



HAL
open science

La sélection du soja en France : Quel état des lieux ?

Pierre P. Roumet, Sophie Rooryck, Pascal Sartre, Muriel Tavaud-Pirra

► To cite this version:

Pierre P. Roumet, Sophie Rooryck, Pascal Sartre, Muriel Tavaud-Pirra. La sélection du soja en France : Quel état des lieux ?. Innovations Agronomiques, 2010, 11, pp.175-186. 10.17180/ez2d-fe24 . hal-02656565

HAL Id: hal-02656565

<https://hal.inrae.fr/hal-02656565v1>

Submitted on 29 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

La sélection du soja en France : Quel état des lieux ?

Roumet P¹, Rooryck S²., Sartre P¹., Tavaud-Pirra M³.

(1) UMR DiaPc , INRA Domaine de Melgueil , 34130, Mauguio, France

(2) Gie Soja, Domaine de Melgueil , 34130 Mauguio France

(3) UMR DiaPc , Supagro, 2 place Viala, 34000 Montpellier Cedex 2, France

Correspondance : Pierre.Roumet@supagro.inra.fr

Résumé

Alors que le soja est une culture de première importance dans les échanges mondiaux, cette espèce reste peu développée en France malgré les efforts mis en œuvre par la recherche, le développement et la demande croissante des transformateurs de graines non OGM en alimentation humaine et animale.

Après avoir revu quelques traits d'histoire évolutive de cette espèce, cette présentation va s'attacher au développement de l'offre variétale en France et à la nature des programmes des recherches ayant impacté cette création variétale. Les travaux liés à la connaissance de la physiologie de la plante, à sa réponse adaptative à différents stress sont résumés. L'effort réalisé par le GIE soja pour intégrer ces connaissances afin de maintenir et améliorer l'efficacité des programmes de sélection sur cette espèce est illustré à partir de 2 exemples : la création de nouvelles populations et l'amélioration de la teneur en protéines.

Mots-clés : Soja, sélection, diversité, génétique, création variétale

Abstract: Soybean Breeding in France; state of art

Cultivated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.], one of the major crops used as animal and human foods, is mainly cultivated in Argentina, Brazil, China and USA. In France, cultivated area remains low despite the interest of research and development institutes and the request of industry for non GMO seeds. After a presentation of the evolutionary history of this species, this paper is focused on the plant breeding effort realised in France in connection with research works. Special attention was paid to plant physiology knowledge development, plant stress tolerance which impacted the development of new raw material for plant breeding. The effort done by GIE Soja to continue soybean breeding programme is illustrated through 2 examples: hybridization to create new segregating populations and the improvement of seed protein content.

Keywords: Soybean, diversity, genetic, plant breeding

Introduction : une espèce d'importance économique majeure mais peu cultivée en France

En un peu plus d'un demi-siècle, l'importance économique mondiale du soja a explosé : cette espèce est passée du statut de plante fourragère et de plante dédiée au régime alimentaire asiatique au statut de production agricole de première importance et de fer de lance de l'intensification agricole.

Destinée à l'alimentation animale et humaine, cette espèce est cultivée principalement aux Etats Unis en Argentine, au Brésil et en Chine (103 millions d'ha, 2010, Source: Oil world 2010). Cette expansion s'est appuyée sur une sélection très active qui a permis de développer au cours du 20^e siècle, des cultivars adaptés à une large gamme de conditions climatiques allant de l'équateur à des latitudes très septentrionales (0 à 60°).

La culture du soja n'a pas en France cette importance. Depuis la fin du 19^e siècle, ses atouts agronomiques et économiques ont été régulièrement redécouverts dès que les approvisionnements en oléagineux et/ou protéagineux (arachide essentiellement) devenaient incertains. Le développement actuel de la culture et des programmes de sélection ont pour origine la menace d'embargo des Etats-Unis (1973) à l'encontre de la Communauté Européenne qui a ainsi pris brusquement conscience de son extrême dépendance vis à vis des importations pour son approvisionnement en protéines.

Aujourd'hui, les besoins en matière de soja pour la France restent très largement supérieurs à sa capacité de production : elle importe chaque année près de 4 millions de tonnes de tourteaux de soja (3,7 en 2009, Labalette et al., soumis) alors que la production est inférieure à 0,5 millions de tonnes de graines. En dépit de ces besoins et des atouts de cette culture en tant que précédent cultural (Labalette et al., soumis), le soja n'arrive pas à trouver une place au sein de la sole française.

Les surfaces ont rarement été stables et ont fluctué entre 20 000 et 130 000 ha sur l'ensemble de la période 1980-2010 (Figure1). En 2010, cette surface représentait environ 51 000 ha ; 65 % étaient localisés dans le Sud-Ouest (80 % avec une conduite irriguée) et 35 % cultivés dans la zone Centre-Est, en sec. La totalité de cette culture est non OGM et environ 15 % ont été cultivés en bio en 2010 (Jouffret, com. pers.). En 2008, dans un volume récolté certes faible, l'alimentation humaine a absorbé pour la première fois plus de la moitié de cette récolte. Excepté l'année 2003 qui fut une année très sèche, les rendements moyens sont supérieurs à 25 q/ha depuis 20 ans.

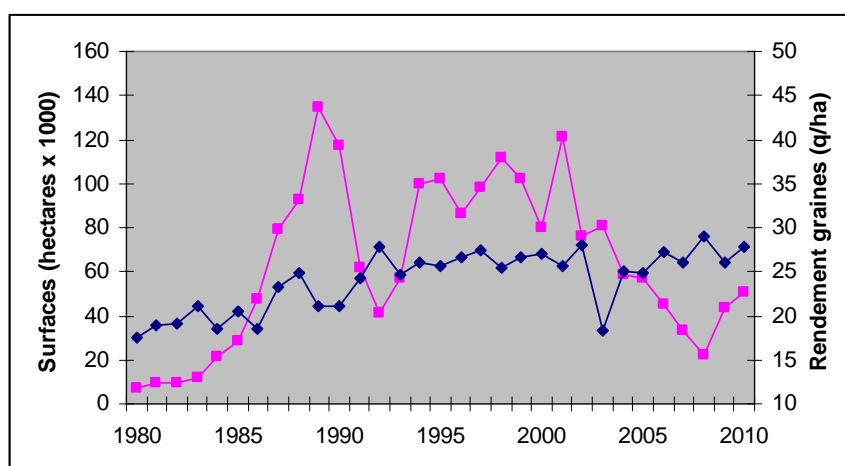


Figure 1 : Evolution des surfaces de soja en France (trait rose) et des rendements moyens (trait bleu) au cours de la période 1980-2010.

1- Histoire évolutive et diversité génétique

Cette importance économique impacte la priorité accordée à la conservation des ressources génétiques : plus de 170 000 accessions de soja (Hammer, 2003) sont conservées ex situ dans les collections internationales. Ces accessions correspondent à différentes étapes de l'histoire évolutive de cette espèce.

La domestication de *Glycine max* à partir de la forme sauvage (*Glycine soja* Sieb. Zucc.) est intervenue en Chine ; mais il n'y a pas de consensus sur une région plus précise (Carter et al., 2004). Les premières références littéraires chinoises faisant état de l'utilisation de cette espèce remonteraient à la dynastie Sang (1700 -1100 BC).

La forme cultivée diffère de *G. soja* par une série de caractéristiques correspondant classiquement au syndrome de la domestication : différence de taille des gousses et des graines (facteur 10 entre les 2 formes pour le poids moyen d'un grain) ; le port de la plante : dressé pour la forme cultivée et rampant pour la forme sauvage ; absence du phénomène de déhiscence des gousses pour les cultivars alors que c'est une composante de la dissémination des graines à maturité pour la forme sauvage.

A partir de la Chine, la culture du soja s'est étendue à la Corée et au Japon (2000 ans BP) et, par la suite, aux autres régions d'Asie. Le soja est apparu en Europe au 17^e siècle. En 1712, Kaempfer (cité par Hymowitz, 1970) serait le premier à avoir présenté cette espèce comme une plante d'intérêt agronomique. Tout au long du 18^e siècle, des introductions récurrentes de semences de soja par les missionnaires ont alimenté différentes collections comme celles du Kew Garden à Londres ou du jardin des Plantes de Paris.

En 1765, les premières semences de soja en provenance de Chine *via* Londres arrivent en Amérique du Nord (Hymowitz, 2005). Jusqu'en 1898, de multiples accessions sont collectées et acheminées vers les Etats Unis par différentes communautés : scientifiques, marchands de semences, commerçants, militaires, migrants générant un flux difficile à caractériser. Ce n'est qu'à la fin du 19^e siècle, que le tout nouvel office des 'Foreign Seed and Plant Introduction' va centraliser les différentes introductions (Hymowitz, 1984) et les répertorier.

Ces épisodes de domestication et de migration ne sont pas sans conséquence sur la diversité génétique disponible dans les différentes régions où l'on peut désormais trouver du soja : une réduction importante de la diversité génétique est facilement observable entre, d'une part, les formes sauvages et domestiquée en Chine et, d'autre part, entre les populations de pays utilisées en Asie, Europe et Amérique.

Sur la base de l'indice de Nei (He) construit à partir d'informations moléculaires nucléaires (marqueurs RAPD), Chen et Nelson (2004) ont estimé cette perte de diversité génétique d'environ 35 % entre formes sauvage et cultivée. Des travaux plus récents basés sur de l'information de séquences (102 gènes) ont montré que 81 % des allèles rares présents chez la forme sauvage avaient été perdus au cours de la domestication (Hyttén et al., 2006).

Les observations faites à partir de marqueurs cytoplasmiques ne sont guère différentes : parmi les 52 haplotypes décrits pour la forme sauvage (SSR chloroplastiques), seulement 8 ont été retrouvés au sein des génotypes cultivés (Xu et al., 2002).

Les différentes comparaisons réalisées sur des bases phénotypiques (Cui et al., 2001), des coefficients d'apparentement (Delannay et al., 1983 ; Gizlice et al., 1994 ; Cui et al., 2000), des données de séquences (Narvel et al., 2000 ; Thompson et al., 1998 ; Hyttén et al., 2006) entre collections de cultivars traditionnels d'Asie et d'Amérique du Nord ont systématiquement démontré le faible niveau de polymorphisme des cultivars américains. Aujourd'hui, le fait que moins d'une vingtaine d'accessions soit à l'origine de plus de 85 % de la base génétique des cultivars développés est bien établi.

Si de nombreux travaux concernent les pools génétiques asiatiques et américains, la diversité génétique du pool européen a été beaucoup moins bien documentée. Les travaux récents de Tavaud-Pirra et al., (2009) réalisés sur la base de marqueurs microsatellites nucléaires et cytoplasmiques suggèrent que la diversité de ce pool est intermédiaire entre pool asiatique et américain, même si globalement elle reste assez faible (+ 8 % seulement par rapport au pool Nord américain).

En parallèle à la documentation de cette histoire évolutive de l'espèce et des conséquences sur la diversité génétique des différents pools génétiques, ces approches ont permis à de nombreuses équipes de proposer des core-collections représentatives de chaque pool génétique afin de faciliter les évaluations génétiques et agronomiques de ce matériel ainsi que la constitution de panels pour la mise en place de démarches de génétique d'association.

2- Offre variétale en France

Quelque soit le groupe de précocité, l'importation de variétés d'origine américaine, canadienne, suisse (pour l'essentiel) a permis d'initier l'offre variétale pour les différentes régions de culture. Cette offre n'a pas été mise en place de façon simultanée ; elle a suivi un gradient sud nord. Les premières importations de semences correspondaient à des variétés américaines appartenant majoritairement aux groupes de maturité 0, I et II. Elles sont à l'origine du développement de la culture dans la région Sud-Ouest de la France. Progressivement, cette offre variétale s'est élargie avec l'apparition des variétés canadiennes précoces (Mapple Arrow sélectionnée par l'Université d'Ontario, groupe 00) puis de variétés très précoces (groupe 000) issues également de l'activité de sélection canadienne ou de la Station Fédérale de Recherches Agronomiques de Changins (Suisse). Les variétés issues de ces programmes ont contribué de façon déterminante à l'élargissement de l'offre variétale et au développement de la culture dans les zones situées au nord de la latitude 45°. La mise en place des programmes de sélection en France a permis progressivement de relayer ces variétés avec du matériel issu de programmes nationaux.

3- Les programmes d'amélioration du soja en France : le cadre général

L'amélioration de cette plante a fait l'objet, en France, d'investissements continus depuis 35 ans. Quantitativement ces moyens investis sont restés modestes, limités par des aspects tels que l'autogamie de la plante et, bien sûr, la faible importance des surfaces cultivées. Ces programmes ont, par conséquent, toutes les caractéristiques de programmes jeunes : une certaine fragilité, peu de lisibilité et d'éligibilité mais beaucoup d'enthousiasme. Pour soutenir le développement des programmes de sélection sur cette espèce, un groupement réunissant les différents acteurs de la filière (interprofession, Obtenteurs, Cetiom, Inra) a été créé en 1981 pour mettre en synergie les efforts et connaissances de chacun. Cette structure, le GIE Soja, rassemble obtenteurs, instituts de recherche et technique, office interprofessionnel. Il a facilité la mise en œuvre depuis 30 ans d'actions cohérentes sur cette espèce, généré et pérennisé un flux d'échanges et de connaissances régulier entre partenaires de la filière, mutualisé les moyens pour la mise en place des travaux de recherche et de création variétale. Sur le plan de la création variétale, l'action de ce GIE s'est inscrite autour de 3 items :

1. La caractérisation de la diversité génétique, son évaluation et sa valorisation dans le cadre de programmes d'amélioration.
2. L'adaptation de cette espèce aux conditions pédoclimatiques des principaux bassins de production en France : Sud-Ouest et Centre-Est.
3. La mutualisation de moyens de sélection : réalisation des hybridations, réseau d'expérimentation, flux de matériel végétal,

4- Les caractères cibles : une priorité forte accordée dans un premier temps à la productivité et aux facteurs de régularisation du rendement.

4-1. Productivité

Comme pour beaucoup d'autres espèces d'intérêt agronomique, la productivité a été LE critère sur lequel les programmes de sélection se sont arc-boutés pour développer la culture. Les premières variétés cultivées avaient un développement végétatif important ; les plantes étaient de grande taille, avaient un type de croissance de type indéterminé pour lequel la croissance végétative se poursuivait pendant le développement reproducteur. La sensibilité à la verse de ces géotypes notamment les groupes de maturité les plus tardifs (groupes I et II) posait problème dans la gestion des apports d'eau, et était à l'origine de variations de productivité importante.

4-2. Résistance à la verse

Au milieu des années 80, la stabilisation des performances agronomiques, notamment pour les groupes de maturité tardifs correspondants à la moitié sud de la France devient prioritaire. Des critères telle que la résistance à la verse sont pris en compte. Cette résistance à la verse a été travaillée sans modification de l'architecture de la plante mais aussi en élargissant l'offre variétale à des types architecturaux nouveaux. C'est dans ce cadre qu'ont été développés les travaux portant sur les types de croissance.

A cette époque, l'essentiel des variétés cultivées dans les zones tempérées est de type indéterminé alors que les variétés des zones tropicales sont de type déterminé avec une séparation entre les phases végétatives et reproductrices.

Cette répartition géographique des types de croissance est liée au fait que l'extension de la culture de soja s'est faite à partir d'une base génétique étroite. A ces deux types de croissance s'ajoute un type semi-déterminé dont les caractéristiques liées à la transformation du bourgeon terminal végétatif en bourgeon reproducteur sont intermédiaires entre les 2 types précédents.

Plus courtes que les indéterminées, les plantes déterminées et semi-déterminées sont plus résistantes à la verse; elles compensent un nombre réduit de sites fructifères par la présence d'un nombre plus important de gousses à chacun d'entre eux ; par ailleurs, la séparation plus précoce entre phases végétatives et reproductrices simplifie la gestion de l'irrigation au cours de la phase de remplissage des graines. Les travaux de recherches (Cooper, 1981 ; Vidal et Hanafiah, 1985) et de création variétale ont permis d'évaluer et de comparer les potentialités agronomiques de ces types de croissance, la création d'un matériel tempéré déterminé et semi-déterminé ainsi que la diffusion de variétés déterminées et semi-déterminées dans les régions traditionnellement réservées aux types indéterminées. Les variétés Elf, Sprite, Hobbit déterminées de groupe II et III sont diffusées aux Etats-Unis et, en France, les variétés semi-déterminée (Alaric en 1988) et déterminée (Spot en 1990) ont été inscrites.

4-3. Amélioration de l'adaptation de la plante aux conditions de culture : la nutrition azotée

Comme toutes les légumineuses, le soja pourvoit à ses besoins azotés grâce à deux métabolismes azotés : la fixation symbiotique de l'azote et l'assimilation du nitrate. L'amélioration de la fixation symbiotique a fait l'objet de beaucoup d'attention de la part de microbiologistes, physiologistes généticiens et agronomes.

Dans un premier temps, le travail a porté sur la bactérie *Bradyrhizobium japonicum*, espèce non endogène dans les sols français. L'amélioration de la capacité fixatrice des souches bactériennes a été travaillée. Sur la base de ses capacités fixatrices et de sa faible compétitivité dans les sols vis-à-vis

d'autres souches (ce qui permettait d'envisager son remplacement à terme), la souche G49 a été sélectionnée par les microbiologistes pour inoculer les sols lors du semis (Obaton et Rollier, 1970). Cette souche est encore celle qui est utilisée aujourd'hui.

De nombreux programmes de génétique et d'amélioration se sont focalisés sur l'amélioration de l'efficacité de la fixation d'azote atmosphérique en condition optimale de fonctionnement de cette association symbiotique : absence de stress hydrique, de reliquats azotés dans le sol. Tous ces travaux ont eu peu d'impact sur l'amélioration de la productivité que ce soit en France (Burias et Planchon, 1990) ou dans les autres pays où cette approche a été développée (Heichel et al., 1984 ; Arrendell et al., 1989 ; Saint Clair et Bliss, 1991 ; Kipe-Nolt et Giller, 1993).

Une alternative a consisté à travailler non plus uniquement sur le métabolisme de fixation mais sur le couple fixation / assimilation du nitrate. En effet, ces deux mécanismes sont successifs dans le temps mais également antagonistes puisque la présence de NO_3 dans le sol inhibe la formation des nodosités. L'objectif des travaux était d'améliorer la nutrition azotée de la plante *via* l'efficacité de cette fixation symbiotique en présence de nitrate dans le sol. Des génotypes capables d'initier la nodulation (souche G49) en présence de nitrate ont été identifiés lors de cribles de collections en Australie ou en France (Betts et Herridge, 1987 ; Serraj et al., 1992) ou à l'issue de programmes de mutagenèse (lignées super ou hyper nodulantes : Carroll et al., 1985 ; Gremaud et Harper, 1989). La lignée tolérante, Tielingbaime identifiée par Serraj et al. (1992), a permis la création de populations dont l'étude a permis de préciser les bases génétiques et l'expression de ce caractère.

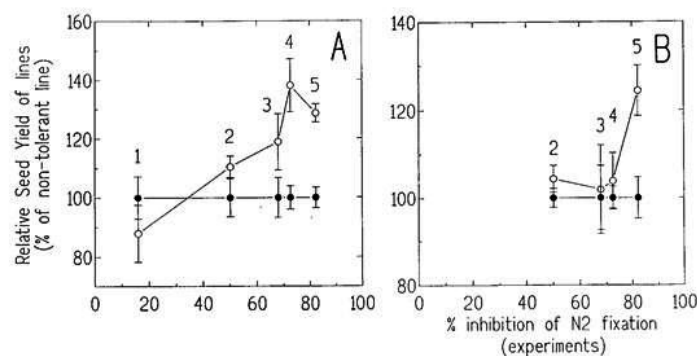


Figure 2 : Rendement en graines dans différentes conditions d'inhibition de la fixation symbiotique pour 2 groupes de précocité (Fig 2a et Fig. 2b). Le rendement est exprimé en % des lignées de soja ne pouvant maintenir une fixation d'azote symbiotique en présence de nitrate. Les lignées tolérantes sont représentées par un rond évidé et les non tolérantes par un rond plein. Chaque groupe comprend 4 à 6 génotypes (Raffin et al., 1995).

L'héritabilité de ce trait ($H^2=0.39$, Raffin et al., 1994) était du même ordre de grandeur que celle de la matière sèche totale ou du rendement en graines ($H^2 \approx 0.30$, caractères à héritabilité faible à moyenne). L'analyse des corrélations génétiques a suggéré qu'une sélection pour le taux d'azote fixé en présence de nitrate permettait d'augmenter le rendement en graines ($r=0.70$, $p<0.01$) sans affecter leur teneur en protéines (-0.34 , NS).

L'évaluation de couples de lignées tolérantes *vs.* sensibles au nitrate, réalisée dans différentes conditions de culture, a montré que ce caractère de tolérance au nitrate ne s'exprimait qu'en milieu riche en azote minéral, les génotypes tolérants maintenaient une capacité fixatrice supérieure à celle des génotypes sensibles. Cette capacité fixatrice plus importante dans les milieux riches en azote minéral s'accompagnerait d'un potentiel de production plus important (Figure 2).

Ce matériel « tolérant au nitrate » a été utilisé comme géniteur dans les programmes de sélection.

4-4. Tolérance aux températures basses à floraison.

La sensibilité du soja aux faibles températures a été très rapidement identifiée comme le facteur limitant majeur du développement de la culture dans les régions situées au dessus de 45° de latitude Nord (Holmberg, 1973 ; Soldati, 1976). Dans ces conditions de culture, les faibles températures affectent le taux de nouaison et, à maturité, l'indice de récolte, trop faible, limite la productivité de la plante. L'extension de l'aire de culture vers le nord imposait donc d'améliorer la tolérance aux basses températures notamment lors de la floraison. Ce travail a fait l'objet de travaux importants en matière de création variétale.

Pour cela, le matériel génétique issu des îles d'Hokkaido (Japon), de Sakhaline et Kouriles (URSS), au climat estival frais et humide a été largement utilisé (en particulier le génotype Fiskeby V), pour améliorer cette tolérance aux basses températures à floraison (Holmberg, 1973 ; Voldeng, 1988 ; Schori et al., 1988). Concrètement, la sélection de lignées tolérantes aux faibles températures a été faite sur des descendances soit dans des pépinières d'altitude soit en conditions contrôlées (seuil 12 °C) (Forest, comm pers).

Ces travaux ont permis le développement et l'avènement de variétés appartenant aux groupes de maturité très précoces (groupes 00, puis 000) avec des variétés pionnières (Mapple Arrow, Labrador, Ultra, Sito) qui ont démontré qu'il était possible d'allier précocité et rendement dans ces régions 'Nord'.

5- La qualité des graines : le soja est considéré en France comme un protéagineux

L'irrégularité de la teneur en protéines des lots de soja produits en France (39 à 42 % de la matière sèche classiquement), la baisse régulière de la teneur en protéines des nouvelles variétés inscrites au début des années 90 (cas des groupes 00 et I), ont incité souvent les industriels à préférer, à cette époque, les lots d'importation à ceux produits localement.

Pour y remédier, la teneur en protéines de la graine est prise en compte dans le schéma de sélection. A partir de 1996, les règles d'inscription CTPS sont modifiées et la notion de rendement protéique va remplacer le rendement en graines pour la cotation des lignées candidates à l'inscription au catalogue variétal.

La teneur en protéines est un caractère assez facile à travailler en sélection du fait de sa bonne héritabilité ; toutefois il présente une corrélation génétique négative avec le rendement en graines. Des programmes spécifiques sont développés à partir des années 1994/1995 pour améliorer la teneur en azote des graines et obtenir une expression plus régulière de ce caractère dans les différentes conditions de culture. Le développement à l'INRA, au début des années 2000, d'une méthode non destructive, rapide, basée sur la spectrométrie proche infra-rouge permettant d'estimer la teneur en protéines des graines va faciliter la prise en compte de ce critère dans le processus de sélection. Mise à disposition des sélectionneurs, cette méthode permettra d'intégrer ce critère dans le processus de sélection dès les générations de sortie de SSD.

Cette prise en considération de la qualité de la graine dans les processus de sélection et d'inscription va impacter très rapidement les caractéristiques des nouvelles inscriptions. Ainsi, à partir de 2002, les performances vont remonter et revenir au niveau de celles de la fin des années 80 (Bagot, 2004).

Cette teneur en protéines est le critère essentiel pour la qualité de la graine : la teneur en huile n'est absolument pas prise en compte dans les programmes actuels. La graine de soja contient également des facteurs anti-trypsiques (40 et 50 UTI/mg, unité trypsine inhibiteur ; AFZ & Cereopa, 2010), qui diminuent la digestibilité des protéines. Ces composés sont détruits par la chaleur au cours du processus de trituration et ne font pas l'objet de travaux de génétique en France.

6- Bilan du progrès génétique

L'ensemble des travaux présentés ici est issu d'une étude menée par le CTPS (Bagot, 2004 ; Luciani 2004 ;) dans le cadre de l'évaluation des progrès génétiques de différentes espèces au cours de la période 1988-2002. Ces travaux sont basés sur l'exploitation des données acquises lors des essais VAT (valeur agronomique et technologique).

En moyenne, l'augmentation des rendements pour la période 1988-2003 était de 33 kg/an/ha pour les 2 groupes de maturité les plus cultivés (00 et I) soit une progression de 0.87 %/an. La teneur en protéines étant restée quasi stable au cours de la même période (+0.06 points soit une légère progression de 0.14 %), le rendement protéique a, par conséquent, progressé quasiment sur le même rythme que la productivité (12 kg/an/ha soit 0.86 %/ an).

Ces progrès génétiques sont très comparables à ceux annoncés dans le même type d'étude aux USA (15 kg/an /ha à 17 kg/an/ha, Fehr et al., 1987 ; Gilizce et al., 1995) soit des rythmes de progression inférieurs à 1 %.

Les données « soja » obtenues dans le cadre de l'étude du CTPS étaient sensiblement inférieures à celles obtenues dans le même temps pour d'autres espèces. Pour le tournesol, par exemple, les progrès pour la productivité et le rendement en huile étaient respectivement de l'ordre de 47 kg/ha/an/ - soit 1.5 %- et 28 kg/ha/an soit 1.70 %.

L'amélioration de la résistance à la verse est assez régulière au cours de cette période pour les groupes tardifs (I et II) cultivés essentiellement en irrigué, et peu lisible pour les groupes les plus précoces cultivés essentiellement en sec.

7- Les méthodes de sélection

La biologie florale du soja est celle d'une plante autogame : la fécondation intervenant alors que le bouton floral est encore fermé. Compte tenu de cette cléïstogamie, la probabilité d'obtenir des allofécondations est très faible (inférieure à 1%). Les variétés cultivées sont des lignées pures et les méthodes de sélection classiques pour ce type de matériel végétal: Bulk et SSD¹ sans filiation méthode préconisée par Brim (1966) précisément pour le soja. Outre le fait qu'elle harmonise la contribution de chaque plante à la constitution de la génération suivante et qu'elle retarde la sélection à des générations avancées, cette méthode permet une manipulation aisée des premières générations (F2, F3, F4) qui suivent l'interfécondation.

Le soja étant une plante de jours courts (Allard et Gardner, 1930), la durée de son cycle de culture peut être réduite de façon conséquente (jusqu'à 50 %) en condition de jours courts et par l'utilisation de température élevées. Sur cette base, il est possible de réduire la durée de phase de consanguinisation en réalisant 3 générations par an.

L'ensemble de ces considérations, ainsi que la faible héritabilité des caractères comme le rendement en graines, l'importance autant supposée qu'avérée de la composante additive x additive dans la variance génétique, ont conduit la plupart des sélectionneurs à opter pour une stratégie de type SSD.

7-1. Amélioration des techniques de sélection

Différentes améliorations techniques ont été proposées pour aménager la méthode SSD qui reste la méthode de référence pour cette espèce. Ces aménagements ont concerné chacune des 3 étapes essentielles de ce schéma d'amélioration : l'hybridation, la fixation de lignées et l'évaluation des performances multi locales.

¹ SSD : Single Seed Descent

Hybridation : Cette étape est très compliquée à mettre en œuvre dans le cas du soja. La taille de la fleur (1 à 2 mm) et une fécondation qui intervient avant que la fleur ne s'ouvre nécessitent une grande dextérité pour réussir ces croisements. L'opérateur doit contrôler l'environnement de façon à travailler dans des conditions d'hygrométrie et de température les plus favorables. La complexité de ces conditions rend très difficile la réalisation de ces hybridations et limite, de fait, l'utilisation d'une diversité génétique importante. Ces difficultés ont incité les obtenteurs à faire réaliser leurs croisements par le GIE soja et non plus directement sur leurs sites de sélection. Il a fallu plus de 20 ans d'expérience pour atteindre des taux de réussite moyens compris 25 et 30 % (Rooryck, comm. pers).

La difficulté des croisements manuels a été contournée grâce à la pollinisation de plantes mâle stériles par des pollinisateurs (*Megachile rotundata* et maintenant *Apis mellifera*) sous cage de pollinisation ou directement en plein champ (Roumet et Magnier, 1993). Du fait de son coût très faible (réduction d'un facteur 200 du coût de production de la semence hybride) et de sa fiabilité, cette technique permet d'obtenir de grandes quantités de semences issues d'allofécondation et de créer des populations avec une base génétique élargie.

La fixation de lignées : la culture d'embryons immatures (Roumet et Morin, 1996) a permis de réaliser un cycle complet (graine à graine) en 65-70 jours, soit un potentiel de 5 générations par an. Cette technique basée sur le prélèvement de graines au début de leur remplissage est très simple d'utilisation, non génotype spécifique et donc complètement compatible avec la mise en place de grandes séries issues de programmes de sélection.

L'expérimentation multilocale : En réponse aux contraintes exercées par les conditions environnementales, l'expression du phénotype va être modifiée, générant pour chaque génotype une courbe de réponse aux variations environnementales. Sur le plan statistique, le terme d'interaction génotype x milieu est la signature de ce phénomène. L'interprétation biologique de cette signature statistique permet d'identifier les génotypes ayant un spectre d'adaptation large ou spécifique à des contraintes environnementales particulières à conditions que nous soyons en mesure d'identifier les principales contraintes environnementales. Une démarche de caractérisation environnementale a été proposée par Desclaux et Roumet (1996). Ces auteurs ont montré que l'examen à maturité des caractéristiques de la plante (biomasse végétative, ratio entre nombre de gousses et biomasse, nombre de graines par gousse, poids moyen d'un grain) permettait *i)* de diagnostiquer sur un essai la présence d'un facteur limitant dans un essai et *ii)* d'établir une relation entre la manifestation de ce facteur limitant et une phase phénologique particulière du cycle cultural. La nature du stress impliqué (stress hydrique / thermique essentiellement pour le soja) est ensuite recherchée par examen des données pédoclimatiques.

Cette méthode basée sur la simple observation de variétés témoins permet de réaliser une première typologie grossière de chaque site expérimental ; elle s'est avérée extrêmement pertinente pour expliquer, sur le plan biologique, ces interactions génotype x milieu.

Perspectives

Schéma de sélection récurrente pour l'amélioration de la teneur en protéines

Les différentes techniques ou méthodologies évoquées ci-dessus ont été intégrées par le GIE Soja dans la création d'un schéma de sélection récurrente destinée à améliorer la teneur en protéines. Pour cela, une population à base génétique large, au sein de laquelle un gène de stérilité mâle ségrégeait, a été construite. A chaque brassage, cette population fonctionne en allogamie stricte : après pollinisation par les abeilles, les graines sont uniquement récoltées sur les plantes mâle stériles. L'objectif de ce dispositif était de construire des géniteurs à forte teneur en protéines

Après chaque brassage, les lignées sont fixées et une sélection combinée sur les critères de teneur en

protéines mesurée par spectrométrie proche infra rouge, de productivité et de précocité est réalisée. Les meilleures lignées sont réutilisées pour créer le brassage suivant. Dix cycles ont été réalisés en 16 ans et quelques géniteurs de lignées déposées au CTPS en sont issus directement. Le progrès génétique réalisé pour les 6 premiers cycles était de 1 point de teneur en protéines soit de 0.13 point/an (données non publiées).

Le suivi temporel des fréquences alléliques aux différents locus permettra de distinguer les locus présentant des variations alléliques globales homogènes d'un locus à l'autre, dues à la dérive génétique, de ceux qui présenteront des variations atypiques, en réponse à des effets concomitants de la dérive et à la sélection dirigée. Les attendus d'un tel programme concernent l'identification des régions chromosomiques soumises à des effets sélectifs, la caractérisation des relations génotypes / phénotypes dans ces régions afin d'identifier des marqueurs liés aux caractères d'intérêt agronomique. Cette phase du programme est en cours de réalisation.

Développement de variétés plus économes en intrants

Le soja se caractérise avant tout comme une culture d'été ayant des besoins importants en eau : 450 mm d'eau sont nécessaires pour produire environ 40 qx/ha de graines. L'irrigation pourvoit à une partie importante de ces besoins dans les zones Sud-Ouest et Sud-Est. Economiser l'eau grâce à un déplacement des besoins hydriques de la plante au cours de son cycle est une solution intéressante. Les premiers travaux de l'Inra ont montré que des semis très précoces (15 février) permettaient d'obtenir des peuplements corrects avec des dates de récoltes comprises entre le 20 Juillet et le 30 août selon la précocité du matériel. Ce travail est repris par le GIE et le Cetiom afin de préciser les dates de semis, de quantifier les conséquences sur les quantités et qualités récoltées et quantifier l'économie d'eau associée.

Sur le plan génétique, les contraintes nouvelles associées à cette modification de date de semis sont, pour l'essentiel, liées à la sensibilité de la plante à la photopériode et à la thermopériode. Compte tenu de l'héritabilité des caractères mis en jeu, de la variabilité intra spécifique disponible, cette orientation sera plus « facile » à mettre en œuvre que la recherche de lignées de soja résistantes à la sécheresse pour le développement de variétés économes en eau.

Références bibliographiques

- AFZ & Cereopa, 2010. Base de données Feedbase (www.feedbase.com)
- Arrendell S., Wynne J.C., Rawlings J.O., 1989. Genetic variability and selection for acetylene reduction in peanut. *Crop Science* 29, 1387-1392.
- Bagot P., 2004. Etude du progrès génétique pour le Tournesol, le colza et le Soja . rapport Section Oléagineux du Comité Technique Permanent de la Sélection. (CTPS)
- Burias N., Planchon C., 1990. Increasing soybean productivity through selection for nitrogen fixation. *Agron. J.* 82, 1031-1034.
- Chen Y.W., Nelson R.L., 2004. Genetic variation and relationships among cultivated, wild, and semiwild soybean *Crop Science* 44:316–325.
- Cooper R.L., 1981. Development of short statured soybean cultivars. *Crop Science* 21, 127-131.
- Cui Z., Carter T.E. Jr., Burton J.W., 2000. Genetic diversity patterns in Chinese soybean cultivars based on coefficient of parentage. *Crop Science* 40, 1780-1793.
- Cui Z., Carter T.E. Jr., Burton J.W., Wells R.. 2001. Phenotypic diversity of modern Chinese and north American soybean cultivars. *Crop Science* 41, 1954-1967.

- Delannay X., Rogers D.M., Palmer R.G., 1983. Relative genetic contributions among ancestral lines to North American soybean cultivars. *Crop Science* 23, 944-949
- Desclaux D., Roumet P., 1996 Impact of water stress on phenology of two Soybean cvs (*Glycine max* L. Merr.). *Field Crops Research* 46, 61-70.
- Gizlice Z., Carter T.E. Jr., Burton J.W., 1994. Genetic base for North American public soybean cultivars released between 1947 and 1988. *Crop Science* 34, 1143-1151.
- Gremaud M.F. Harper J.E., 1989. Selection and initial characterization of partially nitrate tolerant nodulation mutants of soybean. *Plant Physiol.* 89, 169-173.
- Gresshoff P.M., Krotzky A., Mathews A., Day D.A., Schuller K.A., Olsson J., Delves A.C., Carroll B.J., 1988. Suppression of the symbiotic supernodulation symptoms of soybean. *J. Plant Physiol.* 132, 417-423.
- Hammer K., 2003. A paradigm shift in the discipline of plant genetic resources. *Genetic Resources and Crop Evolution* 50, 3-10.
- Heichel G.H., Hardarson G., Barnes D.K. Vance C.P., 1984. Dinitrogen fixation, herbage yield, and *Rhizobial* preference of selected alfalfa clones. *Crop Science* 24, 1093-1097.
- Holmberg S.A., 1973: Soybeans for cool temperate climates. *Agri Hort. Genet.* 31, 1-20
- Hymowitz T., 1970. On the domestication of the soybean. *Economic Botany* 24, 408-421.
- Hymowitz T., 1984. Dorsett-Morse soybean collection trip to East Asia: 50 year retrospective. *Economic Botany* 38, 378-388.
- Hymowitz T., 2005. Debunking soybean myths and legends in the historical and popular literature. *Crop Science* 45, 473-476.
- Hyten D.L., Song Q., Zhu Y., Choi I.Y., Nelson R.L., Costa J.M., Specht J.E., Shoemaker R.C., Cregan P.B.. 2006. Impacts of genetic bottlenecks on soybean genome diversity. *Proc Natl Acad Sci U S A* 103, 16666-71.
- Narvel J.M., Fehr W.R., Chu W., Grant D., Shoemaker R.C., 2000. Simple sequence repeat diversity among soybean plant introductions and elite genotypes. *Crop Science* 40, 1452-1458.
- Obaton M., Rollier M., 1970 L'inoculation du soja: influence de la qualité de l'inoculum sur le rendement en grain et la richesse en protéine de la récolte. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 60, 1174-1195.
- Kipe-Nolt J.A., Giller K.E., 1993. A field evaluation using ^{15}N isotope dilution method of lines of *Phaseolus vulgaris* L. bred for increased nitrogen fixation. -218
- Labalette F., Bourrel C., Jouffret P., Lecomte V., Quinsac A., Ledoux S. Panorama et futur de la filière du soja français. Overview and future of the French soybean production. soumis OCL
- Luciani A., 2004. Progrès génétique pour différentes espèces de grandes cultures. Rapport Comité Technique Permanent de la Sélection. 187 p.
- Raffin A., Roumet P., 1994. Shoot-root control of nitrate tolerance of N_2 fixation in spontaneously tolerant soybean lines: reciprocal grafting experiments. *Agronomie* 14, 473- 480
- Raffin A., Roumet P., Obaton M., 1995. Tolerance of Nitrogen Fixation to nitrate in Soybean: a progeny (tolerant x non tolerant) evaluation. *European Journal of Agronomy* 4, 143-149.
- Roumet P., Magnier I., 1993. Estimation of hybrid seed production and efficient pollen flow using insect pollination of male sterile soybeans in caged plots. *Euphytica* 70, 61-67.
- Roumet P., Morin F., 1996. Germination of immature soybean seeds to shorten cycle duration. *Crop Science* 37, 521-525.
- Saint Clair D.A., Bliss F.A., 1991. Intrapopulation recombination for ^{15}N determined dinitrogen fixation ability in common bean. *Plant Breeding* 106, 215-225
- Serraj R., Drevon J.J., Obaton M., Vidal A., 1992. Variation in nitrate tolerance of nitrogen fixation in soybean (*Glycine max*) - *Bradyrhizobium* symbiosis. *J. Plant Physiol.* 140, 366-371
- Schori A.N., Uehlinger S., Fossati A., 1988: Sélection du soja en Suisse. *Rev. Suisse Agric.* 20, 211-218

Soldati A., 1976: Abklärung von Komponenten des Ertragsaufbaues bei der Sojabohne (*Glycine max* (L.) Merr.) unter verschiedenen klimatischen Bedingungen in der Schweiz. Diss. 5732, ETH Zürich

Tavaud-Pirra M., Sartre P., Nelson R., Santoni S., Texier N., Roumet P., 2009. Genetic Diversity in a Soybean Collection. *Crop Science* 49, 895-902

Thompson J.A., Nelson R.L., Vodkin L.O., 1998. Identification of diverse soybean germplasm using RAPD markers. *Crop Science* 38, 1348-1355.

Vidal A., Hanafiah T.O., 1985. Influence du type de croissance sur la morphologie et la floraison du soja (*Glycine max* L. Merrill). *Eurosoya* 3, 62-70

Xu D.H., Abe J., Gai J.Y., Shimamoto Y., 2002. Diversity of chloroplast DNA SRRs in wild and cultivated soybeans: evidence for multiple origins of cultivated soybean. *Theor Appl Genet* 105, 645-653.