



HAL
open science

Amélioration génétique de la digestibilité de la luzerne, dans la perspective d'un retour important à l'alimentation du bétail au moyen de la pâture et des protéines végétales

Bernadette Julier, Christian Huyghe, Jean-marie Prospero

► To cite this version:

Bernadette Julier, Christian Huyghe, Jean-marie Prospero. Amélioration génétique de la digestibilité de la luzerne, dans la perspective d'un retour important à l'alimentation du bétail au moyen de la pâture et des protéines végétales: Compte-rendu final du contrat de branches 1997-1999. [Contrat] ACVF Luzerne; INRA. 2000. hal-02986986

HAL Id: hal-02986986

<https://hal.inrae.fr/hal-02986986>

Submitted on 3 Nov 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.

Compte-rendu final du contrat de branches 1997-1999

ACVF Luzerne - INRA

Amélioration génétique de la digestibilité de la luzerne, dans la perspective d'un retour important à l'alimentation du bétail au moyen de la pâture et des protéines végétales

Bernadette Julier-Koubaiti et Christian Huyghe, INRA, UGAPF, 86600 Lusignan

Jean-Marie Prospéri, INRA, SGAP, Domaine de Melgueil, 34130 Mauguio

Le programme comportait trois facettes concernant la valeur énergétique de la luzerne et son amélioration par voie génétique :

- Génétique de la digestibilité, par analyse des descendance de trois plans de croisements
- Analyse de la variabilité génétique disponible au sein du matériel végétal de type méditerranéen
- Recherche de critères de sélection liés à la digestibilité de la paille

Nous présentons les résultats obtenus pour chacun de ces points au cours des trois années de programme. De plus, des progrès ont été obtenus sur la prédiction en spectroscopie dans le proche infrarouge des critères liés à la valeur alimentaire de la luzerne.

Génétique de la digestibilité

Trois plans de croisements ont été étudiés :

- Un plan de croisement factoriel 7 x 7, les 14 plantes étant issues de la population Flamande. La génération F1 étudiée provient des croisements entre 7 plantes mâles et 7 plantes femelles issues aléatoirement de la population Flamande. Les plantes F1 ont été repiquées en parcelles de 1 m de long, espacées de 50 à 70 cm, avec 10 plantes par parcelle et 3 répétitions. Les implantations ont été réalisées à Lusignan, Cappelle-en-Pévèle et Mas-Grenier, en 1997.

- Un plan de croisement diallèle avec réciproques entre 7 plantes. Les 7 plantes ont été prises au hasard dans 7 populations (Europe, Magali, Luzelle, Orca, Aragon, Krasnokutskaya, Malzeville), et intercroisées. La génération F1 a été implantée à Lusignan, Cappelle-en-Pévèle et Mas-Grenier en 1997. A Lusignan, des boutures des plantes parentales ont aussi été implantées.

- Un plan de croisement polycross, entre 81 plantes, soit 9 plantes prises au hasard dans 9 variétés.

Les familles de demi-frères implantées en 1997 proviennent d'un polycross entre 81 plantes, soit 9 plantes prises au hasard dans 9 variétés (Europe, Luzelle, 63-28P x Maya, Diane, Orca, Sabre, Alfagraz). Ces familles de demi-frères ont été semées à Lusignan, Montpellier, Rodez, Verneuil et aux Alleuds en lignes de 1 m de long espacées de 50 à 70 cm selon les lieux. A Lusignan, les plantes parentales bouturées étaient incluses dans les essais.

Certaines récoltes n'ont pas pu être exploitées pour des raisons diverses, telles que des attaques de maladies, une récolte impossible, ou un stade trop tardif (tableau 1).

Pour les trois dispositifs, les caractères mesurés sont le nombre de plantes par parcelle, la hauteur à la récolte, le poids de matière sèche par parcelle. Après broyage, les spectres ont été collectés en SPIR pour tous les échantillons. Les caractères prédits sont la solubilité enzymatique, la teneur en azote total (MAT), la teneur en NDF (cellulose + hémicellulose + lignine), la teneur en ADF (cellulose + lignine), la teneur en ADL (lignine) et le rapport feuilles/tiges.

Plan de croisement factoriel

Analyse statistique

L'analyse a été effectuée d'une part pour chaque coupe dans chaque lieu, d'autre part globalement sur l'ensemble des coupes.

Pour chaque coupe

Test d'un effet génotype F1:

$$Y_{ij} = \mu + b_i + G_j + E_{ij}$$

Analyse factorielle

$$Y_{ijk} = \mu + m_i + f_j + mf_{ij} + b_k + E_{ijk}$$

Pour l'ensemble des coupes

Test de l'effet génotype F1

$$Y_{ijk} = \mu + l_i + b(l)_{ij} + G_k + Gl_{ik} + E_{ijk}$$

Analyse factorielle

$$Y_{ijk} = \mu + m_i + f_j + mf_{ij} + l_k + b(l)_{kl} + E_{ijkl}$$

avec Y: valeur, μ : moyenne, b: effet bloc, G: effet génotype F1, m: effet du parent mâle, f: effet du parent femelle, b: effet bloc, l: effet lieu, E: erreur.

Les données ont été traitées en considérant les effets mâles et femelles aléatoires. Les variances des effets ont donc été calculées à partir des carrés moyens de l'analyse de variance. Les variances d'additivité et de dominance en ont été déduites, sous l'hypothèse de locus bi-alléliques et d'absence d'épistasie:

$$\sigma^2_A = 2 \left(\sigma^2_m + \sigma^2_f \right) - \frac{2}{3} \sigma^2_{mf}$$

$$\sigma^2_D = 6 \sigma^2_{mf}$$

Les héritabilités, au sens large (h^2_{SL}) et au sens strict (h^2_{SS}) des caractères ont été calculées selon les formules:

$$h^2_{SL} = \frac{\sigma^2_G}{\sigma^2_G + \sigma^2_E}$$

$$h^2_{SS} = \frac{\sigma^2_A + \frac{1}{3} \sigma^2_D}{\sigma^2_A + \sigma^2_D + \sigma^2_E}$$

Résultats

Les analyses de variances dans chaque lieu en déclarant un effet du génotype F1 sont présentés dans les tableaux 2.A à 2.H. L'effet du génotype n'est pas significatif dans la plupart des conditions pour le rendement par plante, et faiblement significatif pour la hauteur. Le dispositif utilisé, en lignes espacées, n'était pas adapté à la mise en évidence de variation pour le rendement, mais visait à permettre une croissance optimale des plantes de chaque ligne. Au contraire, les caractères liés à la digestibilité, ainsi que le rapport feuilles/tiges montrent un fort effet du génotype F1 et des héritabilités au sens large relativement importantes. L'effet génotype n'est pas significatif dans certaines conditions pour la teneur en protéines, avec donc pour ces conditions, des héritabilités au sens large très faibles. La variabilité obtenue dans cette population de familles F1 est donc très faible pour la teneur en protéines. Les analyses statistiques suivantes ne porteront donc que sur les caractères de digestibilité et le rapport feuilles/tiges.

L'analyse factorielle montre que les effets mâle et femelle sont pratiquement toujours significatifs, et les variances du parent femelle sont inférieures à celles du parent mâle (Tableaux 3.A. à 3.E). Le hasard dans le choix des parents est très probablement responsable de ce phénomène. Les

effets d'interaction entre le parent mâle et le parent femelle sont peu ou pas significatifs. En conséquence, la variance d'additivité est nettement supérieure à la variance de dominance pour les caractères considérés. Les héritabilités au sens strict sont relativement élevées, mais les héritabilités du NDF sont supérieures à celles de l'ADF, de l'ADL et de la solubilité enzymatique. Le rapport feuilles/tiges a aussi une héritabilité au sens strict élevée, avec une large part de variance d'additivité.

L'analyse globale des essais a aussi été réalisée. On met en évidence des effets significatifs du génotype F1, de la condition (lieu x année x coupe) et de l'interaction génotype x condition, sauf pour le poids sec par plante (tableau 4). Les variances d'interaction génotype x condition et d'erreur sont élevées, conduisant à des héritabilités au sens large faibles. Parmi les caractères analysés, on retrouve comme dans l'analyse par condition, une faible variance génétique pour le rendement et la hauteur, car le dispositif expérimental n'était pas propice à sa mise en évidence. De même, la variabilité génétique pour la teneur en protéines est faible, le choix des parents pouvant être à l'origine de cette observation. L'héritabilité pour les teneurs en NDF et en ADF est relativement élevée, avec des variances génétiques plus élevées que les variances d'interaction génotype x condition. L'héritabilité de la solubilité enzymatique est légèrement plus faible car la variance génétique est inférieure.

L'analyse factorielle montre des effets mâle et femelle significatifs, sauf l'effet femelle pour la teneur en protéines. Les effets d'interaction mâle x femelle ne sont pas significatifs sauf pour le poids sec par plante. Pour les critères liés à la digestibilité, les variances d'additivité sont nettement supérieures aux variances de dominance (Tableau 5). On retrouve des résultats similaires à ceux obtenus dans chacune des conditions. L'héritabilité au sens strict des teneurs en NDF et en ADF est supérieure à celle de la solubilité ou de la teneur en ADL. Le rapport feuilles/tiges a aussi une héritabilité élevée.

L'ensemble des données acquises sur la descendance du plan de croisement factoriel montre que les critères de digestibilité ont une héritabilité principalement additive. Ceci est tout à fait favorable à l'amélioration génétique de ce caractère. La teneur en NDF semble être un caractère plus héritable que la solubilité enzymatique.

Plan de croisement diallèle

Analyse statistique

L'analyse a été effectuée d'une part pour chaque coupe dans chaque lieu, d'autre part globalement sur l'ensemble des coupes.

Pour chaque coupe

Test d'un effet génotype F1:

$$Y_{ij} = \mu + b_i + G_j + E_{ij}$$

Analyse diallèle

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + r_{ij} + b_k + E_{ijk}$$

Pour l'ensemble des coupes

Test de l'effet génotype F1

$$Y_{ijk} = \mu + l_i + b(l)_{ij} + G_k + Gl_{ik} + E_{ijk}$$

Analyse diallèle

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + s_{ij} + r_{ij} + l_k + b(l)_{kl} + E_{ijkl}$$

avec Y: valeur, μ : moyenne, b: effet bloc, G: effet génotype F1, g: effet d'aptitude générale à la combinaison (AGC), s: effet d'aptitude spécifique à la combinaison (ASC), r: effet réciproque, b: effet bloc, l: effet lieu, E: erreur.

Les données ont été traitées en considérant les effets des parents aléatoires. Les variances des effets d'AGC, d'ASC et réciproques ont donc été calculées à partir des carrés moyens de l'analyse de variance. Les variances d'additivité et de dominance en ont été déduites, sous l'hypothèse d'absence d'épistasie et de locus bi-alléliques:

$$\sigma^2_A = 4\sigma^2_g - \frac{2}{3}\sigma^2_s$$

$$\sigma^2_D = 6\sigma^2_s$$

Les héritabilités, au sens large (h^2_{sl}) et au sens strict (h^2_{ss}) des caractères ont été calculées comme pour le plan factoriel.

Résultats

Les résultats des analyses de variance en déclarant un effet génotype sont présentés dans les tableaux 6.A à 6.H. Pour le rendement en matière sèche par plante, l'effet du génotype F1 n'est significatif qu'à Lusignan en 1997. La hauteur montre un effet génotype F1 significatif dans seulement 4 conditions parmi les 8 disponibles. Les critères liés à la digestibilité (teneurs en NDF, ADF, ADL, solubilité enzymatique) sont affectés par l'effet du génotype, mais plus faiblement à Lusignan pour la deuxième coupe en 1998 et la première coupe en 1999. L'effet du génotype était significatif pour la teneur en protéines dans 5 conditions parmi les 8.

L'analyse diallèle montre globalement que l'effet d'AGC est significatif, alors que les effets d'ASC et réciproques sont faiblement ou pas significatifs (tableau 7.A à 7.F). Cependant, à Lusignan en 1997, presque tous les caractères montrent plus de variations liées à l'ASC qu'à l'AGC. Les variances d'additivité sont dans la plupart des cas largement supérieures aux variances de dominance. Ceci est en accord avec les résultats obtenus dans le plan de croisement factoriel. Les héritabilités au sens strict sont variables d'un lieu à l'autre, en relation avec la variance génétique mise en évidence dans chaque lieu. Les 4 critères de digestibilité (NDF, ADF, ADL, solubilité enzymatique) ont des héritabilités très semblables. Le rapport feuilles/tiges est lui aussi assez héritable, avec une variance d'additivité supérieure à la variance de dominance. L'effet réciproque n'est significatif que dans certaines conditions. Cependant, dans ces cas, la variance de l'effet réciproque est importante comparée aux variances d'AGC et d'ASC. A Lusignan, pour la coupe 1 de 1998 et la coupe 2 de 1999, tous les caractères ont un effet réciproque significatif.

L'analyse multilocale montre que l'effet du génotype F1 reste significatif (tableau 8). La variance d'interaction est relativement importante, mais moindre que la variance résiduelle. Les héritabilités au sens large sont équivalentes pour les 4 critères de digestibilité, mais sensiblement plus élevée pour la teneur en protéines. L'analyse diallèle multilocale montre un effet d'AGC significatif, alors que l'effet d'ASC n'est significatif que pour le poids sec, la hauteur et la teneur en protéines (tableau 9). Les effets réciproques sont significatifs pour tous les caractères, avec des variances assez fortes par rapport aux variances d'AGC. Les interactions entre AGC et condition et entre ASC et condition sont significatives pour la plupart des caractères étudiés, alors que l'interaction entre l'effet réciproque et la condition n'est pas significative. Globalement, on obtient une hérédité principalement additive. Pour les caractères de digestibilité, l'héritabilité au sens strict est plus élevée pour le NDF, l'ADF et la solubilité que pour l'ADL. La teneur en protéines est nettement plus héritable que la digestibilité, mais elle a une variance génétique moindre.

Comme dans le plan factoriel, on trouve une héritabilité des caractères de digestibilité principalement additive, avec une héritabilité au sens strict non négligeable. La similitude des résultats pour les deux plans de croisements signifie que la variabilité s'organise de la même façon lorsqu'on se place au niveau intra-population (comme dans le plan factoriel) ou au niveau inter-population (comme dans le plan diallèle). Les descendants F1 du plan diallèle étaient plus variables que ceux du plan factoriel pour la teneur en protéines. Ce caractère se révèle avoir une hérédité additive, et être très héritable. Cependant, la gamme de variation disponible pour la teneur en protéines est plus faible que pour la digestibilité. Les interactions entre génotype et condition environnementale sont élevées, mais c'est la forte variance résiduelle qui réduit fortement les héritabilités, et ce pour tous les caractères étudiés.

Plan de croisement polycross

Analyse statistique

Une première analyse de variance a été réalisée pour tester l'existence d'une variabilité génétique entre familles de demi-frères, dans chaque lieu et pour chaque coupe:

$$Y_{ij} = \mu + b_i + G_j + E_{ij}$$

Pour les coupes où il y avait un effet génotype significatif, une analyse de variance a été menée pour tester la variabilité d'origine variétale, et la variabilité d'origine plante:

$$Y_{ijk} = \mu + b_i + Var_j + Pl(Var)_{jk} + E_{ijk}$$

Une analyse multilocale a ensuite été réalisée sur les coupes réalisées en 1998 et 1999. Chaque coupe dans chaque lieu a été définie comme une condition environnementale.

$$Y_{ijk} = \mu + c_i + b(c)_{ij} + G_k + Gc_{ik} + E_{ijk}$$

$$Y_{ijkl} = \mu + c_i + b(c)_{ij} + Var_k + Pl(Var)_{kl} + E_{ijkl}$$

avec Y: valeur, μ : moyenne générale, b: effet bloc, G: effet génotype, ici, famille de demi-frères, Var: effet de la variété, Pl: effet de la plante choisie dans la variété, c: effet de la condition environnementale, E: résiduelle

Les variances des effets du génotype, de la variété et de la plante dans la variété ont été calculées.

Les résultats obtenus sur les plantes parentales du polycross et sur la descendance ont été comparées par des analyses de corrélations. Les plantes parentales ont été observées à Lusignan dans le polycross d'origine implanté en 1996 dans un dispositif en plantes isolées, avec trois récoltes en 1997 et deux récoltes en 1998. Ces plantes parentales ont aussi été bouturées en trois exemplaires et repiquées avec les descendances en 1997, en couvert dense. Sur ces plantes bouturées, les mêmes récoltes que sur les descendances ont été effectuées.

Résultats

Pour chaque lieu, les analyses de variance sont présentées dans les tableaux 10.A à 10.E.

Il existe globalement une variabilité entre les familles de demi-frères pour tous les caractères. Cependant, dans certains lieux pour certaines coupes, cette variabilité ne s'exprime pas. C'est le cas des Alleuds pour les deux coupes de 1998 et la première coupe de 1999, la troisième coupe en 1999 à Rodez, les deux coupes de 1998 à Verneuil, les deux coupes de 1999 et la deuxième coupe de 1998 à Montpellier, pour les caractères liés à la digestibilité. Les raisons de cette absence de variabilité génétique dans certaines conditions ne sont pas expliquées. Par contre, la teneur en protéines montre une variabilité génétique dans presque la totalité des conditions étudiées. Cependant, la variance génétique pour la teneur en protéines est faible par rapport à la variance pour le NDF. Cela montre que la gamme de variation pour la teneur en protéines est plus faible que pour la teneur en NDF. Le rendement et la hauteur sont variables aussi, contrairement aux essais concernant les descendances des plans diallele et factoriel. Dans ces deux essais, les plantes étaient repiquées, avec que la descendance du polycross était semée en ligne.

En grande majorité, la variance de l'effet de la variété est inférieure à la variance de l'effet plante hiérarchisé à la variété (tableaux 10.A. à 10.E.). On illustre une fois encore ici l'importance de la variabilité intra-variétale pour les caractères étudiés, que ce soient des caractères de digestibilité, de teneur en protéines ou de croissance. Ici, on met en évidence cette variabilité au niveau de la descendance de plantes individuelles, alors qu'elle avait auparavant été prouvée sur la valeur propre de génotypes issus de différentes variétés et après bouturage.

L'analyse sur l'ensemble des coupes de 1998 et 1999 (tableau 11) montre un effet du génotype significatif pour toutes les variables étudiées. L'interaction génotype x condition environnementale est hautement significative, avec des variances élevées. L'erreur résiduelle a une variance très importante, conduisant à des héritabilités faibles pour tous les caractères. Sur l'ensemble des conditions environnementales, les variances de l'effet plante hiérarchisé à la variété sont largement supérieures aux variances de l'effet de la variété. Ceci confirme ce qui avait été trouvé dans chaque lieu.

Les corrélations entre les caractères mesurés sur les plantes parentales et les descendances sont présentées dans le tableau 12. Sur les deux coupes de 1998, les corrélations sont positives, alors qu'elles sont non significatives pour les coupes de 1999. Ces résultats suggèrent que la mesure de la valeur d'une plante individuelle est faiblement liée à la mesure de ces descendants. Un test sur descendance, plus coûteux en temps et en moyens, pourrait donc être nécessaire.

Evaluation de la digestibilité et de composantes de la qualité chez des populations sauvages et cultivées de la zone méditerranéenne ¹.

Contexte général

Pour palier les déficits saisonniers de production ou de disponibilité de la végétation naturelle en régions méditerranéennes et pour diminuer les coûts de production, l'amélioration des plantes doit proposer de nouvelles variétés persistantes et rustiques. Celles-ci sont pâturées et doivent présenter une croissance hivernale marquée et une bonne souplesse d'exploitation (large plage d'utilisation, faible baisse de qualité lors du vieillissement des plantes, possibilité de réserves sur pied...). Dans ce contexte, les études sur la qualité et la digestibilité de la luzerne trouvent naturellement leur place.

Les premiers résultats acquis par le laboratoire luzerne de l'INRA de Lusignan ont souligné plusieurs faits importants :

- Les variétés méditerranéennes de luzerne soumises au rythme d'exploitation des matériels nordiques présentent en moyenne, à Lusignan, un niveau de digestibilité inférieur à celui des variétés d'origine flamande.
- Des populations spontanées méditerranéennes de l'espèce *Medicago sativa* sens strict, tout comme celles de *Medicago falcata*, plus nordiques, apparaissent plus digestibles que les variétés cultivées, mais avec un rendement fourrager moindre. Ces populations présentent toutes des tiges fines, et un port étalé favorable à la résistance au pâturage.
- La gamme de variation exploitable pour l'amélioration de la digestibilité apparaît aussi importante au niveau intra-population qu'au niveau inter-population.

Objectifs de travail

Dans ce cadre, le travail proposé a cherché à répondre aux deux questions suivantes :

- Les variétés méditerranéennes sont-elles réellement moins digestibles que les variétés flamandes lorsque celles-ci sont cultivées dans leur zone d'origine ?
- Est-il possible d'améliorer ces variétés conjointement pour leur résistance au pâturage et leur qualité, notamment en les intégrant avec des origines issues de populations naturelles de port rampant ?

Les objectifs poursuivis ont donc été de :

- Identifier la gamme de variation de digestibilité disponible au niveau de variétés cultivées et de populations naturelles méditerranéennes de port rampant.
- Cerner le niveau de variabilité existant au niveau intra-population aussi bien au sein des populations naturelles (quelque soit leur statut) que des populations cultivées.
- Connaître le niveau des corrélations entre les caractères de développement (notamment port des plantes, niveau de dormance hivernale, rapport feuilles/tiges, production annuelle) et leur digestibilité ou leur teneur en azote.
- Rechercher les liaisons entre les structurations mesurées sur différents caractères (mesures agro-morphologiques, marqueurs neutres) et celles obtenues à l'aide de critères liés à la digestibilité.

¹ J.M. Prospero - INRA - SGAP Mauguio. Domaine de Melgueil. F34130 Mauguio.

Expérimentations réalisées

Matériels utilisés

Dix-sept populations naturelles espagnoles à port rampant présentant des niveaux variables d'introgession par du matériel cultivé, 5 populations cultivées méditerranéennes (Aragon, Tierra de Campos, Alcaroches, Ampurdan, Mediterraneo), Europe prise comme variété de référence du pool flamand et une population spontanée de *Medicago Falcata* (Malzeville) ont été retenues. Chacune de ces populations est représentée par environ 40 individus cultivés isolément, soit 960 plantes observées.

Les populations naturelles retenues ont été extraites d'un échantillonnage de 103 populations naturelles collectées en Espagne entre 1985 et 1987 et d'une prospection complémentaire réalisée en 1995. Ces 17 populations représentent la gamme de diversité observable au sein des populations naturelles, elles ont été choisies sur la base d'un essai agronomique de plein champ.

Dispositif expérimental

Le dispositif d'observation a été mis en place en 1996. Installées en pots et dans un environnement semi-contrôlé (arrosage goutte à goutte), ces plantes ont été observées depuis cette date pour différentes caractéristiques agro-morphologiques. Une partie de ces plantes a aussi été typée sur la base de 30 marqueurs RAPD (pour 640 plantes) et de 7 locus isoenzymatiques (pour 320 plantes), ce qui a permis de préciser les niveaux de différenciation entre populations naturelles et cultivées et de préciser le statut des plantes de morphotype 'cultivé' présentes au sein des populations naturelles.

Mesures réalisées

Années 1 et 2 (1997-1998)

- Complément des caractérisations du matériel végétal par un suivi agronomique de la croissance de printemps. Typologie des types de croissance.
- Prélèvement du 1^{er} cycle de printemps sur l'ensemble des plantes, mesure du rapport feuilles sur tiges sur un échantillon représentatif de 100 plantes. Les prélèvements ont été réalisés à un stade phénologique fixe (apparition du 1^{er} bouton mauve) en raison des développements très différents des plantes (origines naturelles et cultivées), ce qui évite à priori les effets de vieillissement des tiges.
- Broyage des échantillons, passage à l'infra-analyseur et obtention des spectres de réflectance dans le proche infrarouge.
- Choix d'un échantillon de calibration représentatif de 94 plantes sur la base de leur spectre infra-rouge.

Année 3 (1999-2000)

- Réalisation des analyses de qualité sur les échantillons de calibration : solubilité enzymatique, azote total.
- Calcul des équations pour estimer la valeur en digestibilité, la teneur en azote et le rapport feuilles sur tiges à partir des spectres infrarouges.
- Mesure des niveaux de diversité intra et inter populations, analyses de données.

En raison de l'arrivée tardive des analyses de références (fin janvier 2000), les résultats définitifs n'ont pu être élaborés et mis en forme, ils vous seront adressés ultérieurement.

Mesure de la digestibilité de la paroi

Dans tout fourrage, on peut identifier deux fractions différentes : les parois cellulaires, riches en fibres (cellulose, hémicelluloses, lignine) et le contenu cellulaire, riche en protéines chez la luzerne. Le contenu cellulaire est entièrement digestible, alors que les parois ne le sont que partiellement. Il apparaît donc que la digestibilité du fourrage est conditionnée par deux éléments : la quantité de parois et la digestibilité de ces parois. La mesure de la quantité de parois est déjà maîtrisée depuis longtemps, il s'agit du dosage du NDF (Neutral Detergent Fiber). En revanche, la digestibilité des parois demande à être mesurée, avec une méthode permettant d'identifier d'éventuelles différences génétiques.

Trois méthodes ont été testées pour mesurer la digestibilité des parois chez la luzerne : 1/ Mesure de la digestibilité enzymatique du résidu NDF préalablement extrait, 2/ Calcul de la digestibilité du NDF à partir de la digestibilité enzymatique de l'échantillon et de sa teneur en NDF, en supposant la fraction non-NDF digestible soit à 100%, soit à 90%, 3/ Mesure de la teneur en NDF avant et après digestion enzymatique de l'échantillon, et calcul de la quantité de NDF digérée.

Ces trois méthodes ont été utilisées en 1998 pour analyser la digestibilité des parois de 15 variétés de luzerne récoltées en 3 répétitions. Chaque analyse a été répétée trois fois de façon indépendante. Il apparaît que la méthode 1 est la plus précise, suivie de près par la méthode 3, la précision étant mesurée par l'écart-type résiduel de la mesure. La méthode 2 est largement moins précise. Il a aussi été montré que le fait d'avoir trois répétitions analytiques apportait peu de gain de précision à la mesure. Par contre, la méthode 1 est beaucoup plus lente à mettre en œuvre que la méthode 3, car le résidu NDF doit être rebroyé. De plus, il semble que la méthode 1 écrase quelque peu la gamme de variation.

La méthode 3 a ensuite été utilisée pour analyser une gamme de 50 variétés ou populations de luzerne. Dans cette gamme, la teneur moyenne en NDF est de 42.2 % et la digestibilité de la matière sèche est en moyenne de 63.4%. La digestibilité de la matière sèche et la teneur en NDF sont très fortement corrélées (-0.92). La digestibilité du NDF est en moyenne de 27.6%, soit une valeur extrêmement faible. Cette très faible valeur explique le faible niveau de la digestibilité de la matière sèche chez la luzerne. Les raisons de la faible digestibilité des parois chez la luzerne devront être recherchées. Il existe des différences entre les variétés pour leur digestibilité du NDF, avec une variation entre 24.5 et 31.5%. Ces différences restent relativement faibles, compte tenu de la précision de la mesure. Cependant, la digestibilité du NDF est corrélée positivement à la digestibilité de la matière sèche (0.68), ce qui montre l'intérêt de ce nouveau paramètre. On observe aussi une corrélation négative entre la digestibilité du NDF et la teneur en NDF : plus il y a de parois, moins ces parois sont digestibles.

La possibilité de prédire la digestibilité des parois par spectrophotométrie de réflectance dans le proche infrarouge a été testée. Pour les trois méthodes évaluées, la prédiction est satisfaisante, évaluée par son SECV (écart-type en validation croisée) et le R² de la prédiction. Cette possibilité permet de prédire à moindre coût, et simultanément aux prédictions de la digestibilité de la matière sèche et des teneurs en parois, un critère de digestibilité des parois. Dans ce cadre, l'évaluation de ce caractère supplémentaire pour différentes variétés prend un coût mineur.

En parallèle à ce programme, et dans le cadre d'un contrat de recherche avec le SNDF (Syndicat National des Déshydrateurs de France), une quatrième méthode de mesure de la digestibilité des parois a été mise en œuvre. Il s'agit de la méthode *in situ* qui consiste à incuber des échantillons de matière sèche des différentes variétés dans le rumen de vaches fistulées. L'incubation dure 2, 4, 8, 12, 24, 48 ou 72 heures, et permet d'établir des cinétiques de dégradation. Le dosage du NDF sur les résidus de digestion a permis d'établir les cinétiques de dégradation du NDF dans le rumen des vaches pour les 15 variétés déjà évaluées pour les trois méthodes précédentes. La méthode *in situ* est souvent considérée comme une méthode de référence car elle utilise directement la digestion de l'animal. Cependant, elle est lourde à mettre en œuvre, l'excluant immédiatement d'un programme de sélection.

Nous avons donc comparé les résultats de la méthode *in situ* avec ceux des trois autres méthodes. Les corrélations entre les méthodes 1, 2 et 3 et les temps d'incubations précoces (2 à 24 heures) sont non significatives (tableau 13). Mais les trois méthodes sont corrélées aux temps d'incubation tardifs (48 et 72 heures). Les mesures au laboratoire représentent donc des digestibilités de parois potentielles. Ceci rejoint les observations sur la digestibilité de la matière sèche, pour laquelle la méthode de laboratoire est une mesure de la digestibilité potentielle dans le rumen de l'animal. La méthode 2 est plus faiblement corrélée que les autres méthodes aux dégradations *in situ*. La méthode 1 est plus corrélée que la méthode 3 à la dégradation du NDF après 48 heures.

Cette étude sur les parois a permis de montrer le rôle crucial de la faible digestibilité des parois dans la limitation de la digestibilité de la plante entière. Les possibilités de progrès sur ce caractère ne semblent pas très importantes en valeur absolue, mais chaque point d'amélioration de la digestibilité des parois aura un effet positif sur la digestibilité de la plante entière. La comparaison des méthodes de laboratoire avec la méthode *in situ* de référence est plutôt

favorable à la méthode 1. La méthode 3 reste valide, alors que la méthode 2 est à écarter pour plusieurs raisons.

Ces résultats soulèvent aussi plusieurs questions : 1/ Pourquoi la luzerne a-t-elle des parois si peu digestibles (en comparaison par exemple avec le maïs), 2/ Quels sont les facteurs biochimiques qui expliquent la faible digestibilité des parois, 3/ Y a-t-il des facteurs structuraux qui y contribuent (répartition des composants biochimiques dans la structure tridimensionnelle de la paroi, répartition de différents types de parois dans les tissus) ?

Mise à disposition des équations de prédiction SPIR

Les essais menés au cours des deux contrats de branches successifs (1994-1996, 1997-1999) ont permis de collecter des spectres de réflectance dans le proche infra-rouge pour de très nombreux échantillons de luzerne, et de mesurer des critères biochimiques. Combinées à d'autres données, ces valeurs ont permis d'établir de robustes équations de prédictions SPIR pour prédire des critères. Il s'agit en particulier de la solubilité enzymatique, de la teneur en NDF, en ADF, en ADL, de la teneur en protéines, de la teneur en cendres totales et du rapport feuilles/tiges. En mars 1999, l'INRA a conclu des accords de secret avec les entreprises intéressées pour leur mettre à disposition les équations prédisant la solubilité enzymatique, la teneur en NDF et la teneur en protéines. Toutes les entreprises ont répondu positivement à ce jour, et leurs laboratoires utilisent les équations pour évaluer le matériel végétal en cours de sélection.

Les derniers essais menés en 1999 ont permis d'améliorer encore la validité des équations (tableau 14). Sur l'ensemble des données disponibles, la prédiction du rapport feuilles/tiges est légèrement moins bonne. Cependant, si on reprend uniquement les essais de 1999, le R^2 entre la valeur manuelle et la valeur prédite passe à 0,76. Le grand nombre d'échantillons dans la base de calibration et la valeur des paramètres d'évaluation des équations montrent la robustesse de ces équations. Les nouvelles équations ont été diffusées aux entreprises.

Publications

Les résultats acquis au cours de ce contrat de branches ont été en partie publiés, et d'autres publications sont en préparation.

Documents publiés:

Julier B., Lila M., Furstoss V., Travers V., Huyghe C. (1999). Measurement of cell-wall digestibility in lucerne using the filter bag technique. *Animal Feed Science and Technology*, 79, 239-245.

Julier B., Emile J.C., Lila M. Huyghe C. Genetic variation for *in situ* dry matter and fibre degradation kinetics in alfalfa. *Australian Journal of Agricultural Research*, accepté sous réserve de modifications.

Julier B., Ecalle C., Huyghe C. (1999). Breeding for a higher energy value in alfalfa : current achievements. *Options Méditerranéennes*, sous presse.

Julier B., Ecalle C., Huyghe C. (1999). Potential for including the digestibility in breeding of alfalfa. XIII Eucarpia Medicago Group Meeting, Perugia, Italie, 13-16 septembre 1999, 125-133.

Cuquel L. (1998). Variabilité génétique pour la digestibilité des parois chez la luzerne : Choix d'une méthode d'évaluation et applications. Université de Pau et des Pays de l'Adour, Maîtrise de Biochimie, 37 p.

Documents en préparation:

- Héritabilité de la digestibilité et de la teneur en fibres chez la luzerne, à soumettre dans une revue à comité de lecture.
- Héritabilité de la digestibilité et de la teneur en fibres chez la luzerne, North American Alfalfa Improvement Conference, Madison, Juillet 2000.

Tableau 1. Données disponibles sur les essais diallèle, factoriel et descendance de polycross

	1997	1998 - C1	1998 - C2	1999 - C1	1999 - C2
Diallèle et factoriel					
Lusignan	X	X	X	X	X
Mas-Grenier	X				
Cappelle		X	X		
Polycross					
Lusignan	X	X	X	X	X
Montpellier	X	X	X	X	X
Rodez	X	X	X	X	X
Les Alleuds		X	X	X	X
Verneuil	X	X	X	X	X

Les cases blanches indiquent des essais non récoltables ou des données non exploitables.

Tableau 2.A. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour le poids sec par plante et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	NS	0.8	5.2	0.13
Lusignan 1998 coupe 1	NS	8.9	111.9	0.07
Lusignan 1998 coupe 2	NS	1.3	107.6	0.01
Lusignan 1999 coupe 1	NS	27.3	298.6	0.08
Lusignan 1999 coupe 2	NS	0.4	392.9	0.00
Cappelle 1998 coupe 1	NS	0.1	1.9	0.05
Cappelle 1998 coupe 2	NS	0	2.7	0.00
Mas-Grenier 1997	**	36.0	79.3	0.31

Avec σ^2_G : variance de l'effet génotype F1, σ^2_E : variance de l'erreur

NS: non significatif au seuil de 5%; *, **, *** : significatif aux seuils de 5%, 1% et 1%

Tableau 2.B. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour la hauteur et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	NS	2.87	30.07	0.09
Lusignan 1998 coupe 1	NS	1.03	91.58	0.01
Lusignan 1998 coupe 2	NS	3.82	48.66	0.07
Lusignan 1999 coupe 1	**	28.28	63.88	0.31
Lusignan 1999 coupe 2	*	8.37	43.57	0.16
Cappelle 1998 coupe 1	*	5.77	28.98	0.17
Cappelle 1998 coupe 2	***	15.84	37.85	0.30
Mas-Grenier 1997	NS	1.11	82.95	0.01

Tableau 2.C. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour le rapport feuilles/tiges et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	***	0.00597	0.01542	0.28
Lusignan 1998 coupe 1	***	0.00189	0.00465	0.20
Lusignan 1998 coupe 2	***	0.00167	0.00336	0.25
Lusignan 1999 coupe 1	**	0.00282	0.0103	0.21
Lusignan 1999 coupe 2	***	0.00294	0.00743	0.28
Cappelle 1998 coupe 1	*	0.0023	0.012	0.07
Cappelle 1998 coupe 2	***	0.004	0.009	0.31
Mas-Grenier 1997	*	0.0129	0.0520	0.20

Tableau 2.D. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour la teneur en NDF et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	***	1.24	2.74	0.31
Lusignan 1998 coupe 1	***	2.07	3.74	0.35
Lusignan 1998 coupe 2	***	1.80	3.21	0.36
Lusignan 1999 coupe 1	*	0.98	4.49	0.18
Lusignan 1999 coupe 2	**	1.18	3.91	0.23
Cappelle 1998 coupe 1	***	2.07	3.74	0.34
Cappelle 1998 coupe 2	***	1.80	3.21	0.36
Mas-Grenier 1997	*	2.69	8.52	0.24

Tableau 2.E. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour la teneur en ADF et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	***	1.01	2.43	0.29
Lusignan 1998 coupe 1	***	1.82	3.36	0.35
Lusignan 1998 coupe 2	***	1.36	2.34	0.36
Lusignan 1999 coupe 1	*	0.69	3.19	0.18
Lusignan 1999 coupe 2	**	0.91	2.81	0.24
Cappelle 1998 coupe 1	**	0.82	2.74	0.23
Cappelle 1998 coupe 2	**	0.55	2.00	0.22
Mas-Grenier 1997	*	1.61	5.49	0.23

Tableau 2.F. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour la teneur en ADL et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	**	0.04	0.14	0.22
Lusignan 1998 coupe 1	**	0.05	0.18	0.21
Lusignan 1998 coupe 2	***	0.04	0.10	0.28
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.04	0.27	0.13
Lusignan 1999 coupe 2	*	0.05	0.22	0.19
Cappelle 1998 coupe 1	*	0.02	0.16	0.11
Cappelle 1998 coupe 2	**	0.03	0.11	0.21
Mas-Grenier 1997	**	2.32	6.29	0.27

Tableau 2.G. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour la solubilité enzymatique et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	***	0.98	2.17	0.31
Lusignan 1998 coupe 1	***	1.87	4.50	0.29
Lusignan 1998 coupe 2	***	0.98	2.55	0.27
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.39	3.37	0.10
Lusignan 1999 coupe 2	**	0.89	2.51	0.26
Cappelle 1998 coupe 1	**	0.83	3.27	0.20
Cappelle 1998 coupe 2	**	0.67	2.39	0.22
Mas-Grenier 1997	**	2.32	6.29	0.27

Tableau 2.H. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement factoriel, pour la teneur en protéines et calcul de l'héritabilité au sens large.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	***	0.16	0.43	0.27
Lusignan 1998 coupe 1	NS	0	0.96	0.00
Lusignan 1998 coupe 2	***	0.31	0.42	0.42
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.08	1.69	0.05
Lusignan 1999 coupe 2	**	0.32	0.92	0.26
Cappelle 1998 coupe 1	NS	0.1	1.62	0.06
Cappelle 1998 coupe 2	**	0.23	0.97	0.19
Mas-Grenier 1997	**	0.83	1.73	0.32

Tableau 3.A. Analyse factorielle, pour le rapport feuilles/tiges

	σ^2_F	σ^2_M	σ^2_{FM}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.0036***	0.0029***	0.0001NS	0.0154	0.0129	0.0006	0.45
Lusignan 1998 coupe 1	0.0013***	0.0003*	0.0001NS	0.0051	0.0026	0.0006	0.32
Lusignan 1998 coupe 2	0.0008***	0.0005***	0.0006NS	0.0033	0.0021	0.0034	0.37
Lusignan 1999 coupe 1	0.0019***	0.0018***	0 NS	0.0100	0.0074	0	0.43
Lusignan 1999 coupe 2	0.0016***	0.0010**	0.0004NS	0.0076	0.0049	0.0024	0.38
Cappelle 1998 coupe 1	0.0014**	0.0025***	0 NS	0.0112	0.006	0	0.38
Cappelle 1998 coupe 2	0.0027***	0.0025***	0 NS	0.0097	0.008	0	0.47
Mas-Grenier 1997	0.0025NS	0.0052*	0.0058NS	0.0523	0.0061	0.0348	0.41

Avec σ^2_F : variance de l'effet parent mâle, σ^2_M : variance de l'effet parent femelle, σ^2_{FM} : variance de l'interaction mâle x femelle, σ^2_E : variance de l'erreur, σ^2_A : variance d'additivité, σ^2_D : variance de dominance, H^2_{SS} : héritabilité au sens strict

Tableau 3.B. Analyse factorielle, pour la teneur en NDF

	σ^2_F	σ^2_M	σ^2_{FM}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.32**	0.83***	0.21NS	2.74	2.16	1.26	0.42
Lusignan 1998 coupe 1	1.03***	0.85***	0.01NS	4.1	3.75	0.06	0.48
Lusignan 1998 coupe 2	0.30**	0.97***	0.71*	3.15	2.07	4.26	0.37
Lusignan 1999 coupe 1	0.60**	0.78***	0NS	4.30	2.76	0	0.39
Lusignan 1999 coupe 2	0.43**	0.43**	0.31NS	4.00	1.51	1.86	0.29
Cappelle 1998 coupe 1	0.26*	0.96***	0.01NS	3.65	2.43	0.04	0.40
Cappelle 1998 coupe 2	0.39***	0.74***	0 NS	2.41	2.26	0	0.48
Mas-Grenier 1997	1.38**	1.95***	0 NS	8.47	4.69	1.86	0.44

Tableau 3.C. Analyse factorielle, pour la teneur en ADF

	σ^2_F	σ^2_M	σ^2_{FM}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.28**	0.63***	0.20NS	2.43	1.82	1.20	0.41
Lusignan 1998 coupe 1	1.04***	0.60***	0 NS	3.70	3.28	0	0.47
Lusignan 1998 coupe 2	0.30***	0.66***	0.51*	2.31	1.58	3.06	0.37
Lusignan 1999 coupe 1	0.42**	0.53***	0 NS	3.09	1.90	0	0.38
Lusignan 1999 coupe 2	0.29**	0.30**	0.29NS	2.87	0.99	1.74	0.28
Cappelle 1998 coupe 1	0.24*	0.63***	0.02NS	2.74	1.72	0.12	0.39
Cappelle 1998 coupe 2	0.29**	0.50***	0 NS	1.85	1.58	0	0.46
Mas-Grenier 1997	0.77**	1.23***	0.01NS	5.45	4.00	0.04	0.42

Tableau 3.D. Analyse factorielle, pour la teneur en ADL

	σ^2_F	σ^2_M	σ^2_{FM}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.016**	0.021***	0.003NS	0.139	0.072	0.018	0.34
Lusignan 1998 coupe 1	0.036***	0.011*	0 NS	0.194	0.094	0	0.33
Lusignan 1998 coupe 2	0.011***	0.027***	0.007NS	0.100	0.071	0.042	0.40
Lusignan 1999 coupe 1	0.027*	0.038**	0NS	0.247	0.130	0	0.34
Lusignan 1999 coupe 2	0.011*	0.019**	0.015NS	0.221	0.050	0.090	0.22
Cappelle 1998 coupe 1	0 NS	0.021***	0.009NS	0.164	0.036	0.054	0.21
Cappelle 1998 coupe 2	0.016**	0.027***	0NS	0.108	0.06	0	0.38
Mas-Grenier 1997	0.041**	0.099***	0.004NS	0.337	0.255	0.024	0.43

Tableau 3.E. Analyse factorielle, pour la solubilité enzymatique

	σ^2_F	σ^2_M	σ^2_{FM}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.24**	0.70***	0.14NS	2.17	1.79	0.84	0.43
Lusignan 1998 coupe 1	1.09	0.45	0.06NS	4.94	3.04	0.36	0.38
Lusignan 1998 coupe 2	0.25	0.55	0.36NS	2.43	1.36	2.16	0.35
Lusignan 1999 coupe 1	0.22*	0.38**	0NS	3.25	1.20	0	0.27
Lusignan 1999 coupe 2	0.16*	0.30**	0.37NS	2.57	0.67	2.22	0.26
Cappelle 1998 coupe 1	0.24	0.53	0.14NS	3.27	1.44	0.84	0.31
Cappelle 1998 coupe 2	1.39	1.19	0.34	5.01	4.93	2.04	0.47
Mas-Grenier 1997	0.92**	1.53***	0.31NS	6.27	4.69	1.86	0.41

Tableau 4. Analyse des effets génotype F1, condition environnementale et de leur interaction, et calcul de l'héritabilité au sens large pour la descendance du plan factoriel.

	σ^2_G	$\sigma^2_{G \times C}$	σ^2_E	H^2_{SL}
Poids sec /plante	11.5 *	0 NS	122.4	0.09
Hauteur	3.4 *	4.8 *	52.7	0.06
Rapport feuilles/tiges	0.002 *	0.001 *	0.013	0.12
Protéines	0.10 *	0.14 *	1.08	0.07
NDF	0.90 *	0.55 *	4.02	0.16
ADF	0.67 *	0.40 *	3.00	0.16
ADL	0.02 *	0.02 *	0.18	0.10
Solubilité enzymatique	0.58 *	0.51 *	3.33	0.13

Tableau 5. Analyse des effets mâle, femelle et de leur interaction, et calcul des variances d'additivité, de dominance et de l'héritabilité au sens strict, dans le plan factoriel sur l'ensemble des conditions environnementales.

	σ^2_F	σ^2_M	σ^2_{FM}	σ^2_A	σ^2_D	σ^2_E	H^2_{SS}
Poids sec /plante	5.62 *	1.39 *	4.75 *	10.9	28.5	123.3	0.13
Hauteur	1.82 *	1.44 *	0.99 NS	5.86	5.94	57.02	0.11
Rapport feuilles/tiges	0.001 *	0.001 *	0 NS	0.004	0	0.01	0.29
Protéines	0.001 NS	0.10 *	0.003 NS	0.2	0.02	1.21	0.14
NDF	0.25 *	0.70 *	0.07 NS	1.85	0.42	4.52	0.29
ADF	0.21 *	0.50 *	0.05 NS	1.38	0.3	3.37	0.29
ADL	0.006 *	0.019 *	0.001 NS	0.05	0.003	0.20	0.20
Solubilité enzymatique	0.19 *	0.44 *	0.03 NS	1.23	0.20	3.80	0.25

Tableau 6.A. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour le poids sec par plante.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	*	19.5	51.1	0.28
Lusignan 1998 coupe 1	NS	10.8	77.0	0.12
Lusignan 1998 coupe 2	NS	5.97	80.1	0.07
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0	87.8	0
Lusignan 1999 coupe 2	NS	4.0	82.5	0.04
Cappelle 1998 coupe 1	NS	0.5	6.2	0.07
Cappelle 1998 coupe 2	NS	2.2	14.2	0.14
Mas-Grenier 1997	NS			

Avec σ^2_G : variance de l'effet génotype F1, σ^2_E : variance de l'erreur, H^2_{SL} : héritabilité au sens large

Tableau 6.B. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour la hauteur.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	**	19.5	51.1	0.28
Lusignan 1998 coupe 1	NS	2.8	87.7	0.03
Lusignan 1998 coupe 2	NS	7.1	124.9	0.05
Lusignan 1999 coupe 1	*	27.3	104.6	0.21
Lusignan 1999 coupe 2	***	40.4	69.6	0.37
Cappelle 1998 coupe 1	**	39.0	28.0	0.58
Cappelle 1998 coupe 2	***	183.0	26.2	0.75
Mas-Grenier 1997				

Tableau 6.C. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour le rapport feuilles/tiges.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	*	0.0047	0.0248	0.10
Lusignan 1998 coupe 1	**	0.0015	0.0051	0.23
Lusignan 1998 coupe 2	NS	0.0005	0.0038	0.12
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.0015	0.0116	0.11
Lusignan 1999 coupe 2	**	0.0026	0.0083	0.24
Cappelle 1998 coupe 1	***	0.0142	0.0137	0.51
Cappelle 1998 coupe 2	***	0.0139	0.0133	0.51
Mas-Grenier 1997	**	0.0148	0.0370	0.29

Tableau 6.D. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour la teneur en NDF.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	**	1.32	4.88	0.21
Lusignan 1998 coupe 1	***	1.96	3.81	0.34
Lusignan 1998 coupe 2	NS	0	6.73	0
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.72	5.40	0.12
Lusignan 1999 coupe 2	***	2.09	4.46	0.32
Cappelle 1998 coupe 1	***	2.85	3.93	0.42
Cappelle 1998 coupe 2	***	6.24	3.81	0.62
Mas-Grenier 1997	**	4.45	7.58	0.37

Tableau 6.E. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour la teneur en ADF.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	*	0.81	3.86	0.17
Lusignan 1998 coupe 1	***	1.53	2.93	0.34
Lusignan 1998 coupe 2	NS	0.07	4.66	0.01
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.38	3.73	0.09
Lusignan 1999 coupe 2	***	1.53	3.35	0.26
Cappelle 1998 coupe 1	***	2.48	3.17	0.44
Cappelle 1998 coupe 2	**	4.62	3.00	0.61
Mas-Grenier 1997	**	2.97	5.31	0.36

Tableau 6.F. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour la teneur en ADL.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	***	0.09	0.21	0.16
Lusignan 1998 coupe 1	**	0.06	0.14	0.29
Lusignan 1998 coupe 2	NS	0.01	0.23	0.06
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.03	0.24	0.10
Lusignan 1999 coupe 2	***	0.12	0.25	0.32
Cappelle 1998 coupe 1	***	0.11	0.22	0.33
Cappelle 1998 coupe 2	***	0.30	0.18	0.62
Mas-Grenier 1997	**	0.24	0.40	0.37

Tableau 6.G. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour la solubilité enzymatique.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	**	1.11	3.48	0.24
Lusignan 1998 coupe 1	***	2.08	3.20	0.39
Lusignan 1998 coupe 2	NS	0	5.20	0
Lusignan 1999 coupe 1	NS	0.34	4.20	0.07
Lusignan 1999 coupe 2	***	0.12	0.25	0.32
Cappelle 1998 coupe 1	***	2.48	3.69	0.40
Cappelle 1998 coupe 2	***	5.16	3.32	0.61
Mas-Grenier 1997	**	0.24	0.40	0.37

Tableau 6.H. Analyse de l'effet du génotype dans le plan de croisement diallèle, pour la teneur en protéines.

	Signification de l'effet génotype	σ^2_G	σ^2_E	H^2_{SL}
Lusignan 1997	***	0.81	1.06	0.43
Lusignan 1998 coupe 1	**	0.57	1.44	0.28
Lusignan 1998 coupe 2	NS	0.12	1.13	0.10
Lusignan 1999 coupe 1	**	0.43	1.38	0.24
Lusignan 1999 coupe 2	**	0.55	1.32	0.29
Cappelle 1998 coupe 1	***	1.06	1.62	0.40
Cappelle 1998 coupe 2	***	2.47	1.20	0.67
Mas-Grenier 1997	**	0.82	1.50	0.35

Tableau 7.A. Analyse diallèle pour le rapport feuilles/tiges.

	σ^2_g	σ^2_s	σ^2_{REC}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.0024**	0.0003NS	0.0003NS	0.025	0.010	0.002	0.28
Lusignan 1998 coupe 1	0.0007***	0.0000 NS	0.0005	0.005	0.003	0.00	0.38
Lusignan 1998 coupe 2	0.0001*	0.0000 NS	0.0003 NS	0.003	0.001	0.000	0.14
Lusignan 1999 coupe 1	0.0015***	0.0000 NS	0.0000 NS	0.01	0.006	0.000	0.37
Lusignan 1999 coupe 2	0.0010***	0.0003 NS	0.0002 NS	0.008	0.004	0.002	0.33
Cappelle 1998 coupe 1	0.0043***	0.0012*	0.0012**	0.013	0.017	0.007	0.52
Cappelle 1998 coupe 2	0.0061***	0.0012*	0.0008*	0.013	0.023	0.007	0.59
Mas-Grenier 1997 *	0.0067***	0.0000 NS	0.0057 NS	0.036	0.031	0.000	0.46

Avec σ^2_g : variance d'aptitude générale à la combinaison et signification de l'effet d'AGC, σ^2_{ASC} : variance d'aptitude spécifique à la combinaison et signification de l'effet d'ASC, σ^2_{REC} : variance de l'effet réciproque, et signification de l'effet réciproque, σ^2_E : variance de l'erreur, σ^2_A : variance d'additivité, σ^2_D : variance de dominance, H^2_{SS} : héritabilité au sens strict

* diallèle 6 x 6 à Mas Grenier, la descendance du parent Malzeville étant manquante

Tableau 7.B. Analyse diallèle pour la teneur en NDF.

	σ^2_g	σ^2_s	σ^2_{REC}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.33*	1.42**	0.00NS	4.87	0.36	8.50	0.23
Lusignan 1998 coupe 1	0.68***	0.05 NS	0.85***	3.81	2.67	0.29	0.41
Lusignan 1998 coupe 2	0.14 NS	0.00 NS	0.00 NS	6.74	0.72	0.00	0.10
Lusignan 1999 coupe 1	0.57**	0.24 NS	0.00 NS	5.41	2.13	1.45	0.29
Lusignan 1999 coupe 2	0.49***	0.72*	0.59**	4.45	1.47	4.33	0.28
Cappelle 1998 coupe 1	0.82***	0.18 NS	0.46*	3.94*	3.15	1.09	0.43
Cappelle 1998 coupe 2	2.87***	0.64*	0.25 *	3.78	11.06	3.84	0.66
Mas-Grenier 1997	2.34***	0.00 NS	1.61 NS	8.01	10.18	0.00	0.56

Tableau 7.C. Analyse diallèle pour la teneur en ADF.

	σ^2_g	σ^2_s	σ^2_{REC}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.21*	0.82*	0.00 NS	3.85	0.30	4.89	0.21
Lusignan 1998 coupe 1	0.55***	0.07 NS	0.67***	2.92	2.15	0.42	0.42
Lusignan 1998 coupe 2	0.14 NS	0.00 NS	0.00 NS	4.66	0.61	0.00	0.12
Lusignan 1999 coupe 1	0.32**	0.19 NS	0.00 NS	3.71	1.17	1.11	0.26
Lusignan 1999 coupe 2	0.39***	0.50*	0.41**	3.34	1.25	2.98	0.30
Cappelle 1998 coupe 1	0.74***	0.15 NS	0.43*	3.17	2.84	0.87	0.46
Cappelle 1998 coupe 2	2.09***	0.49*	0.19*	2.97	8.02	2.95	0.65
Mas-Grenier 1997	1.58***	0.00 NS	0.47 NS	5.72	6.89	0.00	0.55

Tableau 7.D. Analyse diallèle pour la teneur en ADL.

	σ^2_g	σ^2_s	σ^2_{REC}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.036***	0.063**	0.003 NS	0.200	0.100	0.380	0.33
Lusignan 1998 coupe 1	0.014***	0.005 NS	0.032***	0.140	0.051	0.030	0.28
Lusignan 1998 coupe 2	0.017**	0.005 NS	0.000 NS	0.22	0.063	0.030	0.23
Lusignan 1999 coupe 1	0.014*	0.020 NS	0.000 NS	0.240	0.043	0.120	0.21
Lusignan 1999 coupe 2	0.024***	0.033 NS	0.037**	0.240	0.072	0.200	0.27
Cappelle 1998 coupe 1	0.035***	0.000 NS	0.013 NS	0.210	0.143	0.000	0.41
Cappelle 1998 coupe 2	0.146***	0.020 NS	0.003 NS	0.180	0.571	0.120	0.70
Mas-Grenier 1997	0.148***	0.000 NS	0.000 NS	0.400	0.634	0.000	0.61

Tableau 7.E. Analyse diallèle pour la solubilité enzymatique.

	σ^2_g	σ^2_s	σ^2_{REC}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.27**	1.12**	0.00 NS	3.48	0.33	6.71	0.24
Lusignan 1998 coupe 1	0.78***	0.14 NS	0.85***	3.19	3.01	0.83	0.47
Lusignan 1998 coupe 2	0.00 NS	0.00 NS	0.00 NS	5.41	0.06	0.00	0.00
Lusignan 1999 coupe 1	0.28*	0.17 NS	0.00 NS	4.18	1.00	0.99	0.22
Lusignan 1999 coupe 2	0.31***	0.82**	0.69***	3.39	0.71	4.93	0.26
Cappelle 1998 coupe 1	0.80***	0.08 NS	0.34 NS	3.69	3.14	0.46	0.45
Cappelle 1998 coupe 2	2.46***	0.41 NS	0.18*	3.29	9.58	2.43	0.68
Mas-Grenier 1997	1.54***	0.00 NS	1.13 NS	6.44	6.76	0.00	0.51

Tableau 7.F. Analyse diallèle pour la teneur en protéines.

	σ^2_g	σ^2_s	σ^2_{REC}	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Lusignan 1997	0.271***	0.583***	0.107*	1.060	0.70	3.50	0.35
Lusignan 1998 coupe 1	0.275***	0.175 NS	0.018 NS	1.440	0.98	1.05	0.38
Lusignan 1998 coupe 2	0.056*	0.077 NS	0.000 NS	1.130	0.19	0.46	0.19
Lusignan 1999 coupe 1	0.212***	0.153 NS	0.000 NS	1.36	0.75	0.92	0.35
Lusignan 1999 coupe 2	0.018*	0.337**	0.233**	1.330	0.00	2.02	0.20
Cappelle 1998 coupe 1	0.444***	0.057 NS	0.003 NS	1.620	1.74	0.34	0.50
Cappelle 1998 coupe 2	1.304***	0.113 NS	0.000 NS	1.180	5.14	0.67	0.77
Mas-Grenier 1997	0.544***	0.000 NS	0.595 NS	1.440	2.28	0.00	0.61

Tableau 8. Analyse des effets génotype F1, condition environnementale et de leur interaction, et calcul de l'héritabilité au sens large pour la descendance du plan diallèle. Les données de Mas-Grenier n'ont pas été incluses.

	σ^2_G	$\sigma^2_{G \times C}$	σ^2_E	H^2_{Sh}
Poids sec /plante	6.9***	0 NS	47.1	0.13
Hauteur	22.3***	19.8***	72.6	0.19
Rapport feuilles/tiges	0.001***	0.004***	0.011	0.06
Protéines	0.35***	0.46***	1.31	0.16
NDF	0.66***	1.40***	4.78	0.10
ADF	0.51***	1.05***	3.57	0.10
ADL	0.028***	0.070***	0.210	0.09
Solubilité enzymatique	0.51***	1.26***	3.85	0.09

Tableau 9. Analyse des effets d'AGC, d'ASC et réciproques, et calcul des variances d'additivité, de dominance et de l'héritabilité au sens strict, dans le plan diallèle sur l'ensemble des conditions environnementales. Les données de Mas-Grenier n'ont pas été incluses.

	σ^2_g	σ^2_s	σ^2_{REC}	$\sigma^2_{g \times C}$	$\sigma^2_{s \times C}$	$\sigma^2_{REC \times C}$	σ^2_E	σ^2_A	σ^2_D	H^2_{SS}
Poids sec /plante	0.04**	1.64**	4.38***	0.83NS	0 NS	1.94 NS	51.34	0	9.85	0.05
Hauteur	10.5***	6.3***	2.1***	7.4***	4.7 NS	0.4 NS	71.3	37.7	38.0	0.34
Rapport feuilles/tiges	0.0004 ***	0 NS	0.0004 ***	0.002 ***	0.001 ***	0 NS	0.011	0.0016	0.0003	0.13
Protéines	0.12***	0.08***	0.02**	0.37***	0.16*	0.08 NS	1.30	0.44	0.46	0.27
NDF	0.21***	0 NS	0.14***	0.88***	0.95**	0.41 NS	4.72	0.92	0	0.16
ADF	0.17***	0 NS	0.12***	0.69***	0.75**	0.27 NS	3.53	0.72	0	0.15
ADL	0.009 ***	0 *	0.006 ***	0.046 ***	0.043 **	0.15 NS	0.200	0.035	0	0.06
Solubilité enzymatiq.	0.14***	0 NS	0.10***	0.89***	0.91**	0.44*	3.81	0.61	0	0.14

Tableau 10.A. Analyse de la descendance du polycross, à Lusignan

	σ^2_{GE}	σ^2_E	h^2	σ^2_{var}	$\sigma^2_{pl(var)}$
1997					
Hauteur	14,4 ***	23,5	0,38	3.87 ***	10.95 ***
Rendement	103 ***	204	0,34	18.65 ***	86.34 ***
F/T	0,0052 **	0,0176	0,23	0.0015 ***	0.0038 **
ADL	0,043 ***	0,115	0,27	0.007 ***	0.037 ***
NDF	0,86 ***	2,08	0,29	0.07 ***	0.80 ***
ADF	0,59 ***	1,98	0,23	0 NS	0.60 ***
Solubilité	0,71 ***	2,56	0,22	0 NS	0.72 ***
Protéines	0,42 ***	0,58	0,42	0.25 ***	0.19 **
1998 coupe 1					
Hauteur	9,59 **	52,3	0,15	5.22 ***	4.85 NS
rendement	1596 ***	3030	0,35	451 ***	1196 ***
F/T	0,0044 ***	0,0078	0,36	0.0015 ***	0.0031 ***
ADL	0,028 ***	0,089	0,24	0.008 ***	0.021 **
NDF	0,98 ***	1,63	0,38	0.34 ***	0.67 ***
ADF	0,74 ***	1,33	0,36	0.27 ***	0.49 ***
Solubilité	0,69 ***	1,72	0,29	0.27 ***	0.44 **
Protéines	0,31 ***	0,66	0,32	0.13 ***	0.19 ***
1998 coupe 2					
Hauteur	13.0 ***	39.9	0.25	2.1 **	11.3 ***
rendement	534 ***	1404	0,28	168 ***	376 **
F/T	0,0042 **	0,0193	0,18	0.0016 ***	0.0028 *
ADL	0,088 ***	0,304	0,22	0.032 ***	0.059 **
NDF	2,37 ***	8,41	0,22	0.83 ***	1.63 **
ADF	1,77 ***	6,38	0,22	0.65 ***	1.19 *
Solubilité	1,65 ***	6,47	0,20	0.59 ***	1.12 *
Protéines	0,35 ***	1,15	0,23	0.10 ***	0.36 **
1999 coupe 1					
Hauteur	11,7**	60,6	0,16	0 NS	11.7 **
Rendement	1804 ***	4449	0,29	335 ***	1507 ***
F/T	0,0025 **	0,0112	0,18	0.0009 ***	0.0017 *
ADL	0,019 **	0,103	0,16	0.002 NS	0.018 *
NDF	0,69 **	2,81	0,20	0.07 *	0.63 **
ADF	0,52 **	2,05	0,20	0.06 *	0.46 **
Solubilité	0,57 ***	1,95	0,23	0 NS	0.57 ***
Protéines	0,25 **	0,99	0,20	0 NS	0.25 **
1999 coupe 2					
Hauteur	6,7 **	15,4	0,30	3.3 ***	3.5 **
Rendement	1140 ***	2680	0,30	282 ***	895 ***
F/T	0,0009NS	0,011	0,08		
ADL	0,021 **	0,104	0,17	0.011 ***	0.012 NS
NDF	0,47 *	2,98	0,14	0.21 ***	0.29 NS
ADF	0,38 *	2,23	0,15	0.19 ***	0.22 NS
Solubilité	0,46 **	1,81	0,20	0.12 ***	0.37 **
Protéines	0,15 **	0,77	0,16	0.02 *	0.13 *

σ^2_{GE} : variance de l'effet génotype et signification de l'effet génotype, σ^2_E : variance d'erreur, h^2 : héritabilité au sens large, σ^2_{var} : variance de l'effet variété et signification de l'effet variété, $\sigma^2_{pl(var)}$: variance de l'effet plante hiérarchisé à l'effet variété et signification de cet effet.

NS: non significatif au seuil de 5%, *, **, *** : significatif au seuil de 5%, 1%, 1%o.

Tableau 10.B. Analyse de la descendance du polycross, aux Alleuds

	σ^2_{GE}	σ^2_E	h^2	σ^2_{var}	$\sigma^2_{pl(var)}$
1998 coupe 1					
Hauteur	6,25 **	23,9	0,21	5.15 **	1.72 NS
Rendement	398 NS	7268	0,05		
F/T	0,0003 NS	0,0682	0,00		
ADL	0 NS	1,59	0,00		
NDF	0 NS	24	0,00		
ADF	0 NS	30,3	0,00		
Solubilité	0 NS	36	0,00		
Protéines	0,04 NS	7,12	0,01		
1998 coupe 2					
Hauteur	3,4 NS	42,3	0,07		
Rendement	203 NS	4656	0,04		
F/T	0 NS	0,0129	0,00	0 NS	0.023 *
ADL	0,023 *	0,144	0,14		
NDF	0,26 NS	2,06	0,11		
ADF	0,26 NS	2,73	0,09		
Solubilité	0,07 NS	3,7	0,02		
Protéines	0,19 ***	0,64	0,23	0.0026 *	0.191 ***
1999 coupe 1					
Hauteur	15,5 ***	37,7	0,29	8.51 ***	7.48 **
Rendement	746 NS	8602	0,08		
F/T	0 NS	0,0138	0,00		
ADL	0,001 NS	0,136	0,01		
NDF	0,12 NS	3,85	0,03		
ADF	0,07 NS	2,74	0,02		
Solubilité	0,06 NS	2,77	0,02		
Protéines	0,04 NS	1,16	0,03		
1999 coupe 2					
Hauteur	18,1 ***	28,3	0,39	11.4 ***	8.10 ***
Rendement	1294 ***	3137	0,29	174 **	1136 ***
F/T	0,0025 ***	0,0091	0,22	0.0017 ***	0.0010 NS
ADL	0,03 ***	0,09	0,25	0.020 ***	0.012 *
NDF	0,97 ***	2,17	0,31	0.57 ***	0.46 **
ADF	0,69 ***	1,74	0,28	0.40 ***	0.33 *
Solubilité	0,82 ***	1,96	0,29	0.65 ***	0.24 *
Protéines	0,29 ***	0,83	0,26	0.16 ***	0.15 *

Tableau 10.C. Analyse de la descendance du polycross, à Rodez

	σ^2_{GE}	σ^2_E	h^2	σ^2_{var}	$\sigma^2_{pl(var)}$
1997					
Rendement	41,5 **	172,4	0,19	13,7 ***	30,4 *
F/T	0,0038 ***	0,0089	0,30	0,0018 ***	0,0023 **
ADL	0,04 ***	0,12	0,25	0,04 ***	0,01 NS
NDF	0,82 ***	1,74	0,32	0,62 ***	0,26 *
ADF	0,63 ***	1,61	0,28	0,45 ***	0,22 *
Solubilité	0,58 ***	1,46	0,28	0,47 ***	0,16 NS
Protéines	0,36 ***	0,65	0,36	0,29 ***	0,09 *
1998 coupe 1					
Hauteur	3*	23,4	0,11	2,6 ***	0,72 NS
Rendement	577***	1294	0,31	178 ***	421 ***
F/T	0,0043 ***	0,0058	0,43	0,0022 ***	0,0024 ***
ADL	0,037 ***	0,085	0,30	0,011 ***	0,027 ***
NDF	0,6 ***	0,95	0,39	0,21 ***	0,41 ***
ADF	0,87 ***	1,39	0,38	0,36 ***	0,55 ***
Solubilité	0,84 ***	1,54	0,35	0,30 ***	0,57 **
Protéines	0,22 ***	0,64	0,26	0,06 ***	0,17 **
1998 coupe 2					
Hauteur	12,1 ***	10,3	0,54	6,5 ***	6,9 *
Rendement	487 ***	661	0,42	112 ***	387 ***
F/T	0,003 ***	0,0074	0,29	0,0001 **	0,0029 ***
ADL	0,037 ***	0,122	0,23	0,005 **	0,033 **
NDF	0,34 **	1,26	0,21	0,01 *	0,32 **
ADF	0,58 ***	1,73	0,25	0,04 **	0,52 ***
Solubilité	0,56 **	2,08	0,21	0,06 *	0,50 **
Protéines	0,11 **	0,5	0,18	0,03 **	0,08 *
1999 coupe 2					
Hauteur	9,6 ***	16	0,38	9,2 ***	2,5 *
Rendement	128 NS	1407	0,08	10 NS	119 NS
F/T	0,0021 ***	0,0064	0,25	0,0009 ***	0,0013 **
ADL	0,012 **	0,062	0,16	0,008 ***	0,005 NS
NDF	0,38 **	1,72	0,18	0,20 ***	0,21 *
ADF	0,29 **	1,31	0,18	0,18 ***	0,13 NS
Solubilité	0,29 **	1,24	0,19	0,14 ***	0,17 *
Protéines	0,15 ***	0,4	0,27	0,07 ***	0,09 **
1999 coupe 3					
Hauteur	2,7 NS	105,4	0,02	4,2 NS	0 NS
Rendement	127 *	766	0,14	21 *	108 *
F/T	0,003 *	0,02	0,15	0,0007 *	0,0026 *
ADL	0,0234 *	0,16	0,13	0,095 **	0,015 NS
NDF	0,69 *	4,77	0,13	0,17 NS	0,54 *
ADF	0,53 *	3,51	0,13	0,19 *	0,36 NS
Solubilité	0,5 *	3,26	0,13	0,15 *	0,37 NS
Protéines	0,29 **	1,12	0,21	0,14 ***	0,17 *

Tableau 10.E. Analyse de la descendance du polycross, à Montpellier

	σ^2_{GE}	σ^2_E	h^2	σ^2_{var}	$\sigma^2_{pl(var)}$
1997					
Hauteur	3,9	33,5	0,10		
Rendement	125 **	606	0,17	35 **	93 *
F/T	0,0019 *	0,0142	0,12	0.0004 *	0.0015 NS
ADL	0,02 *	0,16	0,11	0 NS	0.02 *
NDF	0,51 *	2,9	0,15	0 NS	0.58 **
ADF	0,33 *	2,6	0,11	0 NS	0.37 *
Solubilité	0,38 *	2,82	0,12	0 NS	0.46 *
Protéines	0,35 ***	0,99	0,26	0.06 ***	0.29 ***
1998 coupe 1					
Hauteur	14,03 ***	21,2	0,40	5.0 ***	9.6 ***
Rendement	445 ***	1130	0,28	93 ***	367 ***
F/T	0,0046 ***	0,0142	0,24	0.0006 **	0.0041 ***
ADL	0,048 ***	0,0671	0,41	0.013 ***	0.036 ***
NDF	0,76 ***	1,17	0,39	0.07 ***	0.69 ***
ADF	0,99 ***	1,48	0,40	0.06 ***	0.94 ***
Solubilité	0,91 ***	1,76	0,34	0.18 **	0.75 ***
Protéines	0,46 ***	1,01	0,31	0.26 ***	0.24 **
1998 coupe 2					
Hauteur	8,9 ***	13,6	0,40	4.7 ***	4.8 ***
Rendement	103 ***	225	0,31	63 ***	48 **
F/T	0,0012 NS	0,0266	0,04		
ADL	0,021 NS	0,271	0,07		
NDF	0 NS	7,08	0,00		
ADF	0 NS	7,21	0,00		
Solubilité	0,15 NS	7,49	0,02		
Protéines	0,55 ***	1,96	0,22	0.02 *	0.53 **
1999 coupe 1					
Hauteur	31 ***	58,4	0,35	16.7 ***	16.3 ***
Rendement	2125 ***	2704	0,44	1077 ****	1164 ***
F/T	0,0026 *	0,0173	0,13	0.0004 *	0.0022 *
ADL	0,011 NS	0,15	0,07	0.007 *	0.005 NS
NDF	0,49 NS	4,18	0,10		
ADF	0,35 NS	2,98	0,11		
Solubilité	0,23 NS	3,18	0,07		
Protéines	0,24 **	1,17	0,17	0.04 *	0.20 *
1999 coupe 2					
Hauteur	10 ***	21,6	0,32	11.9 ***	0 NS
Rendement	229 ***	790	0,22	115 ***	126 ***
F/T	0,0035 *	0,0192	0,15	0.0015 **	0.0022 NS
ADL	0,026 NS	0,301	0,08		
NDF	0,99 NS	7,93	0,11		
ADF	0,57*	4,41	0,11	0.55 ***	0.10 NS
Solubilité	0,65 NS	7,69	0,08		
Protéines	0,38**	1,99	0,16	0.29 ***	0.13 NS

Tableau 11. Analyse multilocale de la descendance du polycross, pour les récoltes de 1998 et 1999: variance des effets et signification.

	Variété	Plante(variété)	Condition x plante(variété)	Erreur	H ²
Hauteur	1.46 ***	2.80 ***	6.86 *	35.68	0.09
Rendement	3 ***	325 ***	624 ***	3415	0.08
F/T	0.0003 ***	0.0009 ***	0.0013 NS	0.0162	0.06
ADL	0.003 ***	0.013 ***	0.010 NS	0.212	0.06
NDF	0.064 ***	0.249 ***	0.265 NS	4.431	0.06
ADF	0.067 ***	0.212 ***	0.178 NS	4.306	0.06
Solubilité	0.046 ***	0.232 ***	0.229 *	4.670	0.05
Protéines	0.013 ***	0.118 ***	0.143 *	1.363	0.08

Tableau 12. Corrélations entre les valeurs obtenues sur les descendance et les plantes parentales bouturées, à Lusignan.

	Feuilles/tiges	NDF	ADF	ADL	Solubilité	Protéines
1998 coupe 1	0.293 **	0.340 **	0.342 **	0.253 *	0.349 **	0.242 *
1998 coupe 2	0.216 *	0.283 **	0.275 **	0.294 **	0.249 *	0.229 *
1999 coupe 1	0.243 *	0.203 NS	0.207 NS	0.157 NS	0.115 NS	0.112 NS
1999 coupe 2	0.305 **	0.144 NS	0.155 NS	0.14 NS	0.01 NS	-0.05 NS

Tableau 13. Corrélations entre la dégradation du NDF *in situ* et trois mesures au laboratoire de la digestibilité du NDF.

	Temps						
	2h	4h	8h	12h	24 h	48h	72 h
DigNDF1	NS	NS	NS	NS	NS	-0.88 ***	-0.83 ***
DigNDF2	NS	NS	NS	NS	NS	-0.75 **	-0.67 **
DigNDF3	NS	NS	NS	NS	NS	-0.78 ***	-0.83 ***

Tableau 14. Validité des équation de prédiction de critères biochimiques chez la luzerne, en utilisant la spectroscopie de réflectance dans le proche infrarouge. Sur la base des données ayant servi à bâtir les nouvelles équations, relation entre les valeurs manuelles et les valeurs prédites, d'une part avec les anciennes équations, d'autre part avec les nouvelles équations.

	Nombre d'échantillons	R ²	sep	pen	biais	sepc
F/T (ancienne équation)	1622	0,65	0,28	1,08	0,04	0,27
F/T (nouvelle équation)	1622	0,62	0,30	1,26	0,06	0,29
NDF (ancienne équation)	558	0,93	1,53	0,98	-0,22	1,52
NDF (nouvelle équation)	558	0,94	1,36	0,98	0,08	1,36
ADF (ancienne équation)	558	0,91	1,42	0,97	-0,06	1,42
ADF (nouvelle équation)	558	0,94	1,13	0,99	-0,01	1,13
ADL (ancienne équation)	558	0,76	0,53	0,94	-0,11	0,52
ADL (nouvelle équation)	558	0,83	0,44	1,00	0,01	0,44
Cendres (ancienne équation)	643	0,74	0,95	1,01	-0,10	0,94
Cendres (nouvelle équation)	643	0,76	0,92	0,98	0,06	0,91
Solubilité (ancienne équation)	558	0,86	2,01	0,98	0,22	2,00
Solubilité (nouvelle équation)	558	0,92	1,49	0,99	-0,01	1,49
Protéines (ancienne équation)	643	0,93	1,07	1,01	0,15	1,06
Protéines (nouvelle équation)	643	0,95	0,90	0,99	-0,02	0,90

Tableau 10.D. Analyse de la descendance du polycross, à Verneuil

	σ^2_{GE}	σ^2_E	h^2	σ^2_{var}	$\sigma^2_{pl(var)}$
1997					
Rendement	308 **	1855	0,14	0 NS	308 *
F/T	0,0012 NS	0,028	0,04		
ADL	0,011 NS	0,134	0,08		
NDF	0,17 NS	2,89	0,06		
ADF	0,08 NS	2,34	0,03		
Solubilité	0,06 NS	2,37	0,02		
Protéines	0,08 NS	0,96	0,08		
1998 coupe 1					
Rendement	1064 ***	3816	0,22	487 ***	636 NS
F/T	0,0016 *	0,0107	0,13	0.0009 **	0.0008 *
ADL	0,012 *	0,11	0,10	0.004 **	0.009 NS
NDF	0,08 NS	2,07	0,04		
ADF	0,06 NS	2,96	0,02		
Solubilité	0,42 **	2,26	0,16	0.22 ***	0.22 NS
Protéines	0,51 **	2,59	0,16	0.12 **	0.41 *
1998 coupe 2					
Rendement	514 ***	1372	0,27	198 ***	343 **
F/T	0,0008 NS	0,0099	0,07		
ADL	0,005 NS	0,142	0,03		
NDF	0 NS	2,87	0,00		
ADF	0 NS	4,14	0,00		
Solubilité	0,26 NS	2,14	0,11		
Protéines	0,18 **	0,69	0,21	0.02 **	0.16 ***
1999 coupe 1					
Rendement	1197 *	66739	0,02	535 ***	727 NS
F/T	0,0034 *	0,0264	0,11	0.0021 ***	0.0015 NS
ADL	0,031 **	0,132	0,19	0.015 ***	0.017 *
NDF	0,76 **	3,34	0,19	0.35 ***	0.45 *
ADF	0,53 **	2,93	0,15	0.28 ***	0.28 NS
Solubilité	0,57 **	2,28	0,20	0.16 ***	0.43 *
Protéines	0,21 **	1,22	0,15	0 NS	0.21 *
1999 coupe 2					
Rendement	865 ***	1387	0,38	484 ***	446 ***
F/T	0,0023 **	0,0087	0,21	0.0007 ***	0.0017 *
ADL	0,021 **	0,086	0,20	0.002 *	0.020 **
NDF	0,75 ***	2,22	0,25	0.11 **	0.65 ***
ADF	0,48 ***	1,58	0,23	0.13 ***	0.37 **
Solubilité	0,63 ***	1,66	0,28	0.08 **	0.56 ***
Protéines	0,32 ***	0,69	0,32	0.07 ***	0.26 ***