sont préférées en général aux campagnes sans arbres par les visiteurs et les habitants. Les conflits d'intérêt entre céréaliculteurs et acteurs habitants, et dont l'enjeu est la présence ou l'absence de l'arbre, n'ont de solutions pérennes que locales.

La gouvernance territoriale des arbres

Chacun pouvant faire usage de ses valeurs tour à tour (postures) selon les contextes et les enjeux, la mise en place d'une gouvernance multiacteurs des arbres d'un territoire devrait s'imposer aux élus. Ainsi, selon les contextes locaux, une hiérarchie différente des valeurs morales débattues (ce qui convient à une majorité) se

met en place pour savoir quelle décision publique démocratique constitutive à la fois des intérêts particuliers et du bien commun arboré à construire ou à préserver peut être prise.

C'est dans ce contexte d'un processus territorial de gouvernance des arbres que les trois lectures des paysages arborés indiquées peuvent être articulées. Ce processus de concertation est toujours long et les résultats dépendent surtout de la familiarité des acteurs locaux avec les outils de la démocratie participative.

Les quatre catégories d'évolution des arbres champêtres peuvent être encadrées par deux polarités principales de gouvernance territoriale probable, prenant en compte le **marché** des biens agricoles, agroalimentaires, cynégétiques, de loisirs et de tourisme, et ce qui reste **hors marché** (les services environnementaux et paysagers) et relève du bien commun.

- *Gouvernance top down* : déterminée plus par les pouvoirs publics territoriaux et leurs techniciens que par l'Etat qui aura moins de moyens financiers à l'avenir. Mise en œuvre des services environnementaux et paysagers publics des arbres locaux par des incitations financières. (ex : les néobocages, les plantations le long des voiries publiques).
- *Gouvernance bottom up* : déterminée plus par les intérêts (de toutes natures) des acteurs privés et associatifs territoriaux que par les pouvoirs publics et pouvant aller jusqu'à l'effacement de ces derniers (autonomie, indépendance) ; ex. : les peupleraies de toutes tailles.

En pratique, ces deux types de gouvernance des arbres (un cas de gouvernance des ressources naturelles communes) confluent pour créer *à la fois* un bien commun territorial, matériel et immatériel transmissible (un patrimoine arboré de services, reconnu, géré et partagé selon des règles débattues démocratiquement) et des biens matériels privés et publics.

LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE DANS LES PAYS DU SUD DE LA MÉDITERRANÉE : ENJEUX ET PERSPECTIVES

INTRODUCTION

par Jean-Louis **Rastoin**¹

Dans tous les pays du monde, le droit à l'alimentation des peuples, inscrit dans la Déclaration universelle des droits de l'homme des Nations unies (1948) devrait guider l'action des responsables politiques dans le domaine agricole et alimentaire et plus généralement du bien-être des citoyens. Ce droit fonde la définition de la sécurité alimentaire adoptée par la FAO au Sommet mondial de l'alimentation de 1996, à Rome, puis précisée par le CSA en 2012 : « *La sécurité alimentaire et nutritionnelle existe lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique, social et économique à une nourriture saine dont la quantité consommée et la qualité sont suffisantes pour satisfaire les besoins énergétiques et les préférences alimentaires des personnes, et dont les bienfaits sont renforcés par un environnement dans lequel l'assainissement, les services de santé et les pratiques de soins sont adéquats, le tout permettant une vie saine et active.* ». La sécurité alimentaire et nutritionnelle est donc une notion à la fois quantitative et qualitative, biologique, sociale et politique dont les conditionnalités sont :

- une disponibilité des aliments (production locale et/ou importation),
- un accès à la nourriture (physique, économique, social),
- une utilisation saine (conditions de consommation),
- une stabilité de l'approvisionnement (volumes et prix),
- une diversité et une qualité conformes aux standards nutritionnels et aux habitudes alimentaires.

De nombreuses études montrent que ces conditionnalités sont fortement corrélées avec le niveau de revenu et d'éducation et relèvent donc de responsabilités individuelles et collectives (locales, nationales et internationales) (Rastoin et Ghersi, 2010).

On peut considérer aujourd'hui que près de 40% de la population mondiale se trouve en état d'insécurité alimentaire et nutritionnelle, du fait d'un ou plusieurs des critères ci-dessus.

Dans les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée (PSEM), la sous-alimentation est relativement réduite (5% de la population *vs* 13%, moyenne mondiale en 2010), mais stagnante. La malnutrition par carences ou excès est en revanche fréquente : les maladies non transmissibles d'origine alimentaire sont à l'origine directe ou indirecte de 54% des décès contre 50% en moyenne mondiale et on observe une prévalence élevée de certaines de ces maladies dont l'obésité, le diabète, et les affections cardiovasculaires.

Les pays du Maghreb et l'Égypte affichent une dépendance croissante des marchés extérieurs pour leur alimentation, en particulier en céréales et oléoprotéagineux qui constituent la base de leur diète. L'Algérie et l'Égypte figurent ainsi parmi les tout premiers importateurs mondiaux de blé. Cette dépendance creuse les déficits publics tant au niveau de la balance commerciale (40 milliards de dollars en 2011, soit 4 fois plus qu'en 2000) que des budgets gouvernementaux du fait de l'existence de caisses de compensation destinées à maintenir le prix des aliments compatibles avec les revenus des classes populaires. On note par ailleurs, dans les dernières décennies, une faible progression de la production en grandes cultures et des difficultés d'organisation des filières. Les récentes révolutions dans la zone (Tunisie, Égypte, Libye, Syrie) ont par ailleurs pointé la question lancinante du sous-développement rural. Les perspectives d'avenir sont handicapées par la montée de nouvelles contraintes : épuisement des ressources en eau, dégradation des sols, pression foncière accrue, chômage de masse, disparition de la diète méditerranéenne favorisant une progression inquiétante des maladies non transmissibles d'origine alimentaire, changement climatique, etc. (Rastoin *et al.*, 2012). Dans ce contexte, l'enjeu d'une sécurité alimentaire durable devient central et invite à

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur émérite de Montpellier SupAgro.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 27 février.

définir rapidement de nouvelles politiques alimentaires et agricoles : selon certains exercices de prospective, la zone Afrique du Nord – Moyen-Orient pourrait devenir la zone du monde la plus menacée par l'insécurité alimentaire (Hervieu *et al.*, 2008, Paillard *et al.*, 2010).

Pourtant, les actions gouvernementales paraissent bloquées avec :

- une inflation institutionnelle et sémantique post-crise de 2008 (G8, G20, CSA, *High Level Panel of Expert on Food Security and Nutrition*, etc.), mais peu d'avancées en dehors d'un embryonnaire observatoire international des marchés agricoles (*Agricultural Market Information System*, AMIS) ;
- l'absence de « cadre stratégique » gouvernemental (chacun des PSEM) et inter-gouvernemental (l'Union européenne et l'Union du Maghreb arabe sont peu mobilisées sur le thème de la sécurité alimentaire régionale) et de financements clairement ciblés (*European Neighbourhood Programme for Agriculture and Rural Development – ENPARD* de l'Union européenne et fonds souverains sont positionnés sur des approches agricoles).

On semble *in fine* rester dans le cadre du consensus de Washington et de la coopération bilatérale dont l'impuissance à contribuer à un développement alimentaire durable a largement été confirmée par la communauté scientifique.

Pourtant, la région méditerranéenne possède deux atouts exceptionnels pour construire une sécurité alimentaire partagée : une communauté culturelle et naturelle autour de sa diète alimentaire reconnue par les nutritionnistes du monde entier et un espace euroméditerranéen géostratégique de proximité et de solidarité (Guigou, 2012). Ces deux éléments sont porteurs d'espoir.

Pour traiter de la question hautement sensible de l'insécurité alimentaire contemporaine en Méditerranée et suggérer des pistes d'action porteuses d'avenir, nous entendrons, puis nous débattons avec :

- Radhi **Meddeb**, chef d'entreprise, président de l'Institut de prospective économique du monde méditerranéen, Ipemed, et président-fondateur de l'association Action et développement solidaire, Tunis, qui analysera le concept de sécurité alimentaire du point de vue de l'économie politique et de la société civile dans les pays du Maghreb,
- Sébastien **Abis**, administrateur au Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes, Ciheam, qui présentera le cadre géopolitique de la sécurité alimentaire méditerranéenne,
- Bernard **Roux**, chercheur honoraire de l'INRA, qui s'interrogera sur la possibilité d'une plus grande souveraineté alimentaire au Maghreb,
- Bertrand **Hervieu**, Vice-Président du CGAAER et ancien secrétaire général du Ciheam, qui tirera les conclusions de la séance.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) CSA, 2012. – S'entendre sur la terminologie, Sécurité alimentaire, Sécurité nutritionnelle, Sécurité alimentaire et nutrition, Sécurité alimentaire et nutritionnelle. Comité de la sécurité alimentaire mondiale, 39^e session, Point V.a, CFS 2012/39/4, Rome : 17 p.
- (2) GUIGOU J.-L., 2012. – Le nouveau monde méditerranéen, Descartes & Cie, Paris, 129 p.
- (3) HERVIEU B., éd., 2008. – Méditerranée, Les futurs agricoles et alimentaires en Méditerranée, Les Presses de Sciences Po., CIHEAM, Paris, 368 p.
- (4) PAILLARD S., TREYER S. ET DORIN B. (coord.), 2010. – Agrimonde : Scénarios et défis pour nourrir le monde, Quæ, Versailles, 295 p.
- (5) RASTOIN J.L., GHERSI G., 2010. – Le système alimentaire mondial, concepts et méthodes, analyses et dynamiques, préface d'Olivier de Schutter, Rapporteur spécial des Nations-Unies sur le Droit à l'alimentation, Éditions Quæ, Paris, 581 p.
<http://www.quae.com/fr/r966-le-systeme-alimentaire-mondial.html>
- (6) RASTOIN J.L., BOURGEOIS L., CHERIET F., MOVAHEDI N., 2012. – Pour une politique agricole et agroalimentaire euro-méditerranéenne, Ninagrimes, Ipemed, série « Construire la Méditerranée », Paris ? 86 p.

SÉCURITÉ ALIMENTAIRE ET ÉCONOMIE POLITIQUE DANS LES PAYS DU MAGHREB : L'ACCÈS À L'ALIMENTATION

par Radhi Meddeb¹

Dans les PSEM, l'agriculture et les activités qui lui sont liées font vivre au moins 72 millions de personnes. De plus, la population des PSEM va passer, dans les 20 prochaines années, de 280 millions d'habitants à 352 millions (+72 millions). Du fait de la démographie, il faudra créer autour de 2 millions d'emplois par an à l'horizon 2030, en plus de la résorption indispensable d'un chômage structurel élevé. L'espace rural et le système alimentaire, l'artisanat et l'agrotourisme pourraient apporter une contribution significative dans ce cadre. La réponse proposée à ces multiples enjeux est la création d'une politique alimentaire et agricole commune pour les PSEM (PAAC-PSEM). La PAAC-PSEM a pour objectif d'améliorer la sécurité alimentaire quantitative et qualitative des populations à travers l'augmentation de la production agricole et alimentaire des PSEM et la mise en place d'un partenariat commercial euro-méditerranéen structuré autour de l'organisation de filières agroalimentaires territorialisées pour le développement des zones rurales.

Le coût d'une PAAC-PSEM a été estimé au début des années 2010 à environ 31 milliards de dollars par an, dont environ 26 milliards pour la politique alimentaire et 5 milliards pour les mesures agricoles. Le volet alimentaire pèse aujourd'hui considérablement sur les équilibres macroéconomiques dans les PSEM. Il est proposé de redéployer ces budgets en dirigeant une partie vers la production agricole et en introduisant des aides directes aux ménages défavorisés, d'une part, et, d'autre part, en triplant la part consacrée à l'information et à l'éducation du consommateur et au contrôle de qualité des produits alimentaires. Dans les PSEM, il s'agirait principalement d'un redéploiement des budgets agricoles actuels qui se chiffrent à environ 20 milliards €. Pour l'UE, la contribution à la PAAC-PSEM s'élèverait à 4 % du budget actuel de la PAC et 26 % du budget de coopération internationale « imputable » aux PSEM. Au total, le volet agricole de la PAAC-PSEM coûterait moins de 13 € par personne et par an, soit 5 € par citoyen européen et 8 € par habitant des PSEM. Enfin, la PAAC-PSEM devra s'inscrire dans le cadre d'un partenariat euroméditerranéen conçu comme un volet spécifique de la politique de voisinage de l'UE.

(Reçu le 20 février 2013)

¹ Président de l'Institut de Prospective économique du monde méditerranéen, Ipemed, président-fondateur de l'association Action et développement solidaire, Tunis.

GÉOPOLITIQUE DE LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE MÉDITERRANÉENNE

par Sébastien **Abis**¹

Les révoltes qui secouent les pays arabes méditerranéens ne sont pas des émeutes de la faim. Néanmoins les insécurités alimentaires et la fragilité des zones rurales constituent de puissants catalyseurs dans l'expression des revendications politiques en faveur d'une plus grande justice sociale et territoriale.

Ces pays concentrent toutes les grandes tensions agricoles de la planète : croissance de la population, transformation des modes de consommation, rareté de l'eau et de la terre, accélération des changements climatiques, vulnérabilité économique des régions de l'intérieur, dépendance envers les marchés internationaux. Ces défis s'inscrivent dans un contexte global où les dynamiques du commerce s'intensifient et les rivalités de puissance se complexifient.

Au moment où se renforce la dimension stratégique des questions agricoles et alimentaires dans le monde, n'est-il pas urgent de réexaminer les relations internationales à l'aune des besoins les plus élémentaires ? Tout comme d'autres matières premières, les produits alimentaires sont fondamentaux à l'équilibre et à la stabilité des nations.

Cette réalité va-t-elle s'imposer dans l'agenda de la coopération entre l'Europe et les pays méditerranéens ? Que veut faire la France face à de telles perspectives ?

(Reçu le 14 février 2013)

¹ Administrateur au Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes, Ciheam, Paris.

LES POLITIQUES PUBLIQUES AGRICOLES AU MAGHREB

par Bernard **Roux**¹

RÉSUMÉ

Après les indépendances et jusqu'à la moitié des années 1980, les États se montrent extrêmement présents et actifs (politique hydraulique, subventions aux intrants agricoles, soutiens aux produits de base, subventions à la consommation). Dans les années 1980 et 1990, les déséquilibres macroéconomiques obligent les États à appliquer des Plans d'ajustement structurels (PAS). Les PAS se traduisent par un fort désengagement des États (limitation des soutiens aux prix payés aux producteurs, aides aux intrants abandonnées, subventions aux produits alimentaires réduites). En résumé, le règne des lois du marché est instauré. Au cours des années 2000, les politiques rurales intègrent les préoccupations de préservation des ressources naturelles et l'amélioration des infrastructures et des services. Pendant le demi-siècle écoulé, et malgré ces politiques successives d'inspirations différentes, la dépendance alimentaire en produits de base n'a cessé de s'aggraver. Des conditions naturelles peu favorables (climat méditerranéen, faible disponibilité en sols fertiles, manque d'eau) expliquent en partie le déficit agricole. Mais d'autres causes tout aussi importantes sont à souligner : refus de réduire le dualisme des structures agraires qui concentrent les moyens et les rentes dans les grandes exploitations, insuffisance et inégalité du développement rural, articulation excessive aux marchés internationaux déterminée par l'adhésion au libre-échange. Les nouveaux plans de développement agricole et rural (Plan Maroc vert au Maroc, politique de renouveau agricole et rural en Algérie) n'envisagent pas de s'attaquer à ces causes structurelles, au contraire, ils privilégient les mesures qui les renforcent : les chances de réduire l'insécurité alimentaire sont faibles. Des politiques qui viseraient au développement équilibré des territoires ruraux et du tissu de l'économie agricole devraient s'inspirer de quelques principes : privilégier l'agriculture familiale en la soutenant techniquement et financièrement, soutenir les produits agricoles de base et les protéger aux frontières, reconsidérer les cultures d'exportation consommatrices d'eau, reconstituer le lien entre les territoires intérieurs et les centres urbains de consommation, lien qui est en train de se rompre sous l'effet de l'articulation aux marchés mondiaux.

Introduction

Depuis les indépendances, l'Algérie, le Maroc et la Tunisie ont mis en œuvre des politiques agricoles qui ont fluctué mais qui, sur le papier au moins, ont affiché toujours un même cap : tenter d'assurer la couverture des besoins alimentaires à partir des ressources nationales. Malheureusement, cet effort n'a pas été couronné de succès puisque les trois pays sont obligés d'avoir recours massivement aux marchés mondiaux des produits agricoles de base : céréales, huiles, sucre, lait. Leur souveraineté alimentaire est donc loin d'être assurée, surtout en ce qui concerne l'Algérie.

Pour compenser le coût des importations, deux d'entre eux, le Maroc et la Tunisie, sont engagés dans une spécialisation productive qui leur permet d'exporter des fruits et légumes, principalement vers l'Union européenne (UE). Ce n'est pas le cas de l'Algérie qui n'exporte pratiquement pas de produits agricoles.

Dans la période récente, ont été définis et mis en œuvre des programmes de politique publique qui continuent à afficher l'objectif de la souveraineté alimentaire. Ont-ils quelque chance de succès, sont-ils capables d'inverser la situation actuelle, marquée par la dépendance à l'égard des marchés extérieurs ?

Les difficultés historiques des politiques publiques à réduire la dépendance alimentaire

Première période : des indépendances aux Plans d'ajustement structurel

Lorsque les pays du Maghreb accèdent à l'indépendance, la préoccupation des États est de tenter de remédier à la pauvreté et au sous-emploi qui affectent durement les populations rurales. Des chantiers

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France. Chercheur honoraire de l'INRA.

d'intérêt public sont lancés et des programmes humanitaires sont mis en place (distributions alimentaires, alphabétisation) qui, malheureusement, par manque d'ambition et de moyens, ne modifieront guère la situation. Sur le plan purement agricole, des orientations structurelles à caractère socialiste sont mises en oeuvre sur les terres coloniales en Tunisie (création de coopératives) et en Algérie (organisation de domaines autogérés) qui seront arrêtées au bout d'une dizaine d'années, tant en raison d'oppositions idéologiques qu'à cause de leur échec technique et économique.

Dans les années 1970 et la première moitié des années 1980, les Etats se montrent extrêmement présents et actifs. Ils accentuent la politique hydraulique en mobilisant les eaux de surface par de nombreux barrages qui permettent la mise en eau de grands périmètres irrigués, notamment au Maroc. Sur ces périmètres, s'exerce une planification tatillonne par des offices publics, tandis que des subventions aux intrants agricoles et des soutiens aux produits de base, notamment les céréales, sont accordés aux agriculteurs des zones irriguées comme « en sec ». Des subventions aux aliments les plus importants dans les régimes des populations complètent le dispositif. Ces orientations de politiques agricoles et alimentaires vont être structurantes par l'incitation au développement des cultures d'exportation dans des exploitations dites modernisées en Tunisie et au Maroc, tandis que les exploitations familiales traditionnelles resteront marginalisées par ces politiques dans les trois pays.

Deuxième période : à partir des Plans d'ajustement structurel

Dans les années 1980 et 1990, les déséquilibres macroéconomiques (dette publique, déficit commercial, déficit budgétaire) conduisent les Etats à accepter l'intervention du FMI et de la Banque mondiale et à appliquer des Plans d'ajustement structurels (PAS) (1984 au Maroc, 1986 en Tunisie, 1994 en Algérie). Dans les politiques agricoles et alimentaires, les PAS vont se traduire par un fort désengagement des Etats. Les garanties de prix à la production sont limitées à quelques cultures, différentes selon les pays (céréales, lait, pommes de terre de semence, tomate industrielle en Algérie, céréales ailleurs). Les subventions aux produits alimentaires sont réduites au pain dans les trois pays et, en plus, au lait en Algérie. Par ailleurs, les aides aux intrants sont abandonnées, les États cessant de gérer les périmètres irrigués et diminuant les budgets consacrés à la formation des agriculteurs.

En même temps que s'instaure l'application des mesures restrictives des PAS, les années 1990 sont marquées par des programmes compensatoires de développement rural visant à prendre en compte les inégalités en matière d'infrastructure et de niveau de vie dont souffrent les campagnes par rapport aux zones urbaines, notamment les plus enclavées et marginales. La décennie voit la mise en place, en Tunisie, de Programmes de développement rural intégré (PDRI) qui financent des équipements collectifs et des actions productives pour les plus démunis. La Tunisie deviendra le pays du Maghreb au milieu rural le mieux équipé. A la même époque, un type analogue d'intervention de l'Etat est mis en œuvre au Maroc, notamment à travers des projets de mise en valeur de périmètres en *bour* (cultures pluviales). En Algérie, les désordres considérables des années 1990 empêchent l'exécution de programmes allant dans le même sens.

Au cours des années 2000 les politiques rurales se poursuivent en intégrant les préoccupations de préservation des ressources naturelles, notamment en Tunisie avec la nouvelle génération des PDRI qui restent cependant centrés sur l'amélioration des infrastructures et des services (pistes, eau potable, habitat, électrification, santé). En Algérie, le Plan national de développement agricole et rural (PNDA), inauguré en 2000, doté d'importants moyens financiers, vise les mêmes objectifs en s'appuyant sur une démarche participative de développement local. La politique de renouveau rural (PRR), adoptée en 2005, s'adresse prioritairement aux communautés pauvres enclavées (amélioration des conditions de vie, diversification des activités, protection des ressources naturelles). Au Maroc, s'applique la Stratégie 2020 à partir de financements nationaux et internationaux de projets sociaux, économiques et environnementaux.

Plusieurs causes peuvent expliquer ces difficultés historiques, parmi lesquelles :

- la forte croissance de la population, bien connue de tous et sur laquelle on ne reviendra pas ici,
- l'insuffisance des moyens, matériels et humains, mobilisés pour la mise en œuvre des politiques publiques,
- les contraintes du milieu, qui constituent un gros obstacle à la croissance de la production agricole,
- la structure agraire, marquée par la présence d'un très grand nombre de petites et très petites exploitations marginalisées par les politiques publiques.

Il faut s'attarder sur ces deux dernières causes, qui paraissent très importantes, avant d'évoquer les politiques en cours.

Les contraintes du milieu, gros obstacles à la production agricole

Quels qu'ils soient, ces programmes ne peuvent ignorer les fortes contraintes du milieu auxquelles l'agriculture doit faire face au Maghreb. Rappelons-les succinctement.

Les climats méditerranéens et arides, peu favorables à l'agriculture

Le climat méditerranéen est contraignant pour les pratiques agricoles en raison d'une longue saison estivale sèche et chaude et d'une pluviométrie irrégulière qui varie beaucoup dans le temps et dans l'espace. Les pluies tombent en grande partie pendant la saison froide, lorsque la demande en eau des cultures est faible et souvent sous forme d'averses violentes qui provoquent l'érosion. La survenue de la sécheresse, qui est une menace constante, peut affecter considérablement la production, en zone aride comme méditerranéenne. En outre, le réchauffement climatique constitue une menace qui pourrait encore réduire les potentialités agricoles.

Cependant, il existe quelques rares avantages : la douceur relative des hivers et la lumière, présente en toutes saisons. Quand le rayonnement photosynthétique peut être associé à la chaleur et à l'eau, il permet des récoltes abondantes, par exemple dans la production de primeurs sous serre, qui procure le principal avantage comparatif de l'agriculture méditerranéenne.

Le sol agricole, une ressource rare et menacée

Les sols aptes à une exploitation productive satisfaisante, fertiles ou fertilisés par l'homme, sont en petite proportion, limitation qui résulte autant de l'omniprésence du relief montagneux que de la faible évolution de la pédogenèse dans les zones arides. De plus, la ressource en terre est soumise à l'érosion hydrique et éolienne, souvent corrélée aux pratiques agricoles, à la surexploitation de la végétation par le pâturage, à la salinisation due à une irrigation mal maîtrisée.

Il faut ajouter la perte de terres agricoles due à l'artificialisation, soit par la construction de logements, soit par des infrastructures, notamment à proximité des villes, là où les terres sont les meilleures. Cette détérioration de la ressource se combine avec la croissance démographique pour réduire chaque jour un peu plus les disponibilités en terre cultivée. Actuellement, les terres cultivables disponibles par habitant sont de 21 ares en Algérie, 22 ares au Maroc, 46 ares en Tunisie, en diminution de plus de 50 % depuis 40 ans.

L'eau, une ressource limitée face aux besoins agricoles

En raison de l'aridité du climat et de la forte progression démographique, l'eau disponible par habitant est une ressource rare.

Face à la contrainte climatique et à la rareté des terres fertiles, l'irrigation a toujours constitué la riposte favorite des agriculteurs. La plus grande extension des surfaces irriguées vient de l'eau stockée dans les retenues des grands barrages. La part de l'eau mobilisable sous cette forme est maintenant très avancée et l'envasement des retenues réduit sa durabilité. Complétant la grande hydraulique, les pompages dans les nappes phréatiques se sont beaucoup développés dans les dernières années.

Au total, malgré les efforts de générations d'agriculteurs et l'investissement important des pouvoirs publics, la part de l'irrigation reste modeste: 12,5 % de la surface agricole utilisée au Maroc, 9,5 % en Algérie, 7 % en Tunisie.

Des perspectives peu encourageantes d'augmentation de la production

Toutes ces contraintes naturelles placent les agricultures du Maghreb dans des situations de risque et d'incertitude et hypothèquent les possibilités de croissance agricole à venir car :

- l'aridité du climat limite l'extension potentielle des surfaces cultivées,
- la production des cultures en sec, en plaines et plateaux, limitée par le climat, ne pourrait s'accroître que de 40 % au mieux,
- dans les cultures en irrigué, les possibilités d'augmentation de la production, soit par les rendements, soit par l'extension des surfaces, sont inférieures à l'augmentation prévisible des besoins.

En conséquence, compte tenu de l'accroissement des besoins futurs expliqués par la démographie et le revenu, la réduction de la dépendance alimentaire ne se présente pas sous les meilleurs auspices

Une difficulté structurelle : le dualisme de l'agriculture

Si le milieu est une contrainte pour le développement agricole, la structure agraire ne l'est pas moins. Quelle est cette structure agraire? A quel genre d'exploitations et d'exploitants agricoles a-t-on affaire dans les trois pays du Maghreb? Qui opère dans ce milieu naturel majoritairement ingrat que nous venons d'évoquer? On va s'arrêter un instant sur ces questions.

Il y a environ 3 millions d'exploitations au Maghreb : 1,02 million en Algérie (2001), 1,43 million au Maroc (1996), 0,51 million en Tunisie (2005), ce qui donne une petite surface moyenne par unité de

production : 8,4 ha en Algérie (2001), 6,1 ha au Maroc (1996), et 10 ha en Tunisie (2005). On trouve, d'un côté, une myriade de petites et très petites exploitations familiales, principalement situées en zones non irriguées, vivant principalement de la céréaliculture et de l'élevage, souvent à la marge de la viabilité économique, très vulnérables à la sécheresse, d'une surface insuffisante pour assurer un revenu décent aux familles paysannes. De l'autre côté se développent des exploitations de grande superficie, capitalisées, utilisant le travail salarié et parmi lesquelles se trouvent celles qui utilisent les canaux commerciaux de l'exportation.

En Algérie (2001), les trois quarts (75,5 %) des exploitations ont moins de 10 ha, elles se partagent un quart (25,4 %) des terres agricoles et sont d'une dimension moyenne de 2,8 ha. A l'autre extrémité de la structure agraire, au delà de 50 ha, 1,9 % des exploitations concentrent 22,7 % des terres, sont d'une dimension moyenne de 96 ha et sont ainsi 34 fois plus grandes que la masse des petites exploitations.

Au Maroc (1996), près de 90 % (87,7 %) des exploitations ont moins de 10 ha, se partagent 45,6 % des terres agricoles et sont d'une dimension moyenne de 3 ha. A l'autre extrémité de la structure agraire, au delà de 50 ha, 0,7 % des exploitations concentrent 15,4 % des terres, sont d'une dimension moyenne de 86 ha et sont donc 28 fois plus grandes que la masse des petites exploitations.

En Tunisie (2005), 75 % des exploitations ont moins de 10 ha, se partagent 25 % des terres agricoles et sont d'une dimension moyenne de 3,4 ha. A l'autre extrémité de la structure agraire, au delà de 50 ha, 3 % des exploitations concentrent 33 % des terres, sont d'une dimension moyenne de 128 ha et sont donc 37 fois plus grandes que la masse des petites exploitations.

Entre les deux pôles de la structure, les exploitations moyennes, dont le poids n'est pas insignifiant, sont de 12 % à 22 % en nombre et se partagent 40 % à 50 % des terres. Les exploitations petites et moyennes ont une productivité faible en raison de rendements bas et d'une faible surface par travailleur.

Ainsi, dans chaque pays, une minorité d'exploitants contrôle une part importante de la terre, du capital, des moyens de production et des techniques modernes diffusées par les industries d'amont et d'aval ainsi que par les institutions de recherche et de vulgarisation. Le mouvement de concentration foncière et capitalistique a tendance à s'intensifier. Dans les régions steppiques, les grands éleveurs s'approprient des terres d'usage collectif par la mise en culture et la motorisation. Dans les zones de plaine et de collines, le capital urbain s'investit dans des plantations de vergers et dans l'irrigation par motopompe qui permet leur développement. Dans les plaines irriguées, la mainmise des grandes exploitations est une réalité ancienne qui ne fait que se renforcer. L'intérêt des urbains pour la terre est une réalité connue. Au Maroc : « Les familles urbaines aisées investissent dans la terre et sont les principaux acheteurs des exploitations modernes mises sur le marché... D'une façon générale, elles conservent jalousement les parcelles qu'elles détiennent en indivision ou leur part du collectif » (Lazarev, 2007, p.319).

À ce dualisme purement foncier s'ajoutent d'autres facteurs de divergence entre les exploitations, conduisant à ce que certains auteurs, appellent « un nouveau dualisme agraire » qui « oppose les exploitations qui ont accès aux ressources naturelles, notamment à l'eau et qui maîtrisent les technologies et les circuits de commercialisation, aux exploitations qui, même si elles sont intégrées au marché, ne possèdent qu'une faible maîtrise des techniques, des circuits de commercialisation et qui sont exclues de l'accès à certaines ressources naturelles » (Elloumi, 2007, p. 371).

« Partout se sont donc développées au Maghreb, à des degrés plus ou moins avancés, des exploitations de grande dimension (extensives sur les zones pluviales, intensives en irrigué) coexistant aux côtés d'une petite agriculture familiale caractérisée par une surpopulation, sous-employée et déployant des stratégies de survie » (Bessaoud et Montagne, 2009, p.75).

Ce mouvement de « dualisation » a été encouragé par les pouvoirs publics et l'industrie agro-alimentaire, inspirés par le courant de pensée économique néolibéral. Il élargit le fossé entre le plus grand nombre (constitué par les familles des paysans pauvres) pratiquant des techniques faiblement productives et une minorité de moyens et grands exploitants auxquels sont fournies les capacités d'intégrer tous les facteurs de production et qui sont les premiers à profiter des politiques publiques. Ce qui signifie qu'une fraction très importante de la population rurale est maintenue dans la pauvreté.

Cette situation conduit beaucoup de décideurs à considérer que les problèmes posés par les effets de la libéralisation, c'est-à-dire la marginalisation économique d'une très importante fraction des exploitants, relèvent du domaine social. C'est un point de vue qui mérite d'être discuté : le développement, de préférence durable, consiste-t-il à pousser hors de l'agriculture les paysans les plus faibles face à la concurrence ou, au contraire, à prendre des mesures pour les aider à s'intégrer équitablement aux échanges marchands et à sauver le plus grand nombre possible d'entre eux ?

Ce dualisme constitue donc un grand défi pour le pouvoir, pour la définition des politiques agricoles et pour leur mise en oeuvre, comme nous allons le voir.

Le Plan Maroc Vert : un grand programme néolibéral

Voyons comment s'y prend le Maroc.

Selon Najib Akesbi, professeur à l'Institut agronomique et vétérinaire de Rabat, le meilleur analyste de l'agriculture marocaine selon moi, le tableau de la situation de son pays est bien sombre. Voici ce qu'il écrit en 2011 : « Depuis la fin des programmes d'ajustement structurel au milieu des années 90 jusqu'en 2007, l'agriculture marocaine a vécu orpheline d'une stratégie pour son développement. Parce que les politiques conduites jusqu'alors avaient failli, n'atteignant en tout cas guère les objectifs qu'elles s'étaient assignés, cette agriculture ne cessait de cumuler les déboires, ajoutant à ses problèmes structurels séculaires de nouvelles désillusions inhérentes à une libéralisation mal réfléchie et mal pratiquée. Ressources naturelles limitées et dégradées, structures foncières complexes et archaïques, systèmes d'exploitation peu intensifs et encore moins articulés à l'amont et à l'aval de leurs filières, production défaillante et toujours à la merci des aléas climatiques, marchés et circuits de commercialisation désorganisés, voire anarchiques, déficits commerciaux et dépendance alimentaire croissants, infrastructures déficientes et populations appauvries... »

L'Etat marocain semble vouloir prendre à bras le corps ces problèmes avec le Plan Maroc Vert, nom donné à la politique publique agricole pour la période 2008-2014. Elaboré en très peu de temps par le cabinet d'études international McKinsey, dans des conditions d'opacité quasiment totales dont se sont plaint les professionnels et les techniciens du secteur, ce plan s'est fixé des objectifs à l'horizon 2020 très optimistes : un accroissement de 40 % du PIB agricole, la création de 1,5 million d'emplois et la multiplication par 2 à 3 fois du revenu agricole pour 3 millions de ruraux.

Il s'agit d'un programme néolibéral fondé sur les principes du productivisme classique. Il érige la grande exploitation en modèle, dont il propose d'améliorer la productivité et la compétitivité en vue d'augmenter la production mais aussi de participer au libre-échange. Les moyens proposés sont, notamment, l'aide à l'investissement, la mise à niveau technologique et la contractualisation. Les actions accompagnant ces objectifs visent les 560 000 les plus grandes parmi les 1,4 million d'exploitations du pays. Elles constituent le premier pilier du programme.

Un deuxième pilier s'adresse aux 860 000 petites exploitations restantes, surtout situées dans les zones montagneuses et défavorisées. Il propose des mesures d'accompagnement visant à lutter contre la pauvreté : abandon de la céréaliculture au profit de l'arboriculture, valorisation des produits du terroir, encadrement technique.

Ces deux piliers du programme sont sous-tendus par des mesures dites transversales :

- mesures concernant le foncier : mise en gestion privée des terres publiques et collectives, régularisation de la propriété privée,
- nouvelle politique de l'eau : tarification incitative, meilleure exploitation des périmètres irrigués existants,
- mesures concernant l'exportation : développer une stratégie offensive d'accès aux marchés étrangers, promouvoir de nouveaux accords de libre-échange et améliorer les conditions à l'exportation,
- modernisation des circuits de distribution intérieurs : renforcement de la grande distribution, amélioration de l'accès aux marchés de gros et modernisation des abattoirs,
- amélioration du climat des affaires pour stimuler l'investissement privé et l'encourager à contribuer au succès du Plan Maroc Vert.

Le Plan Maroc Vert suscite des critiques; en voici quelques unes:

- il ne tient pas compte de la nature familiale de la grande majorité des exploitations : les mesures sont pensées pour s'appliquer à des entreprises et non à des unités de production fonctionnant avec la spécificité du couple famille/exploitation,
- toute idée de réforme agraire ou même simplement d'aménagement des structures foncières est abandonnée, pour laisser place aux mécanismes du marché pour agrandir les exploitations déjà les plus grandes,
- le second pilier est un simple traitement social en direction des petits agriculteurs,
- il n'y a rien dans ce plan qui esquisse une stratégie de sécurité alimentaire pour le pays.

Quelles peuvent être les conséquences de la politique publique suivie par le Plan Maroc Vert ?

- la disparition accélérée des petits paysans,
- la concentration de la production dans les grandes exploitations et dans les régions aux terres les plus fertiles,
- la diminution de l'emploi agricole,

- l'insertion accentuée dans les marchés internationaux et une dépendance accrue aux importations de produits de base.

En résumé, à ne pas mettre en avant le développement des exploitations familiales, il y a fort à parier que les objectifs du Plan Maroc Vert ne seront pas atteints.

La Politique de renouveau agricole et rural en Algérie

En 2009, l'Algérie a adopté un programme quinquennal (2010-2014) dont l'objectif central, selon son libellé, est « le renforcement de la sécurité alimentaire du pays ».

Les actions programmées avec des moyens financiers très importants (20 milliards d'€ par an) sont des plus classiques, certaines affichant des objectifs très optimistes :

- l'accroissement de la production pour arriver à couvrir 75 % des besoins en produits de base (8,3 % de taux de croissance annuel), notamment grâce au renforcement des crédits de campagne et de moyen terme,
- la diffusion du progrès technique fondé sur le renforcement de l'administration, de la recherche et de la vulgarisation,
- la sécurisation foncière,
- l'organisation des réseaux de collecte ;
- la régulation des filières, l'incitation directe aux productions de base (céréales, lait, semences), le stockage,
- l'extension de l'irrigation : passer de 900 000 ha à 1,6 million (+78 %),
- le développement équilibré des territoires ruraux et l'amélioration des conditions de vie des ruraux, notamment dans les zones défavorisées,
- la lutte contre les dégradations du milieu, par la réalisation de « contrats de performance » avec les communes rurales : protection des bassins versants des barrages, lutte contre la désertification, réhabilitation du patrimoine forestier, mise en valeur de nouvelles terres, conservation d'écosystèmes naturels.

À la différence du Maroc, l'Algérie ne définit pas explicitement telle ou telle catégorie d'exploitations vers lesquelles seront dirigées les mesures et n'évoque pas non plus l'hypothèse d'une participation aux échanges extérieurs. Mais en réalité, peu de choses distinguent les programmes des deux pays, les mêmes instruments et les mêmes méthodes s'y retrouvent.

En Tunisie, qui n'a pas défini récemment de grands programmes pour son agriculture, les mesures en cours relèvent des mêmes choix politiques.

Y a t il une politique alternative?

Résumons la situation actuelle. En choisissant la promotion de la grande exploitation et en acceptant la compétition sur les marchés internationaux en ce qui concerne le Maroc et la Tunisie, en s'approvisionnant sur les marchés mondiaux pour se nourrir, les pays du Maghreb inscrivent leurs agricultures dans la mondialisation de l'économie. Ces pays n'ayant que peu d'avantages comparatifs, il nous semble que c'est la meilleure façon pour eux de s'éloigner de la souveraineté alimentaire. Ils ne se libèreront pas de la dépendance à l'égard de l'extérieur, l'aggraveront sans doute et ne parviendront pas à équilibrer leur balance commerciale agricole.

Trois conséquences importantes sont prévisibles :

- la disparition accélérée des petits paysans et la diminution de l'emploi agricole,
- la concentration de la production dans les grandes exploitations et dans les régions aux terres les plus fertiles,
- l'insertion accentuée dans les marchés internationaux et une dépendance accrue aux importations des produits de base.

Sans oublier les contraintes naturelles dont ils souffrent, nous pensons que ces pays pourraient s'orienter vers une politique alternative qui conduirait à une meilleure sécurité alimentaire, à plus de justice sociale et à plus d'emploi. Mais il s'agirait de s'engager vers un tout autre modèle économique et social qui supposerait :

- le choix de l'agriculture familiale comme moteur du développement, plutôt que l'avantage donné à la grande exploitation,

- la protection de l'agriculture familiale aux frontières, plutôt que le libre-échange,
- la promotion de la diète méditerranéenne, plutôt que l'occidentalisation des modes de consommation,
- l'articulation de l'approvisionnement des villes par les territoires intérieurs, plutôt que l'association croissante de la grande distribution aux marchés extérieurs.

Or, ce que nous voyons des orientations politiques actuelles entraîne plutôt les pays du Maghreb dans un autre sens, celui de l'insertion accrue dans la mondialisation et d'une plus grande dépendance alimentaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) BESSAOUD O. et MONTAIGNE E., 2009. – Quelles réponses au mal-développement agricole? Analyse des politiques agricoles et rurales passées et présentes. *Options méditerranéennes. Série B : Études et recherches n° 64 : Perspectives des politiques agricoles en Afrique du Nord*, CIHEAM/AFD, Paris, p. 51-91.
- (2) ELLOUMI M., 2007. – Agriculture et développement rural en Tunisie. Les nouvelles formes d'organisation de l'agriculture familiale. In : Akesbi N., Benatya D., Zagdouni L., Zouggar A. (Dir.). *Hommage à Paul Pascon. Devenir de la société rurale, développement économique et mobilisation sociale*. Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, p.359-376.
- (3) LAZAREV G. 2007. – Quelques réflexions sur l'évolution de la ruralité au Maroc In : Akesbi N., Benatya D., Zagdouni L., Zouggar A. (Dir.). *Hommage à Paul Pascon. Devenir de la société rurale, développement économique et mobilisation sociale*. Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, p.309-326.

(Reçu le 19 avril 2013)

CONCLUSION

par Bertrand **Hervieu**¹

En conclusion, cinq points sont à retenir des présentations fort stimulantes qui nous ont été livrées.

1) La Méditerranée est un précipité de la mondialisation. La Méditerranée est au cœur des débats les plus vifs de la vie internationale et réciproquement toutes les grandes puissances sont présentes dans les économies méditerranéennes ; ceci nous oblige à abandonner une représentation de la Méditerranée comme simple flanc sud de l'Europe ou comme l'espace d'un face à face nord-sud.

2) Dans leurs relations avec les pays européens, les pays de la rive sud de la Méditerranée oscillent entre bilatéralisme et multilatéralisme de façon asymétrique. Chaque pays cultive à la fois des relations bilatérales avec les pays de la rive nord et avec l'Union européenne sans qu'aucune dynamique régionale circumméditerranéenne n'en émerge. De leur côté les pays de la rive nord peinent à construire des projets proprement méditerranéens.

3) On évoque beaucoup les questions de production et peu les sujets de logistique et de transformation industrielle. Or nous savons que l'investissement doit s'orienter prioritairement vers ces secteurs.

4) Cette situation décevante à bien des regards, nous oblige à réinterroger nos politiques de coopération mises en place depuis cinquante ans en matière de recherche et de formation des ingénieurs et des cadres. Nous avons fourni de façon continue un gros effort pour soutenir dans les pays du Maghreb la recherche et la formation. Or nous constatons que les appareils de recherche n'ont pas opéré le renouvellement des générations et sont affaiblis. Quant aux ingénieurs, formés dans les écoles au nord comme au sud, ils ne sont pas orientés prioritairement vers les secteurs agricoles et agroalimentaires. Ceci interroge.

5) Enfin, l'explosion démographique, la libéralisation des échanges, les pressions environnementales invitent à repenser les politiques publiques alimentaires et agricoles. En particulier les relations emploi, gestion du territoire et développement de la production sont les facteurs qui doivent être reliés, ce qui veut dire que nous devons sortir des propositions centrées sur le seul facteur de développement de la production et prendre en compte, conjointement, les autres facteurs.

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France
Vice-Président du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 27 février.

L'IRRIGATION, UN ATOUT POUR LA FRANCE

par Jean-Paul **Bonnet**¹

L'irrigation s'est fortement développée en France durant ces quarante dernières années. Elle s'est imposée essentiellement dans les régions soumises à des contraintes climatiques : Sud-Est et Sud-Ouest de la France, Pays de Loire, régions Centre et Alsace.

L'irrigation a été favorisée là où existent des nappes abondantes, comme en Beauce ou en Alsace ; dans d'autres régions, des investissements beaucoup plus conséquents ont été réalisés, allant de multiples retenues d'eau individuelles à des grands équipements hydrauliques tels que ceux réalisés par la Compagnie d'aménagement des Côteaux de Gascogne et par la Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc, pour fournir l'eau aux agriculteurs en période critique.

Elle concerne d'abord des productions à forte valeur ajoutée où la maîtrise de la production en termes quantitatif et qualitatif est devenue incontournable. C'est ainsi que l'essentiel des vergers, des cultures maraîchères et horticoles, des productions de semences et des cultures légumières de plein champ est aujourd'hui irrigué. L'irrigation a permis aux exploitations de grande culture de sécuriser les rendements, mais aussi de diversifier les assolements et de maintenir ou développer des productions telles que maïs, blé dur, pommes de terre, betteraves, semences et plants. Elle contribue, enfin, à sécuriser les stocks fourragers pour les exploitations d'élevage.

L'irrigation fournit ainsi aux agriculteurs des atouts techniques, économiques et commerciaux précieux. Elle leur permet de saisir des opportunités, de s'adapter, et finalement de rentrer dans une dynamique de développement, dans de nouvelles trajectoires.

Elle favorise ainsi l'emploi et la vitalité des territoires.

Les irrigants contribuent donc au maintien de la position concurrentielle de la France pour toutes les productions à forte valeur ajoutée et technicité.

L'eau est apportée de façon de plus en plus raisonnée : l'irrigation par gravité a quasiment disparu alors que l'irrigation au goutte à goutte est devenue la règle pour les productions pérennes. En grandes cultures, les doses sont mieux ajustées et la part du maïs dans les cultures irriguées a diminué.

Dans les années qui viennent, l'intérêt économique de l'irrigation ne peut que se renforcer au regard de l'évolution du climat, et des contraintes techniques et économiques.

Au final, 9% de la SAU française est équipée pour l'irrigation. Les régions herbagères et le nord de la France sont très peu concernés ; dans certaines régions où elle serait nécessaire, les conditions techniques ne la permettent pas. La tendance actuelle est à la stabilisation globale des surfaces irriguées, avec des évolutions divergentes : augmentation en région Centre et diminution au sud de la France.

Les Pouvoirs publics disposent des moyens organisationnels, économiques et juridiques pour maîtriser l'usage de l'eau, arbitrer entre les différents usages, et préserver l'environnement. Les Agences de bassin affectent aux agriculteurs des quotas d'eau et prélèvent des redevances. La Loi sur l'Eau et les Milieux aquatiques de 2006 doit être mise en place d'ici 2014.

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 20 mars.

Dans quelques zones où la ressource en eau est faible ou aléatoire, si les projets de retenues complémentaires n'aboutissent pas, les agriculteurs se verront contraints à des révisions drastiques de leurs systèmes de production. Or l'irrigation et les retenues d'eau soulèvent de nombreuses oppositions.

Une position trop intransigeante vis-à-vis de l'irrigation risque de pénaliser les agriculteurs de certaines régions. Il est souhaitable, dans le respect du bon fonctionnement des cours d'eau et du maintien du niveau des nappes, de permettre aux agriculteurs d'investir et aux collectivités de trouver des solutions là où les restrictions peuvent devenir pénalisantes pour les exploitations et les terroirs.

LE GASPILLAGE ALIMENTAIRE : COMMENT LE PRÉVENIR ?

par Patrice **Robichon**¹, Jacques **Risse**² et Maurice-Paul **Durand**³

Les pronostics démographiques actuels indiquent que **le défi majeur des prochaines décennies sera de permettre une meilleure adéquation de l'offre agricole à la croissance de la demande alimentaire**, tout en garantissant des productions plus durables.

Selon la FAO, **plus d'un tiers des aliments produits dans le monde, soit environ 1,3 milliards de tonnes, sont perdus ou gaspillés**, c'est-à-dire abandonnés comme déchets entre le champ et l'assiette alors qu'ils sont toujours consommables.

Ce gaspillage représente un prélèvement inutile de ressources naturelles en terres cultivables et en eau, l'agriculture utilisant 70% de la ressource en eau globale et en énergie. Il représente des émissions de CO₂ évitables et des déchets à traiter. Enfin il impacte négativement le budget des ménages.

Dans les pays en voie de développement, le gaspillage est proche du champ faute de moyens de conservation des récoltes adéquats et/ou d'emballages.

Dans les pays développés, le gaspillage se situe plutôt du côté de la transformation, de la distribution et de la consommation. Le pourcentage de nourriture perdue a été multiplié par deux depuis 1974.

Les institutions et la littérature spécialisées définissent et mesurent les gaspillages alimentaires de différentes manières. L'ADEME, par exemple, estime que le gaspillage alimentaire domestique en France représente 20 kg par an et par habitant, dont 7 kg d'aliments encore sous emballage, soit au total 1,2 million de tonnes de nourriture, alors que la Commission européenne l'estime à 100kg/an/habitant.

Notre Académie devrait s'attacher à établir la réalité des faits.

En pratique, il n'existe pas **de définition univoque du gaspillage alimentaire, ni de données comparables.** Cet exposé propose la définition suivante :

« **Toutes pertes d'aliments périmés ou jetés (pertes + déchets)** qu'on aurait pu éviter dans le cadre d'un **référentiel de Bonnes pratiques** fondées sur l'état actuel de la Technologie (Meilleures techniques disponibles), et dans le respect des lois et règlements (notamment Paquet hygiène R 178/2002 CE, R 852/2004 CE, R 854/204 CE, R882/2004 CE et R 183/2005 CE, et Directive-cadre Déchets) ».

De nombreux acteurs sont concernés par le gaspillage alimentaire : pouvoirs publics centraux et locaux, agriculteurs, pêcheurs, entreprises de l'agroalimentaire et de la distribution, restauration, organisations non gouvernementales et foyers.

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Conseiller scientifique du Groupe Pernod Ricard, délégué au développement durable Pernod Ricard.

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Membre de l'Académie vétérinaire de France.

³ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Membre de l'Académie nationale de médecine et de l'Académie vétérinaire de France. Directeur de recherches biologiques honoraire.

Si les industries alimentaires ne représentent que 2% des déchets alimentaires produits en France⁴, elles ont cependant un **rôle important à jouer** afin de réduire le gaspillage alimentaire – c’est-à-dire la production de déchets alimentaires évitables - sur l’ensemble de la chaîne et notamment auprès des consommateurs.

La commission européenne a fait de ce sujet une priorité avec pour objectif de réduire de moitié le gaspillage d’ici 2025 (**Projet européen FUSIONS**, « Food Use for Social Innovation by Optimizing waste prevention Strategies »).

Le **ministère français de l’Agriculture et de l’Agroalimentaire** se mobilise en vue de présenter et signer un **Pacte national contre le gaspillage** en juin 2013.

En conclusion, nous proposons quelques actions auxquelles pourrait contribuer l’Académie d’Agriculture de France :

- **Consolider nos connaissances** : qualifier le « gaspillage » et quantifier les volumes gaspillés à chaque étape de la filière alimentaire.
- **Identifier, valoriser et déployer les bonnes pratiques** mises en œuvre, y compris chez le consommateur.
- **Recenser les freins juridiques** identifiés sur l’aide alimentaire (dons aux associations notamment) et la lutte contre le gaspillage alimentaire.
- **Contribuer à renforcer le don alimentaire**, par la mise à jour du guide ANIA/FCD sur le don alimentaire, la sensibilisation des entreprises et la mise en place d’un dispositif de préinscription des entreprises qui le souhaitent sur la Bourse aux dons, en lien avec le ministère de l’Agriculture et de l’Agroalimentaire.
- **Engager une discussion avec la grande distribution** pour améliorer les pratiques logistiques afin de prévenir le gaspillage.
- **Mettre en place une communication pédagogique auprès du consommateur**, sur le thème du gaspillage alimentaire (gérer son frigo, comprendre les DLC-DLUO, accommoder les restes, etc.)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Étude Barilla « Food Waste : causes, impacts and proposals »: Barilla Center for Food Nutrition, www.barillacfn.com
- (2) Projet européen FUSIONS, « Food Use for Social Innovation by Optimizing waste prevention Strategies » https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt_en/projects/fusions
- (3) Rapport du MEDDE « Réduction du gaspillage alimentaire – État des lieux et pistes d’actions », www.developpement-durable.gouv.fr
- (4) « Guide méthodologique des bonnes pratiques Eco-conception et Emballages » www.conseil-emballage.org/Img/publications/84_0.pdf
- (5) Guide ANIA/FCD des bonnes pratiques de l’aide alimentaire, juillet 2009 : www.fcd.asso.fr/maj/upload/docs_fcd/doc_alimentation/guide%20de%20bonnes%20pratiques%20juillet%202009.pdf

⁴ Source : projet de rapport final de l’étude sur la réduction du gaspillage alimentaire du ministère de l’Écologie (D.Viel, sept 2012). Répartition de la production de déchets alimentaires en France : 2% IAAs, 6% marchés, 11% commerce/distribution, 15% RHF, 67% ménages.

Bilan provisoire du groupe de travail sur les potentiels de la science pour l'avenir de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement (Mars 2013).

par Jean-Claude **Pernollet**¹

Les défis posés à la science par les besoins alimentaires et en biomasse croissants

L'Académie d'Agriculture de France a réalisé récemment une étude sur les voies et les moyens d'accroître la production agricole mondiale à l'horizon 2050, la population mondiale devant passer de 7 à 9 milliards en 2050 (1). En conséquence, selon la FAO, il serait nécessaire d'augmenter la production agricole de 70 % pour alimenter la population dans le monde au 21^e siècle (soit un taux d'accroissement annuel de 1 à 2 % selon les productions), objectif incontournable mais difficile à atteindre. Les conclusions de cette étude ont été reprises dans une note académique (2) qui relève que les hommes devront utiliser pour arriver à ces fins tous les moyens à leur disposition, tels que l'extension des surfaces cultivées, la réduction des pertes et surtout l'accroissement des rendements des cultures, tout en ne détériorant ni les ressources naturelles, notamment les sols, ni notre environnement. Cependant, *les surfaces cultivables sont limitées* (elles couvrent actuellement 1 550 millions d'hectares dans le monde et seuls 200 à 300 millions d'hectares, qui se situent surtout en Amérique du Sud et en Afrique – voire en Russie et au Canada, suite au changement climatique – pourraient s'y ajouter d'ici 2030). Les terres encore disponibles mais de bonne qualité se font rares, alors que l'urbanisation les ampute chaque jour un peu plus (35 000 ha/an en France, plus de 500 000 en Chine). C'est pourquoi une *augmentation de la production* est impérative, ce qui implique de trouver des méthodes efficaces *au niveau des cultures*, tout en limitant l'usage des produits phytosanitaires pour des raisons tant économiques qu'écologiques. Il est indispensable également de *limiter les pertes après récolte* qui sont de 15 % en moyenne (mais bien plus élevées dans les pays les moins avancés) et enfin de juguler le gaspillage de produits alimentaires dans les pays les plus avancés, évalué de 25 à 30 % des aliments produits. Malgré tout, accroissement des surfaces et réduction des pertes tendront vers des limites, de sorte que les seules réserves de productivité résident dans l'accroissement des rendements des cultures qui constituera l'essentiel de l'augmentation de la production agricole. Elle passe nécessairement par l'acquisition et la mise en œuvre de technologies plus efficaces qui reposent sur des connaissances nouvelles et des innovations techniques et technologiques. Les attentes sont nombreuses. Elles portent sur l'obtention de variétés de plantes et de races animales plus productives tout en étant plus tolérantes aux contraintes biotiques et abiotiques, l'optimisation des cultures d'espèces secondaires et, éventuellement, la domestication de nouvelles espèces. On attend aussi des progrès sur l'utilisation et la valorisation de l'eau (meilleures techniques d'irrigation, mais aussi variétés résistantes à la sécheresse), et sur l'adaptation au réchauffement climatique. On doit aussi compter sur des améliorations sensibles dans l'usage des engrais et la protection des cultures contre les maladies et les ravageurs, ainsi que dans l'alimentation et la santé animales ; mais encore sur la production de biomasse et d'énergie qui entrent en compétition avec les productions alimentaires, et, dans une moindre mesure, sur des changements de comportements en alimentation humaine (problème récurrent de la consommation de viande).

Pour préserver les sols agricoles dont l'extension future sera rapidement limitée, pour réduire les risques de pertes de production avant et après récolte, pour augmenter très significativement les rendements des récoltes, tout en s'adaptant au réchauffement climatique et en réduisant les intrants (engrais, pesticides), pour limiter l'utilisation de l'eau, tout en préservant l'environnement (biodiversité, déforestation, gaz à effet de serre...), il s'avère incontournable de mettre en œuvre tous les potentiels scientifiques et technologiques possibles pour développer une *agriculture productive économiquement, socialement acceptable et respectueuse de l'environnement* (3).

Par ailleurs, le développement d'une véritable « bioéconomie » implique l'accroissement de la mobilisation, de la production et de l'utilisation de *biomasse lignocellulosique*, notamment issue des forêts et de plantations dédiées. Cette biomasse peut avoir la forme de bois d'œuvre pour la construction et l'ameublement, ou de bois d'industrie pour les panneaux, les matériaux composites, les fibres, la pâte à papier, la *chimie verte*, l'énergie (cogénération chaleur-électricité, biocarburants de deuxième génération, etc.). En outre, les forêts assument d'autres fonctions essentielles de production de nombreux biens et

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France.

services, de nature marchande ou non : protection et régulation (avalanches, crues) stockage du carbone, biodiversité, eau à usage domestique, aménités, etc., dont l'importance croissante est aujourd'hui reconnue. La gestion forestière est caractérisée par un cadre temporel très long (plusieurs décennies, voire un ou deux siècles) et des modalités, généralement peu intensives (pratiquement sans intrants), largement fondées sur les principes de « l'agroécologie ». La question des changements climatiques est donc particulièrement forte, en termes d'impact sur les écosystèmes forestiers, de leur capacité d'adaptation, et de leur rôle dans l'atténuation de ces changements. Les progrès de la gestion forestière durable à des fins multiples (économique, sociale, environnementale) nécessitent une mobilisation des potentiels scientifiques de disciplines variées (biophysiques, mathématiques, économiques, etc.) et de leur intégration au sein de stratégies innovantes.

Mise en place d'un groupe de travail interdisciplinaire.

L'état des lieux et les prévisions faites en 2009 se limitaient aux progrès fondés sur la projection des connaissances actuelles, sans prendre en compte, par précaution, les avancées scientifiques probables. Cependant, il faut s'attendre à ce que la formidable avancée des progrès scientifiques apporte des sauts technologiques qui bouleverseront certainement le monde agricole comme, par exemple, la génomique est aujourd'hui en passe de profondément révolutionner l'organisation de la sélection des plantes et des animaux domestiques. C'est ce qui a motivé la création d'un groupe de travail interdisciplinaire sur les potentiels de la science pour l'avenir de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement qui a été mis en place début 2011. Bien qu'en matière de science et de technologie, les avancées décisives soient difficilement prévisibles, ce groupe de travail inter-sections s'est mis en place pour tenter d'imaginer les scénarios vraisemblables car la vitesse actuelle du progrès scientifique, notamment en biologie, est telle que les retombées agronomiques potentielles en seront certainement décisives, même si cette notion de progrès est fréquemment mise en doute.

Ce groupe de travail a eu pour objectif de croiser, sans *a priori* ni exclusive, les acquis cognitifs les plus originaux (*e.g.* génomique, modélisation, biologie synthétique, défenses anti-microbiennes, etc.) avec les attentes indispensables au développement d'une agriculture durable, notamment en réduisant les intrants (*e.g.* résistance aux contraintes biotiques et abiotiques, relations hôtes-parasites, biodiversité *vs* lutte contre les ravageurs, nutrition des plantes et des animaux, pollution diffuse, préservation des sols, etc.). Les réflexions du groupe de travail se situent à différentes échelles géographiques : en matière de progrès des connaissances, par nature universelles, il s'agit d'intégrer des données internationales, alors qu'en termes d'applications, ce sont surtout les problèmes nationaux qui sont développés, car les choix technologiques dans un pays ne sont pas indépendants des questions sociétales et des choix de la population. Cependant, la comparaison avec des options développées ailleurs n'est pas éludée. Outre les possibilités nouvelles offertes par les récents progrès de la connaissance dont on peut anticiper les retombées, les lacunes à combler sont évoquées ainsi que les domaines orphelins propres aux questions non résolues de la science.

Les questions abordées.

Le groupe de travail a choisi de traiter différentes thématiques qui ont abouti à la rédaction de chapitres constitués généralement de plusieurs articles qui peuvent se lire indépendamment, même s'ils sont énumérés ici selon une suite logique.

Le premier chapitre, dédié aux connaissances fondamentales, *Concepts et outils du génie génétique* (le transfert de gènes, un des moteurs essentiels de l'évolution ; les outils de la génomique renouvellent la biologie ; les « *omiques* » et les analyses à haut débit ; la variabilité naturelle ; la biologie synthétique, etc.) sert de support à la compréhension de nombreuses questions de biologie, tout en apportant des éclairages nouveaux sur des questions en bouillonnante évolution qui contribueront à révolutionner notre conception de l'agronomie.

Le second chapitre se rapporte à l'*Élevage* (exploitation de la biodiversité pour l'aquaculture ; la génétique et la sélection des animaux ; les animaux génétiquement modifiés ; le rôle de la science dans l'alimentation animale, etc.).

Le troisième chapitre *Amélioration des plantes* est consacré aux ressources génétiques végétales et à leur mise en œuvre pour améliorer génétiquement les plantes cultivées (la génomique et l'amélioration des plantes ; la paléogénomique des plantes pour l'amélioration variétale ; le rôle de l'épigénome dans le contrôle du développement et des interactions avec le milieu ; l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des

engrais azotés chez les plantes cultivées ; les pistes d'utilisation des connaissances pour l'amélioration des plantes vis-à-vis du déficit hydrique ; à compléter par la génétique des relations plantes pathogènes, etc.).

Après ces articles consacrés peu ou prou au génome et à son expression, un quatrième, intitulé *Nutrition, croissance et développement des plantes*, est relatif à la physiologie des plantes. Il commence par des questions scientifiques non encore résolues, quoique bien avancées, que constituent le fonctionnement de l'absorption racinaire et le rôle des symbioses microbiennes (les relations sol-plantes, les apports de la microbiologie des sols à l'agronomie et au développement des plantes cultivées ; les bases moléculaires de la nutrition minérale des plantes). Puis ce sont divers aspects de la physiologie qui sont abordés (le fonctionnement des méristèmes, les semences, la modélisation de la croissance des cultures, etc.).

Un cinquième chapitre regroupe des articles portant sur la *Protection des cultures*. Il illustre les moyens nouveaux permettant à la lutte phytosanitaire d'assurer sa nécessaire fonction en préservant l'environnement (la protection phytosanitaire ; science et protection intégrée des plantes cultivées ; comment des microbes bénéfiques peuvent aider des plantes à acquérir une tolérance aux stress environnementaux ?).

Le sixième chapitre nommé *Gestion des ressources sol-eau-espace et énergie en relation avec le développement socio-économique* est consacré aux questions relatives à la limitation des ressources en considérant diverses échelles, de l'agrosystème au paysage, voire au-delà (pour une agriculture plus écologique ; les prairies, ressources pour l'élevage et pour l'environnement, un compromis indispensable pour l'agriculture). Il clôt les aspects dédiés aux plantes et est suivi par un chapitre dénommé *Itinéraires techniques et mécanisation* qui traite de questions plus technologiques (mécanisation, automation, robotisation, zootechnie, phytotechnie). La thématique "*mécanisation, machinisme, automation*", outre la description des nouveaux moyens mis à la disposition de l'homme pour s'affranchir des lourdes tâches répétitives, fournit aussi des réflexions sur les implications socioéconomiques du développement de la robotisation à la ferme. Quant aux deux autres articles, ils expliqueront comment améliorer le système agricole ; ils correspondent aux choix et combinaisons de techniques associant les aspects phytotechniques et zootechniques aux problèmes relevant du paysage ; ils intègrent l'ensemble des connaissances précédemment énoncées pour montrer comment on peut reconsidérer l'association des moyens disponibles pour développer une agriculture plus efficace, écologiquement respectueuse et cependant économiquement rentable.

Les deux chapitres suivants sont dédiés d'une part à l'*Utilisation non alimentaire des organismes vivants et à la valorisation des sous-produits* qui comporte aussi des regards d'économistes sur l'obtention de biomasse, avec les espoirs fondés sur la disponibilité de nouveaux matériaux, de nouvelles sources de molécules pour l'industrie chimique, et aussi de sources énergétiques renouvelables non génératrices de gaz à effet de serre (les forêts, leurs produits et services dans un contexte changeant : apports potentiels de la science ; la chimie verte ou comment l'agriculture de demain fournira les bioproduits non-alimentaires) et, de l'autre, à l'*Avenir de l'alimentation humaine* (science et alimentation ; notre microbiote, une partie essentielle de nous même ; progrès attendus dans le secteur agro-alimentaire) qui intègre des savoirs très divers allant des besoins diététiques au comportement du consommateur en passant par les nouvelles connaissances sur les populations microbiennes intestinales, les risques alimentaires et l'évaluation et la prévention de ces risques.

Enfin, un neuvième et ultime chapitre est dédié à des articles prospectifs qui décrivent les frontières de nos connaissances et les espoirs attendus en matière d'applications.

Bilan provisoire des contributions

Le tableau en annexe rapporte l'état d'avancement de la collecte des publications dont bon nombre ont atteint le stade de la mise en page qui permettra leur mise en ligne.

Sur le plan *quantitatif*, un total de 25 articles sont terminés à des degrés divers, 6 en cours de rédaction et une demi-douzaine envisagés : 30 sont assurés et 6 probables :

- 25 articles sont terminés : 19 mis en page et 6 en attente de mise en page,
- 2 articles sont en cours d'ultimes corrections ou de relecture,
- 4 autres en phase de rédaction d'un premier jet, à plus ou moins brève échéance,
- enfin au moins une demi-douzaine d'autres articles sont sérieusement envisagés pour compléter cet ensemble.

Sur le plan *qualitatif*, les articles sont très hétérogènes, que ce soit pour la forme (certains très bien

illustrés, d'autres totalement dépourvus d'illustrations), ou pour le niveau d'intelligibilité (certains très « grand public » avec des encadrés explicatifs et des définitions claires, quelques-uns, à l'extrême, d'un niveau scientifique assez ardu, difficiles d'accès pour un profane). Ces différences sont généralement dues au sujet lui-même et non à la compétence du rédacteur.

En matière de contenu, on note encore un très fort déséquilibre entre les domaines animal (4 articles assurés) et végétal (15 articles assurés).

Enfin, il convient de rappeler que le contenu est essentiellement évolutif. Non seulement des articles nouveaux vont s'ajouter, mais encore la mise à jour des articles publiés sera régulièrement envisagée pour les domaines les plus rapidement évolutifs.

Réflexion sur le mode de publication des articles

La rénovation du site de l'Académie ne surviendra pas avant l'été. Comme il sera mieux adapté à la mise en valeur des publications des groupes de travail et qu'il reste encore beaucoup d'articles à achever et à mettre en forme, il a été décidé d'attendre la mise en ligne du nouveau site pour commencer la publication.

La mise en ligne se fera de manière progressive : dès que le site sera fonctionnel, une demi-douzaine d'articles pourront être mis en ligne d'emblée, puis les autres présentés au fur et à mesure (1 à 2 articles par mois) pour apparaître en page d'accueil et contribuer à faire vivre le site tout en faisant de la publicité pour les productions du groupe PS3AE.

En ce qui concerne les publications papier, la diversité de forme des articles pose un sérieux problème d'homogénéisation, d'une part, et de déséquilibre entre les disciplines, de l'autre, rendent peu opportune l'idée de faire un seul gros ouvrage. D'autant que les éditeurs recherchent plus volontiers de petits opuscules à bas coût (6-7€), telles les collections Que Sais-Je, les Petites Pommes du Savoir (Ed Pommier), Domino (Flammarion)... La proposition de faire un court livre de vulgarisation sur l'ensemble des articles du groupe de travail PS3AE pourrait être envisagée.

On pourrait aussi contacter des éditeurs pour leur proposer l'existant et leur demander comment ils envisageraient une telle publication. Mais il ne faut pas se leurrer : il s'agira d'une importante quantité de travail, non seulement pour la coordination, mais aussi pour tous les auteurs impliqués.

Il est donc prévu, dans un premier temps, d'attendre que des éditeurs se manifestent après découverte des articles en ligne.

Remarques conclusives

Bien évidemment, tous les nouveaux savoirs en amont des sciences directement applicables à l'agriculture n'ont pas été présentés autrement que par de courts encadrés et des renvois bibliographiques. Il s'agit notamment des systèmes d'information géographiques, du calcul intensif, de la télédétection par satellite, etc. Enfin, les questions relatives à l'agriculture biologique ne sont évoquées que dans les différents chapitres et n'ont pas fait l'objet d'une thématique indépendante, puisqu'un groupe de travail de l'Académie d'Agriculture *ad hoc* a récemment mis en ligne un rapport accessible sur le site de l'Académie (4) qui a été repris dans un ouvrage publié aux éditions QUAE en 2012.

Par ailleurs, on ne peut rejeter *a priori* l'innovation technologique que constituent les organismes génétiquement modifiés (OGM), notamment les plantes (PGM), cités dans nombre de chapitres pour leur indéniable apport à la résolution de questions prégnantes (amélioration de nombreux paramètres phytotechniques, mais aussi environnementaux, ainsi que d'usage en agroalimentaire). Ces considérations propres aux PGM sont l'objet d'un autre groupe de travail de l'Académie d'Agriculture qui publiera ses conclusions fin 2013.

Enfin, il convient de rappeler que les productions du groupe de travail PS3AE vont s'accumuler au cours du temps. Non seulement des articles nouveaux vont s'ajouter, mais encore la mise à jour des articles publiés est envisagée pour les domaines les plus rapidement évolutifs.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Rapport du groupe de travail de l'Académie d'Agriculture de France, 2009. – Nourrir le monde en 2050 – Les voies et les moyens pour accroître la production agricole mondiale. Disponible sur http://www.academie-agriculture.fr/detail-seance_191.html
- (2) MOVAHEDI N., PAILLOTIN G. et NEVEU A., 2009. – Le monde manquera-t-il de terres pour nourrir les hommes du 21^e siècle ?– Note de Recherche de l'Académie d'Agriculture de France. Disponible sur <http://www.academie-agriculture.fr/notes-de-recherche.html>
- (3) GRIFFON M., 2006. – Nourrir la planète. Ed. Odile Jacob.
- (4) LE BUANEC B. *et al.* 2010. – L'agriculture biologique.
Disponible sur http://www.academie-agriculture.fr/detail-seance_230.html.

Groupe de travail "Potentiels de la science pour l'avenir de l'agriculture, l'alimentation et l'environnement"

Introduction : quelles avancées scientifiques pour quels progrès ? - JC Pernollet

Concepts et outils du génie génétique

Le transfert de gènes : un des moteurs essentiels de l'évolution - Yves Chupeau

Les outils de la génomique renouvellent la biologie - Yves Chupeau

Variabilité naturelle, évolution et adaptation; les apports du modèle Arabidopsis - Olivier Loudet

La biologie synthétique - Agnès Ricroc

Les omiques et les analyses à haut débit - JC Pernollet

Élevage : domestication, sélection et alimentation des animaux

Exploitation de la biodiversité : cas de l'aquaculture - Jérôme Lazard

Génétique et sélection des animaux - Louis Ollivier

Animaux génétiquement modifiés - Louis-Marie Houdebine

Passé et futur de l'Alimentation animale, quel rôle de la Science ? - Daniel Sauvart

Amélioration des plantes

La génomique et l'amélioration des plantes - Yves Chupeau

La Paléogénomique des Plantes pour l'Amélioration Variétale. Jérôme Salse

Rôle de l'épigénome dans le contrôle du développement et des interactions avec le milieu. Quels apports pour l'amélioration des plantes ? - Hervé Vaucheret

Améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais azotés chez les plantes cultivées - B. Hirel et A. Gallais

Pistes d'utilisation des connaissances pour l'amélioration des plantes vis-à-vis du déficit hydrique - Georges Pelletier

Nutrition, croissance et développement des plantes

Relations sol-plantes : Quelques apports de la microbiologie des sols à l'agronomie et au développement des plantes cultivées - Jean-Claude Germon

Relations sol-plantes : Nutrition minérale des plantes : aspects moléculaires - Jean-François Morot-Gaudry

Méristèmes végétatifs et floraux - JF Morot-Gaudry

Protection des cultures

La protection phytosanitaire des cultures - Charles Descoins

Science et Protection intégrée des Plantes cultivées - Jean-Louis Bernard

Des microbes bénéfiques peuvent aider des plantes à acquérir une tolérance aux stress environnementaux - Heribert Hirt

Gestion des ressources sol-eau-espace en relation avec le développement socio-économique

Pour une agriculture plus écologique - Bernard Saugier

Les prairies, ressources pour l'élevage et pour l'environnement; un compromis indispensable pour l'Agriculture - Gilles Lemaire

Itinéraires techniques (phytotechnie, zootechnie et systèmes de culture) et mécanisation

Mécanisation, automation, robotisation - Jean Dunglas

Itinéraires zootechniques - Daniel Sauvart

Phytotechnie - JM. Meynard et MH. Jeuffroy

Utilisation non alimentaire des organismes vivants et valorisation des sous-produits

Les forêts, leurs produits et services dans un contexte changeant : apports potentiels de la science - Yves Birot, Xavier Déglise, Bernard Thibaut, Bernard Roman-Amat

Chimie verte ou comment l'agriculture de demain fournira les bioproduits non-alimentaires - Jean-François Morot-Gaudry et Jean-Claude Pernollet

Le futur de l'alimentation humaine

Science et alimentation - Léon Gueguen

Notre microbiote, une partie essentielle de nous même - G. Corthier

Progrès attendus dans le secteur agro-alimentaire - Pierre Feillet

Prospective agronomique

Article prospectif et spéculatif (Plantes C3 transformée en C4, fixation N2 par les céréales...) - collectif Yves Chupeau

SÉANCE SUR LA SÉLECTION GÉNOMIQUE

INTRODUCTION

par Marion Guillou¹

Chers collègues, c'est un plaisir d'introduire cette séance de l'Académie pour aborder la thématique de la sélection génomique. Ce sujet n'est pas directement relié à la spécialité de notre Section 9 mais j'ai souhaité vous le proposer car il s'agit d'une innovation en génétique et les perspectives offertes sont majeures face aux enjeux de sécurité alimentaire mondiale.

Les enjeux en agronomie : nourrir la planète en préservant l'environnement, dans un contexte de démographie croissante et de changement climatique à l'échelle mondiale.

La conjoncture mondiale nous montre que pour nourrir la planète, il faut augmenter la production globale et cette augmentation nécessitera des recherches en génétique. Dans ce contexte, l'innovation que représente la sélection génomique est majeure car, comme cela vous sera présenté dans la matinée, elle permet de sélectionner de manière précise et performante sur des caractères complexes, ce qui réduit le temps de sélection et permet de diversifier les caractères sélectionnés.

Une nécessité : continuer le progrès génétique et sélectionner sur des caractères nouveaux en élevage et en production végétale

Depuis les années 60, le progrès génétique a pesé pour moitié dans la hausse du rendement des cultures. Cette hausse du rendement des cultures a atteint à peu près 2% par an dans les pays occidentaux. Or, depuis la fin des années 1990, une stagnation des rendements a été observée pour le blé et le maïs, en Europe notamment. Il est avéré que cette stagnation est due au changement climatique et aux aléas que cela entraîne : sécheresse ou pluie à des périodes non favorables pour le cycle de floraison par exemple. Sans le progrès génétique, les rendements auraient chuté. Pour produire plus et mieux, dans un contexte de changement climatique, il sera plus que jamais nécessaire d'adapter et d'améliorer les plantes cultivées, en prenant en compte de nouveaux caractères : la tolérance à la sécheresse et parfois à l'inondation, la résistance à des bioagresseurs, l'efficacité d'utilisation de l'azote, la facilité de transformation pour des énergies ou pour des utilisations pour des matériaux renouvelables ou la chimie.

Jusqu'à récemment, les travaux de recherche en élevage étaient surtout orientés vers la maximisation des performances zootechniques. Afin d'adapter les systèmes d'élevage aux changements globaux, les recherches visent dorénavant à améliorer leur efficacité et leur résilience face aux aléas, en agissant au niveau des caractéristiques des animaux, de la conduite des troupeaux et de la gestion globale des systèmes. A l'échelle de l'animal, il s'agit d'accroître l'efficacité alimentaire, la robustesse et l'adaptabilité à des conditions plus diversifiées et changeantes que par le passé. A l'échelle des élevages, l'objectif est de combiner au mieux l'utilisation des ressources et la conduite des animaux pour développer des systèmes efficaces dans l'utilisation des intrants robustes face aux aléas et plus efficaces d'un point de vue environnemental.

En élevage comme en production végétale, nous déployons désormais de nouvelles approches consacrées à la gestion intégrée de la santé et avons lancé deux métaprogrammes sur cette thématique, l'un dédié aux animaux et l'autre aux plantes. L'objectif est de préserver l'équilibre entre l'animal ou la plante et son environnement. Les pistes incluent les pratiques de production, la gestion des risques sanitaires, la sélection et la diffusion de la résistance génétique aux agents pathogènes, l'utilisation précoce et ciblée des antibiotiques, le dépistage plus rapide des individus malades.

La sélection génomique : une innovation majeure pour la prédiction des phénotypes

Le séquençage de nombreux génomes d'espèces agronomiques a permis d'identifier des polymorphismes répartis sur l'ensemble des génomes à forte densité et des progrès technologiques récents permettent de génotyper simultanément plusieurs centaines de milliers de marqueurs par individu. Cette

¹ Membre de l'Académie d'Agriculture de France, ancienne Présidente de l'INRA, membre de l'Académie des Technologies, Présidente du conseil d'administration d'Agreenium.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 27 mars.

connaissance des génomes, associée aux méthodologies de génotypage à haut débit et à de nouvelles méthodes d'analyse des données, ouvre des perspectives sans précédent dans le domaine de la sélection. L'information moléculaire dense des marqueurs génétiques permet une estimation plus précise de la valeur génétique individuelle dès la naissance, ce qui réduit le temps nécessaire pour choisir les individus les plus performants à mettre à la reproduction.

Il est important de rappeler que le progrès génétique est une des composantes des systèmes de production, qui incluent également l'environnement et les pratiques. La sélection génomique offre de nouvelles perspectives pour aborder ces effets entre génétique et environnement. Les attentes sont fortes en recherche et dans les filières.

Les exposés proposés pour notre séance ont pour objectif de broser un tableau des connaissances, enjeux, applications et questions en sélection génomique :

Laurence **Moreau** présentera les principes et les enjeux de la sélection génomique. Didier **Boichard** et Maurice **Barbezant** exposeront la mise en place réussie de la sélection génomique en bovins laitiers et les conséquences sur l'organisation de la filière, Didier **Boichard** apportant la vision recherche et Maurice **Barbezant** la vision filière. L'INRA a mis en place en 2012 un métaprogramme dédié à la sélection génomique, avec deux espèces phares : les bovins et le blé. En conclusion, Denis **Milan**, en charge de ce métaprogramme, nous apportera son éclairage sur la faisabilité et la pertinence de développer des approches de sélection génomique à un nombre croissant d'espèces animales comme végétales.

LA SÉLECTION GÉNOMIQUE, UNE INNOVATION POUR L'AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE : ENJEUX SCIENTIFIQUES ET PARTENARIAUX

par Laurence Moreau¹ et Alain Charcosset¹

La sélection des espèces végétales et animales remonte à la domestication d'espèces sauvages environ – 8000 avant J.C. et s'est poursuivi par une longue période de sélection massale conduite par les agriculteurs/éleveurs. C'est au 19^e siècle que la sélection moderne a commencé à se mettre en place avec la fixation des races animales et les travaux fondateurs de de Vilmorin sur la fixation de lignées végétales et de Darwin sur l'hybridation. Les méthodes de sélection ont connu un développement rapide au cours du 20^e siècle notamment grâce aux progrès en statistiques qui ont permis d'améliorer les dispositifs expérimentaux permettant une meilleure appréciation de la valeur génétique des candidats à la sélection. Les travaux d'Hendersen sur les modèles mixtes, dans les années 50, ont conduit au développement de méthodes d'évaluation des valeurs génétiques par la prise en compte des relations de parenté entre individus par la méthode dite du « Blup modèle animal » dont l'utilisation s'est généralisée pour la sélection des espèces animales dans les années 80. Bien qu'efficaces, ces méthodes reposent sur une modélisation statistique de la valeur génétique au travers des performances, sans connaître les gènes impliqués dans la variation observée. Ce n'est qu'à la fin des années 80 que les outils de marquage moléculaire ont permis de révéler des variations de séquence de l'ADN entre individus. Très rapidement les marqueurs ont eu de nombreuses applications en sélection et ils sont désormais utilisés en routine dans la plupart des entreprises de sélection végétale notamment. Récemment, les avancées liées au séquençage du génome ont permis de développer de nouvelles technologies permettant désormais de génotyper des individus simultanément pour plusieurs milliers de marqueurs (dits SNPs pour *Single Nucleotide Polymorphism*), voire de directement séquencer les individus plus ou moins complètement pour des coûts sans cesse décroissants. Ces outils ouvrent de nouvelles perspectives pour la compréhension des caractères d'intérêt agronomique et la mise en œuvre d'une nouvelle approche de sélection assistée par marqueurs dite « sélection génomique ».

1. De la sélection assistée par marqueurs à la sélection génomique

1.1 Sélection assistée par marqueur

En permettant de suivre la transmission de fragments chromosomiques au sein d'une descendance en ségrégation (résultant par exemple du croisement entre deux lignées, ou issue d'un même taureau), les marqueurs moléculaires permettent de construire des cartes génétiques et de positionner sur ces cartes les gènes impliqués dans la variation des caractères d'intérêt. Outre un intérêt fondamental pour la compréhension des bases génétiques des caractères, la cartographie de gènes peut être valorisée directement en sélection. En effet, connaissant le génotype des candidats pour des marqueurs proches des gènes, il est possible d'identifier de façon indirecte ceux qui portent des allèles d'intérêts sans avoir besoin de mesurer leur performance. Ceci permet une sélection plus rapide et *a priori* plus efficace. La Sélection assistée par marqueur (SAM) est désormais utilisée en routine pour des caractères simples déterminés par des gènes à effet majeur comme les gènes de résistance, de stérilité, les transgènes... souvent nécessaires pour l'accès des variétés végétales au marché, ou pour l'éradication de certains gènes défavorables chez les animaux (ex : sensibilité à l'halothane, gène Rn chez le porc...). Les progrès liés aux travaux de génomique permettent d'affiner la localisation des gènes, et dans certains cas l'identification de la mutation causale mais aussi d'élargir la variabilité disponible (par transgénèse ou mutagénèse notamment).

En comparaison, l'utilisation de SAM pour les caractères complexes (déterminés par un grand nombre de gènes, appelés QTL, à effet individuel faible) s'est beaucoup moins généralisée. Une des principales limites à son utilisation vient de l'étape de détection des associations marqueurs-QTL, qui reste peu précise et ne permet d'identifier généralement qu'un faible nombre de QTL. Néanmoins, grâce aux marqueurs, de nombreuses recherches de QTL ont pu être réalisées notamment chez les plantes et ont permis de comparer la valeur des allèles aux QTL apportées par différents parents. Une fois les effets des QTL estimés, les associations marqueurs-QTL peuvent être utilisées pour prédire la valeur génétique des candidats. Des études par simulation ont montré que l'intérêt de la SAM vient de la possibilité de prédire précocement la valeur des

¹ INRA, UMR de génétique végétale, Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette.

candidats sans attendre de connaître leur performance ce qui permet d'accélérer le processus de sélection. L'intérêt de cette approche a pu être validé expérimentalement notamment dans des dispositifs multiparentaux. Des publications provenant du secteur semencier privé montrent que cette approche a été mise en place avec succès et a permis de doubler le progrès génétique par rapport à la sélection conventionnelle (Eathington *et al.*, 2007). Son intérêt dépend de la possibilité d'extraire l'ADN au stade précoce (voire même au niveau de la graine) et de la possibilité d'accélérer les cycles par l'utilisation de serres, générations d'hiver...

1.2 Principe de la sélection génomique

La détection des associations marqueurs-QTL constitue l'étape cruciale des approches de sélection assistée par marqueurs. Le fait de ne considérer dans l'index de sélection que des QTL dont l'effet est suffisamment fort pour être déclaré comme significatif conduit à certains biais statistiques : (i) une large part des QTL d'effet faible ne sont pas détectés et ne sont donc pas pris en compte dans les prédictions et (ii) de façon corrélative les effets retenus dans l'index ont tendance à être surestimés (biais de sélection). Pour des caractères quantitatifs à déterminisme complexe, on peut imaginer qu'un grand nombre de QTL, répartis sur l'ensemble du génome, interviennent dans la variabilité du caractère. De plus, l'évolution des techniques de marquage conduit à l'utilisation de plus en plus fréquente de « puces » permettant de génotyper un individu simultanément pour un très grand nombre de marqueurs répartis sur l'ensemble du génome. L'ensemble de ces éléments tend à remettre en cause l'intérêt de ne considérer dans l'index de prédiction qu'un sous-ensemble de marqueurs. Néanmoins, la prise en compte dans l'index de sélection d'un grand nombre de marqueurs pose des problèmes statistiques dès lors que le nombre de marqueurs devient important par rapport au nombre d'individus phénotypés. Il est donc nécessaire de s'orienter vers des approches statistiques (*ridge regression*, modèles bayésiens...) adaptées à ce type de problème et dont la finalité n'est en général pas de sélectionner parmi les marqueurs ceux qui expliquent individuellement la plus grande part de la variation et d'estimer précisément leurs effets, mais plutôt de trouver une fonction de prédiction, incluant potentiellement tous les marqueurs génotypés, qui soit le mieux corrélée aux performances observées. Cette sélection basée sur des marqueurs répartis sur l'ensemble du génome est appelée « sélection génomique ». Elle a été proposée initialement par Whittaker *et al.* (2000) et Meuwissen *et al.* (2001) mais elle n'a été réellement mise en œuvre que grâce au développement de puces de génotypage à haute densité qui permettent d'envisager son utilisation dans des populations à base génétique large.

La sélection génomique connaît un essor très important en génétique animale, en particulier pour l'amélioration des grandes races bovines laitières (cf, exposé de D. Boichard). Chez les plantes, cette approche connaît elle aussi un très fort engouement, même si son efficacité a, pour l'instant, été essentiellement évaluée par simulation (cf, Jannink *et al.*, 2011 pour une synthèse sur les potentialités de cette approche chez les plantes). Les premiers résultats expérimentaux, principalement obtenus par validation croisée, confirment l'intérêt de cette approche. Son efficacité sur plusieurs cycles reste à valider mais certaines études expérimentales montrent un gain significatif par rapport à la SAM post-détection de QTL, notamment pour des caractères complexes à faible héritabilité (Massman *et al.*, 2013, par exemple).

2. Enjeux scientifiques et partenariaux

2.1 Optimisation

Le principe général de la sélection génomique repose sur l'estimation d'effets associés aux marqueurs dans une population dite de « calibration », ou de « référence », à la fois génotypée et phénotypée. Une fois l'équation de prédiction obtenue, celle-ci peut être utilisée pour sélectionner des candidats dans une population le plus souvent issue de la population de référence. Ce principe est le même que pour la SAM « conventionnelle » post-détection de QTL, les différences essentielles venant (i) de la méthode utilisée pour calibrer le modèle de prédiction et (ii) de la population de calibration utilisée. Au cours des cycles de sélection, la qualité des prédictions diminue au fur et à mesure que la distance génétique qui sépare la population sélectionnée et la population de référence augmente. Il est donc nécessaire de réévaluer régulièrement des formules de prédiction en intégrant des individus des générations de sélection récentes dans la population de référence.

Notamment chez les plantes, plusieurs types de populations de référence peuvent être utilisés depuis les simples populations biparentales jusqu'aux panels de lignées diversifiés. En fonction du niveau de diversité présent dans la population de référence, cette approche peut être envisagée avec quelques centaines de marqueurs et quelques dizaines d'individus pour une population biparentale mais nécessiter jusqu'à plusieurs centaines de milliers de marqueurs et plusieurs milliers d'individus pour des panels à fort niveau de diversité pour lesquels la longueur des blocs chromosomiques conservés (ou déséquilibre de liaison) est

faible. Le niveau de diversité de la population de référence conditionne la portabilité des formules de prédiction dans les populations en sélection. L'étape de phénotypage de la population de référence étant souvent limitante, des travaux sont en cours pour optimiser le choix des individus à phénotyper, tant au niveau des effectifs, de leur diversité (groupes, races...) que de la structure de la population (nombre de fondateurs, plan de croisement...)

Afin d'optimiser la densité de marquage nécessaire et tester la faisabilité de l'approche, il est important d'évaluer l'étendue du déséquilibre de liaison entre locus intra et aussi inter-groupes (races) génétiques en fonction de la population ciblée. Compte tenu des investissements nécessaires pour développer ces outils de marquage, la mise en commun d'informations entre organismes ou sociétés privées apparaît être un enjeu majeur notamment pour les « petites » espèces.

La sélection génomique conduit à revoir la place de l'évaluation agronomique dans les schémas de sélection conduisant à une sélection « assistée par le phénotype ». L'efficacité des cycles de sélection repose sur l'estimation des associations marqueurs-performances dans l'étape de calibration, il est donc crucial que l'évaluation agronomique réalisée à cette étape d'estimation soit la plus précise et la plus pertinente possible. Grâce à la sélection génomique, on peut envisager d'introduire dans les critères de sélection de nouveaux caractères (paramètres de modèles écophysologiques, réponses à des stress biotiques ou abiotiques...) impossibles à mesurer en routine dans des programmes de sélection, mais qui peuvent être évalués dans la population de référence. La sélection génomique conduit à reconsidérer la prise en compte des interactions génotype-environnement dans les schémas de sélection. Des développements sont nécessaires pour permettre des prédictions multicaractères prenant en compte la dimension multienvironnementale.

La sélection génomique soulève de nouveaux enjeux tant au niveau informatique (l'approche nécessite de gérer des quantités de données sans précédent) qu'au niveau statistique. Les modèles actuels doivent être améliorés, notamment pour intégrer l'information sur les gènes ou QTL connus, prendre en compte l'existence d'interactions entre locus ou les phénomènes de dominance dans un contexte de sélection hybride...

2.2 Conséquences socioéconomiques

Au-delà des aspects scientifiques, il est probable que la sélection génomique va bouleverser l'organisation des schémas de sélection comme cela a été le cas chez les bovins laitiers. Il est important d'évaluer l'intérêt économique de cette approche pour les différentes espèces afin de déterminer ses domaines d'application et d'optimiser l'utilisation des moyens financiers.

Via la production de modèles de prédiction, on peut penser que la sélection génomique permettra un transfert plus rapide des résultats de travaux de recherche en sélection sans nécessairement attendre que les gènes impliqués aient été identifiés et validés. Dans un tel contexte, l'accès aux données de phénotypage et de génotypage devient crucial. On peut s'interroger sur les conséquences de cette approche sur les acteurs de la sélection dans les différentes espèces et sur les partenariats entre acteurs et notamment avec la recherche. Cette nouvelle approche de sélection pourrait renforcer le *leadership* des grosses sociétés privées au détriment des petites ou/et conduire à la création de consortium entre sociétés de taille modeste pour développer des outils de génotypage, et mutualiser le phénotypage ou des bases de données de calibration.

Ainsi, la sélection génomique soulève encore de nombreuses questions. De très nombreuses expériences de sélection génomique se mettent en place dans les instituts publics comme l'INRA et dans les sociétés privées. Les résultats de ces expériences permettront de mieux évaluer l'intérêt et les limites de cette nouvelle approche. La sélection génomique fait actuellement l'objet d'un métaprogramme INRA « Selgen » impliquant des chercheurs en génétique, statistiques, économie et sciences sociales afin de répondre aux différents enjeux soulevés autour de cette thématique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) EATHINGTON S.R., CROSBIE T.M., EDWARDS M.D., REITER R., BULL J.K., 2007. – Molecular markers in a commercial breeding program. *Crop Science* **47** (S3), S154-63.
- (2) JANNINK J.L., LORENZ A.J., IWATA H., 2011. – Genomic selection in plant breeding : from theory to practice. *Briefings in Functional Genomics* **9**, 166-177.
- (3) MASSMAN J.M., GORDILLO LORENZANA R.E., BERNARDO R., 2013. – Genomewide predictions from maize single-cross data. *Theor. Appl. Genet.* **126**, 13-22.

- (4) MEUWISSEN T.H.E, HAYES B.J., GODDARD M.E., 2001. – Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics* **157**, 1819-1829.
- (5) WHITTAKER J.C., THOMPSON R., DENHAM M.C., 2000. – Marker-assisted selection using ridge regression. *Genetical Research* **75**, 249-252.

DÉVELOPPEMENT, MISE EN ŒUVRE ET PERSPECTIVES DE LA SÉLECTION GÉNOMIQUE CHEZ LES BOVINS : IMPACT SUR L'EFFICACITÉ ET L'ORIENTATION DE LA SÉLECTION

par Didier **Boichard**¹

Propriétés générale de la sélection génomique

La sélection génomique consiste à sélectionner des reproducteurs sur la base de leur valeur génétique prédite à partir de marqueurs génétiques répartis sur le génome. Son principe est relativement simple : une population de référence de quelques milliers d'individus est phénotypée et génotypée. Cette population permet d'établir les relations statistiques entre génotype et phénotype. Ces relations sont ensuite appliquées à des candidats génotypés mais sans performance, et permettent ainsi de prédire leur valeur génétique.

La précision de la prédiction génomique est fonction de la population de référence qui permet l'établissement des équations de prédiction. Plus la population de référence est grande, plus les prédictions sont bonnes. Il est essentiel que la population de référence soit représentative de la population des candidats et qu'elle soit renouvelée pour « suivre » l'évolution des candidats : toute augmentation de distance (en termes de nombre de générations, de déterminisme des caractères et d'évolution du milieu) induit une perte de précision. Enfin, la population de référence doit être phénotypée pour les caractères que l'on veut évaluer. Plus l'héritabilité du caractère est faible, plus l'effectif doit être élevé pour maintenir la précision des prédictions.

Les conséquences de la sélection génomique sont nombreuses. La sélection génomique produit des évaluations précoces, la seule contrainte étant la disponibilité d'une quantité suffisante d'ADN de qualité. Une analyse dès la naissance est donc possible, voire même éventuellement sur l'embryon. La sélection devient moins dépendante d'une mesure du phénotype sur les candidats ou ses descendants, elle peut donc être précoce ; elle est grandement facilitée quand le caractère est non mesurable sur le candidat, coûteux à mesurer, invasif, ou tardif dans la vie. La précision obtenue est équivalente chez les mâles et les femelles, ce qui est un avantage considérable pour les caractères exprimés dans un seul sexe. En théorie, la sélection génomique peut s'appliquer à n'importe quel caractère, dès lors qu'une population de référence de taille suffisante peut être constituée. Il y a déconnexion totale entre obtention des phénotypes et processus de sélection des candidats, ce qui permet une grande souplesse de mise en œuvre, en particulier pour des caractères non mesurables chez les candidats.

Les gains obtenus sont de plusieurs types : une précision élevée permettant une sélection précise, si la population de référence est de taille suffisante, un intervalle de génération qui n'est plus limité que par le potentiel de reproduction et non plus par l'obtention d'information, une intensité de sélection qui peut être élevée si le coût du génotypage est suffisamment faible pour permettre un criblage large de la population. Au final, diverses simulations montrent que l'intérêt de la sélection génomique varie beaucoup entre espèces et systèmes de production. Dans les cas les plus favorables comme chez les bovins laitiers, on peut doubler le progrès génétique sans augmenter le coût du programme de sélection.

Alors que l'information familiale joue un rôle majeur en sélection classique, la sélection génomique est relativement peu coûteuse par candidat et permet de rechercher les meilleurs individus dans l'ensemble de la population. Ceci ouvre des perspectives importantes dans la gestion de la diversité des populations.

Alors que la sélection classique est liée à la mesure des caractères sur les candidats ou leurs apparentés proches, la sélection génomique ne requiert que la mesure du phénotype dans la population de référence, en général plus petite et moins proche. Cela ouvre des perspectives importantes dans la définition des objectifs de sélection, au moment même où les objectifs doivent prendre en compte des besoins de plus en plus complexes.

Mise en œuvre et impact de la sélection génomique chez les bovins laitiers

Il ressort de la présentation ci-dessus que chez les bovins laitiers, toutes les conditions sont réunies pour une mise en place de la sélection génomique : un coût du programme de sélection classique élevé du fait du testage sur descendance des taureaux et donc le coût réduit du génotypage par rapport à la valeur d'un

¹ INRA, UMR1313 Génétique animale et Biologie intégrative, 78350 Jouy-en-Josas.

reproducteur, des caractères exprimés le plus souvent dans un seul sexe, un intervalle de génération long, l'existence d'une grande base historique de phénotypes, mais aussi une expérience ancienne de l'utilisation de l'information moléculaire, des partenaires capables de financer les investissements initiaux nécessaires. Les avantages de la sélection génomique sont nombreux : Le testage sur descendance est supprimé. Le progrès génétique peut être doublé, essentiellement par diminution de l'intervalle de génération mais aussi par une meilleure précision des index des femelles. Les gains génétiques devraient être plus équilibrés entre les différents caractères de l'objectif de sélection. La gestion de la diversité génétique devrait être facilitée.

En France, différents projets, financés par l'ANR, ApisGene et l'INRA ont permis de génotyper rapidement 7000 taureaux testés avec la puce 50k d'Illumina. Cette première population de référence a constitué la base de travail de la sélection génomique et de nombreux travaux de recherche. Les index génomiques des taureaux ont été rendus disponibles en 2008 et officialisés en juin 2009, ouvrant la voie à leur utilisation en insémination sans testage. Fin 2009, le consortium EuroGenomics s'est mis en place en race Holstein, constituant aujourd'hui un ensemble de plus de 23 000 taureaux, assurant une très grande précision de l'évaluation génomique. Depuis début 2011, le système est ouvert à l'ensemble des clients intéressés et les index femelles correspondants sont rendus officiels. La précision (CD ou R^2) des index produits est comprise entre 0.6 et 0.7 en race Holstein selon les caractères, et entre 0.55 et 0.65 en Normande et Montbéliarde. Ces valeurs varient peu selon les caractères et sont un peu plus basses qu'après testage pour les caractères d'héritabilité moyenne à élevée, mais plus élevées pour les caractères peu hérissables comme la fertilité. Pour les femelles, les précisions sont beaucoup plus élevées.

Dès 2009, environ 20 000 animaux (60% de mâles et 40% de femelles environ) ont été génotypés chaque année à des fins de sélection des taureaux, soit environ 30 typages par taureau mis en marché.

L'impact de la sélection génomique chez les bovins laitiers est majeur, à de nombreux points de vue. Tout d'abord, le testage est supprimé avant diffusion. Cela ne signifie pas, bien sûr, que les taureaux n'ont plus d'index sur descendance, mais ils sont utilisés avant. Obtenus tardivement mais très précis avec plusieurs centaines de filles, ces index sur descendance devraient être plus précis que des index de testage, dès lors que le contrôle de performances reste très présent, ce qui est un fort enjeu à l'avenir. Ces index constituent à la fois une validation récurrente de la méthode mais aussi une composante essentielle du renouvellement de la population de référence.

Plusieurs scénarios d'utilisation des taureaux sont envisageables. En pratique, il est recommandé de n'utiliser que des jeunes taureaux, en nombre assez élevé et chacun de façon relativement raisonnable (quelques milliers de doses) et donc avec un fort *turn-over*. Cette solution présente l'avantage d'un très fort progrès génétique (+100%) et d'une réduction de l'augmentation de consanguinité (-20%), l'impact négatif de l'intervalle de génération court sur la consanguinité étant contrebalancé par l'augmentation du nombre de reproducteurs. Il s'agit là d'un changement culturel majeur par rapport au système actuel basé sur un petit nombre de taureaux élites. Le pari est en passe d'être gagné puisqu'en 2012, environ 70% du marché était assuré par des jeunes taureaux.

La précision des index sera beaucoup plus homogène que par le passé : entre mâles et femelles, et entre caractères. Cela se traduira par d'importantes conséquences : une bonne précision des index des jeunes femelles qui vont donc contribuer beaucoup plus qu'aujourd'hui au progrès génétique, un levier beaucoup plus efficace pour la sélection des caractères fonctionnels, un progrès génétique plus équilibré entre caractères, même sans changement des poids économiques de l'index de synthèse (ISU), du simple fait de la meilleure homogénéité des précisions des différents index. La diminution de l'intervalle de génération et l'augmentation du progrès génétique se traduiront aussi par une diminution du temps nécessaire pour observer le progrès génétique.

La technologie devrait aussi se diffuser largement pour la sélection des femelles intra-troupeau. Le service est ouvert depuis 2011 et, en 2012, ce marché en augmentation a atteint environ 25000 animaux. Les avantages sont évidents : avec la précision obtenue, la sélection des femelles gagne en précision et devient un outil attractif, surtout s'il s'accompagne d'une bonne pression de sélection, par exemple avec l'utilisation de semence sexée. Le facteur d'intérêt est essentiellement le coût. D'importants efforts ont été réalisés pour diminuer le coût de la technique, en simplifiant les prélèvements mais surtout en utilisant une puce de plus basse densité, limitée à 6900 SNP, mais moins chère. Combinée à l'imputation des marqueurs haute densité (pour laquelle elle a été optimisée), elle permet d'obtenir des index d'une précision proche de celle obtenue avec 50000 SNP, mais avec un coût moindre. Un autre facteur essentiel jouant sur le coût est le volume d'analyses, il est donc important de positionner le produit pour qu'il soit attractif et largement utilisé.

Au-delà de l'enjeu commercial, cette utilisation large sur les femelles est essentielle techniquement. Ces animaux génotypés et disposant de phénotypes grâce aux contrôles de performances seront les populations de référence du futur.

Perspectives

Les perspectives sont essentiellement de deux ordres :

(1) La prise en compte de nouveaux caractères. Elle ne dépend plus d'un contrôle de performances généralisé à une fraction importante de la population comme auparavant mais simplement dans une population de référence de quelques dizaines de milliers d'animaux. On peut donc imaginer le développement de nouveaux index en fonction du phénotypage réalisé. Les possibilités sont vraiment très larges en fonction des moyens techniques mis en œuvre. Il est ainsi possible de récupérer des données existantes pour mieux les valoriser (données sanitaires, données d'abattage...), ou de tirer plus d'information de mesures existantes (par exemple utiliser les spectres MIR du contrôle laitier pour prédire d'autres informations que les taux butyreux et protéique comme la composition fine du lait), ou de générer des phénotypes nouveaux grâce à l'élevage de précision (santé, comportement, reproduction...). Aujourd'hui des efforts importants sont déployés sur la composition fine du lait et sur les événements sanitaires. On peut donc supposer que l'objectif de sélection évoluera fortement dans les prochaines années pour prendre en compte de nouveaux caractères. Je ne décris pas ici les conséquences sur la propriété et la valorisation des données, et les conséquences organisationnelles en sélection, qui seront développées plus largement par Maurice Barbezant.

(2) L'amélioration de la technique de sélection génomique proprement dite. Les perspectives sont immenses et l'on n'a sans doute pas encore vu les changements les plus importants. Pour l'instant, la sélection génomique ne fonctionne efficacement qu'intrarace, ce qui nécessite de répliquer les populations de référence dans chaque population et de les renouveler régulièrement. Un enjeu important (en bovins mais encore plus dans les autres espèces pour lesquelles la sélection génomique est plus difficile à mettre en œuvre et moins rentable) est d'obtenir une bonne qualité de prédiction entre populations. Ainsi, on pourrait prédire la valeur génétique d'un individu d'une race donnée à partir des populations de référence de toutes les races. L'investissement pourrait être mutualisé, toutes les populations auraient accès à la technologie (contre seulement les plus grandes actuellement), la précision serait maximum, et on pourrait envisager de sélectionner sur des caractères très difficiles comme l'efficacité alimentaire ou la production de méthane par exemple. Pour cela, les effets marqueurs doivent être aussi stables que possible entre populations. Un moyen est d'augmenter la densité des marqueurs de façon à renforcer la relation (le déséquilibre de liaison) entre marqueurs et mutations causales. Un projet multiracial est en cours, Gembal, qui repose sur l'utilisation d'une puce SNP à haute densité (777k) permettant de mettre en évidence les segments chromosomiques conservés entre races. Pour des raisons de coût, seuls des échantillons de fondateurs (5000 au total, issus de 18 races) ont été génotypés à haute densité dans chacune des races, tandis que l'essentiel de la population est génotypé à densité plus basse et imputée. Mais cette évolution ne constitue qu'une étape puisque le séquençage voit son coût diminuer et qu'il est d'ores et déjà possible de séquencer quelques centaines d'individus. Séquencer un individu revient à le génotyper non pas pour un jeu de marqueurs définis à l'avance mais pour tous ses polymorphismes. La même stratégie qu'avec Gembal peut alors être appliquée, avec imputation sur la séquence. Une nouvelle sélection génomique peut ensuite être appliquée, d'autant plus efficace que les mutations causales sont dans l'ensemble des polymorphismes mis en évidence. Compte tenu du coût encore élevé du séquençage, une collaboration internationale s'est instituée pour mettre en commun l'effort de séquençage dans le cadre du projet « 1,000 *bull genomes* », dont l'objectif devrait être atteint courant 2014.

De façon plus prospective, les autres applications sont nombreuses, dont voici une liste non exhaustive : sélection pour des objectifs adaptés à chaque milieu, compréhension des phénomènes biologiques sous-jacents aux interactions génotype-milieu (on aura des animaux avec génotype et phénotype dans tous les milieux), orientation des accouplements pour diminuer la consanguinité ou construire un génotype cible, prise en compte des interactions épistatiques les plus importantes.

IMPLICATION PROFESSIONNELLE DANS LA RECHERCHE EN GÉNOMIQUE ET CONSÉQUENCES DE L'AVÈNEMENT DE LA SÉLECTION GÉNOMIQUE SUR L'ACTIVITÉ DES ACTEURS PROFESSIONNELS DE LA SÉLECTION.

par Maurice **Barbezant**¹

Un contexte favorable à l'implication des professionnels de l'élevage dans la recherche en génomique

La reproduction des bovins, notamment pour les races laitières fait largement appel à l'insémination. Plus de 70% des troupeaux ont recours à ce mode de reproduction. En France, ce service est organisé principalement par des coopératives d'insémination qui assurent la mise en place de la semence et par leurs unions chargées de la sélection et de la production de semence.

Avec la loi sur l'élevage de 1966, ces entreprises coopératives bénéficiaient d'un monopole pour le service de la mise en place. En contrepartie, les coopératives devaient assurer le service dans tous les élevages de leur zone d'agrément. Elles devaient également s'organiser pour assurer la sélection et la production de semence dans les différentes races en quantité suffisante pour servir tous les éleveurs intéressés. Cette situation évitait toute concurrence extérieure mais également toute concurrence entre ces coopératives. En effet chacune d'elles bénéficiait d'un agrément unique pour un territoire bien défini.

Cette situation particulière les a encouragées à conduire des actions en commun pour la défense de la branche mais également pour la mise au point et la modernisation des techniques de l'insémination. C'est pourquoi elles se sont réunies au sein de l'UNCEIA (Union nationale des coopératives d'élevage et d'insémination animale).

Chaque coopérative bénéficiait de la compétence d'un chef de centre de niveau bac+5 (ingénieur ou vétérinaire) qui participait, avec ses collègues, à la modernisation de la technique. Certains comme Robert Cassou ou Maurice Bernage ont même fini par monter leur propre entreprise dont on connaît encore aujourd'hui la prospérité.

Il est vrai que, dans la période de lancement de l'insémination dans les années 1950, il fallait tout inventer car il n'existait pas vraiment de techniques éprouvées pour ce service. Les chefs de centre avaient besoin de se concerter pour confronter leurs innovations et en vérifier l'intérêt. Compte tenu de l'absence de concurrence entre les coopératives, les directeurs et les conseils d'administration des coopératives ont proposé de financer un service commun pour la recherche à l'UNCEIA.

Il faut également rappeler que la sélection animale comme la sélection végétale ne bénéficiaient pas des crédits de l'ANDA. Il fallait que ces secteurs, pourtant essentiels à la modernisation de l'agriculture mais considérés comme des secteurs potentiellement rentables, assurent leur propre développement, sans aide extérieure.

Ajoutons à cela que les coopératives, en relation étroite avec l'UNCEIA, étaient, avec l'INRA et l'Institut de l'Élevage, coacteurs de la mise au point des schémas de sélection.

Dans ce contexte, il s'est tissé progressivement un partenariat étroit entre l'UNCEIA et l'INRA tant pour la reproduction que pour la sélection. L'équipe R&D de l'UNCEIA a rapidement été reconnue, au niveau national comme au niveau international. Elle a participé avec bonheur aux grandes innovations du secteur comme la congélation de la semence, la sélection sur descendance, le diagnostic précoce de gestation, l'OPU FIVE et la fécondation *in vitro*, la synchronisation des chaleurs, et plus récemment, à tous les travaux sur la numération spermatique, la détermination objective de la qualité de la semence, la mise au point de dilueurs de semence, etc.) Ces travaux se poursuivent encore aujourd'hui. Ils font de plus en plus appel aux technologies modernes d'analyse comme la cytométrie de flux ou l'imagerie qui justifient encore davantage le travail en partenariat entre le secteur professionnel et la recherche publique.

Mais toutes ces innovations ont des limites techniques, progressivement surmontées mais aussi des limites économiques qui pèsent sur le coût du service rendu à l'éleveur. Dans l'espèce bovine, par exemple, le coût des schémas de sélection est très élevé. En effet chaque taureau mis en testage revient à plus de 40.000 € et, au final, comme on en retient un sur dix, voire un sur douze, chaque taureau producteur de semence sélectionnée revient à plus de 400 000€. Malgré cet investissement important, le progrès est lent car

¹ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Ancien directeur de l'UNCEIA.

l'intervalle de génération est long (5 à 7 ans) et, pour un certain nombre de caractères sélectionnés à faible héritabilité, la précision reste faible. Enfin, la précision sur la valeur génétique des femelles reste très faible compte tenu du petit nombre de performances à partir desquelles on peut l'évaluer.

La sélection génomique : une belle aventure prouvant l'efficacité du partenariat entre la recherche publique et un secteur professionnel

Face à ces problèmes l'INRA a lancé une prospective sur les sauts technologiques envisageables en élevage pour dépasser les limites rencontrées du progrès (rapport Valin en 2000). À cette époque, on commence à parler de génomique, de QTL, de microsatellites, de séquençage plus ou moins partiel du génome bovin. Les précurseurs pressentent que, si les technologies naissantes permettent de scruter le génome avec un débit suffisamment important, on connaîtra la valeur génétique des animaux dès la naissance par une simple analyse de sang. Ce pari a été fait et l'INRA a sensibilisé tous les professionnels de l'élevage sur l'intérêt d'intensifier les recherches sur le génome dans la perspective de dépasser les limites connues de la sélection sur descendance.

Bien évidemment, l'UNCEIA et les entreprises coopératives de sélection, sensibilisées à la problématique de l'innovation appliquée à la reproduction des bovins et très concernées par le sujet ont répondu présent :

- en mettant à disposition de l'INRA leurs données,
- en acceptant de lancer, à leur frais, les premiers génotypage expérimentaux,
- en cofinçant les premiers programmes de recherche de QTL,
- en testant les premiers résultats acquis (SAM1).

Rapidement cet investissement intellectuel et financier s'est avéré insuffisant. Il fallait passer à la vitesse supérieure. L'INRA a pris l'initiative de lancer un Groupement d'intérêt scientifique (GIS) dédié à la génomique animale : AGENAE (Analyse du GENome des Animaux d'Élevage) pour poursuivre quatre objectifs :

- acquérir des connaissances en génomique,
- acquérir des savoir faire relatifs à l'analyse du génome et au calcul d'index génomiques,
- acquérir et caractériser du matériel biologique,
- créer des outils nouveaux (puces, typage à haut débit, bioinformatique).

Tout naturellement, le monde de la sélection bovine s'est senti concerné. L'UNCEIA a poursuivi la tâche de mobilisation initiée par l'INRA. Elle a convaincu ses partenaires de l'élevage et s'est associée aux interprofessions du lait et de la viande, à la CNE et à l'Institut de l'Élevage pour créer une société dédiée à la recherche sur la génomique des ruminants : la SAS APISGENE dont les missions essentielles sont :

- permettre aux différents partenaires de l'Élevage de participer de façon unie au GIS AGENAE,
- réfléchir aux orientations à donner à la recherche en génomique et proposer au GIS AGENAE les grands sujets de préoccupations des professionnels de l'élevage,
- mobiliser des moyens professionnels pour cofinancer avec la puissance publique (ANR) des programmes de recherche en génomique,
- valoriser les résultats obtenus en donnant accès à tous les éleveurs aux nouvelles méthodes de sélection découlant de ces recherches.

Dans le cadre d'AGENAE le monde de l'élevage s'est fortement mobilisé :

• financièrement en proposant de cofinancer les programmes de recherche en génomique finalisés, c'est-à-dire pouvant déboucher directement ou indirectement sur une technologie transférable aux éleveurs : Dans le cadre des deux premiers contrats du GIS AGENAE, APISGENE s'est mobilisé à hauteur de 12 millions d'euro, ce qui a permis de cofinancer 50 projets de recherche labellisés par l'ANR et de mobiliser au total plus de 30 millions d'euro d'argent public,

- en mettant ses données de phénotypage à disposition des chercheurs,
- en organisant et en animant des concertations avec les pays voisins pour élargir ces bases de données et créer des populations de référence de taille suffisante pour rendre les résultats plus fiables. C'est ainsi que UNCEIA a été à l'initiative de la création d'EUROGENOMICS associant les entreprises de sélection de France, Allemagne, Pays-Bas, Danemark, puis dans un deuxième temps, Pologne et Espagne. Cet accord a permis de porter la population de référence en race Holstein à 20 000 taureaux, améliorant de façon significative la prédiction génomique de la valeur génétique des animaux,
- intellectuellement ; en participant :

- activement aux différentes instances de gouvernance de la recherche en génomique : comité de pilotage, conseil scientifique et comité stratégique du programme GENANIMAL de l'ANR, toutes les instances techniques et décisionnelles d'AGENAE, comité de pilotage des programmes labellisés, etc.
- directement à certains programmes de recherche pour lesquels l'UNCEIA dispose de compétences propres (domaines de la reproduction et de la génétique). Dans certains cas, les équipes de l'UNCEIA travaillent directement dans les laboratoires de l'INRA.

Globalement le dispositif a permis d'atteindre rapidement les objectifs poursuivis :

- acquisition de nouvelles connaissances en génomique,
- acquisition de nouveaux savoir faire, création de nouveaux outils performants (puces),
- caractérisation du matériel biologique,
- mise au point d'une nouvelle méthode de sélection des reproducteurs en races Holstein, Normande et Montbéliarde : (cf. La sélection génomique présentée par Didier Boichard).

Conséquences sur l'activité des acteurs professionnels de la sélection

Les entreprises de sélection ont participé directement à l'acquisition de ces résultats. Elles en étaient acteurs puisque le dispositif expérimental qui a permis de les atteindre était constitué des taureaux qu'elles sélectionnaient. Chaque entreprise de sélection participait au comité de pilotage de la recherche coordonné par l'UNCEIA et animé par les chercheurs de l'INRA.

De plus, rappelons que les dirigeants de ces entreprises attendaient avec impatience des résultats tangibles pour améliorer l'efficacité de la sélection. Il en découle que le transfert des résultats des travaux de recherche en sélection génomique n'a posé aucun problème. Le comité de pilotage de la recherche a poursuivi son rôle en organisant ce transfert et en proposant une utilisation optimale des reproducteurs recrutés par sélection génomique. Rapidement, les entreprises de sélection ont modifié leur façon de faire pour optimiser l'usage de la sélection génomique. On constate notamment :

- le recrutement des taureaux candidats à la sélection sur index génomique : À la naissance, grâce à un simple génotypage on connaît avec une précision suffisante la valeur génétique des taureaux pour pouvoir les diffuser en étant certain de réaliser un progrès génétique,
- en conséquence le testage avant diffusion ne se justifie plus. Les entreprises de sélection l'abandonnent. La valeur génétique sur descendance est toujours calculée *a posteriori*. Elle n'est connue qu'après diffusion des taureaux,
- une évolution sur la sélection et l'emploi des taureaux s'est traduite par une réduction de la durée de présence des taureaux dans les centres d'insémination. Le cheptel des taurelleries est beaucoup plus jeune, induisant des méthodes de conduite appropriées. Les entreprises en ont profité pour réaliser la restructuration drastique de ce secteur de leur activité en fermant trois unités sur quatre et en modernisant celles qui étaient retenues pour qu'elles soient mieux adaptées aux conditions de production des jeunes taureaux. Un effort particulier a été entrepris sur le bien-être animal et sur les conditions de sécurité des animaliers,
- la concentration des entreprises de sélection que l'on constate également n'est qu'en partie liée à l'avènement de la sélection génomique. La conjoncture économique et l'abandon du monopole de zone que leur accordait la loi de l'élevage de 1966 en sont les principaux responsables,
- les entreprises de sélection reportent une partie des économies réalisées par l'abandon du testage sur la création génétique par accouplements raisonnés et la production (*in vivo* ou *in vitro*) d'embryons en ferme et/ou en station dans l'objectif d'obtenir les meilleurs descendants issus des meilleurs parents,
- les taureaux ainsi sélectionnés sont maintenant utilisés dès le plus jeune âge. Le facteur limitant à leur utilisation n'est plus la détermination de leur valeur génétique mais la production de semence en quantité et en qualité suffisante pour des jeunes taureaux, et ce dès la puberté. C'est la fin du « taureau star », les entreprises de sélection proposent à leurs adhérents des « packs de semences » constitués de doses de plusieurs taureaux ayant des qualités comparables (pack matière utile, pack qualité de la mamelle, pack conformation, etc.)
- grâce à cette utilisation judicieuse des taureaux issus d'une sélection génomique, le progrès génétique est doublé tout en renforçant la diversité d'origine, limitant ainsi la consanguinité,
- la sélection sur des caractères à faible héritabilité est rendu possible alors que le testage était peu efficace sur ces caractères. Il convient cependant de recueillir les performances des animaux sur ces caractères qui s'avèrent très importants quand on parle de développement durable puisqu'ils touchent à la fonctionnalité des animaux et à leur longévité,

- avec le testage sur descendance, le progrès génétique était véhiculé principalement par la voie mâle. En effet le manque de précision sur les index femelles en limitait l'intérêt surtout pour des caractères à faible héritabilité. La sélection génomique quant à elle est indépendante du sexe. Les index obtenus ont la même précision pour les mâles que pour les femelles. C'est la raison pour laquelle les entreprises de sélection se sont lancées dans une grande campagne de promotion du génotypage des jeunes femelles des troupeaux d'éleveurs. Pour offrir ce service à tous les éleveurs, elles ont créé VALOGENE, Société par actions simplifiée qui œuvre, dans le respect des missions confiées à l'INRA et à l'Institut de l'Élevage, à la diffusion de la technique au plus grand nombre en en limitant le coût. Sa fonction de groupement d'achat des puces de génotypage au niveau européen permet d'obtenir les prix les plus bas du marché.

- la sélection génomique n'est pas la seule innovation qui modifie les pratiques des éleveurs et des organismes de service qui les accompagnent. Ces innovations renforcent encore l'efficacité de la sélection génomique,

- l'informatique embarquée, par exemple, permet de mesurer en continu différentes performances utiles à l'éleveur pour une meilleure gestion de son troupeau et une levée de certaines contraintes de surveillance. Collectivement, ces informations sont appréciables pour la sélection, dès lors qu'elles peuvent être disponibles pour le Système d'information génétique (SIG) qui est la base de données indispensable au calcul des index,

- par ailleurs, le sexage de la semence permet de choisir le sexe des veaux à naître. Couplé à la sélection génomique, il ouvre des perspectives nouvelles pour la conduite du troupeau :

- classement par index génomique des femelles destinées au renouvellement du troupeau. Ces vaches sont alors inséminées avec de la semence sexée « femelle » de taureaux choisis pour leurs qualités complémentaires de celles des vaches. Les meilleures génisses issues de ces accouplements raisonnés pourront prétendre devenir mères à taureaux si elles ont largement bénéficié de « l'aléas de méiose ». S'il prévoit large, l'éleveur pourra même envisager de commercialiser une partie des génisses dont il n'a pas besoin pour le renouvellement de son troupeau, en apportant à l'acheteur une garantie supplémentaire de qualité, grâce à l'index génomique disponible dès le plus jeune âge ;
- pour le reste du troupeau, l'éleveur pourra envisager un croisement viande en choisissant de la semence sexée « mâle » de taureau ayant un bon index « facilité de naissance ». C'est sans doute une voie d'avenir pour produire tout à la fois du lait et de la viande en limitant les rejets de gaz à effet de serre (GES)

Conclusion

Les professionnels de l'élevage se sont impliqués avec bonheur dans la mise au point de la sélection génomique chez les bovins. Ils y étaient préparés par les bonnes relations historiques avec la recherche publique. Il y avait aussi une nécessité économique compte tenu du coût élevé du progrès génétique chez les bovins.

Souvent on prétend qu'une bonne innovation est une innovation acceptée et mise en œuvre par les acteurs économiques. C'est le cas avec la sélection génomique qui a trouvé rapidement sa place dans les dispositifs exploités par les entreprises de sélection. On doit la réussite de ce transfert au fait que la recherche en génomique a été une « recherche action » impliquant chercheurs et entreprises de sélection dans une relation de confiance.

Il est important de poursuivre le travail dans un même état d'esprit. C'est en ce sens que les professionnels se sont engagés dans une troisième convention GIS AGENAE. La signature de cette convention a eu lieu sur le stand de l'INRA au Salon de l'agriculture 2013. Elle ouvre de nouvelles perspectives comme :

- l'élargissement de la sélection génomique à tous les bovins (races laitières régionales et races à viande), aux ovins, aux caprins et, en tant que de besoin aux autres espèces d'élevage,
- l'élargissement des caractères sélectionnés pour des animaux doublement performants répondant aux critères du développement durable,
- une attention particulière sera donnée aux problèmes de l'efficacité alimentaire, des rejets de gaz à effet de serre, de la productivité numérique du troupeau, de la santé, des défenses naturelles des animaux et de leur bien-être.

Ainsi la sélection génomique a ouvert une voie. Les perspectives d'application sont nombreuses. Espérons que les conditions seront favorables à la poursuite de cette belle entreprise.

Conclusion de la séance sur LA SÉLECTION GÉNOMIQUE

par Denis Milan¹

Un des défis majeurs des prochaines décennies est la capacité à nourrir une population mondiale croissante, qui devrait atteindre 9 milliards d'habitants en 2050, dans un contexte d'évolutions fortes incluant des contraintes liées au milieu (réchauffement climatique, prise en compte plus forte de l'impact écologique) ou à la limitation des ressources (compétition sur les terres entre alimentation humaine, alimentation animale et usages non alimentaires, gestion plus parcimonieuse de l'eau). Il est également nécessaire de préserver la compétitivité de l'agriculture française, et plus largement européenne, et de favoriser un aménagement équilibré des territoires.

Parmi les différentes approches permettant de relever ces défis, la génétique est un levier de choix expliquant de l'ordre de 50 à 60 % des gains de productivité réalisés sur les décennies récentes. Originellement, les méthodes d'estimation de la valeur génétique ignoraient les gènes influençant réellement les caractères, mais étaient basées sur l'analyse de performances d'individus dont on connaissait les apparentements. Les connaissances acquises sur les génomes et leur polymorphisme ont permis, ces vingt dernières années, de détecter les régions du génome (gènes à effet majeur ou à effet plus réduit appelés QTL pour Quantitative Trait Locus) influençant les caractères d'intérêt. L'identification de marqueurs génétiques proches sur le génome de ces gènes, a permis la mise en place de Sélection assistée par marqueurs (SAM), et l'augmentation de la fréquence des allèles favorables dans les populations. Pour être efficace, ce mode de sélection nécessitait toutefois que les caractères sélectionnés soient influencés par un petit nombre de gènes ayant un effet assez important (notamment gènes de résistance à des agents pathogènes).

Comme cela a été expliqué au cours des présentations précédentes, une nouvelle génération de méthodes de sélection, appelée « Sélection génomique », se met en place grâce aux progrès réalisés par la génomique et la possibilité maintenant offerte de pouvoir génotyper facilement de grands nombres de marqueurs génétiques couvrant le génome de façon très dense (usuellement 50 à 100 000 marqueurs) à des coûts limités à moins de 100€ par individu. L'étude de populations de référence de quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'individus, pour lesquels on dispose à la fois de génotypes et de performances permet alors d'estimer la contribution aux caractères d'intérêt des principales régions du génome influençant ces caractères (usuellement de l'ordre de 200 régions par caractère). Dans un deuxième temps, l'analyse de ces mêmes marqueurs sur des candidats à la sélection permet ensuite de prédire avec une précision suffisante la valeur génétique de ce candidat pour lequel on ne dispose pas de performances propres. Bien évidemment cette sélection génomique s'est mise en place en premier dans les races bovines laitières où les méthodes précédentes ne permettaient d'estimer fiablement la valeur génétique d'un taureau candidat que vers 8 ans d'âge (ses filles devaient avoir produit du lait) pour un coût de l'ordre de 40 k€.

Les innovations de la « Sélection génomique » ouvrent ainsi de grandes perspectives avec notamment : i) la possibilité de connaître avec la même précision la valeur génétique de tout individu mâle ou femelle, né ou à naître, ii) la possibilité corollaire d'utiliser une variabilité génétique plus vaste, en donnant une chance à des lignées au sein desquelles les méthodes classiques n'auraient pas cherché de candidats, iii) la possibilité de prendre en compte des caractères à faible héritabilité (notamment ceux pour lesquels il existe une forte influence de l'environnement), iiiii) la possibilité d'améliorer des caractères que l'on ne peut analyser sur les candidats à la sélection (comme, par exemple, la réponse à un challenge avec un agent pathogène).

Au-delà des races bovines laitières, où le rapport coût bénéfice était le plus immédiatement favorable, la sélection génomique ouvre des perspectives très intéressantes chez de nombreuses espèces animales et

¹ Chef du département de Génétique animale de l'INRA, Directeur du métaprogramme SELGEN de l'INRA.
C.R.Acad. Agric. Fr., 2013, 99, n°2. Séance du 27 mars.

végétales. Le modèle bovin ne peut toutefois être transposé tel quel à d'autres espèces et il convient de voir pour chaque espèce ce que la sélection génomique peut apporter et de déterminer de quelle manière ces technologies peuvent se déployer.

Reconnaissant ce domaine comme stratégique, le collège de direction de l'INRA a défini la « Sélection génomique » comme l'une des 8 priorités devant être traitée dans un cadre transdisciplinaire commun aux règnes animal et végétal, avec un investissement significatif dans le domaine des sciences économiques et sociales. Le principe de lancement du métaprogramme SELGEN a ainsi été validé en 2011 avec deux espèces premières, l'espèce blé et l'espèce bovine, même si la sélection génomique a vocation à s'ouvrir à l'ensemble des espèces pour lesquelles cela est pertinent.

Les travaux menés dans le cadre de SELGEN sont structurés autour de quatre axes transversaux : 1) étude et connaissance du déséquilibre de liaison, 2) méthodologie et optimisation de la sélection génomique, 3) production, stockage et intégration des données, 4) stratégie des acteurs, évolution de l'organisation des filières.

Le premier appel, lancé en 2012, a conduit à sélectionner 8 projets de recherche et 2 actions internationales. L'approche transversale et pluridisciplinaire du métaprogramme SELGEN a permis de faire émerger des projets combinant l'expertise présente dans différents départements de recherche de l'INRA. Des généticiens végétaux et animaux, des méthodologistes mathématiciens, des économistes se sont ainsi regroupés pour travailler sur le couplage de modèles génétiques et économiques afin d'optimiser l'apport potentiel de la sélection génomique dans les différentes espèces. Pour chaque espèce en effet, cet optimum dépendra notamment de ses propres caractéristiques biologiques (intervalle de génération, mode de reproduction usuel, taux de multiplication, caractères d'intérêt, valeur des produits commercialisés) ou génétiques (étendue du déséquilibre de liaison, taille efficace des populations en sélection), des données économiques et de l'organisation des structures d'amélioration génétique en place. Pour donner un deuxième exemple, un autre projet, retenu dans le cadre de SELGEN, combine les compétences de statisticiens, d'agronomes écophysiologistes et de généticiens des plantes pour mieux appréhender les interactions entre génotypes et milieu et définir les critères de sélection les plus pertinents.

Il est évident que la sélection génomique, plus qu'une simple évolution, est une vraie révolution qui ouvre de nouvelles perspectives, en même temps qu'elle bouleverse l'organisation de la sélection. Elle présente des effets structurants sur les systèmes et les filières de production agricole. L'abandon, par exemple, du testage sur descendance dans les races bovines laitières modifie profondément l'organisation, les rapports de pouvoir et les équilibres entre acteurs. Pour les grandes races, utilisées internationalement, il place encore plus l'avenir sur un plan mondialisé, renforçant l'importance des alliances internationales.

Pour être efficace la sélection génomique n'a pas « besoin de comprendre », il lui suffit de disposer de marqueurs associés aux gènes influençant les caractères d'intérêt sans avoir besoin de connaître pour autant ces gènes. Malgré cet aspect « boîte noire », la sélection génomique ouvre toutefois des perspectives importantes pour la recherche fondamentale en produisant une ressource extrêmement précieuse : des populations de référence de taille croissante pour lesquelles on dispose conjointement, sur chaque individu, de phénotypes mesurés et de génotypes à une très forte densité pouvant aller jusqu'à la séquence complète (observée ou prédite à partir de génotypages à forte densité). L'accès des chercheurs à cette ressource, permettra d'identifier, avec une précision toujours plus grande, la position sur le génome des gènes influençant les caractères d'intérêt, jusqu'à identifier les gènes influençant ces caractères. À côté des objectifs finalisés d'une sélection plus efficiente et préservant mieux la diversité génétique, on attend ainsi, dans les prochaines années, des retombées plus fondamentales sur la compréhension de l'architecture des caractères, le polymorphisme des gènes impliqués et l'effet de ces polymorphismes, et plus largement sur la compréhension de la régulation et du fonctionnement du génome. En même temps que la sélection génomique se met en place dans un partenariat gagnant-gagnant entre les filières et la recherche, la prochaine évolution se prépare déjà...

NOTE DE CONJONCTURE

**SITUATION DU MARCHÉ AVICOLE ET ENJEUX
POUR LA FILIÈRE FRANÇAISE**par Pascale **Magdelaine**¹**RÉSUMÉ**

Sur les vingt dernières années, le contexte avicole mondial a affiché une forte croissance, de la production (+ 4,3 % par an), et, plus encore, du commerce international (+ 7 % par an). L'Union européenne a cependant peu bénéficié de cette dynamique, avec une croissance plus modérée de la production, autour de 2 % par an, et un recul de sa part de marché au plan mondial. La dynamique de la filière française est encore plus faible, la production restant stable sur la période. Après une croissance modérée dans les années 90, la France a en effet enregistré, sur la dernière décennie, un déclin significatif, en grande partie lié à la perte de marchés à l'exportation et à une progression constante de ses importations.

Si la filière française conserve des atouts, notamment un marché diversifié et à forte valeur ajoutée, du savoir-faire technique et sanitaire et des relations contractuelles fortes, elle montre également des faiblesses : vieillissement des outils de production et de transformation, sousinvestissement, manque de standardisation et hyper segmentation des gammes, artificielle et coûteuse. Elle doit également faire face à une lecture souvent plus contraignante de la réglementation européenne que ses concurrentes. Les leviers d'action résident dans la levée des blocages actuels (sur l'acceptabilité des élevages, sur les relations administration/industrie et industrie/distribution) et sur la construction d'une vision partagée de l'avenir de la filière.

INTRODUCTION

Le contexte avicole français est actuellement marqué par un déclin relatif de la production nationale dans un environnement international assez dynamique.

En effet, sur les vingt dernières années, l'aviculture mondiale a affiché une forte croissance, de la production (+ 4,3 % par an), et, plus encore, du commerce international (+ 7 % par an). L'Union européenne a cependant peu bénéficié de cette dynamique, avec une croissance plus modérée de la production, autour de 2 % par an, et un recul de sa part de marché au plan mondial.

La dynamique de la filière française est encore plus faible, la production restant globalement stable sur la période. En effet, après une croissance modérée dans les années 90, la France a enregistré, sur la dernière décennie, un déclin significatif, en grande partie lié à la perte de marchés à l'exportation et à une progression constante de ses importations. Les échanges extérieurs français de viandes et de préparations se sont détériorés, le solde global chutant de 714 000 tonnes équivalent carcasse (Tec) en 2000 à 134 000 tec en 2012. Les échanges avec nos partenaires européens sont déficitaires en volume comme en valeur. En 2012, plus du quart des volailles et 44 % des poulets consommés en France étaient importés.

¹ ITAVI, 4 rue de Bienfaisance, 75008 Paris. Courriel : magdelaine@itavi.asso.fr

1. LE CONTEXTE INTERNATIONAL

1.1 Dynamisme de la production et de la consommation mondiale

1.1.1 Une production en hausse de 4,3% par an en moyenne sur vingt ans

Selon les estimations de la FAO datées de novembre 2012, la production de volailles atteindrait 104 Mt en 2012, soit une progression de 2,2 % par rapport à 2011. La demande mondiale en viandes de volailles reste stimulée par les prix élevés des viandes concurrentes, mais la croissance est ralentie par la hausse des coûts des matières premières et la résurgence de l'influenza aviaire en Asie.

La production de volailles se situe au second rang derrière celle de la viande de porc (111 Mt), mais loin devant la viande bovine (67 Mt). Sur les vingt dernières années, la croissance moyenne de la production mondiale de volailles a été de 4,3 % par an contre 1 % pour la viande de bœuf et 2.2 % pour la viande porcine.

Le leadership de l'Asie et de l'Amérique latine s'est accentué sur cette période, avec des taux de croissance respectifs de 5,6 % et 6,7 % par an.

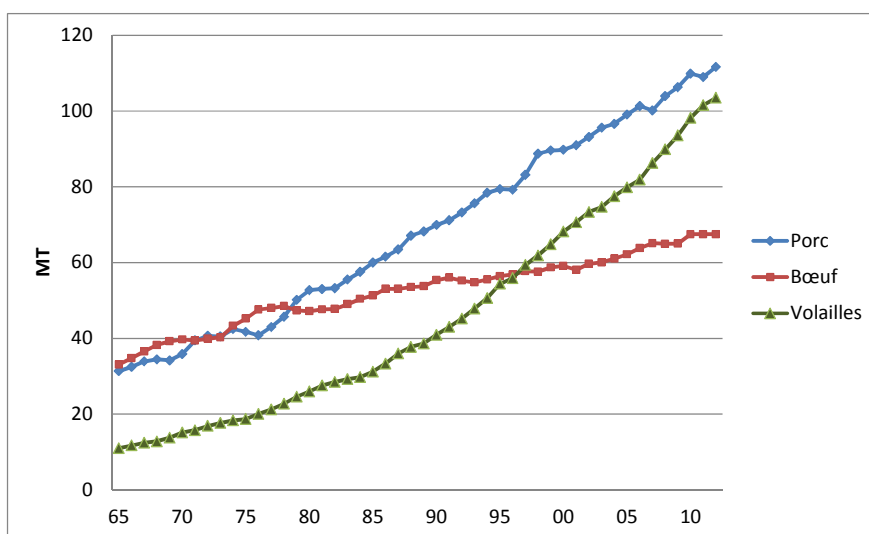


Figure 1 : Évolution de la production mondiale de viandes (1 000 t, ITAVI d'après FAO)

1.1.2 Des niveaux de consommation et des préférences consommateurs variés

Le niveau de consommation individuelle de volailles s'établissait à 13,6 kg par personne en 2009 selon la FAO, avec des écarts (moins de 10 kg en Afrique, autour de 50 kg aux États-Unis, en Israël et dans certains pays du Golfe) et des dynamiques de croissance contrastées.

Malgré une apparente standardisation, le marché mondial du poulet, qui représente plus de 80 % du marché mondial de la volaille, conserve des segmentations correspondant à des niveaux de maturité différents et liés aux niveaux de pouvoir d'achat des populations, aux modèles alimentaires et aux attentes sociétales spécifiques vis-à-vis de l'alimentation. Dans les pays en développement, ou d'agriculture d'autosubsistance, le produit-type consommé est un poulet familial rustique de souche colorée ; quand le marché se développe, la demande évolue vers des produits avec de meilleurs rendements en viande, et sur les marchés à maturité les souches s'alourdissent en réponse à une demande de produits transformés. Enfin, sur des marchés très matures, apparaît la recherche de nouvelles différenciations vers des modes d'élevage plus extensifs pour répondre à des attentes de bien-être animal, notamment.

Les segmentations de marché traduisent aussi les diverses préférences des consommateurs : les marchés nord-américain et de l'Europe de l'Ouest sont centrés sur le filet, le marché japonais sur les cuisses désossées et les chinois consomment des pattes de poulet. Les niveaux d'attentes sociétales se traduisent également par des exigences spécifiques.

1.2 La volaille est la première viande échangée dans le monde

D'après la FAO, les échanges internationaux de volailles (hors échanges intracommunautaires) ont atteint 13 Mt en 2012. Sur les vingt dernières années, ils ont enregistré une croissance moyenne de 7% par an.

Le commerce mondial est très concentré : les États-Unis et le Brésil sont au coude à coude pour la place de premier exportateur mondial en volume, avec respectivement 30 % et 32 % des échanges internationaux en 2012. En valeur, le Brésil est le leader incontesté avec des exportations de volailles s'élevant à 8,4 milliards USD en 2012, contre 5,5 milliards USD pour les États-Unis. Les ventes de l'Union européenne atteignent juste 2 milliards USD. La place de l'Union européenne dans le commerce international de volailles est en nette diminution depuis 15 ans, passant de 20 % des volumes exportés en 1994 (date de la signature des accords de Marrakech) à 10 % en 2012 (*Figure 2*).

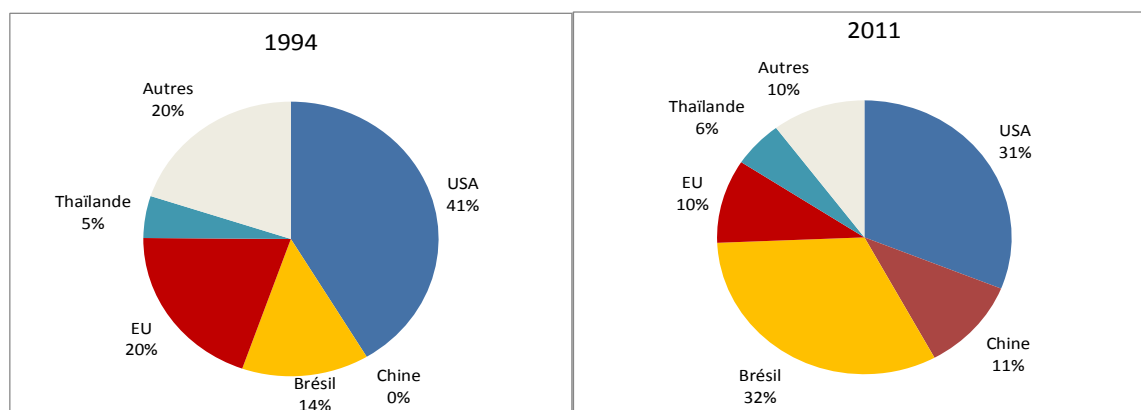


Figure 2 : Évolution de la part des principaux acteurs dans les échanges mondiaux (ITAVI d'après FAO, Commission européenne, UBABEF et USDA)

Les importations sont beaucoup plus atomisées. Les principaux importateurs sont la Chine (2 Mt), le Proche et Moyen-Orient avec l'Afrique du Nord (environ 2 Mt) en forte croissance, le Japon (1 Mt), la Fédération de Russie (430 000 t en 2011, 600 000 t en 2012) et l'Union européenne.

Les importations russes ont fortement diminué en quatre ans, le taux d'autosuffisance russe atteignant près de 90 % vs 40 % environ il y a dix ans.

Si l'Union européenne est exportatrice nette en volume (1.4 Mt exportées en 2012 pour 843 000 t importées), elle est cependant déficitaire en valeur, de 500 M€ en 2012. Après avoir fortement progressé de 2000 à 2008, les importations européennes de viandes tendent à se stabiliser autour de 800 000 t et 2 milliards €. Les raisons de ce recul de l'Union européenne sur la scène mondiale relèvent de deux raisons majeures qui seront précisées plus loin : un déficit de compétitivité par rapport à ses compétiteurs mondiaux et la libéralisation des échanges internationaux dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) depuis la signature des accords de Marrakech en 1994.

1.3 Les facteurs de compétitivité sur le marché international.

1.3.1 Analyse comparée des coûts de production dans le monde et facteurs de compétitivité-coûts

Le LEI (Bureau d'études néerlandais adossé à l'université de Wageningen) réalise régulièrement des analyses comparées des coûts « moyens » de production en élevage avicole pour différentes filières dans le monde (Van Horne, 2009, 2012). Les dernières données disponibles, relatives à l'année 2010, confirment la compétitivité-coût des États-Unis et du Brésil sur la production de poulet au stade élevage (*Figure 3*).

Les principaux avantages compétitifs du Brésil et des États-Unis sont des coûts d'intrants plus faibles avec un coût d'aliment de 212 €/t en 2010 au Brésil, 214€/t aux USA, contre 275 à 300 €/t en Europe, ce qui entraîne mécaniquement un plus faible « coût poussin », de bonnes performances techniques, un très faible niveau de charges fixes lié à des installations souvent plus rudimentaires et à un plus faible coût de la main-d'œuvre et enfin un cadre réglementaire moins contraignant que le cadre communautaire, notamment en ce qui concerne la protection de l'environnement et certaines normes sanitaires.

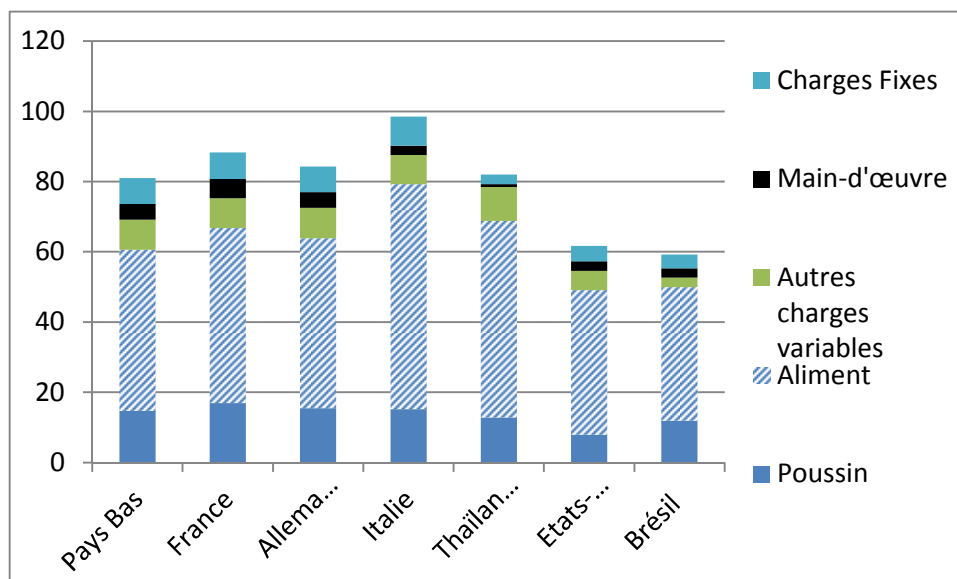


Figure 3 : Coûts de production du poulet sortie élevage (€/kg vif) en 2010 (Van Horne 2012)

Ce différentiel de compétitivité se creuse encore au stade abattage-transformation, en lien avec le faible coût de la main-d'œuvre. En effet, le salaire minimum mensuel brésilien était de 622 BRL début 2012, soit environ 272 €. En 2010, le coût du poulet sortie abattoir était estimé inférieur de 36 % au Brésil comparé à la France (Fouillade, 2010).

Si l'on compile différentes sources, données élaborées par Peter van Horne pour les années 2000, 2001, 2004, 2007, 2009, 2010, données de l'Embrapa (Santa Catarina), pour les années 2007 à 2011 et des données ponctuelles retravaillées lors d'études *ad hoc*, pour les années 1999 (étude ITAVI pour OFIVAL) et 2006 (projet AVITER), certaines tendances se dessinent, même s'il convient d'être prudent compte tenu de l'hétérogénéité des sources et des méthodologies. On constate ainsi, sur une décennie, que le surcoût de production entre l'Europe et le Brésil se réduit, passant en moyenne de 76 % sur les années 1999-2001 à 48 % sur 2009-2011. L'écart de coût aliment se réduit de moitié passant de 50 % à 26 % en moyenne triennale, traduisant un rapprochement des prix européens et brésiliens des céréales, alors que les écarts demeurent relativement constants sur le coût du soja, liés à celui du transport.

1.3.2 Le rôle du contexte réglementaire et des accords internationaux

Après plus de trente années de développement sur le marché international, la signature des accords de Marrakech en 1994 a sonné le glas du développement des exportations européennes subventionnées. Or, sans soutien à l'exportation, les différentiels de coût existants entre l'Union européenne et ses principaux compétiteurs internationaux interdisent aux opérateurs européens (et notamment français) une présence significative sur le marché mondial. Si, globalement, les volumes exportés par l'Union européenne à destination des pays tiers, exprimés en Tec, se sont maintenus jusqu'au début des années 2000, grâce au développement des ventes de sous-produits de l'industrie avicole - type VSM (Viandes séparées mécaniquement) de dinde ou de poulet - les exportations européennes chutent nettement en valeur à partir de 1998, puis en volume à partir de 2000, avant de se stabiliser.

La part, en volume, des exportations européennes réalisées avec restitutions passe ainsi de plus de 90 % avant l'entrée en vigueur des accords de Marrakech à environ 20 % aujourd'hui.

1.3.3 L'exemple brésilien, atouts et perspectives.

Avec 13 Mt produites et plus de 4 Mt exportées en 2012, le Brésil est aujourd'hui le troisième producteur de viandes de volailles (derrière les États-Unis et la Chine) et le premier exportateur mondial devant les États-Unis en volume mais plus encore en valeur. La croissance de la production brésilienne s'est d'abord appuyée sur un marché intérieur en fort développement puis sur la mise en œuvre de stratégies de développement des marchés d'exportation, basées sur une compétitivité par les coûts et une forte diversification des couples produits-marchés.

La filière brésilienne dispose actuellement d'avantages comparatifs qui demeurent déterminants : de faibles coûts d'intrants (maïs, soja, main-d'œuvre), une capacité à innover, une bonne technicité.

Aujourd'hui, les performances brésiliennes en élevage sont largement équivalentes aux performances françaises, même si les productivités en kg/m²/an sont inférieures. En effet, les densités brésiliennes sont inférieures aux françaises en relation avec des bâtiments plus rudimentaires notamment dans le Sud.

La forte intégration de la filière et sa structuration autour d'acteurs multi-viandes fortement internationalisés (Tregaro, 2011), comme Brasil Food (résultant de la fusion entre Sadia et Perdigao), Marfrig ou JBS (qui a récemment repris les actifs de la filiale brésilienne de Doux) sont également des facteurs de compétitivité déterminants. Ces grands groupes ont développé des stratégies de diversification sur les trois viandes (bovine, porcine, avicole) répondant à la recherche de synergies à trois niveaux : technologique, commercial et souplesse sur l'approvisionnement en ingrédients entrant dans les plats préparés.

Ces entreprises sont par ailleurs largement soutenues par l'État (Champion *et al*, 2012), soit *via* des crédits bonifiés, soit *via* des opérations de capital. De 2008 à 2011, la BNDES (banque nationale d'investissement) a notamment versé plus de 11 milliards de réals (4,5 milliards €) aux seuls Marfrig et JBS sous forme de crédits et d'achats d'obligations. L'État brésilien, *via* la BNDES, détient désormais 30 % du capital de JBS et environ 14 % de Marfrig, mais aussi des parts du capital de plus petites structures. Le fonds de pension de la banque publique Banco do Brasil détient en outre 14 % du capital de Brasil Foods. Ces soutiens aux opérations de fusion-acquisition au Brésil, mais surtout à l'international ont très largement favorisé l'émergence de géants mondiaux de la viande. A ces véritables facteurs de compétitivité dont bénéficient en priorité les principales entreprises du secteur, il convient d'ajouter des exemptions massives de taxe sur les produits destinés à être exportés.

Cependant, l'écart de coût de production en vif avec la France, exprimé en €/kg vif, s'est réduit sur la dernière décennie, malgré une dépréciation du réal par rapport à l'euro. A l'avenir, l'appréciation du réal brésilien, observée depuis 2010, devrait se poursuivre et contribuer à l'augmentation des coûts de production brésiliens exprimés en euro. Cette tendance devrait être accentuée par le renchérissement des coûts de main-d'œuvre, favorisée par l'attractivité du marché du travail urbain.

On note, par ailleurs, une convergence des coûts de l'alimentation entre le Brésil et l'Europe, le Sud du pays étant plus exposé à la volatilité des cours mondiaux que la région Centre-Ouest, moins connectée au marché international. Enfin, l'entrée en vigueur de nouvelles réglementations environnementales ou sanitaires devrait, à moyen terme, générer de nouvelles contraintes et de nouveaux coûts.

2 LE CONTEXTE EUROPÉEN ET LA PLACE DE LA FRANCE

2.1 Des dynamiques de filière contrastées au sein de l'Union européenne

Les changements dans les politiques agricoles et les accords OMC signés en 1994 ont eu des impacts forts : la production de l'UE à 15 a stagné à partir de 1998 alors que la production mondiale a continué son développement au même rythme. Les deux élargissements de l'UE (2004 et 2007) ont cependant redonné un peu de dynamisme à la production européenne qui a atteint 12,2 Mt en 2012. Au sein de l'Union européenne, les dynamiques de production sont très contrastées selon les États-membres (Figure 4). La France a vu sa production nettement refluer, alors que celles des autres pays membres se sont maintenues ou développées.

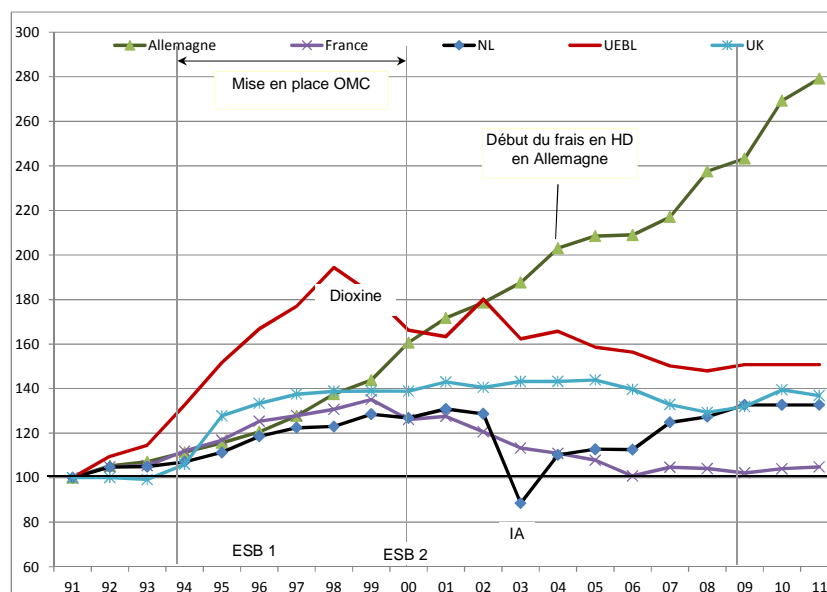


Figure 4. : Dynamiques de production de différentes filières nationales européennes
Base 100 année 1991 (Eurostat 2012)

	1995	2000	2005	2010	2012
France	2098	2233	1975	1817	1842
Allemagne	664	923	994	1439	1493
Royaume-Uni	1404	1526	1582	1578	1615
Espagne	1008	1125	1287	1239	1239
Total UE-27	8042	10375	11029	11893	12152

Tableau 1 : Productions nationales de volailles dans l'UE-27 (d'après Eurostat)

Le bassin « Nord Europe » (Basse Saxe, Pays-Bas, Belgique) ressort comme le grand gagnant de cette période. L'Allemagne a connu une croissance continue et a presque triplé sa production en vingt ans. La France a perdu le *leadership* de la production européenne de poulets en 1999 et se maintient depuis au second ou troisième rang, selon les années, proche de l'Espagne et loin derrière le Royaume-Uni. A noter cependant que le dynamisme français des dernières années est très lié à celui de la filière « grand export ». En dinde, le recul de la France est spectaculaire, surtout comparé au dynamisme allemand. Depuis 2010, l'Allemagne a rejoint la France au premier rang communautaire pour la production de dinde.

Les échanges intra-communautaires de viandes de volailles ont atteint 4,3 millions de tonnes équivalent carcasse en 2011 (source FranceAgriMer), en forte progression sur les dix dernières années; l'essentiel de la progression provient de la viande de poulet. Ils portent sur 35 % de la production européenne. Les volumes échangés entre l'Allemagne, la Belgique, la France, les Pays-Bas, le Royaume-Uni et la Pologne représentent actuellement la moitié du commerce intra-communautaire. Ainsi, les Pays-Bas et, dans une moindre mesure, la Belgique jouent un rôle majeur dans le commerce intracommunautaire. Ils assurent, à eux seuls, 29 % des importations et 42 % des exportations communautaires.

Selon la Commission européenne, la consommation globale de volailles a atteint 11,6 millions de tonnes au sein de l'UE à 27 en 2012, soit une consommation individuelle de 23,2 kg, ce qui représente environ 27 % de la consommation totale de produits carnés. Ce niveau de consommation est assez stable depuis le début des années 2000, la viande de volailles améliorant son poids relatif au sein d'une consommation toutes viandes en léger repli. La consommation de poulets est la plus dynamique, dépassant les 17 kg/habitant, ce qui correspond à une progression de plus de 3 kg en 10 ans. A l'inverse, la production de dindes est en déclin depuis 2005, avec 3,4 kg consommés par habitant contre 4 kg en 2004.

2.2 Les caractéristiques de la filière et du marché français

2.2.1 Un développement de la production puis un déclin depuis 2000

Avec 1 842 000 tonnes produites en 2012, la production française retrouve un niveau de production proche de celui du début des années 90 : après le développement enregistré de 1970 à la fin des années 90 (la production culmine à 2 300 000 tonnes en 1998), elle a subi un déclin important sur la dernière décennie.

	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2012
Total Volailles	1 263	1 665	2 098	2 233	1 975	1 818	1842
Poulet	773	958	1 106	1 084	1 014	1 046	1 088
Dinde	249	439	656	763	564	409	415
Canard	71	110	174	234	260	240	236
Pintade	49	56	54	60	50	40	37

Tableau 2 : Evolution de la production française de volaille (d'après SSP)

L'analyse du développement de l'aviculture française depuis le début des années 50 peut se décomposer en quatre grandes périodes :

- les années 60 ou « années d'apprentissage » ont vu l'émergence d'une aviculture intégrant des innovations techniques importantes (en génétique, nutrition et santé animale). Une demande alimentaire soutenue et la mise en place du marché européen ont été les principaux moteurs du développement sur cette période. Spécialisation régionale et organisation de partenariats forts entre producteurs et industriels (intégration) ont vu le jour dès cette époque. La production française atteint 650 000 Tonnes en 1970 ;
- les années 70 et le début des années 80 ont vu la poursuite de l'expansion. Les éléments favorisant le développement avicole français sur cette période relèvent d'un contexte mondial très dynamique et d'une politique européenne soutenant les exportations de l'Union vers les Pays-tiers. La concentration régionale s'accroît, avec une spécialisation de la Bretagne vers le « grand export » et la production de dindes, alors que d'autres régions développent une aviculture tournée vers le marché national et une production fermière qui se structure autour du Label Rouge ;
- les années 1985-1995 sont celles de la consolidation de la position française en Europe, la croissance étant alimentée par le développement simultané de la consommation nationale et du marché communautaire ;
- À partir de 1995, commence la fin de « l'âge d'or », avec une dégradation du solde des échanges extra communautaires de viande de volailles, initiée par la signature des accords de Marrakech en 1994 et l'émergence de nouveaux compétiteurs sur le marché international. La consommation intérieure, jusque-là très dynamique, se stabilise. Cette dernière décennie a été par ailleurs marquée par différentes crises sanitaires qui ont alimenté la méfiance des consommateurs vis-à-vis d'une agriculture perçue comme de plus en plus industrielle. À la même époque, les contraintes environnementales deviennent une limite au développement de l'aviculture dans certaines zones de Bretagne et de Vendée.

Si, depuis 2000, la production globale toutes volailles accuse un repli de près de 20 %, la production de viande de canard se maintient globalement grâce au dynamisme de la filière gras qui assure aujourd'hui près de 60 % de la production française de viande de canard.

La production de poulets retrouve son niveau de 2000, après un repli significatif de 2000 à 2006. La reprise de la production de poulet depuis 2007 est cependant uniquement liée au dynamisme de la filière « export » qui produit des poulets de petit calibre, surgelés et destinés aux marchés des Proche et Moyen Orient. Ces ventes sont soutenues par les restitutions (subventions à l'exportation destinées à compenser les écarts de coûts de production entre l'Union européenne et son principal compétiteur, le Brésil, sur ce marché très concurrentiel). Les productions de dindes et de pintades enregistrent les baisses proportionnellement les plus importantes.

Une originalité de la filière française réside non seulement dans la diversité des espèces produites et le poids des volailles secondaires dans la production nationale, mais également dans la place de la production différenciée et produite sous cahier des charges « qualité ». Les filières respectant un cahier des charges Label Rouge, Certification de conformité produit (CCP) ou Bio, représentent aujourd'hui près du quart de la production de volailles. Moins confrontées à la concurrence internationale ou intracommunautaire que les filières de production standard, elles se trouvent cependant actuellement face à des évolutions de marchés et de modes de consommation moins favorables que par le passé. En 2011, selon le SSP, les volailles Label Rouge représentaient 10 % des abattages contrôlés (15 % des abattages de poulets), les volailles certifiées CCP 12 %, le bio et les volailles sous Appellation d'origine contrôlée chacun moins de 1 %.

2.2.2 L'organisation de la filière française

La filière française est organisée autour des organisations de production qui ont en charge la gestion des plannings de production. Ces organisations ont un rôle central de coordination et de construction de la performance globale de la filière. Elles traduisent les attentes quantitatives et qualitatives du marché, exprimées par leurs clients abattoirs, en termes d'objectifs de production (nombre, calibres, qualité, respect d'exigences spécifiques), et mettent en œuvre des stratégies d'approvisionnement en intrants, de planification de la production, d'incitation à la performance permettant de répondre à ces attentes.

Les organisations de production sont le plus souvent liées à une usine de fabrication d'aliment, elles peuvent également maîtriser certains outils d'amont (couvoirs) ou d'aval. Les principaux acteurs industriels d'aval intègrent parfois leur amont industriel (fabrication d'aliment, accoupage), dans ce cas il existe une relation d'exclusivité entre l'organisation de production et son client abattoir. Dans les autres cas, les organisations de production ont pour clients différents partenaires industriels d'aval.

Si, en 2010, l'INSEE recensait 444 « unités légales » dans le secteur de la transformation et de la conservation de la viande de volaille, quelques groupes industriels concentrent aujourd'hui la plus grande partie des capacités de transformation. En 2010, l'industrie de la volaille réalisait un chiffre d'affaires HT de 6 441 millions d'euros et employait 28 686 personnes au (31 décembre), correspondant à 25 275 emplois équivalent temps plein.

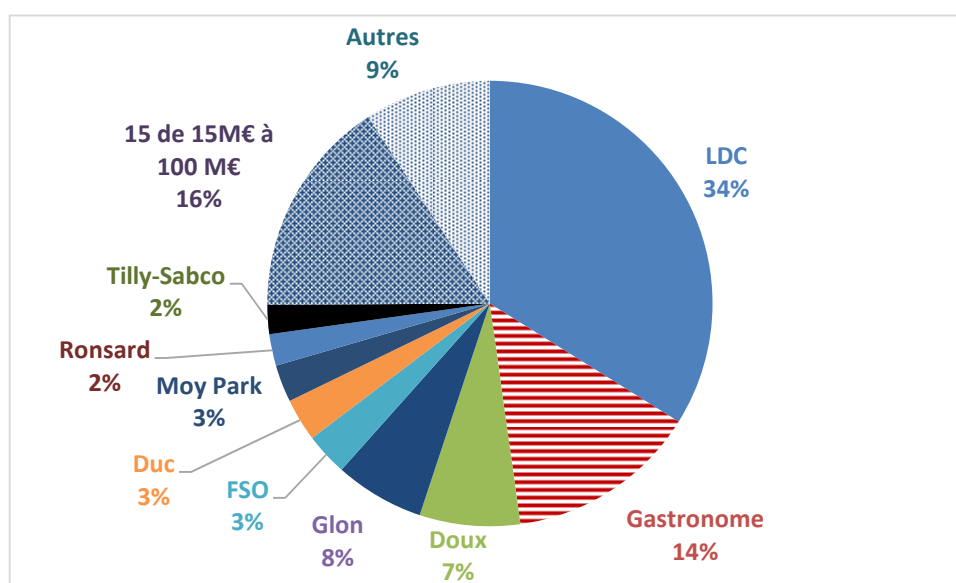


Figure 5 : Concentration sectorielle en 2012 (Source AND International)

L'industrie de la volaille se caractérise par un poids élevé de l'export (16,1%), comparable à celui de l'ensemble des industries alimentaires (15,8%) mais plus élevé que celui de l'industrie des viandes (10,3%). L'industrie de la volaille, comme l'ensemble des industries des viandes affiche des soldes intermédiaires de gestion nettement plus faibles que ceux de l'ensemble des industries alimentaires. Le résultat net ressort à 1,1% du CA en 2010 contre 3,6% pour l'ensemble des IAA, 1,3% pour le secteur viandes dans son ensemble et 5% pour le secteur de la charcuterie.

2.2.3 Caractéristiques et tendances d'évolution du marché intérieur français

La consommation française de volailles s'élève en 2012 à 25,5 kg de viande de volaille dont 15,6 kg de poulet. La consommation globale de volaille est stable autour de 25 kg depuis le début des années 2000, celle de poulet est en progression malgré un contexte général orienté vers une stagnation, voire une diminution, de la consommation de viande. La principale spécificité du marché français réside dans la présence d'une segmentation en fonction de différents signes de qualité : Label Rouge, certifié, biologique et AOC, qui viennent s'ajouter aux productions standard et représentent environ un quart de la production.

La spécificité des productions sous signes de qualité et d'origine protège ces segments de la concurrence internationale sur le marché français, malgré des coûts de production plus élevés que ceux du standard. Les productions Label et biologique doivent cependant relever d'autres défis, à commencer par celui de l'adéquation avec une consommation qui s'oriente de plus en plus vers la recherche de praticité, et

donc vers des découpes et des plats préparés, ainsi que vers des prix bas. Le poulet standard, quant à lui, est directement mis en concurrence avec les produits d'importation.

La stagnation du niveau de consommation individuelle de volailles depuis une dizaine d'années s'accompagne d'une forte segmentation des marchés, faisant une part croissante aux produits élaborés au détriment des volailles entières et des produits moins transformés. Ainsi, le poulet entier ne représente plus, en 2011, que 32 % des achats des ménages de viande de poulet contre 42 % pour les produits de découpes et 26 % pour les produits élaborés. Or ces derniers sont, d'une part, plus vulnérables à la pénétration croissante de viandes d'importation et, d'autre part, ne favorisent pas la valorisation d'une origine ou d'un mode de production spécifiques.

En 2011, 56% des volumes de poulets entiers, achetés par les ménages pour la consommation à domicile, sont constitués de Label Rouge mais cette part diminue depuis 2004. La segmentation des achats de découpes de poulet est très différente, puisque la volaille « standard » constitue la majeure partie des volumes (68 % en 2011).

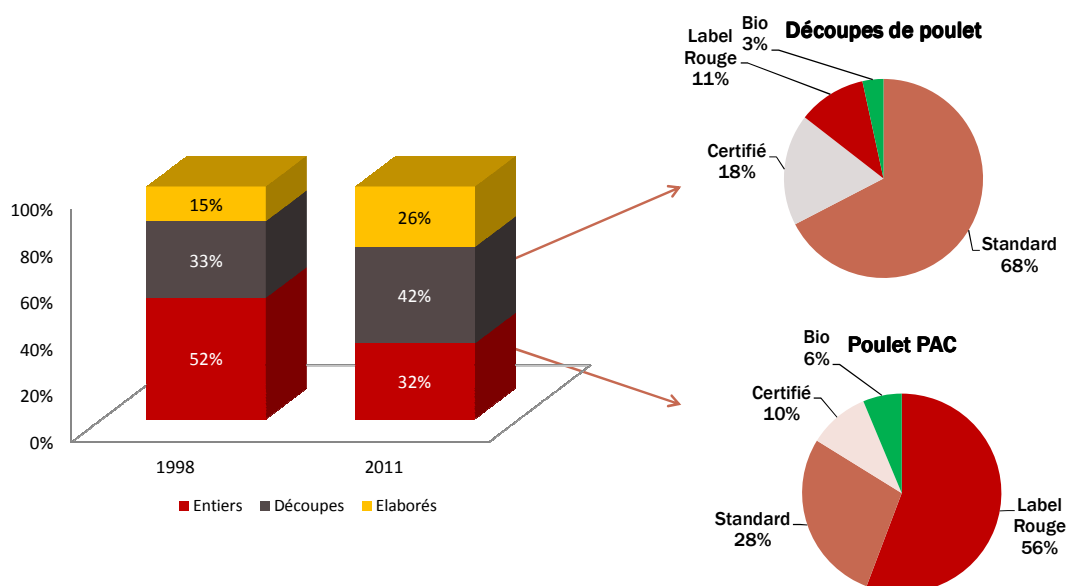


Figure 6 : Évolution du modèle de consommation vers une recherche de praticité (ITAVI d'après FranceAgriMer et Kantar World Panel)

2.2.4 Dégradation des échanges extérieurs français de volailles

Depuis une dizaine d'années, les échanges extérieurs français de viandes et de préparations se détériorent. Après avoir dégagé un bénéfice commercial de près d'1,2 milliard d'euro en 2000, les échanges de 2012 sont en excédent de seulement 172 M€. En vdtume, l'excédent total est passé de près de 720 000 TEC en 2000 à 134 000 TEC en 2011.

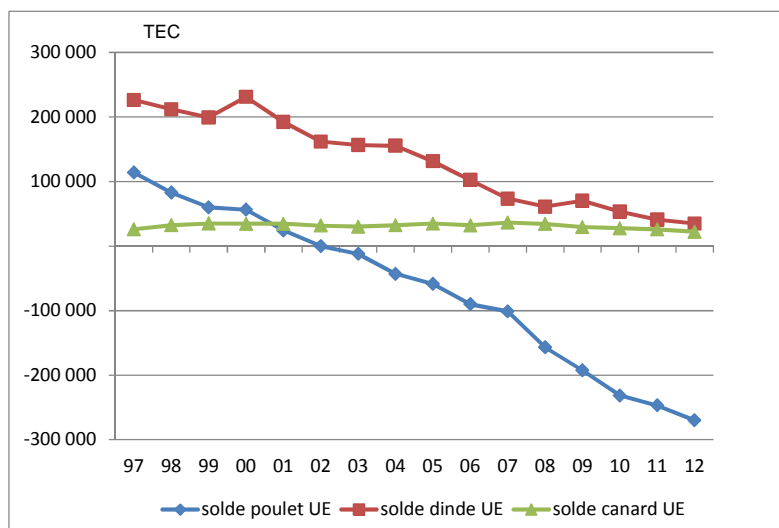


Figure 7 : Évolution du solde des échanges intracommunautaires de la France (d'après SSP)

Cette situation résulte essentiellement de la dégradation de nos échanges extérieurs avec nos partenaires de l'Union européenne qui fournissent plus de 90% de nos importations. Notre déficit intracommunautaire a ainsi atteint 267 M€ en 2012 et 210000 TEC (déficit de 270 000 TEC en poulet).

2.3 Les facteurs de compétitivité sur le marché communautaire

2.3.1 Les indicateurs de coûts de production

L'analyse comparée des coûts de production du poulet en Europe (Van Horne, 2009, 2012) permettent de confirmer des analyses qualitatives (Renault *et al.*, 2011).

Si la France n'accuse pas de handicaps rédhibitoires sur le coût du vif, elle a perdu l'avantage concurrentiel qu'elle possédait par le passé. Les performances techniques moyennes françaises sont légèrement inférieures à celles de ses concurrents nord-européens (IC plus élevé pour des poids vifs inférieurs en poulet). Les écarts s'expliquent en partie par des choix génétiques et des stratégies alimentaires différents en poulet comme en dinde.

Coût du vif	Pays Bas	Allemagne	France
Coût de l'aliment €/T	275	288	277
Poussin €/100 p	31,1	32.7	31.0
Poids Vif gr	2200	2200	1920
IC (Indice de Consommation)	1,67	1.68	1,80
Coût sortie élevage €/kg vif	0.810	0.842	0.881
Coût sortie élevage €/kg mort	1.16	1.20	1.26
Coûts d'abattage €/kg mort	0.30	0.30	0.40
Coût total €/kg mort	1.46	1.50	1.66

Tableau 3 : Indicateurs technico-économiques en élevage de poulet de chair (Van Horne 2012, Renault *et al.* 2011, actualisé en 2012)

Sur les coûts aval (abattage/découpe), l'écart apparaît plus significatif (de 20 à 30 %). Les facteurs explicatifs sont multiples (Renault *et al.*, 2011) : hyper standardisation des produits et des *process* de nos concurrents, avec des outils plus récents, saturés, spécialisés, et, pour l'Allemagne, un coût de main-d'œuvre inférieur. La différence de coût unitaire de la main-d'œuvre ouvrière entraîne la moitié de l'écart de coût d'abattage avec l'Allemagne. Les autres raisons sont liées à l'organisation, les gammes, la taille des outils ou leur taux de saturation.

2.3.2 Les facteurs structurels

Les ateliers avicoles français ont une taille limitée par rapport à ceux des autres grands producteurs européens : alors que la capacité moyenne totale d'un atelier français professionnel est de 16 000 poulets (en effectif instantané), les ateliers belges et espagnols hébergent en moyenne 30 000 animaux, les allemands 60 000 et les britanniques plus de 90 000 (RA 2010). Cette particularité est en partie due à la production sous Signes de qualité et d'origine (SIQO, qui regroupe les AOC et Label Rouge) qui impose des tailles d'élevages réduites et n'existe, en volaille, qu'en France. Si l'on ne considère que les ateliers « standard », la taille moyenne est comparable à celles de l'Espagne et de la Belgique.

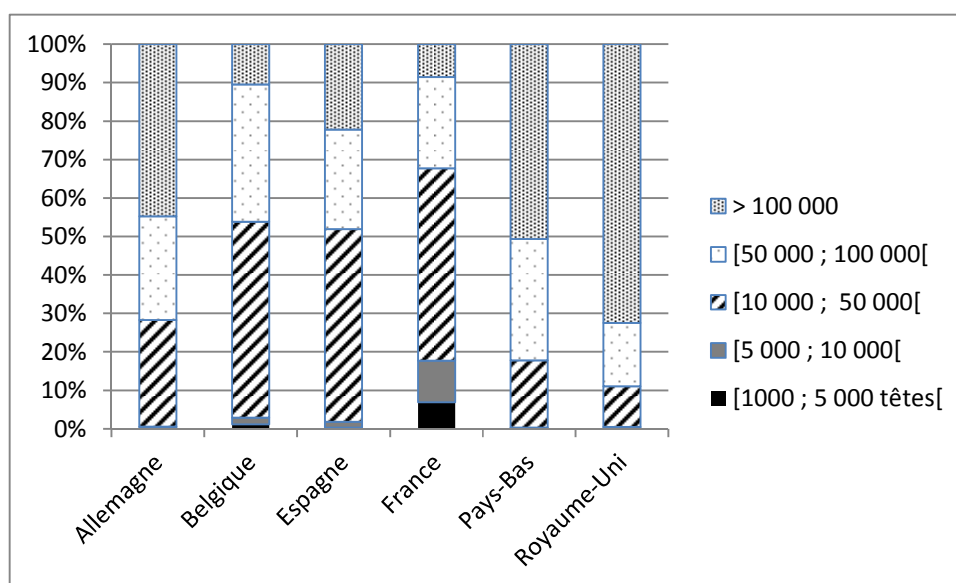


Figure 8 : Taille des exploitations produisant du poulet en Europe (Source Recensement agricole 2010) en effectifs instantanés de poulets

Le modèle de développement avicole français s'est longtemps appuyé sur des exploitations de type familial, combinant les productions pour mieux répartir les risques, au sein desquelles les ateliers avicoles sont souvent des ateliers complémentaires. Les élevages de poulets, et plus généralement de volailles de chair, sont souvent amortis et le renouvellement du parc de bâtiments est faible. On assiste à une diminution progressive du nombre d'élevages (- 5,7 % entre 2000 et 2010) qui s'accompagne d'une augmentation de la taille moyenne des ateliers (+ 20,7 % entre 2000 et 2010).

Si les structures sectorielles (concentration des entreprises) de l'industrie avicole en France et en Allemagne sont assez identiques (avec un poids du leader de 30 % dans l'activité nationale), les structures industrielles (concentration des outils industriels) sont nettement plus petites en France (Mulder, 2012).

Le déficit français s'explique ainsi par un cumul de facteurs défavorables (Renault *et al.*, 2011). Certains sont liés à un environnement réglementaire défavorable (fiscalité, coût du travail, interprétation plus contraignante en France de la réglementation environnementale ou sanitaire), d'autres relèvent de la structure et de l'organisation des filières et des stratégies d'acteurs : retard dans la standardisation des *process* et produits offerts ne permettant pas de réaliser des économies d'échelle et de gamme comparables à celles réalisées par nos compétiteurs ; absence de système de certification unifié conduisant à l'inflation des cahiers des charges ; faiblesse de la R&D ; absence de partenariat technique avec la GMS. De façon générale, le diagnostic posé est celui d'un manque de standardisation des *process* et d'investissements dans les outils à

tous les stades de la filière ainsi que celui d'un déficit de partage de l'information technique entre les différents maillons.

A l'inverse, les filières avicoles du bassin Nord Europe disposent de structures de plus grande taille permettant à la fois de réaliser des économies d'échelle et de rentabiliser des investissements diminuant les impacts environnementaux, voire de produire de l'énergie. Un autre facteur clé de succès réside dans l'adaptation des gammes de produits à la demande des circuits en croissance, comme le *hard discount* allemand ou les grandes chaînes de restauration rapide. La standardisation des gammes et des *process*, dans des outils industriels de grande taille permet la réalisation d'économies d'échelle et de gamme et une diminution des coûts logistiques.

CONCLUSIONS : PERSPECTIVES ET ENJEUX

Les principaux moteurs des filières avicoles dans le monde sont d'une part, des atouts intrinsèques au produit, notamment en comparaison des autres viandes (coût modéré, qualité nutritionnelle, absence d'interdits religieux), aux caractéristiques de l'élevage (cycles de production courts permettant réactivité et flexibilité, bonne efficacité sur la transformation des céréales d'où un faible impact environnemental), et enfin à la structuration des filières qui ont favorisé une modernisation rapide et des innovations fortes.

Les freins à leur développement sont aujourd'hui la subsistance de risques sanitaires et notamment la menace de recrudescence d'épisodes d'influenza aviaire à partir de foyers endémiques et le nouveau contexte matières premières pour l'alimentation animale marqué par une tendance haussière sur le long terme et une forte volatilité. Plus récemment, de nouveaux freins sont apparus, notamment dans les pays développés : la faible acceptabilité du modèle d'élevage industriel (particulièrement en Europe du Nord et de l'Ouest) et une baisse de la part de l'alimentaire dans le budget des ménages, accentuée par la situation de crise économique qui rend plus difficile la transmission des hausses d'intrants au consommateur final.

La consommation mondiale est attendue en forte hausse à l'horizon 2030, compte tenu du développement de la population mondiale et de l'évolution des régimes alimentaires des pays émergents vers une consommation accrue de produits animaux. La Rabobank (Mulder, 2011) anticipe ainsi un accroissement de la consommation mondiale de viandes de 1,9% par an pendant les vingt prochaines années, et de 2,4% pour la viande de volailles, soit un accroissement de la production de volailles de 60 Mt en vingt ans. Cette hausse de la consommation de volailles interviendra essentiellement dans des régions où les ressources locales sont limitées (à l'exemple de la Chine), ce qui devrait favoriser une poursuite du développement des échanges internationaux. Ce développement sera également favorisé par une poursuite de la libéralisation des échanges internationaux, même en l'absence de nouveaux accords multilatéraux dans le cadre de l'OMC. En effet, la conclusion de nouveaux accords de libre-échange bilatéraux et l'ouverture de nouveaux marchés, aujourd'hui protégés, seront probablement finalisées, notamment afin de limiter les tensions inflationnistes sur les marchés importateurs. Dans cette perspective, le marché communautaire pourrait s'ouvrir davantage aux importations des pays-tiers. Un autre enjeu important pour la filière avicole européenne, et notamment la filière française, est l'avenir des soutiens communautaires à l'exportation, qui conditionnent le maintien de près d'un quart de la production française de poulets.

Enfin, les perspectives concernant le marché des matières premières nécessaires à l'alimentation animale conjuguent hausse structurelle des prix sur le long terme (en raison d'une hausse forte attendue sur la demande) et volatilité accrue.

Dans ce contexte, l'enjeu majeur pour les filières avicoles européennes est de conserver la maîtrise de l'approvisionnement du marché communautaire. Cela passe par la recherche d'un modèle économique durable, c'est-à-dire intégrant des contraintes environnementales et sanitaires fortes tout en préservant la viabilité économique des élevages et des filières. Pour les filières françaises, cet enjeu se conjugue avec la recherche d'une amélioration de la compétitivité française sur la scène européenne.

Certains leviers d'action relèvent de la politique agricole et des réglementations de la production. Toute diminution de la protection tarifaire à l'entrée dans l'Union européenne, sous l'effet d'un accord multilatéral de libéralisation des échanges agricoles à l'OMC ou d'accords bilatéraux de libéralisation avec les pays du Mercosur, conduirait à une augmentation des importations extracommunautaires de produits avicoles et aurait un effet négatif sur la production française. De même, la suppression des restitutions impacterait négativement la compétitivité de la filière et les volumes produits.

Les évolutions réglementaires concernant la production, au plan communautaire, relatives à la protection de l'environnement et au bien-être animal, seront également décisives quant à la compétitivité des filières. Une meilleure intégration des impacts socioéconomiques des nouvelles réglementations devrait

également permettre de prendre en compte les nouvelles exigences sociétales dans ces domaines sans mettre en péril la viabilité et la pérennité des filières.

D'autres leviers d'action reposent pour une grande part dans les mains des acteurs de la filière. Cette dernière doit définir un projet accepté par la société et associant tous les maillons jusqu'à la grande distribution. Les pistes proposées en conclusion de l'étude sur la compétitivité des filières viandes blanches françaises, réalisée par le cabinet AND associé à l'IFIP et à l'ITAVI, pour le compte de FranceAgriMer, s'orientent notamment autour de trois points :

- la recherche d'un consensus social autour d'un modèle d'élevage durable, avec une gestion pragmatique de la question environnementale afin de répondre aux attentes sociétales en matière de bien-être animal, de proximité et de durabilité,

- une réorientation du modèle industriel vers une économie de la simplicité, avec une remise à plat des gammes, des cahiers des charges et la mise en œuvre d'un système de certification français unifié afin de gagner quelques points de compétitivité,

- une amélioration de la coordination verticale et du dialogue interprofessionnel au sein de la filière.

Si la filière volailles de chair française ne génère « que » 60 000 emplois directs, son impact social est beaucoup plus important. Elle contribue en effet à la santé et à l'équilibre d'autres secteurs et à l'activité économique de nombreuses régions. L'aviculture « chair » est aussi un débouché important des filières de grandes cultures, ce qui apporte un complément de revenu à de nombreuses exploitations de polyculture-élevage, et garantit ainsi leur pérennité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) CHAMPION F. *et al.* – La compétitivité agricole du Brésil. Le cas des filières viandes. Notes et Études Socio-Économiques (à paraître).
- (2) FOUILLADE P., GUILLET M., MENARD J.N. – Compétitivité de la filière volailles de chair française, rapport CGAAER, octobre 2010.
- (3) JEZ C., BEAUMONT C., MAGDELAINE P., 2010. – La filière avicole française à l'horizon 2025. Une prospective INRA ITAVI. INRA Productions Animales, **23** (5), 379-390.
- (4) MAGDELAINE P. – Analyse du développement de l'aviculture française. Perspectives et enjeux. Synthèse réalisée dans le cadre du programme de recherche AviTer., février 2008.
- (5) MAGDELAINE P. – Analyse comparée des facteurs de compétitivité de l'industrie avicole chair en France, en Europe et au Brésil, 10èmes JRA JRFG, La Rochelle, 26-28 mars 2012.
- (6) MULDER Nan-Dirk – Crossroads for Growth, the international Poultry Sector Towards 2020, www.rabobank.com/far 2011.
- (7) RENAULT C., RIEU M., ROUSSILLON M.A., MAGDELAINE P. – Analyse de la compétitivité des filières des viandes blanches françaises dans le contexte européen. AND IFIP ITAVI pour FranceAgriMer, avril 2011.
- (8) TREGARO Y. – Les *global players* dans les filières viandes : américains et brésiliens aux premières places. Les synthèses de FranceAgriMer, août 2011.
- (9) Van HORNE PLM. – Coûts de production des poulets de chair dans divers pays d'Europe et du Monde : étude comparative et perspectives. Huitièmes Journées de la recherche avicole, St-Malo, 25 et 26 mars 2009.
- (10) Van HORNE PLM. – International comparison broilers production costs. Octobre 2012 (non publié).

ANALYSES D'OUVRAGES

LA RECHERCHE MALADE DU MANAGEMENT¹

par Vincent de Gauléjac

Jean-Marc Boussard². – Ce petit volume de lecture facile correspond à la transcription remaniée de deux conférences faites par l'auteur à Paris et Montpellier, en 2011, dans le cadre du groupe de travail « Sciences en question » de l'INRA. Le texte des conférences est complété par les questions posées par l'auditoire, et les réponses correspondantes.

Le groupe de travail *Sciences en question* (animé en particulier par notre confrère Raphaël Larrère) s'efforce depuis plusieurs années d'ouvrir le débat sur des sujets parfois provocants, mais qui ne peuvent laisser les chercheurs indifférents, parce qu'ils sont liés à leurs préoccupations quotidiennes. C'est bien le cas de l'évaluation, qu'elle s'applique aux institutions, comme le « Classement de Shanghai » des universités, ou aux chercheurs eux-mêmes comme cela se fait par exemple à l'INRA.

On l'aura compris à la lecture du titre, l'auteur est sévère pour les pratiques en cours actuellement de ce point de vue, aussi bien en France que dans bien d'autres pays. Elles reposent sur des indicateurs chiffrés (et donc supposés objectifs) des performances de chaque objet évalué, chercheur ou institution. Publiés « en temps réel », ces indicateurs induisent un stress permanent supposé accroître les motivations des individus et permettre à tout instant de prendre les décisions qui s'imposent dans les institutions pour redresser la situation en cas de dégradation.

Le drame est qu'il y a souvent peu de relations entre la valeur prise par les indicateurs et la qualité des recherches effectuées, telle qu'on peut la juger *a posteriori* lorsque le temps a fait son œuvre. Il y a pire : le recueil des chiffres nécessaires au calcul des indicateurs, les efforts effectués pour les améliorer de façon plus ou moins cosmétiques, tout cela représente une charge de travail considérable, qui détourne les chercheurs de leurs véritables occupations productives, tout en les incitant à tricher pour améliorer leurs scores. Enfin, cette pression constante entraîne des effets désastreux sur les personnes fragiles qu'il faudrait au contraire rassurer pour leur permettre d'exprimer toutes leurs potentialités.

Il est difficile de ne pas partager la vision de l'auteur. Les histoires qui confirment son diagnostic forment un corpus littéraire très fourni. Parce qu'il vaut peut-être encore mieux en rire qu'en pleurer, celui-ci égaie de façon significative les « pauses café » dans toutes les réunions scientifiques. La chose est vraie dans le « privé » comme dans le « public », tant les méthodes de « management » sont semblables dans les deux cas.

Et pourtant l'évaluation est une nécessité pratique. Si l'on dispose d'un poste pour trois candidats, il faut bien avoir des critères pour choisir le meilleur (ou le moins mauvais !). Si l'on doit allouer des ressources à une structure ou à une autre, il faut bien savoir laquelle a le plus de chances de donner des résultats. C'est cela qui constitue la « rationalisation des choix budgétaires ». On voit mal qui pourrait être favorable à des choix irrationnels...

De plus, comme les choix *ex ante* peuvent toujours se révéler erronés *ex post*, il faut bien évidemment vérifier leur pertinence en effectuant de temps à autres une « RGPP » (Révision périodique des politiques publiques). Il est dommage que, pour les besoins de son pamphlet, l'auteur esquive ces difficultés. Or il y aurait beaucoup à dire ici, parce que le problème alors est celui des critères de jugement et des procédures susceptibles de les mettre en lumière.

Dans son principe, le problème n'est pas propre à la recherche. Il est commun à toutes les organisations. Il y a bien longtemps qu'il a été abordé par les militaires : on se souvient de la fameuse apostrophe d'un maréchal d'empire à Napoléon III en 1870 : « il ne manque pas un bouton de guêtre ». Compte tenu des méthodes des adjudants de l'époque, experts en génération de stress pour les soldats, il est fort probable que cette affirmation était formellement exacte. En même temps, elle cachait le fait qu'il manquait presque tout le reste, en particulier l'intelligence de ce qu'il faut à une armée en campagne, un manque qui explique le piteux résultat de la guerre contre la Prusse.

Dans le cas de la recherche, on ne décompte pas les boutons de guêtre, mais toutes sortes de statistiques sans beaucoup plus d'importance ni de signification. Et comme c'était le cas pour l'armée de Napoléon III, la conséquence en est une efficacité très faible, conséquence d'une très mauvaise appréciation

de la situation réelle. Mais que faudrait-il faire pour y remédier ? Gaulejac est malheureusement peu disert sur ce point, pourtant crucial.

Il me semble pour ma part que les limites du modèle actuel tiennent pour l'essentiel au fait que les actuels gestionnaires de la recherche n'ont pour la science qu'une curiosité limitée et une indifférence polie. De même que les maréchaux de Napoléon III s'intéressaient plus à leur rang protocolaire qu'à la réactivité de leurs troupes face à l'ennemi, ce qu'ils veulent, c'est briller face à des hommes politiques encore plus ignorants qu'eux-mêmes. Et quoi de mieux pour cela que d'aligner une série de chiffres dont personne ne comprend la véritable signification, mais qui donne cependant une impression générale rassurante de rigueur et de sérieux ?

Mais ce diagnostic est lui-même porteur d'une angoisse encore plus tragique sur le fonctionnement des démocraties : car, après tout, en adoptant ce comportement désastreux, les gestionnaires de la recherche ne font que se plier à la règle démocratique qui impose de toujours s'incliner devant les exigences du Peuple et de flatter ses représentants élus, même lorsque le résultat en est la condamnation de Socrate.

Est-il possible de faire autrement ? Comme on le sait, la démocratie est le pire des régimes, à l'exception de tous les autres. Il faut donc bien s'en accommoder, et surtout, essayer de la faire fonctionner d'une façon qui en minimise les inconvénients. Il faut pour cela arriver à engager le dialogue avec le Peuple sur des bases saines, lui faisant comprendre la démarche expérimentale, ses avantages et ses contraintes, lui faisant aussi partager les joies de la découverte. C'est un très vaste programme pour les scientifiques, les seuls à même de le mener à bonne fin, avec l'aide des gestionnaires de la recherche, dont il faut bien utiliser les compétences et l'habileté en matière de relations publiques.

¹ Éditions Quae, Paris, 2012, 96 pages.

² Vice-Président de l'Académie d'Agriculture de France, directeur de recherche à l'INRA, Laboratoire de politique économique, CIRAD, 45bis, avenue de la Belle-Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne.

LE TOUT BIO EST-IL POSSIBLE ? 90 CLÉS POUR COMPRENDRE L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE¹

par Bernard **Le Buanec**, coordinateur²

Jean-Paul Charvet³. – La réponse à la question posée par le titre est « non », mais cette réponse est argumentée avec la plus grande précision tout au long d'un ouvrage qui souligne par ailleurs tout l'intérêt de l'approche « bio » en tant que laboratoire « *in vivo* » pour l'ensemble des agricultures intégrées ou raisonnées.

Une douzaine de consœurs et confrères de notre Académie ont participé, sous la direction de Bernard Le Buanec, à la rédaction de cet ouvrage de haut niveau scientifique qui associe de façon complémentaire des spécialistes de différentes disciplines impliquées dans la production agricole². De nombreuses illustrations sous forme de photographies, de graphiques et de tableaux de chiffres ainsi que la présence d'un glossaire relativement développé et très utile rendent toutefois cet ouvrage scientifique accessible à un lectorat qui va bien au-delà du monde des chercheurs. Nous disposons là d'un excellent ouvrage de vulgarisation scientifique.

Le plan retenu est aisé à suivre et les lecteurs au temps plus mesuré pourront, s'ils le souhaitent, se concentrer, en fonction des centres d'intérêt qui sont les leurs, sur une partie seulement des réponses apportées aux 90 questions posées dans l'ouvrage.

La définition de l'agriculture biologique est présentée au travers de son histoire : on y voit comment les cahiers des charges du « bio » ainsi que ses certifications ont varié et continuent à varier aussi bien dans le temps et dans l'espace. Il n'y a pas de normes définies, reconnues et appliquées au niveau mondial. L'agriculture biologique certifiée comme telle couvrait, en 2009, 37 millions d'hectares dans le monde, soit 0,9% de l'ensemble des terres agricoles de la planète. Ces superficies correspondent toutefois pour les 2/3 (cf. l'Australie, l'Argentine...) « à des prairies et pâturages extensifs qui ont de tout temps été conduits sans fertilisation et sans traitements phytosanitaires ». Les itinéraires techniques du « bio » sont très clairement présentés qu'il s'agisse des cultures ou des activités d'élevage, l'exclusion du recours à des produits chimiques de synthèse d'origine industrielle constituant le cœur de la démarche « bio ». Différents points techniques plus précis sont discutés comme celui des conséquences de l'utilisation relativement importante du cuivre en agriculture biologique ou celui de la création de variétés spécifiques pour cette forme

d'agriculture. Il apparaît à ce sujet que les variétés modernes se révèlent pour l'AB mieux adaptées que les variétés plus anciennes.

La question 39 (« La transgénèse aurait-elle un intérêt en agriculture biologique ? ») ouvre un débat encore plus large et susceptible d'alimenter de vives controverses. Alors qu'existent des objectifs communs entre PGM (plantes génétiquement modifiées) et AB, les agriculteurs « bio » ne risquent-ils pas de se priver par leur opposition aux techniques de transgénèse d'utiles résultats ?

Les aspects économiques et environnementaux sont largement abordés au travers des écarts de rendements et de consommations d'énergie relevés entre agriculture biologique et agriculture conventionnelle.

Concernant l'impact du « bio » sur l'environnement, il apparaît que sa très grande dispersion géographique aux différents échelles, depuis celle des exploitations jusqu'à l'échelle nationale, a comme conséquence la dilution de son impact sur l'environnement rural. On est là confronté à un problème de continuité territoriale qui s'est déjà posé avec les CTE (Contrats territoriaux d'exploitation) et qui risque de se poser à nouveau avec les groupements d'agriculteurs à mettre en place dans le contexte de la promotion de l'« agroécologie ». En revanche, l'intérêt de regroupements d'exploitations « bio » sur des secteurs plus sensibles comme les zones de captage d'eau potable est souligné.

En fin d'ouvrage sont abordés les aspects alimentaires, nutritionnels et sanitaires. Il apparaît le plus souvent bien difficile de mettre en évidence des différences significatives entre produits « bio » et produits issus de l'agriculture conventionnelle. En revanche, les produits « bio » coûtent nettement plus cher (de 50% et plus). Ceci n'empêche pas que le marché de ces produits soit aujourd'hui en pleine expansion en Amérique du Nord et en Europe. La France doit même importer le 1/3 des produits « bio » qu'elle consomme, bien qu'elle consacre désormais un million d'hectares (près de 4% de sa SAU) à l'agriculture biologique. Un rapport très récent du Worldwatch Institute – postérieur à la publication de l'ouvrage – signale toutefois qu'au niveau mondial, les superficies en « bio » se sont stabilisées et ont même très légèrement diminué entre 2009 et 2010 en raison de réductions de superficies en Inde et en Chine.

Très peu de chose à signaler concernant la forme. Les 1500 millions d'hectares mentionnés à la page 218 ne correspondent pas à la surface agricole mondiale, mais à la surface cultivée. Dans la bibliographie, – qui ne peut pas être exhaustive sur un thème aussi vaste – on peut regretter l'absence d'une contribution publiée dans le rapport Déméter 2011 et qui a pour titre : « La bio en plein boom : un tournant à bien négocier ». S'y trouvent analysées les mutations imposées au « bio » par le changement d'échelle de ses circuits de commercialisation. Enfin, mais c'est un regret de géographe, quelques cartes établies à différentes échelles auraient pu compléter utilement un ensemble d'illustrations il est vrai déjà très riche.

Ces remarques tout à fait mineures n'enlèvent rien aux qualités et au grand intérêt d'un ouvrage collectif qui est déjà très proche de sa seconde édition. J'en recommande vivement la lecture.

¹ Éditions QUAE, 2012, 240 pages.

² Outre Bernard Le Buanec, ont collaboré à la rédaction de cet ouvrage : Gilles Bazin, Jean-Louis Bernard, Yvette Dattée, Léon Guéguen, Jean-Claude Ignazi, Gilbert Jolivet, Gil Kressmann, Bernard Mauchamp, Nahid Movahedi, Gérard Pascal, Pierre Thivend, Philippe Viaux.

³ Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur émérite de géographie agricole et rurale de l'Université de Paris-Ouest-Nanterre-La Défense.

DYNAMIQUES DES ESPACES RURAUX DANS LE MONDE¹

par Martine **Guibert** et Yves **Jean**

Jean-Paul Charvet. – La rédaction de ce gros ouvrage de plus de 400 pages a mobilisé 22 auteurs, tous spécialistes des évolutions les plus récentes des espaces ruraux qui couvrent notre planète. Leur nombre a permis d'analyser de façon précise aussi bien les espaces ruraux des pays du « Nord » que ceux des pays du « Sud », à l'exception, et ce sera mon principal regret concernant cet ouvrage, de ceux des pays d'Afrique du Nord et du Proche Orient pourtant proches de nous. Les analyses portent pour partie sur les évolutions des relations villes-campagnes, mais aussi sur celles des phénomènes de déterritorialisation/ reterritorialisation des productions agricoles. Dans ce double contexte, la question du devenir des exploitations agricoles « familiales » dans des espaces ruraux en transformation plus ou moins rapide constitue un autre fil directeur.

Introduite par un chapitre épistémologique qui souligne tout l'intérêt de lectures interdisciplinaires de la ruralité fondées sur des concepts intégrateurs, la première partie de l'ouvrage est composée de cinq

chapitres généraux et transversaux qui présentent plusieurs défis majeurs (défis de l'alimentation, de la pauvreté, de l'urbanisation et de la périurbanisation, de la gestion de l'environnement) que l'on retrouve dans la plupart des espaces ruraux de la planète. La lecture du chapitre 2 qui est consacré aux dynamismes des espaces périurbains – l'étalement urbain progresse aujourd'hui dans le monde plus vite que la démographie – ne manquera pas de retenir plus particulièrement l'attention des membres de notre groupe intersections « Agricultures et forêts en milieux périurbains ». Densification du périurbain et poursuite de l'étalement urbain coexistent souvent, alors qu'il apparaît bien difficile de dégager un « géotype universel » des espaces périurbains. Ces espaces qui sont des espaces de tensions et de conflits, de croissances spontanées et d'opérations planifiées souffrent toutefois partout, même si c'est à des degrés divers, de déficits de gouvernance. Mon principal regret à propos de ce chapitre concerne une approche qui demeure plus urbaine que rurale et qui ne met pas assez en valeur une préoccupation qui est, pour nous, majeure à l'Académie : celle d'une consommation devenue massive de terres agricoles par l'étalement urbain.

La seconde partie de l'ouvrage est construite selon un plan régional. C'est l'occasion de présenter les évolutions les plus récentes des espaces ruraux et des agricultures des « poids lourds » (Union européenne, Etats-Unis, Brésil, Chine, Inde) de l'agriculture mondiale, mais aussi d'agricultures et d'espaces souvent moins connus tels les espaces ruraux très divers de l'Afrique subsaharienne, de l'Asie du Sud-Est, de l'Argentine et du Chili ainsi que de la Russie et de l'Ukraine. Tous les auteurs ont conduit pendant de longues années, et parfois des décennies, des recherches approfondies sur les espaces qu'ils présentent. Si la plupart d'entre eux sont des enseignants-chercheurs géographes, Sophie Devienne, qui a rédigé un chapitre particulièrement bien informé sur les espaces de moins en moins agricoles des Etats-Unis (ce qui n'est pas contradictoire avec l'existence d'une agriculture particulièrement puissante dans ce pays), est agronome et maître de conférences à AgroParisTech et Jean-Jacques Hervé, qui nous présente de façon très concrète et très vivante les campagnes d'Ukraine et de Russie, est cadre financier au Crédit Agricole. Les analyses très fines de ce dernier soulignent entre autres comment la crise financière de 1998 a favorisé, de façon paradoxale, l'essor d'agroholdings grands rassembleurs de « pailles foncières », c'est-à-dire de parts sociales de foncier agricole. Ultime exemple d'une collaboration faisant appel à des compétences variées : la conclusion de l'ouvrage a été confiée à un sociologue : Jacques Rémy, président de la Société Française d'économie rurale. C'est pour lui l'occasion de revenir sur la question du devenir d'agricultures « familiales » qui sont elles-mêmes très diverses.

La lecture de l'ensemble de ce gros ouvrage, en outre très dense, ne manque pas d'être très chronophage. Il est toutefois possible pour le lecteur ne disposant que d'un temps limité de concentrer son attention sur quelques chapitres seulement en fonction de ses centres d'intérêt ou de ses préoccupations. Avec Thierry Sanjuan il pourra se faire une idée des « *prédations* foncières » liées en Chine aux développements de l'urbanisation. Dans ce pays – très vaste -- où commence à se développer un « excursionisme périurbain », l'auteur distingue 5 types d'espaces ruraux. Avec Frédéric Landy, le lecteur verra comment l'Inde, qui sera le pays le plus peuplé du monde en 2025, demeurera encore à cette date un pays d'abord rural et avec une ruralité fortement agricole. Dans un pays où voisinent sur le plan social « mobilités ascendantes » et « spirales descendantes », « 4 exploitations agricoles sur 5 ne sont pas viables » et impliquent la recherche de ressources extérieures. Ceci dans un contexte de très grande pauvreté rurale : la rémunération que reçoit un journalier agricole pour 8 heures de travail lui permet tout juste de s'acheter un demi hamburger chez Mac Donald's à Delhi... Au Brésil où l'économie agricole est dominée par les exploitations « non familiales » (les entreprises agricoles géantes de l'agrobusiness), Hervé Théry nous signale que « l'agriculture familiale est enfin aidée ». Il en va de même, mais de façon plus modeste, en Argentine, comme nous le disent Martine Guibert et Marcelo Sili. D'autres exemples et d'autres faits mériteraient d'être cités, mais, faute de place, je ne vais pas pouvoir poursuivre davantage.

Pour conclure, je pense que bien des analyses et des informations qu'apporte – à différentes échelles géographiques – cet ouvrage mériteraient d'être reprises au moins partiellement dans le cadre du groupe intersections « Agriculture, filières et sécurité alimentaire » de notre Académie. À un moment où sont remises en avant, dans un contexte de très grande diversité des situations alimentaires et agricoles à l'échelle mondiale, les notions de retour des territoires, de « reterritorialisation » des systèmes productifs et de « développement local », il serait sans doute utile de prendre davantage en compte les échelles et les dimensions « régionales » des espaces agricoles et ruraux de notre planète.

¹ Armand Colin, collection U, 2011, 407 pages

REGARDS CROISES SUR LA FORESTERIE COMMUNAUTAIRE L'expérience camerounaise¹

par Jean-Louis **Doucet**², Cédric **Vermeulen**², Jean-Yves de **Vleeschouwer**², Nadège **Nzoyem Saha**³, Cécilia **Julve Larrubia**⁴, Jérôme **Laporte**⁵ et Michèle **Federspiel**⁴

Ferdinand Delecour⁶ – En promulguant, en 1994, une loi autorisant les communautés locales à gérer elles-mêmes leurs forêts, l'état camerounais, devenait le pays pionnier de la foresterie communautaire en Afrique centrale. Il s'engageait dans un long processus de décentralisation, visant à allier conservation des ressources naturelles et développement local.

Les communautés rurales ressentent un besoin d'accompagnement dans leur démarche visant à l'autogestion. C'est ainsi que la Faculté Gembloux Agro-Bio tech de l'université de Liège, l'ONG SNV, organisation néerlandaise de développement et l'asbl Nature+ unirent leurs compétences pour soutenir les associations locales dans leur long cheminement.

Ces trois organismes ont bénéficié d'un financement par le Fonds Forestier du Bassin du Congo. Financement qui leur a permis, dès 2010, d'appuyer le développement technique, institutionnel et organisationnel de regroupement de forêts communautaires, dans trois zones du Sud-Cameroun. L'ouvrage nous présente l'évolution de ces forêts, mettant les forces en évidence, sans toutefois en occulter les faiblesses.

Les auteurs nous emmènent ainsi dans une visite présentée en six étapes :

- des paysages éblouissants, des forêts surprenantes,
- une biodiversité déconcertante,
- la vie au village, au rythme de la forêt,
- de la cuisse de céphalophe au verre de vin de palme : les produits forestiers non ligneux,
- le bois des forêts communautaires,
- un avenir clair-obscur.

Tout en se félicitant des résultats obtenus au bénéfice des associations locales qui deviennent plus autonomes, J.L. Doucet et ses co-auteurs ne cachent pas les points d'ombre (corruption, braconnage, concurrence d'autres ressources...). Ceux-ci ne pourront être maîtrisés que par l'existence d'un secteur associatif fort, épaulé par les organes de pouvoir aux différents niveaux.

Voici un très beau livre, magnifiquement illustré de près de 150 photographies en couleurs, la plupart en pleine page. Les auteurs ont pris le pari que texte et images susciteront l'intérêt des lecteurs : décideurs, chercheurs, enseignants, étudiants... intéressés par la pérennité des ressources liées à la forêt, pour le plus grand bien des populations locales.

¹ Presses agronomiques de Gembloux, 2, Passage des Déportés, B-5030 Gembloux. ISBN 978-2-87016-119-7, 216p, 2012.

² Gembloux Agro-Bio tech, Université de Liège, Laboratoire de Foresterie des Régions tropicales.

³ SNV Cameroun, organisation néerlandaise de développement, BP 1239, Yaoundé.

⁴ Nature+, 57, rue Bourgmestre Gilisquet, B-1457 Walhain.

⁵ Société forestière Pallisco, BP 397 Douala

⁶ Correspondant étranger de l'Académie d'Agriculture de France, Chargé de cours honoraire de pédologie forestière à Gembloux Agro-Biotech, Université de Liège.

AGRICULTURE MONDIALE : Un désastre annoncé¹

par André Neveu²

Philippe Lacombe³. – Les connaisseurs des travaux d'André Neveu retrouveront ici, à propos d'une question d'une actualité brûlante, l'évolution des formes socioéconomiques de production agricole dans le monde, les qualités de leur Confrère : un souci d'analyse de la réalité fondée sur les données statistiques mais aussi sur la description qualitative des organisations, une concision d'expression et la construction d'une thèse qui débouche sur la formulation de recommandations : le capitalisme se développe non seulement dans les activités d'amont et d'aval de l'agriculture mais aussi, aujourd'hui, dans la production agricole elle-même. Ce développement présente des dangers qui conduisent l'auteur à parler de catastrophe ou de désastre auquel il convient de s'opposer. La présentation figurant sur la quatrième de couverture est une annonce claire et confirmée du propos de l'ouvrage : « Je veux mettre en garde les paysans du monde, les gouvernements et les consommateurs contre l'offensive du système capitaliste... ». Ce n'est pourtant pas d'un manifeste militant qu'il s'agit mais bien d'une thèse construite, argumentée, dont il est tiré des enseignements pour les politiques et actions publiques. Ce débat sur les formes sociales de production, habituel dans l'économie rurale au cours du temps, un peu éclipsé ces dernières décades sous l'effet de la suprématie de la pensée libérale, revient sur le devant de la scène.

Sans ignorer complètement l'histoire de la pensée dans ce domaine, ce livre est entièrement consacré à l'actualité. A. Neveu examine d'abord (deux premières parties) **pourquoi et comment le capitalisme s'empare de la terre**. C'est l'occasion de montrer la diversité des formes prises par le capitalisme : pénétration de capitaux à la recherche d'occasions de profit, acquisitions foncière pour s'assurer une alimentation, concentrations d'exploitations et/ou d'élevages (*feedlots*), *farming companies* et délégations de travaux, agro-holdings, développement de grandes plantations de palmiers à huile dans le Sud-Est asiatique, *pool* de cultures en Argentine... Le complexe agroalimentaire brésilien se présente comme la ferme du monde et finance des agricultures capitalistes à l'étranger, la Chine achète des terres... **Tous les continents** sont touchés (3^e partie) selon des modalités adaptées au contexte socioéconomique local.

Il est tentant d'essayer de mesurer l'importance relative de ces exploitations capitalistes. L'auteur se livre à cet exercice forcément très approximatif compte tenu de la carence des données. Selon ses estimations, l'agriculture capitaliste pourrait à court ou moyen terme réunir entre 20 et 25 % des terres de culture et des élevages du monde, cette part paraît croissante dans le temps.

Pour le monde rural, **les conséquences de ce développement capitaliste** (4^e partie) sont catastrophiques : l'exode rural est accéléré, le tissu social est déchiré, les ressources naturelles sont maltraitées, la durabilité n'est pas assurée, les produits de cette agriculture sont souvent davantage destinés à l'exportation qu'à la consommation locale. La gravité de ces conséquences justifie, selon l'auteur, **une riposte mobilisant** les gouvernements, les paysanneries, les consommateurs-citoyens (5^e partie). L'analyse vient ainsi justifier une souveraineté alimentaire permettant aux sociétés non pas d'exercer un choix totalement autonome de leur alimentation mais de l'orienter depuis ses modes de production jusqu'à sa répartition.

Cette analyse suggère des thèmes de débats, des voies d'approfondissement, des orientations de recherche. Regroupons-les sous deux rubriques : la dynamique du système productif agricole, et la politique publique en insistant préalablement sur un besoin commun, l'impérieuse nécessité d'une **amélioration de l'information** aujourd'hui très limitée, pauvre et souvent occultée.

Les conditions favorables aux exploitations capitalistes (opportunément rappelées dans l'ouvrage) sont sans doute moins contraignantes aujourd'hui. Sont-elles cependant suffisantes pour offrir des occasions de profits assez attractives pour que ce mode de production se généralise ? La mobilité de capitaux privés non agricoles vers la production agricole serait un indicateur convaincant. Or, aujourd'hui, plus que par le jeu de cette mobilité, le capitalisme agraire procède de l'intervention des états, de l'héritage de situations historiques, de l'effondrement du système socialiste, d'incertitudes juridiques (sur le statut des terres) facilitant les occupations violentes...

Cette diversité d'origine peut conduire à surévaluer l'ampleur de la conquête capitaliste, l'exploitation « modulaire », « flexible », la dissociation de la gestion du patrimoine, de l'entreprise, des travaux, les multiples coopérations entre agriculteurs (pour la terre, les travaux, les équipements, les assolements, la vente, le salariat...), la délégation de travaux... constituent des organisations souvent de « grandes tailles »,

marquées par les mécanismes capitalistes mais ne se présentant pas comme un archétype de la firme capitaliste (à cause du capital familial, de la faiblesse du salariat, de l'immobilité, de l'insertion locale) comme peut l'être l'« United Fruit Company » ou la plantation indonésienne ; on est plutôt ici dans le champ du petit commerce de quartier... ou de l'exploitation moyenne modernisée !

L'intérêt du travail présenté réside davantage dans un début de repérage des constituants de cette hétérogénéité que dans leur réunion et leur addition qui semble parfois calculée pour les besoins de la thèse !

D'ailleurs, A. Neveu le ressent quand il nous dit qu'il s'intéresse non seulement aux exploitations indiscutablement capitalistes mais aussi à celles qui s'en « rapprochent » ou pourraient devenir sa « proie », constituer son support (p.21), voire construire l'amorce d'une future entreprise capitaliste (p.34)... Pour l'instant, ne pourrait-on pas interpréter ces dernières comme « l'exploitation moyenne » d'aujourd'hui ? Mais alors la vision d'avenir (présentée dans l'ouvrage) d'une « **agriculture duale** » : entreprises capitalistes versus petite agriculture paysanne (p. 151) se trouverait mise en cause.

L'implication des gouvernements dans cette expansion capitaliste est fréquente mais largement inconnue et souvent cachée. Sous l'effet de pressions nationales et internationales, les politiques publiques peuvent sinon maîtriser, du moins inciter, orienter ces investissements capitalistes et leurs impacts en matière d'emploi, de fiscalité, de transferts, de droit du travail. L'étude du **contenu et de l'organisation** de ces politiques comme leur **évaluation** complèteraient avantageusement l'analyse du développement du capitalisme agraire afin d'en apprécier la portée et la signification. Ces politiques publiques concernant les exploitations capitalistes pourraient ainsi contribuer à l'exercice d'une responsabilité sociale comme à son articulation avec une politique de modernisation de la paysannerie (clairement recommandée dans l'ouvrage).

Au total, ce livre nous propose un double apport : un constat, une vision. Le **constat** informe sur le développement du capitalisme dans la production agricole envisagé dans ses aspects quantitatifs, dans ses modes d'organisation et dans ses impacts. L'ampleur des changements conduit A. Neveu à parler d'une nouvelle révolution agricole en gestation. La **vision** avance une interprétation des structures de production dans le monde qui débouche sur des recommandations pour les politiques publiques. Qu'on la partage, la conteste ou la nuance, cette vision (étroitement articulée avec le constat) est stimulante et fertile. C'est pourquoi ce travail est une contribution bienvenue dans un domaine de recherche dont l'exploration est clairement attendue aujourd'hui.

¹ Éditions Autrement, Paris, 2012, 201 p.

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France, ancien adjoint au Directeur de l'Agriculture et des Collectivités locales de la Caisse nationale de Crédit Agricole.

³ Membre de l'Académie d'Agriculture de France.

LES MISSIONS MILITAIRES AU SERVICE DE LA BIODIVERSITÉ¹

par Sarah Brunel

Christian Lévêque². – Le titre peut surprendre. *A priori*, les militaires et la biodiversité ne font pas bon ménage. L'auteure s'est donc attelée à un exercice difficile qui est de nous démontrer que les temps changent...

Une première partie dresse un rapide tableau de la biodiversité et de ses enjeux (services rendus). Au-delà du discours habituel on appréciera le passage sur les trafics, le braconnage et la corruption, cette dernière étant trop souvent passée sous silence dans les discours onusiens. Certains États se dotent ainsi de brigades « vertes » pour protéger la biodiversité, parfois composées d'ailleurs de militaires. La protection (ou présentée comme telle) passe également par l'accaparement des terres par de riches philanthropes ou des ONG qui investissent dans les pays du Sud. La biodiversité est par ailleurs un enjeu économique, *via* les ressources génétiques, qui voit s'affronter les pays du Sud pourvoyeurs de biodiversité, aux industriels des pays du Nord, avides de nouvelles molécules ou de nouveaux procédés biotechnologiques. L'accusation de biopiraterie, c'est-à-dire l'utilisation de ressources biologiques d'un État sans qu'il en tire profit, tient au fait que la biodiversité n'est pas un bien commun de l'humanité, mais une ressource nationale, les États étant souverains pour décider de sa protection, de son utilisation et de sa valorisation. Et les traités internationaux sont souvent perçus par les États du Sud comme une nouvelle forme d'impérialisme, suscitant le rejet de toute ingérence en la matière. La Convention sur la Diversité biologique est en réalité le lieu d'affrontements

entre le Nord et le Sud sur la question de la propriété de la biodiversité et du partage des avantages financiers liés à son exploitation.

Les conflits sont bien évidemment préjudiciables à la biodiversité par leurs impacts directs (destruction physique d'écosystèmes et pollutions) ou indirects (les populations doivent survivre). Le contraire aurait surpris... Sans compter que l'accès aux ressources naturelles peut aussi être à l'origine de conflits, et divers cas sont présentés. La protection de l'environnement n'est certes pas une priorité en temps de guerre, malgré l'existence de traités internationaux. Mais la thèse de l'auteur est que la biodiversité peut contribuer au rapprochement entre Etats. Il suggère la création de « parcs pour la paix » qui sont des parcs transfrontaliers devant être gérés en commun, et qui participeraient ainsi à recréer un dialogue et une coopération entre Etats voisins. Une idée déjà avancée par des ONG qui, me semble-t-il, paraît plutôt relever d'un discours utopiste comme on les aime dans les instances internationales. Certes, on peut avancer l'argument que pour prévenir les conflits environnementaux il faut anticiper et recueillir des données sur le terrain. Et la solution ne réside-t-elle pas dans l'imagerie satellitaire, que les pays développés maîtrisent bien. L'OTAN et le PNUE s'intéressent de près à cette question au nom de la sécurité environnementale. On va même jusqu'à cartographier les zones de stress environnemental, pour identifier les régions vulnérables et les points chauds. La prévention et la résolution de conflits environnementaux est ainsi un nouvel enjeu affiché par l'armée américaine et les forces de l'OTAN. Mais on ne peut s'empêcher de penser qu'il s'agit peut-être là d'une autre forme d'ingérence ?

Reste que l'on peut dire sérieusement que les terrains militaires sont des zones de haute protection de la biodiversité (20% des terrains militaires en France sont classés Natura 2000...) et que, de par le monde, les armées participent marginalement à la protection de la biodiversité *via* ces terrains militaires. Il existe aussi un commandement environnemental de l'armée américaine dont les forces armées doivent respecter les réglementations environnementales fédérales ou du pays hôte lorsqu'elles sont engagées à l'étranger. Est-ce une autre forme de *Greenwashing* ? Toujours est-il que la stratégie environnementale de l'armée américaine pour le 21^e siècle insiste sur le rôle des soldats dans la mise en œuvre de la protection de l'environnement. Plusieurs pages sont ainsi consacrées à l'intégration de l'environnement dans les prises de décision de l'armée américaine et dans la politique étrangère américaine, *via* l'USAID. L'environnement représenterait un moyen de dialogue entre militaires et civils, et certains Etats envisagent de rentabiliser leurs dépenses en utilisant les militaires pour la protection de l'environnement. L'enjeu, bien entendu, est aussi de redorer l'image de l'armée auprès du public.

Plusieurs pages intéressantes sont ensuite consacrées au bioterrorisme et au biocrime, avec un regard particulier sur l'agroterrorisme (attaque des cultures vivrières d'un pays tiers afin de l'affaiblir sur le plan économique et social). Des tas de pistes insoupçonnées qui pourraient donner des idées !

Le dernier chapitre traite des interventions et des ingérences environnementales. Le droit d'ingérence humanitaire peut-il être élargi à la cause environnementale ? Il existe toujours un risque que ces interventions recouvrent d'autres intérêts. La protection de la nature, vue sous l'angle économique, peut devenir un enjeu géopolitique qui pourrait justifier des interventions environnementales... Cette question de l'ingérence écologique restera ouverte et débattue probablement très longtemps. On peut parier que les pays du Sud n'y sont guère favorables.

Bref un ouvrage qui comporte pas mal de chapitres intéressants et parfois un peu déroutants. Il se démarque de nombreux autres ouvrages conventionnels sur la biodiversité, par des idées originales, parfois discutables, mais que l'auteure essaie de bien argumenter. Elle y défend la thèse délicate selon laquelle l'armée aurait à jouer un rôle plus important que par le passé, dans la protection de la nature. Cette idée est en partie argumentée par des exemples précis, mais qui restent souvent anecdotiques. Et je ne peux me départir de l'idée que ce n'est pas par conviction, mais par intérêt (image, renseignements, ingérence possible) que les militaires affichent une telle politique environnementale. Je souhaiterais bien évidemment avoir tort !

¹EDP SCIENCES, Collection InterSections, septembre 2012, 131 pages.

² Président de l'Académie d'Agriculture de France, directeur de recherche émérite de l'IRD (ex ORSTOM).

INNOVATION ET PATRIMOINE ALIMENTAIRE EN ESPACE RURAL¹

par Jacinthe Bessière

Jacques Risse². – Cet ouvrage collectif (sept auteurs), placé sous la coordination de Jacinthe Bessière, maître de conférences en sociologie, et publié aux éditions QUAE en novembre 2012, compte 150 pages et environ 500,000 signes.

Les auteurs ont écrit ce livre avec pour objectif d'approfondir, d'élargir la connaissance des patrimoines alimentaires en espace rural, dans toutes leurs composantes, matérielles bien sûr mais aussi culturelles ou sociales. Ce faisant, ils ont analysé l'évolution de ces patrimoines, recherché la créativité et l'innovation, quelle qu'en soit l'origine, dont ils ont été ou dont ils sont l'objet, et ceci tout en soulignant l'intérêt croissant qui leur est porté, ainsi qu'à toutes les cultures locales, devant l'essor de la mondialisation.

L'ouvrage est divisé en trois parties.

La première, écrite par Jacinthe Bessière, traite de l'évolution, voire même de la mutation, des espaces ruraux qui, confrontés à de nouvelles exigences liées notamment à une évolution des populations, des mœurs, des habitudes, à une *touristisation*, changent. En résulte une redéfinition claire des patrimoines alimentaires dans le chapitre 2 : produits bruts (châtaigne, truffe, viande...), produits transformés (fromages, aligots, foie gras...), recettes culinaires. Dans le chapitre 3, sont cités en exemple trois territoires du sud-ouest situés dans le Gers et l'Aveyron, tous trois engagés dans des stratégies d'innovation patrimoniale alimentaire.

Dans la deuxième partie Laurence Tibère, Sébastien Rayssac, Jacinthe Bessière, Elise Mognard s'intéressent aux innovateurs eux-mêmes (qui sont-ils ? quels sont leurs motivations, leurs objectifs ?) avant d'en venir aux fonctions, aux rôles de l'innovation patrimoniale alimentaire, aux sources et aux conditions d'émergence des innovations.

Dans la troisième partie Jacinthe Bessière, Jean Pilleboue, Laurence Barthe et Emilien Soulenq soulignent les difficultés auxquelles se heurte l'innovation patrimoniale dans le domaine alimentaire, difficultés qui connaissent de multiples origines (conservatisme, réflexes sociétaux, réglementation, etc.) Ces innovations peuvent aussi, soulignent-ils, se montrer pernicieuses : s'il faut savoir aller de l'avant, il faut aussi savoir préserver son image.

Ce livre n'est pas un livre grand public, il est destiné aux enseignants-chercheurs, aux étudiants mais aussi aux milieux professionnels spécialisés, agricoles ou agroalimentaires notamment.

Il soulève, faut-il le dire, un problème grave auquel il n'est pas facile d'apporter une réponse. L'image d'une région tient pour une part non négligeable à la richesse de son patrimoine alimentaire, à ses produits, à sa gastronomie, à ses façons d'être, de faire et de dire. Les consommateurs, bénéficiaires de la mondialisation, en sont en même temps plus ou moins las : ils sont las de ces produits, des produits certes bon marché mais qui ne véhiculent qu'une image médiocre et en lesquels personne ou presque n'a vraiment confiance et ils jettent désormais assez volontiers un regard vers les produits régionaux.

En bref, les auteurs incitent à la réflexion dans un domaine fondamental : celui du patrimoine alimentaire. Innover est certes important mais doit-on innover dans le domaine patrimonial alimentaire et si oui comment ? Il n'y a pas de réponse unique à cette question mais ce livre a l'immense mérite de la poser et de donner des méthodes et des pistes de réflexion. On ne peut qu'en recommander la lecture.

¹ Éditions Quæ, Collection Update Sciences and Technologies, 2012, 160 pages.

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France, membre de l'Académie vétérinaire de France

LA VIANDE VOIT ROUGE¹

Jacques Risse. – Ce livre, écrit par René Laporte et Pascal Mainsant, tous deux ingénieurs agronomes, zootechniciens et spécialistes de la viande, a été publié chez Fayard en mai 2012. Il compte 220 pages et environ 300 000 signes.

Les auteurs, excédés sans doute par les attaques à répétition et souvent violentes dont la viande, ou mieux les viandes, font l'objet, ont écrit ce livre plaidoyer pour présenter leur défense.

Il faut d'ailleurs souligner d'entrée qu'ils plaident tout autant en faveur de l'élevage que des viandes. Ce qui les amène à parler en même temps du lait et des œufs.

L'ouvrage comporte six chapitres dont les titres sont autant d'affirmations :

- 1) L'homme respecte les animaux, êtres sensibles.
- 2) L'homme un végétarien devenu un carnivore intelligent.
- 3) La viande ne ruine pas la santé.
- 4) L'élevage n'affame pas la planète.
- 5) La viande ne détruit pas la planète.
- 6) Un monde sans viande, un monde sans élevage : une absurdité !

Dans les deux premiers chapitres, les auteurs présentent et expliquent les améliorations apportées aux méthodes d'élevage ces dernières années. Ce bref historique, qui va du paléolithique à aujourd'hui, en passant par Descartes, se propose de faire comprendre aux lecteurs comment a évolué notre perception du monde animal des origines à aujourd'hui, une évolution qui explique notre comportement à son égard. Il est probable que certaines des affirmations des auteurs ne feront pas l'unanimité des lecteurs (ex : la sélection naturelle a probablement repéré la supériorité des nutriments de la viande pour faire grossir le cerveau).

Les trois chapitres suivants répondent aux critiques habituellement adressées à l'élevage et aux viandes concernant notamment la santé humaine, la sécurité alimentaire et l'environnement.

Ce livre, un plaidoyer – souvent véhément – en faveur des viandes et de l'élevage, est bien écrit, facile à lire. Sans doute suscitera-t-il quelques réserves, mais après tout, cela permet d'ouvrir le débat.

¹ Éditions Fayard, Collections Documents, 2012, 224 pages.

SUR LES ÉPAULES DE DARWIN¹ Les battements du temps

par Jean-Claude Ameisen

Charles Descoins². – Cet ouvrage, de plus de 400 pages, reprend l'essentiel des thèmes abordés lors d'émissions radiophoniques animées par l'auteur et diffusées sur France-Inter.

Son style ne répond pas à une syntaxe rigoureuse mais se rapproche plutôt du journalisme ou du langage parlé. Le texte lui-même est entrecoupé de nombreuses citations (en italique) d'auteurs souvent peu connus et parfois peu compréhensibles. On y rencontre de nombreuses références à des travaux scientifiques qu'il est possible de retrouver dans la bibliographie jointe en annexe.

L'essentiel de l'ouvrage porte sur la notion de temps et sur les relations entre passé, présent et futur ; tâche difficile puisque, comme le dit Saint Augustin, « *le passé n'est plus et l'avenir n'est pas encore* » ou comme l'affirme G. Galaz « *le présent n'existe pas* ».

Ces considérations philosophiques qui servent, en quelque sorte, d'introduction à l'ouvrage peuvent dérouter et surprendre le lecteur mais cette impression va peu à peu s'estomper lorsque l'auteur aborde des exemples concrets s'appuyant sur « *les épaules* » des scientifiques.

L'auteur nous invite alors, sur plusieurs chapitres, à ressusciter le passé à trois niveaux : géologique, historique et individuel ce qui permettra d'assurer, à ce dernier, la transition vers le présent et d'aborder les mécanismes de la mémoire et de l'apprentissage.

Citons quelques exemples.

En observant la disposition des traces de pas figées dans la roche, on peut, en se référant à nos connaissances actuelles, retrouver le comportement de l'animal au moment où il les a laissées.

En s'appuyant sur la disposition des souches de ptéridophytes et de lépidodendrons, à l'intérieur des veines de charbon, on peut reconstituer la structure des forêts humides de l'ère primaire.

Plus près de nous, la découverte des ruines de Pompéi et d'Herculanum, figées instantanément dans le temps lors de l'éruption du Vésuve, a permis de nous faire découvrir et de partager la vie quotidienne des riches familles romaines du 1^{er} siècle, rendant presque présent un passé de 2000 ans.

La redécouverte, en Italie, au début du 16^e siècle, des ouvrages des auteurs grecs et latins a été à l'origine de la Renaissance dont l'influence s'est répandue ensuite en Occident.

Ces quelques exemples sont exposés de façon claire et accessible à tous.

La transition passé/présent et leur relativité sont abordées lorsque l'auteur nous invite à observer l'Univers, exposant en même temps des notions d'astrophysique. En effet la lumière que nous recevons des étoiles au temps présent est en réalité une lumière du passé qui a mis plusieurs années-lumière pour nous parvenir.

Viennent ensuite plusieurs chapitres consacrés à l'élaboration du « Je » à partir de notre passé individuel que la mémoire permet de transformer en présent et à partir de ce que nous recevons des autres grâce à l'apprentissage.

Les mécanismes de la mémoire sont expliqués en se référant à de nombreux travaux de neurosciences présentant les résultats d'expériences menées chez l'homme et les animaux. Si la souris et les primates supérieurs occupent une place de choix dans ces expériences, on est surpris d'apprendre que les oiseaux ont, eux aussi, largement contribué au développement de nos connaissances dans ce domaine.

L'auteur mettra aussi largement à contribution les oiseaux pour expliquer les mécanismes de l'apprentissage, donnant ainsi un véritable cours d'éthologie. Les faits rapportés, par exemple l'apprentissage du chant par l'oisillon, retiennent sur plusieurs pages l'attention du lecteur et laissent à penser que l'auteur a certainement un penchant personnel pour l'ornithologie. Les oiseaux sont plus intelligents que nous ne le pensons et l'auteur n'hésite pas à dire que, parmi ceux-ci, les corbeaux peuvent être considérés comme « *des chimpanzés à plumes* ».

Mais apprendre c'est aussi innover transmettre et anticiper sur le futur. Comment l'homme imagine-t-il le futur et son futur ? L'auteur ne nous donne pas de réponse, les philosophes souvent cités ne nous la donnent pas non plus et la notion de sacré intimement liée à l'idée que l'homme se fait de son futur n'est pas abordée.

En conclusion, cet ouvrage original dans sa forme, un peu déroutant surtout dans ses premiers chapitres, permet néanmoins au lecteur, d'aborder des disciplines scientifiques abstraites comme les neurosciences et l'éthologie, grâce à des exemples judicieusement choisis. Il pourra, s'il le désire, se référer aux travaux scientifiques originaux cités dans la bibliographie.

Le choix des citations à caractère philosophique, souvent peu claires, alourdissent inutilement le texte et ne contribuent pas à en faciliter la compréhension.

Il eût été préférable que l'auteur, scientifique lui-même, se limite à transmettre une vulgarisation scientifique de qualité.

¹ Éditions Les Liens qui Libèrent / France Inter, 2012, 444 pages.

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Directeur de recherche honoraire de l'INRA.

CÉRÉALES

La plus grande saga que le monde ait vécue¹

par Jean-Paul Collaert

Christian Ferault². – L'auteur, journaliste et à l'origine de différents ouvrages reconnus dans le domaine horticole, nous livre aujourd'hui une imposante contribution sur les céréales ou plus exactement sur tout ce qui tourne et touche ces productions si nécessaires à l'humanité.

Ce livre surprend par son ampleur et son ambition. En effet, son titre pourrait suggérer un nième ouvrage sur les céréales, essentiellement phytotechnique et construit dans l'esprit de ceux qui ont fleuri dans la seconde moitié du siècle dernier.

Or, il n'en est rien. Pourquoi ?

Le contenu est réparti entre cinq sections d'inégale ampleur. Une première, intitulée « Les céréales à la conquête du monde », constitue une contribution historique relative à la domestication. Si l'on n'y apprend rien de bien nouveau, on y trouve une approche originale et très vivante qui fait participer et retient le lecteur sur ces 10/12000 ans qui ont tout modifié dans le monde.

Puis l'auteur nous livre ce qu'ont enduré et dû résoudre nos aïeux pour progresser et vaincre l'adversité dans des milieux fort divers. Un retour utile car porteur de leçons

La troisième partie traite des enjeux autour des semences, spécialement depuis l'orée du 19^e siècle. On y trouve, sur une bonne trentaine de pages, un « dialogue sur les OGM » entrepris à l'occasion d'un voyage en chemin de fer, entre plusieurs partenaires, le tout bien illustré. Le parti pris est clairement explicité, sous une forme agréable à lire. Il y aurait beaucoup à répondre... et éventuellement à contester.

Changement de décor et d'objectifs avec la partie suivante dans laquelle les aspects économiques et politiques sont abondamment traités avec adjonction de nombreuses données statistiques habilement présentées. Le style de l'auteur interpelle, pose d'utiles questions pour l'avenir et surtout soulève des interrogations qui dépassent largement les clivages politiques et autres.

La partie 5 envisage « Les céréales au quotidien » avec leurs usages, les façons de les préparer – anciennes, actuelles et proposées – mais aussi leur place dans la littérature, les chansons, les représentations picturales et... les religions mais aussi les superstitions et les sortilèges ! La lecture en est enrichissante et ouvre bien des perspectives. Aurions-nous imaginé... ?

Enfin, sous le titre « Les céréales sous toutes les coutures » qui occupe un tiers de l'ouvrage, l'auteur nous livre tout ce qu'il faut savoir sur chaque céréale (une bonne quinzaine, sans compter les « sauvages »), et selon un plan original qui peut surprendre, mêlant origine, expériences locales, gastronomie et beaucoup d'autres aspects. On y découvre également le recours aux céréales au jardin.

Ce livre est complété de renseignements utiles – dont l'indication de nombreux sites plus ou moins dédiés – d'une fresque historique... et d'une bibliographie limitée (mais on nous indique pourquoi).

Bref un livre surprenant, bien écrit, avec de l'humour et des prises sur les réalités et des expériences multiples. Une sorte de « roman » des céréales qui captive rapidement et donne l'envie d'aller jusqu'à son extrémité. Le propos est sérieux, engagé et attachant. Il est souvent polémique et c'est heureux. Et la saga annoncée est loin d'être achevée !

Une référence de qualité dont il faut disposer.

¹ Éditions Rue de l'Echiquier, 2013, 639 pages

² Vice-Secrétaire de l'Académie d'Agriculture de France, directeur de recherche honoraire de l'INRA.

PRÉSENTATIONS DE THÈSES

MODÉLISATION DE L'IMPACT DES SYSTÈMES DE CULTURE SUR LA POLLINISATION CROISÉE CHEZ LE MAÏS DANS LE CADRE DE L'ÉTABLISSEMENT DE RÈGLES DE COEXISTENCE¹

par Frédérique Angevin

André Gallais². – Outre l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux, les cultures potentielles d'OGM en Europe doivent respecter le principe de coexistence entre différents types d'agriculture : chaque agriculteur doit ainsi pouvoir être libre de choisir de cultiver des OGM, de garder un mode de production conventionnel ou d'opter pour l'agriculture biologique. La faisabilité de cette coexistence dépend du seuil de présence fortuite d'OGM admis dans les produits conventionnels et est largement conditionnée par le flux de gènes à l'échelle des paysages et l'effet des systèmes et pratiques agricoles.

Le travail réalisé lors de cette thèse a d'abord consisté en la conception du modèle MAPOD qui simule les flux de gènes chez le maïs à l'échelle du paysage. Ce modèle est basé sur une fonction de dispersion individuelle qui dépend de paramètres biologiques et climatiques et qui calcule une probabilité de fécondation en un point (x, y) en fonction de la distance à la source émettrice de pollen (pollinisation efficace). Il comporte un module de dynamique de floraison qui rend compte des conséquences des synchronismes ou asynchronismes de floraison entre champs sur les taux d'OGM dans les récoltes. Le modèle permet de déterminer l'effet de la distribution spatiale des parcelles de maïs, des caractéristiques variétales, du climat et des itinéraires techniques sur les taux de pollinisation croisée.

MAPOD a ensuite été évalué grâce à des données issues de suivis effectués pendant 5 ans dans des parcelles d'agriculteurs en Catalogne, région où le maïs Bt est cultivé à grande échelle. Ces données ont permis d'estimer non seulement la qualité des prédictions réalisées mais aussi celle des décisions prises grâce aux résultats de simulations.

Plusieurs études qui visaient à analyser la faisabilité technique de la coexistence dans différentes régions européennes productrices de maïs ont été réalisées en recourant aux simulations effectuées avec MAPOD. Il permet en effet de répondre à des questions du type : « Que se passerait-il, en terme de dispersion de gènes, si on introduisait telle variété de maïs OGM dans telle région européenne ? » et « Comment organiser les cultures pour maintenir dans les limites des seuils légaux la présence fortuite d'OGM dans les cultures conventionnelles ? ». De façon globale, les différents résultats obtenus montrent que les risques sont gradués suivant le contexte cultural et surtout le seuil de présence d'OGM toléré.

Le modèle a aussi été utilisé dans le cadre de plusieurs collaborations pluridisciplinaires. Il a ainsi été couplé avec un modèle de gestion afin d'évaluer l'efficacité de stratégies de coexistence mises en œuvre par des organismes de collecte-stockage. Des travaux menés avec des écologues et des statisticiens ont permis d'étudier l'effet des éléments structurels des paysages sur les processus de flux. Enfin, les sorties des simulations réalisées lors des études de faisabilité de la coexistence ont été analysées par des spécialistes de la fouille de données et de l'intelligence artificielle. Ceci a abouti à la mise au point d'un outil d'aide à la décision à destination des agriculteurs de leurs conseillers. Il permet d'estimer la possibilité de respecter un seuil de présence d'OGM dans une récolte non-OGM à l'aide d'éléments de contexte facilement renseignables.

¹ Thèse soutenue le 6 novembre 2012, présentée pour la médaille d'argent de la section 1, année 2013.

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France, Professeur émérite d'AgroParisTech (Génétique et Amélioration des plantes), INRA, Station de Génétique végétale, Ferme du Moulon, 91190 Gif-sur-Yvette.

PRODUIRE DES ALIMENTS OU DE L'ÉNERGIE: FAUT-IL VRAIMENT CHOISIR ? ÉVALUATION AGRONOMIQUE DE LA PRODUCTIVITÉ DE SYSTÈMES AGRIVOLTAÏQUES¹

par Hélène **Marrou**

Yves Brunet². – La question de la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale, ainsi que le développement envisagé de sources d'énergies contribuant le moins possible au réchauffement climatique, mettent une forte pression sur l'utilisation des terres agricoles : comment à la fois augmenter les surfaces cultivées et libérer des espaces pour implanter par exemple des centrales photovoltaïques ? C'est sur ce dilemme que se penche le travail de thèse de H. Marrou, en proposant une solution pour le moins innovante : pourquoi choisir, alors qu'on peut faire les deux sur un même champ ? Il s'agit en effet ici de tester la faisabilité, et pour cela d'en comprendre le fonctionnement, d'un système mixte consistant à cultiver des plantes sous un ensemble de panneaux solaires disposés suffisamment haut pour ne pas gêner les opérations culturales mécanisées. L'idée est très récente, et particulièrement attrayante.

Le travail de thèse est donc centré sur le fonctionnement agronomique d'un tel système de production, dit « agrivoltaïque », cherchant à combiner production d'électricité et production alimentaire sur la même surface et la même période de temps. La thèse est structurée autour de cinq chapitres : le premier en pose le contexte et la problématique. Les trois chapitres suivants présentent les résultats : le second porte sur la quantification de la productivité des cultures sous les PVP (panneaux photo-voltaïques) et son interprétation par la décomposition des efficacités d'interception et de conversion du rayonnement ; le troisième concerne une analyse du microclimat sous les PVP et les conséquences sur la dynamique d'émission des feuilles des cultures et les stades phénologiques ; le quatrième est centré sur une analyse de la consommation en eau des cultures au sein du système agrivoltaïque. Enfin, le dernier chapitre est composé d'une discussion générale des résultats acquis et de perspectives liées à l'évaluation économique de tels systèmes.

Sur ce sujet fortement innovant, le travail a été mené dans deux directions principales : (1) mieux comprendre les déterminants de la productivité des cultures en conditions d'ombrage intermittent sous les panneaux photovoltaïques, (2) identifier les leviers d'action principaux pour optimiser la productivité totale de ces systèmes. Les résultats de la thèse sont remarquables et démontrent la « preuve du concept » agrivoltaïque. On retiendra en particulier les points suivants :

- L'auteur a montré que lorsque les plantes sont cultivées en conditions d'ombrage sous les panneaux, elles peuvent compenser la réduction de la ressource lumineuse en augmentant leur capacité à intercepter la lumière ;
- à partir d'une analyse approfondie des changements microclimatiques observés sous les panneaux solaires, à la fois à l'échelle de temps horaire et journalière, elle a évalué l'impact de ces changements, notamment de la température du sol, sur la croissance et le développement des cultures ;
- elle a montré que l'efficacité d'utilisation de l'eau est accrue à l'ombre des panneaux solaires ;
- elle a mis en évidence que ces systèmes peuvent être doublement productifs (la production d'énergie et de biomasse est élevée), en particulier lorsque les panneaux sont agencés de façon à laisser au moins 70% de la lumière incidente disponible pour les cultures.

Outre les résultats qu'il a produits, le travail de thèse comporte de nombreux points forts. On notera notamment les points suivants :

- la thèse repose sur un dispositif expérimental original, permettant de tester un système agrivoltaïque en grandeur nature, et consistant en un traitement à haute densité de panneaux, un traitement à mi-densité, et un traitement témoin sans panneau. Ce dispositif, fortement équipé en mesures, a permis à H. Marrou de quantifier l'impact de panneaux et de leur densité sur un grand nombre de variables liées au microclimat des cultures, à la consommation des plantes, à leur développement et à leur croissance, etc. Les protocoles expérimentaux sont bien conçus et plusieurs espèces et variétés ont été testées pendant des saisons climatiques différentes : céréales d'hiver, cultures légumières au printemps et en été, en climat méditerranéen (Montpellier) ;

- l'auteur a conduit, à partir de ces données, une remarquable analyse multidisciplinaire du système agrivoltaïque, en l'analysant dans les domaines de l'écophysiologie, de la micrométéorologie, de l'hydrologie et de l'économie ;
- au cours de son travail H. Marrou a développé des outils de modélisation (simulation de carte de lumière au niveau du sol, modèles conceptuels pour l'accumulation de biomasse) qui pourront être utiles pour évaluer de nouvelles dispositions des panneaux solaires afin d'optimiser les systèmes agrivoltaïques du point de vue de leur productivité totale ;
- elle a suivi une excellente stratégie de publication puisque chacun des cinq chapitres est bâti autour d'un article original en anglais ; deux sont actuellement publiés, deux sont soumis, un est en cours de finalisation ;
- enfin, H. Marrou conclut en évoquant des pistes de recherche judicieuses, montrant que le présent travail ne constitue pas l'aboutissement d'une idée mais bien au contraire le point de départ d'une future et prometteuse ligne de recherche.

¹ Thèse soutenue le 18 décembre 2012 Montpellier SupAgro, Doctorat ESA-Ecosystèmes et sciences agronomiques – SupAgro.

² Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, Directeur de recherche à l'INRA.

NÉCROLOGIES

Brice de Turckheim (Correspondant national honoraire, section 2, Bois et forêts, décédé le 5 janvier 2013 à Obernai, Bas-Rhin, à l'âge de 82 ans). Sorti en 1952 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich avec le diplôme d'ingénieur agronome (et spécialisation forestière), il est expert forestier et gestionnaire d'importants domaines (de Dietrich, Cristalleries de Saint-Louis, Coopérative Forestarn...). Parallèlement, au cours d'une très longue carrière qui ne s'achèvera vraiment qu'à la veille de sa mort, il va assumer des responsabilités importantes aux niveaux régional et national : secrétaire général du Syndicat des propriétaires forestiers d'Alsace et du Syndicat des sylviculteurs des Vosges et de «Forêt privée d'Alsace», du Comité des forêts, de la Compagnie nationale des ingénieurs et techniciens de la forêt, administrateur de la Fédération nationale des syndicats de propriétaires forestiers sylviculteurs, etc. Mais la réputation de notre Confrère s'étendait au-delà de nos frontières : il fut l'un des membres fondateurs (et premier président) du mouvement *Pro Silva* Europe - comme l'ont été aussi deux de nos confrères européens, Hans-Jürgen Otto d'Allemagne et Jean-Philippe Schütz de Suisse -, association créée en 1989 pour la promotion d'une sylviculture «irrégulière, continue et proche de la nature», sylviculture qui aura connu depuis un grand développement en Europe. Élu Correspondant national en 1987, apprécié pour la grande, et, en même temps, ferme courtoisie avec laquelle il défendait ses positions en matière de sylviculture et de chasse, il avait accepté, en 2010, de se charger de la supervision de la gestion de nos forêts normandes, charge qu'il assumait avec beaucoup de dévouement malgré leur éloignement de la propriété familiale de Trüttenhausen.

Jean-Paul Lanly

Jacky Ganry était âgé de 66 ans. Dans le cadre de la section 1, il fut élu Correspondant de l'Académie d'Agriculture en 2000. D'abord chercheur au CIRAD, puis Directeur scientifique du département FLHOR (Fruits tropicaux) de cette institution, il était devenu une des grandes références scientifiques dans le monde de la banane, notamment en matière de création variétale et d'amélioration de la qualité. Avec ses équipes, il a aussi contribué à la lutte raisonnée contre les cercosporioses. De manière plus large, Jacky Ganry a mis l'accent sur la place des technologies agroalimentaires dans leurs relations avec l'alimentation et la santé humaine. Il s'est aussi beaucoup engagé au secrétariat du Forum mondial de la recherche agricole à Rome. Il était connu pour son dévouement aux valeurs que porte le Cirad et son engagement constant à faire progresser la connaissance des filières horticoles.

Christian Lévêque

L'ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE VISITE ISAGRI

Le jeudi 22 janvier, le Président Jean-Marie Savalle recevait un groupe de membres de l'Académie d'Agriculture de France venu visiter Isagri. Christian Maréchal initiateur de cette journée à Beauvais, le remerciait pour son accueil et lui présentait en quelques mots l'AAF. Jean-Marie Savalle développe alors l'aventure d'Isagri, et ce depuis 29 ans, une histoire que l'on pourrait intituler « *success story d'un homme à la vocation contrariée* ». En effet et en attente de la reprise de l'exploitation familiale en Seine Maritime, il est parti, après ses études, en stage aux États-Unis, stage suivi d'un autre au Canada dans un laboratoire d'informatique à l'Université Laval sur le thème de la mise en place d'une comptabilité informatisée. D'analyste-programmeur, les circonstances l'ont conduit à accepter un intérim de professeur de comptabilité, puis un contrat d'enseignement qui s'est prolongé trois ans.

A son retour en France, après quatre années d'absence, un jeune frère se trouve aussi candidat à la reprise de l'exploitation. En attendant, il accepte un poste d'enseignant à l'ISAB avec l'espoir de travailler plus tard avec son frère. Mais des divergences, notamment sur la conduite du troupeau laitier, ont ruiné son projet. Il met alors à profit son expérience canadienne en se lançant début 1983 dans la création de logiciels pour l'agriculteur, avec l'appui de quelques enseignants et étudiants de l'ISAB. Cette activité nécessite très vite le recrutement de trois spécialistes programmeurs.

Dans les besoins des agriculteurs, l'utilité d'un logiciel de comptabilité avait été identifiée et aussi celle d'un autre pour la gestion de la production laitière. Le développement de cette activité a généré une controverse parmi les enseignants et les étudiants et, devant le coût croissant de ce service, l'école a décidé de l'arrêter.

Jean-Marie Savalle voyait ses projets d'installation et de création de logiciels tomber à l'eau. Pour persévérer il n'y avait pas d'autre solution que de créer sa propre entreprise. Ses économies étant passées dans l'achat d'un troupeau laitier, le démarrage a été difficile avec des fonds récoltés, entre autres, auprès de ses collègues enseignants. L'équilibre n'a été atteint qu'après trois ans. Au départ l'entreprise a hérité des salariés embauchés par l'école pour cette activité, qu'il a fallu rapidement compléter par un commercial pour diffuser les logiciels. Jean-Marie Savalle a néanmoins continué d'enseigner pendant huit ans.

Un débat s'ouvre à propos de la relation avec son frère agriculteur : cette compétition pour rester attaché à la terre, que, d'un certain point de vue, Jean-Marie Savalle a perdue, ne l'a-telle pas conduit vers une carrière dont l'essor n'a rien à voir avec le développement qu'il aurait pu conduire sur une exploitation ?

Question taquine : son frère utilise-t-il le logiciel « Isalait » ? Longtemps réfractaire à l'informatisation, il s'y est finalement mis avec le concours d'un voisin étudiant.

Isagri s'est fixé comme mission de faire des nouvelles technologies un facteur de progression durable et de choisir celles qui apportent un plus.

C'est avec l'ouverture en 1991 d'une filiale à Valence, en Espagne, que commence l'expansion d'Isagri. Les ventes à l'étranger posent le problème d'adaptation des logiciels aux besoins locaux et demandent la mise en place d'un service local. Cette première expérience a débuté en Espagne après une étude de marché qui a porté sur des pays comme la Grande-Bretagne, l'Espagne, l'Italie ou l'Allemagne. Ce choix de l'Espagne a été déterminé par l'adéquation des logiciels à la culture et à la taille des exploitations. Ce pays a beaucoup apporté pour l'appréciation de la différence culturelle.

En 1997 était créé Terrenet, portail d'informations agricoles avec une première embauche de journalistes. En 2001/2002 paraît « Agiris », marque dédiée à la profession comptable libérale, aujourd'hui troisième acteur français dans ce domaine et, dans la foulée, est créé Isagri ingénierie qui répond à des besoins spécifiques.

2006 a été marqué par le passage sous Windows et a conduit dans les quatre années qui ont suivi, au rachat de différentes entreprises dont :

- CDER-informatique, département du CDER chargé d'informatiser ses adhérents,
- SATPLAN, spécialisée dans le guidage par satellites,
- OCTALIS, filiale de 70 centres de gestion,
- SONEO, impliquée dans les produits techniques, filiale des centres de gestion normands et bretons

- SIGA, société d'informatique leader au Canada dans l'informatique en agriculture.

2011 est marquée par le rachat du Groupe France Agricole (GFA), premier groupe de presse agricole. Une question est posée sur la motivation du rachat de GFA : c'est la complémentarité entre Terrenet et le journal France Agricole. Quelles en ont été les modalités ? Isagri a fait appel à un apporteur de capitaux dans la profession agricole : Sofiprotéol a été retenu et est entré dans le capital à hauteur de 25 %, Isagri, conservant 75 %.

La même année est repris EIC, premier éditeur de logiciels pour la profession comptable libérale, qui compte 8000 clients parmi les 12000 cabinets d'experts-comptables.

Il y a deux pôles d'activités chez Isagri : le pôle médias qui réalise un CA de 48 millions d'euro et l'informatique avec un CA de 83 millions d'euro

Le chiffre d'affaires global de l'ordre de 130 ME. est en progression constante.

La stratégie de développement est originale : Isagri a eu recours à des correspondants, ingénieurs agriculteurs, éloignés de la zone de prospection, qui sont intervenus à différents niveaux dans la vente. Cela a donné lieu à la création d'un réseau d'environ 500 correspondants ? qui perdure. La rémunération est à la commission et les correspondants sont à la fois vendeurs et formateurs.

A une question sur un parallèle possible avec la démarche coopérative, il est certain que du point de vue du capital il n'y a pas d'analogie : au début, l'école était majoritaire, puis le capital est passé aux mains de 25 porteurs. L'école est sortie du capital depuis quatre ans et, peu à peu, tous les petits porteurs. Jean-Marie Savalle a repris tout le capital. Isagri n'a jamais versé de dividendes, tout étant réinvesti. Bien sûr, les parts rachetées l'on été en fonction de l'essor de l'entreprise.

Le débat vient sur l'évolution de la gouvernance. Comment assurer la pérennité d'une entreprise portée par un seul homme ? Jean-Marie Savalle affirme qu'il ne vendra jamais et envisage de faciliter l'entrée de ses enfants dans l'entreprise. La pérennisation est assurée par la présence d'un directeur adjoint depuis 15 ans, lui-même secondé par une autre personne également formée. Bien entendu, sont utilisés les dispositifs de défiscalisation dans le cas de conservation d'entreprise et les possibilités de donation aux enfants.

Le débat se poursuit avec l'incidence du développement durable : c'est à la fois un ennui car il impose une évolution permanente des logiciels et aussi un point positif car c'est un facteur de développement du marché.

Le conseil informatique pourrait-il évoluer vers le conseil agricole, comme dans le cas d'Agritel allié à Vivescia ? Techniquement, Isagri pourrait le faire mais sa déontologie lui interdit de franchir le pas. La discussion évolue sur les terrains du conseil et du problème du financement des aménités.

Les logiciels sont certes protégés contre la copie, mais aujourd'hui une concurrence se crée avec les Chambres d'Agriculture qui développent des logiciels sur fonds publics et les commercialisent souvent à des prix très bas.

Actuellement, quelques 1400 personnes travaillent chez Isagri, ainsi réparties :

- 250 personnes à la recherche/développement avec 25 % du budget (un nouveau logiciel de comptabilité demande 200 années/homme),
- support technique : 200 personnes avec recours en période de pointe aux agriculteurs-correspondants qui multiplient ainsi l'équipe par trois,
- commerciaux 180,
- formateurs près de 100,
- marketing/communication autour de 100,
- journalistes 150,
- experts moins de 100,
- et, bien sûr, les services administratifs.

À l'exportation, les logiciels d'Isagri sont présents dans 45 pays et des filiales existent au Canada (y compris dans la zone anglophone), en Espagne, en Italie, en Belgique, en Suisse, au Maroc (en développement), en Roumanie (début) et, en Allemagne, une société de 20 salariés a été reprise.

Dans le pôle informatique se trouvent les activités de Satplan qui développe des logiciels embarqués pour l'agriculture de précision, domaine où la concurrence est vive avec les constructeurs qui, de plus en

plus, proposent leurs propres solutions. On y trouve aussi Hexanet, un ensemble de réseaux et lignes téléphoniques, qui héberge les applications informatiques de la clientèle.

L'évocation du pôle Média permet de revenir sur les choix des partenaires dans le rachat de GFA et de discuter de la rentabilité des différentes activités. Le débat se poursuit sur différents points comme :

- les succès et échecs dans le développement et la diversification de l'entreprise ; les échecs ont été nombreux comme, par exemple, dans les développements à l'étranger,
- la nature des ressources : les ressources sont récurrentes et assurées pour les 2/3 par le service à la clientèle où les petits comptes, s'adressant aux professionnels de l'agriculture sauf les officines de comptabilité, concernent à 90 % les agriculteurs.

Avant de visiter les différents services, Jean-Marie Savalle nous présente l'implantation des bâtiments sur le terrain acquis de par la nécessité d'avoir à quitter l'ISAB. Ces bâtiments, indépendants, forment les branches d'un U ; ils ont été construits en 1996, 2001 et 2007. Un quatrième a été construit en 2012, en prolongement de bâtiments existants et en limite extérieure, que nous verrons dans l'après-midi.

La salle de stockage des données est visitée en fin de matinée. Les équipements y sont redondants en protection contre les pannes. Le fonctionnement des appareils génère beaucoup de chaleur. Un groupe climatiseur permet de maintenir une température constante et l'excédent de calories chauffe le bâtiment. La protection contre les incendies se fait par l'argon, choix qui permet aux opérateurs de quitter les lieux sans risque d'asphyxie immédiate. Dans cette salle de stockage se trouvent les outils pour les besoins internes, ceux des clients et de Terrenet. Prochainement, le stockage sera ouvert aux clients agriculteurs et à la téléphonie. La connexion extérieure se fait par fibre optique ce qui permet un suivi à distance pour les astreintes. La quantité de stockage est de 15 terra-octets. Actuellement, sur une puissance installée de 40 KW un peu plus de la moitié est utilisée.

Après le déjeuner, retour en salle pour une présentation du projet 2014. Il s'agit d'un projet annuel par secteur qui se traduit par une lettre de mission pour chaque salarié. Le projet 2014 a été formalisé dès 2010. Il interpelle les salariés sur les valeurs fondatrices de l'entreprise : satisfaction des clients, qualité de la relation dans l'entreprise, volonté de progresser, écoute des clients, pragmatisme dans l'action. C'est l'application d'une règle 80/20 : 80% d'efforts pour 20 % de résultats.

En 2010, le projet a été construit sur une vision optimiste de l'avenir de l'agriculture, du marché informatique dans ce secteur et de l'avenir de l'entreprise avec le pari d'une augmentation de plus de 50 % des clients collaborateurs en quatre ans.

Pour 2020, les objectifs sont de maintenir deux pôles d'activités, d'avoir des succursales avec des salariés dans 20 pays, d'atteindre 200 millions de chiffre d'affaires, de compter dans l'entreprise 2000 salariés heureux et 200 000 clients satisfaits. Pour y parvenir les actions se développent selon quatre axes :

- monter en puissance à l'international (1 projet/an/pays),
- créer un partenariat majeur avec la profession comptable,
- rester leader de la « satisfaction client »,
- continuer la croissance : 100 postes ouverts/an, soit 150 avec le *turnover*; dans le souci que tout nouveau salarié s'intègre dans l'entreprise et en accepte les valeurs.

A une question sur la féminisation, il est précisé que les analystes-programmeurs sont très majoritairement des hommes alors que dans les métiers des services les femmes occupent 75 % des emplois.

Après une discussion apportant des précisions sur quelques points et l'évocation d'un partenariat avec l'AAF dans un échange de services, Christian Maréchal demande de remercier Madame Giacomuzzi pour les facilités dans l'organisation de cette journée.

Avant que Jean-Marie Savalle ne quitte le groupe, Gérard Tendron, Secrétaire perpétuel de l'AAF, le remercie chaleureusement pour son accueil, l'apport d'un témoignage d'une grande réussite d'abord personnelle dans un métier auquel il n'était pas prédestiné. Gérard Tendron souligne la démonstration de talent et de pugnacité pour la réussite économique d'un projet ambitieux qui se concrétise par une croissance continue tant interne qu'externe. C'est un succès économique où le pragmatisme a permis de satisfaire la cible avec les outils qui conviennent et où le développement de l'entreprise a été conduit avec une vision très claire des objectifs. Cette présentation a été très instructive pour les participants et nous restons très demandeurs d'échanges pour valoriser nos compétences réciproques.

En réponse Jean-Marie Savalle estime qu'il y a eu beaucoup de changements au cours de ces dernières décennies mais il concède qu'il a su en saisir les opportunités et ce n'est pas là son moindre mérite.

La visite des services se poursuit alors sous la houlette de François Louarn, responsable de la formation. Le bâtiment le plus ancien abrite la filière Isacompta, la première créée, où l'on trouve les équipes de marketing, d'informatique et de support logiciel auxquelles s'ajoute la filière commerciale. Dans le bâtiment où nous étions reçus se trouvent les filières végétales, animales et logiciels de paie.

François Louarn nous explique la démarche de création d'un logiciel : au départ l'écoute du terrain fait remonter les progrès des connaissances, les besoins des OPA, l'évolution des règlements, etc. Pour satisfaire ces nouveaux besoins une analyse fonctionnelle est lancée. Elle est suivie d'une analyse technique. Cela conduit à établir un cahier des charges qui va permettre de mettre en lumière les priorités de commercialisation et d'apprécier ce qu'il faut mettre en œuvre dans la nouvelle version.

Aujourd'hui Isagri commercialise 25 logiciels pour lesquels les utilisateurs ont un contrat de mise à jour.

L'assistance technique mobilise deux étages d'un bâtiment. Les demandes des clients, agriculteurs ou centres de gestion, reçoivent 75 % de réponses instantanées. Sinon, le délai maximum est de 24 h par téléphone ou mail. Le service assistance fonctionne en équipe avec des cursus de formation pour les points spécialisés.

Tous les ans en juin/juillet il y a une évaluation de la performance par rapport à la lettre de mission.

L'évolution de carrière après Isagri est évoquée. Ceux qui partent vont vers la banque, le conseil, la comptabilité ou s'établissent comme exploitants agricoles.

François Louarn insiste sur la dimension humaine de l'entreprise.

La visite se poursuit avec le dernier bâtiment récemment racheté et agrandi par une construction réalisée en trois semaines pour abriter l'activité matériel *via* Isagri Technology : le matériel est vendu avec le service; tout client dispose ainsi d'une offre clé en main. Satplan est également hébergé dans ce bâtiment, ce qui permet de terminer la visite par une démonstration de ISA 360, le module de guidage embarqué sur tracteur.

Après des remerciements à François Louarn pour sa disponibilité et la précision de ses explications, le groupe se sépare vers 17 heures.

L'ACADÉMIE D'AGRICULTURE DE FRANCE VISITE LE 75^{ème} SIMA⁽¹⁾

Comme lors des précédents SIMA, un groupe de membres de l'Académie d'Agriculture de France (AAF), auquel s'étaient joints quelques membres de l'AMOMA⁽²⁾ d'Ile de France était accueilli par Madame Martine Dégremont, Directrice du Salon, le jeudi 28 février 2013. Cette année la visite était organisée par notre confrère René Autellet, conseiller technologique du SIMA, en l'absence de Jean-Bernard Montalescot, empêché pour raison de santé, à qui tout le groupe souhaite la meilleure amélioration possible de son état.

Quelques chiffres pour situer l'importance de ce Salon : environ 1700 exposants venus de 40 pays pour y représenter 1070 marques. Les nouveaux exposants étrangers sont en progression de près de 30 % et les visiteurs proviennent de plus de 120 pays. Cette participation, en augmentation par rapport au précédent Salon, montre, selon Madame Dégremont, l'importance du SIMA aux yeux des visiteurs professionnels. Plusieurs ministres français, dont MM. Stéphane Le Foll et Guillaume Garot, et étrangers ont longuement visité le Salon et les très nombreuses délégations étrangères ont pu établir d'intéressants contacts.

Comme à chaque fois le Salon récompense de nombreuses innovations. Madame Dégremont nous cite la tablette de type Ipad liée au chauffeur et pouvant remplacer le terminal isobus du véhicule ou le tracteur polycarburant utilisant l'huile de colza pure, innovations que nous verrons au cours de la visite. Le SIMAGENA⁽³⁾ continue sa montée en importance avec pour exemple, la vente d'une génisse au prix remarquable de 2 8000 euros.

Cette année, l'attention du grand public n'a pas été seulement focalisée sur le SIA⁽⁴⁾. Le SIMA a été largement présenté par les grandes chaînes de télévision et la presse.

Jean-Marc Boussard, Vice-Président de l'AAF, remercie Madame Martine Dégremont pour la chaleur de son accueil, la facilité dans l'organisation de cette visite qu'elle encourage depuis de nombreux Salons. C'est, dit-il, pour nous un immense plaisir de continuer cette tradition de suivre avec intérêt les informations qu'elle nous délivre pour mieux situer l'apport des agroéquipements dans une agriculture œuvrant pour la préservation de l'environnement.

René Autellet nous indique le déroulement de la visite qui se terminera en début d'après-midi par la Galerie des innovations. Il assure, avec Gilbert Grenier, enseignant les agroéquipements à l'agro de Bordeaux, l'intérim de la fonction de commissaire technique, pour laquelle ils sont aidés par Frédéric Vigier, de l'Irstea⁽⁵⁾, que vous verrons plus tard.

Comme déjà signalé lors du précédent Salon, Les constructeurs prennent de plus en plus en compte l'impact des matériels, auxiliaires nécessaires de l'agriculture qu'ils conçoivent, pour un meilleur respect de l'environnement. Cette année encore les innovations primées, de la citation à la médaille d'or, contribuent à cet objectif. Trois grandes tendances se dégagent du palmarès des innovations :

1. *l'intégration de plus en plus poussée des TIC* (Technologies de l'information et de la communication) dans les machines agricoles. Cela permet une simplification de la mise en œuvre de machines de plus en plus complexes ;
 2. *l'amélioration de l'efficacité des machines* aux plans technique, économique et environnemental. Cette efficacité concerne aussi bien la qualité du travail que la performance énergétique des appareils ;
 3. *la prise en compte des exigences de sécurité* dans la conception ou l'aménagement des machines.
- René Autellet cite quelques exemples de machines distinguées que nous verrons au cours de la visite qui ne se limitera pas aux innovations.

La visite commence par le stand de l'APRODEMA⁽⁶⁾ où le groupe est accueilli par notre Consœur Laurice Pechberty accompagnée de Michel Morel, Président. Le secteur des agroéquipements dispose de 70 000 emplois dans l'industrie pour un chiffre d'affaires de 10 milliards. Il propose annuellement quelques

6 000 emplois à différents niveaux de compétence (du bureau d'étude au commercial). La formation dispensée dans les écoles spécialisées de ce secteur débouche sur des emplois et permet aussi de poursuivre vers l'enseignement supérieur. L'APRODEMA a fait beaucoup d'efforts depuis quelques années pour faire connaître les agroéquipements au grand public.

Le passage sur le stand de l'Irstea permet d'évoquer l'évolution du point de vue des agroéquipements depuis les années 70 où l'on pensait qu'il y aurait un frein dans leur développement technique et social. Or cela n'a pas été le cas et le machinisme a continué d'évoluer vers le gigantisme. Une idée lancée à cette époque par Jean Lucas au CEMAGREF⁽⁷⁾ vient d'être reprise et elle est en cours d'expérimentation : au lieu d'avoir un très gros tracteur avec un nombre impressionnant de socs pour le labour, on utiliserait de petites charrues 2 socs automotrices. Ces matériels seraient peu chers parce qu'ils feraient appels à des composants de grande diffusion (moteurs produits en grandes séries et composants électroniques aujourd'hui largement vulgarisés). Ils seraient télécommandés pour fonctionner de façon autonome. C'est ce qu'on appelle la « conduite en troupeau ». La présence d'un « superviseur » sur le terrain assure le pilotage en restant au milieu du « troupeau ». C'est Michel Berducat (Irstea) qui conduit ce projet appelé « *Safepatoon* », soutenu par l'ANR⁽⁸⁾. En continuant sur l'espace des « bonnes pratiques », Xavier Gautier (Arvalis-Institut du végétal) rappelle l'intérêt de ce carrefour de rencontre qui regroupe 12 partenaires depuis une dizaine d'années au SIMA. Il présente Farmstar, un logiciel d'aide au conseil agronomique développé par les Instituts végétaux pour un meilleur pilotage des parcelles.

Sur le stand Technoma, François Lacroix retrace l'historique de cette firme, créée pour développer le 1er tracteur enjambeur et qui, après le rachat de la société Vermorel, est entrée dans le domaine de la pulvérisation pour arriver aujourd'hui à la première place européenne dans ce secteur. L'AAF avait visité, il y a quelques années, l'usine Technoma d'Épernay.

L'aspect sécurité est abordé sur le stand New Holland. René Autellet rappelle la directive européenne « Machines » de 1994 qui aboutit à l'autocertification par les constructeurs qui s'engagent ainsi sur la conformité de leurs matériels. Jusqu'ici, la protection des organes en mouvements se faisait par des capots que l'on ouvrait dans le meilleur des cas avec une clé spéciale. Le progrès primé est l'ouverture sans outil mais seulement après arrêt des mouvements.

Le passage sur le stand Pérard permet de rencontrer Patrick Pérard actuel président d'AXEMA⁽⁹⁾ qui parle de la fréquentation du Salon. Il insiste sur l'importance des visiteurs étrangers et les besoins d'experts qu'ils expriment.

Un exemple d'utilisation des TIC pour piloter le réglage d'un distributeur d'engrais est vu sur le stand de Kverneland. Avec une tablette isobus, on renseigne par Internet une base de données sur les caractéristiques de l'engrais pour obtenir les réglages à appliquer, ce qui se fait automatiquement. Un autre exemple, cité plus haut par Madame Dégremont, a valu une médaille d'or à Claas. C'est une application Terminal Universel Isobus pour tablette de type Ipad. Ce n'est plus un Terminal dédié au tracteur mais un produit grand public qui devient le Terminal universel du chauffeur qui peut l'emmener partout avec lui, aussi bien sur un tracteur pour les réglages des outils, que pour piloter une installation de biogaz ou pour regarder ses photos en famille.

Sur le stand Claas, le groupe est invité sur « l'espace cent », espace dédié au centenaire de la firme, où il est accueilli par le Président de Claas France, Thierry Panadéro, qui fait un rappel historique de cette firme familiale aujourd'hui dirigée par une femme Madame Katrina Claas-Mühlhauser. Créée à Harsewinkel, où se trouve toujours le siège social, la firme a établi sa notoriété grâce à un brevet sur un noueur à ficelle et en a même fait son logo. Aujourd'hui avec 3000 salariés sur notre territoire, et deux usines au Mans (tracteurs) et à Metz (presses), la firme est très bien implantée en France. A une question sur la localisation des bureaux d'études, il est répondu que chaque usine fait la recherche/développement pour les produits qu'elle fabrique. Son souci d'innovation se traduit régulièrement par les meilleures récompenses du SIMA. Le Président invite le groupe à un sympathique repas.

La visite se poursuit l'après-midi toujours sur le stand Claas pour une innovation distinguée concernant les réglages automatiques de la moissonneuse-batteuse. De nombreux capteurs, en particulier de mesure de la quantité de grains propres dans le retour des otos, permettent le pilotage des grilles, du régime de ventilation et des éléments de séparation. Ainsi les ajustements se font en temps réel pour optimiser le débit de la machine.

Un refroidissement anti-encrassement sur moissonneuses-batteuses vaut une médaille d'argent à Claas. Inspiré du système de refroidissement des véhicules du désert, un ventilateur à régime variable est

positionné à plat sur le toit, derrière la trémie et le moteur. Aspiré par le haut, l'air traverse le radiateur avant de s'échapper par de longues grilles latérales, créant un effet de rideau qui empêche la poussière de monter et d'encrasser le radiateur.

Geringhof est cité pour un cueilleur à maïs indépendant des rangs. Un double système de rabatteurs, permet de redresser les tiges qui ne se présentent pas dans l'axe du bec cueilleur.

Sur le stand Tama (Israël) nous est présentée une solution de protection contre les moisissures dans les balles rondes au cours du stockage extérieur, qui consiste en un filet doublé d'une enveloppe plastique.

Au passage sur le stand Laforge est abordé le problème de l'équilibre des masses sur un tracteur. Spécialisée dans les relevages avant des tracteurs pour des outils frontaux portés ou semi-portés, la firme a développé un abaque de calcul du lestage.

Proposer un tracteur avec un moteur polycarburant pouvant fonctionner à l'huile de colza pure, n'est pas en contradiction avec les mises en garde ces dernières années contre l'emploi d'une huile végétale pure dans un moteur Diesel moderne ? C'est pourtant la démarche de John Deere dans un souci d'indépendance énergétique qui lui vaut une médaille d'or. A l'état de concept pour l'instant, les caractéristiques du moteur ont été adaptées pour qu'il puisse accepter tout carburant, en respectant les exigences antipollution de la phase IV.

Une attention est portée au Roboconcept Iazard 45H de Dario, automoteur sur chenilles hybride et télécommandé. Il permet de faire des travaux de débroussaillage en conditions de pente allant jusqu'à 55°.

Comme lors de chaque visite, certains dans le groupe s'étonnent de cette course au gigantisme des matériels, moissonneuses-batteuses de 12 m de largeur de coupe, charrues de plus de 10 socs, tracteurs de plus de 300 ch, bennes énormes, etc. Y a-t-il vraiment une clientèle pour ces produits ? En réponse, il y a certes une forme d'agriculture qui recherche ces matériels, mais il ne faut pas oublier que le SIMA est une vitrine où l'on expose une image que l'on veut toujours la plus flatteuse possible et ces matériels ne constituent pas, loin s'en faut, l'essentiel des fabrications.

La visite se termine par la Galerie des innovations qui présente toutes les machines qui ont reçu une médaille ou ont été citées. Les innovations et les tendances des agroéquipements de ce 75ème SIMA seront sans doute présentées lors d'une séance libre de l'Académie dans les mois qui viennent.

Le groupe se sépare vers 16 heures.

Claude **Sultana**, section 9

1 -	SIMA	Salon international du machinisme agricole
2 -	AMOMA	Association des membres de l'Ordre du Mérite agricole
3 -	SIMAGENA	Salon international du machinisme agricole et de la génétique animale
4 -	SIA	Salon international de l'agriculture
5 -	Irstea	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
6 -	APRODEMA	Association professionnelle de développement de l'enseignement du machinisme agricole et des agroéquipements
7 -	CEMAGREF	Centre du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts, devenu Irstea
8 -	ANR	Agence nationale de la recherche
9 -	AXEMA	Regroupement des syndicats des industries et de la diffusion des agroéquipements

Les travaux de l'Académie d'Agriculture de France

L'Académie a pour mission essentielle de présenter le plus rapidement possible les travaux les plus récents et de confronter les expériences pour élaborer des synthèses en considérant divers aspects : scientifiques, techniques, économiques, sociaux, etc. Elle s'attache à l'ensemble « Agriculture, Alimentation, Environnement » et à son insertion dans la société et les territoires. D'essence biologique, elle couvre dans un esprit pluridisciplinaire les domaines scientifiques, techniques, économiques, juridiques et sociétaux s'y rapportant.

L'Académie tient séance publique le mercredi après-midi, 18, Rue de Bellechasse à Paris. Les ordres du jour sont disponibles sur son site Internet (<http://www.academie-agriculture.fr>), où l'on trouve les résumés des communications présentées en séances, ainsi que des notes proposées par des chercheurs et publiées dans les trois mois. Tous les textes publiés sont soumis à un Comité de lecture. L'Académie se réserve l'exclusivité des droits de reproduction des articles publiés sur son site Internet et dans ses Comptes Rendus.

L'abonnement au site permet de consulter le texte intégral de toutes les communications en séance, de toutes les notes de recherche, de conjoncture ainsi que les notes académiques. Des présentations et analyses d'ouvrages, l'annonce de publication d'ouvrages et de thèses y sont aussi disponibles, ainsi que des liens Internet avec les principales organisations traitant de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, tant françaises qu'étrangères.

Publication éditée par l'Académie d'Agriculture de France

avec le concours de :

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Administration, rédaction et édition

Académie d'Agriculture de France
18 rue de Bellechasse 75007 PARIS
Tél. 01 47 05 10 37 – Télécopie : 01 45 55 09 78
C.C.P. 3829-19 X Paris

Secrétaire perpétuel et Directeur de la Publication : Gérard Tendron

Courriel : secretaire-perpetuel@academie-agriculture.fr

Responsables de l'édition : Christian Ferault et Jean-Claude Mounolou

Courriel : vice-secretaire@academie-agriculture.fr

Trésorier perpétuel : Jean-Paul Lanly

Courriel : tresorier-perpetuel@academie-agriculture.fr

Secrétariat de rédaction : Christine Ledoux-Danguin

Courriel : christine.ledoux@academie-agriculture.fr

Site Internet : <http://www.academie-agriculture.fr>

Imprimerie de Montligeon – 61400 St Hilaire le Châtel

Assistante de direction : Corinne Migné

Courriel : corinne.migne@academie-agriculture.fr

ABONNEMENTS

Abonnement Comptes Rendus papier (étranger)

100 €

Abonnement Comptes Rendus papier (France)

80 €