

Etude de la variabilité des populations de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) cultivées dans les régions arides tunisiennes et sélection de variétés plus performantes



Studie van de variabiliteit in gierstpopulaties (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) uit ariede zones in Tunesië en selectie van productieve rassen

par/door

ir. Mohamed LOUMEREM

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur (Ph.D.)
en Sciences Biologiques Appliquées
Section: Agronomie

Proefschrift voorgedragen tot het bekomen van de graad van
Doctor in de Toegepaste Biologische Wetenschappen
Richting: Landbouwkunde

op gezag van:

Rector: **Prof. dr. A. DE LEENHEER**

Decaan:

Prof. dr. H. VAN LANGENHOVE

Promotoren:

Prof. dr. ir. P. VAN DAMME
Prof. dr. ir. D. REHEUL

ISBN: 90-5989-030-2

DECLARATION-STATEMENT

L'auteur et les promoteurs autorisent la consultation de ce travail uniquement pour l'usage personnel. Toute autre utilisation est interdite par la loi d'impression. La reproduction d'une partie de ce travail doit se faire avec l'accord au préalable de l'auteur.

De auteur en de promotoren geven de toelating dit proefschrift voor consultatie ter beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperking van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting uitdrukkelijk de bron te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit dit proefschrift.

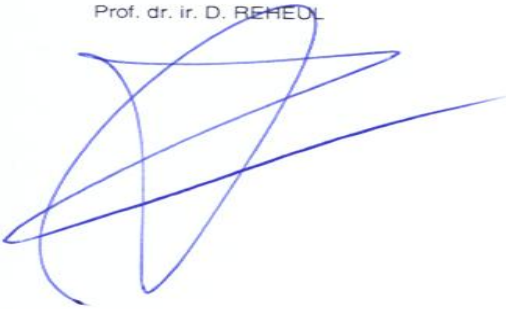
The author and promoters give the authorisation to consult and copy parts of this work for personal use only. Any other use is limited by laws of copyright. Permission to reproduce any material in this work should be obtained from the author.

Gent, 01 juillet 2004

Encadreur/promotoren:
Prof. dr. ir. P. VAN DAMME

Auteur:
ir. Mohamed LOUMEREM

Prof. dr. ir. D. REHEUL



REMERCIEMENTS

La thèse constitue une expérience intense, passionnante et marquante. Elle m'a donné l'occasion de côtoyer de nombreuses personnes pour qui je ne saurais en quelques lignes exprimer mes profonds sentiments.

Grâce au Professeur Tillo BEHAEGHE, elle a été de plus agréable, vivante, et excitante. Qu'il s'agisse de science ou d'états d'âme, nous avons beaucoup partagé : joies, excitations, etc. Le Prof. T. BEHAEGHE, compagnon des premiers essais aux dernières retouches (photos, tableaux, textes, etc.), présent à toutes les étapes de réalisation, sur le terrain, en laboratoire ou lors des recherches bibliographiques, et sans qui, l'ensemble aurait été inachevé. Je ne saurais comment lui exprimer ici toute l'étendue de ma reconnaissance pour l'encadrement de ce travail et les grandes orientations jusqu'au moindre détail. Il m'a été donné tout le long de ce travail de profiter aussi bien de sa rigueur scientifique que de ses qualités humaines, et m'est un honneur et un grand plaisir de lui exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements.

Le Prof. dr. ir P. VAN DAMME, a bien voulu, malgré ses nombreuses occupations, consacrer de nombreuses entrevues pour discuter le travail, m'apporter des conseils précieux, faire des remarques et critiques pertinentes et constructives dans l'exploitation des résultats et la réalisation de ce texte de synthèse.

Je suis extrêmement reconnaissant au Prof. dr. ir D. REHEUL pour l'intérêt soutenu qu'il a porté à ce travail malgré ses nombreuses obligations et d'avoir accepté d'être co-promoteur et membre du jury. J'apprécie votre caractère nobiliaire.

Mes remerciements les plus sincères sont aussi à ceux qui m'ont fait l'honneur d'être dans le comité de lecture de ma thèse, qui ont bien voulu-me faire-part de leurs pertinentes critiques et suggestions, et à ceux qui m'ont fait l'honneur d'être dans mon jury ; Prof. dr. A. DE LEENHEER, Prof. dr.H. VAN LANGENHOVE, Prof. dr. P. SORGELOOS, Prof. dr. ir. E. VAN BOCKSTAELE, Prof. dr. P. GOETGHEBEUR, Prof. dr. R. VIANE, Prof. dr. A. BAR-HEN et Prof. dr. ir. A. FERCHICHI.

Si l'IRA est un lieu à la fois convivial et pratique, c'est avant tout au Prof. dr. H. KATTALI, qu'il le doit : je ne serais ni le premier ni le dernier à le remercier, mais c'est sincère et mérite. Depuis le début de ce travail, Pr. dr. H. KHATTALI n'a cessé de m'apporter son soutien, son encouragement et son assistance aussi bien matérielle que morale qui m'ont permis de faire cette thèse dans des bonnes conditions, qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude et de mes vifs remerciements.

Toute l'équipe du laboratoire d'aridoculture et cultures oasiennes, particulièrement Prof. dr. ir. A. Ferchichi, directeur du dit laboratoire qui m'apporte un soutien amical précieux et d'avoir accepté d'être rapporteur et membre du jury, Hedi Yahya compagnon des essais sur terrain et en laboratoire, Belgacem Lechiheb , Nejya El Hajaji, Kamel Nagaz, Taoufik Hayek, Samira El Ouref et Mustafa Lehzien. Mais aussi tous les autres membres de laboratoire qui ont contribué à ce que ce travail se déroule dans la joie et la bonne humeur, sans oublier Messaoud Mars (ex-directeur de laboratoire d'agronomie). Mes remerciements chaleureux vont à l'ensemble du personnel de l'IRA, et tout particulièrement aux collègues de la station régionale de Ben Guerdan: Abdel magid Mcharek pour l'aide qu'il a toujours su m'apporter et surtout m'avoir aidé à corriger ma thèse, Noureddine Hamrouni, Ali Chaffar, Jilani Neffati, Abdallah Ellafi et Houcine Hraabi pour leurs aides sur le terrain -aux documentalistes: Salah Belhouchette, Amina Raboudi et Haj Boubakri - l'équipe du laboratoire informatique et documentations: Mohamed ali El Abed pour son aide qui est toujours rapide, Abderrazak Mabrouk, Taieb Chibli, Sadok Chuiki, Fatma Chniter et plus particulièrement Mohamed Jaouad qui m'a communiqué toutes les informations nécessaires à l'utilisation des logiciels statistiques (SPSS , Statistica) et qui m'a communiqué son courage à travers les e-mails envoyés en Belgique -l'équipe du laboratoire Zootechnie: Touhami Korchani pour les conseils stimulants et plus particulièrement Hajeur et Naceur El jarray, qui ont réalisés les analyses chimiques -l'équipe de laboratoire économie rural: plus particulièrement Mongi Sghair qui m'a accordé un soutien matériel pour la réalisation des essais chez les agriculteurs et Abdelmagid El Mokh -aux collègues du parc auto, magasin, restaurant de l'IRA plus particulièrement Mehdi Louihichi chef du parc et Salem Secrafi cafetier de l'IRA.

Je remercie pour leur aide et leur amitié les membres de laboratoire d'ethnobotanique et des cultures tropicales (faculté d'agronomie de Gent): Annita Goethals; ir. Tinneke Dirckx; Johan Geirnaert; Marleen Delanoy; Hamid Reza Karimi; Vahid Roohi; Sofie Ruyschaert; Ina Vandenbroek; Evert Thomas, Jean Ndimubandi (département d'Economie Rurale)... que j'ai pu côtoyer pendant la phase finale de cette thèse.

Évidemment, je ne peux pas oublier de remercier mes amis en Belgique.

Je remercie Marjolein Visser et sa famille pour l'aide qu'ils ont toujours su m'apporter avec enthousiasme lors de mon séjour d'étude à Gent. Je remercie également Heduig et sa famille pour l'aide et leur amitié.

Ce travail a fait l'objet de pas mal de crises de nerfs, chute de moral et remises en question. Mais il y en aura toujours un, qui m'a aidé quand j'en avais besoin, par son écoute, son attention, son compétence et pour qui je ne saurais trouver la force des mots à même d'exprimer ce dont je lui suis redevable pour son amitié, pour m'avoir permis de surmonter mes difficultés dans le travail et de m'avoir gentiment aidé à corriger ma thèse, c'est Mohamed Ben Sassi 'le grand de l'IRA'.

Il m'est également agréable de remercier tous ceux qui, à un instant donné dans la réalisation de ce travail, m'ont aidé par leurs conseils ou leur participation. En particulier je remercie Mohamed Thabet pour son aide sur le terrain, Mohamed Moussa, Chehbani bel Lachheb, Mohamed Wassar, Ammar Zerim, Fethi Ebdili, Kamel Larroussi, Bagdad Abaab. Mes remerciements vont également à mon collègue Mohamed Neffati qui m'a aidé à poursuivre mes études en Belgique et surtout de me faire connaître le Professeur Tillo Behaeghe

J'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à ceux qui, à la sueur de leur front, ont préservé la culture et les semences du mil local, rendant ainsi possible la synthèse qui est présentée ici; je voudrais en particulier citer: Mabrouk El Kourchani, Ahmed Ben Slama, Mohamed Rhouma, Khalifa Yahya, Belgacem Essid et Khalifa Essid

Je tiens à remercier les techniciens de CRDA (Médenine et Tataouine) pour l'aide qui ont toujours su m'apporter avec enthousiasme.

Je remercie également l'équipe ICRA Montpellier qui m'ont facilité l'accès aux bibliothèques du pôle Agropolis Montpellier.

Je remercie également ma famille et tous les amis.

Je remercie, enfin, SERST, pour son aide financière.

Résumé

L'esprit inventif des agriculteurs a permis la création d'agro-écosystèmes où les semences sont constamment adaptées aux conditions changeantes du sol, de l'irrigation et aux besoins nutritionnels.

Dans les régions arides tunisiennes où la pluviométrie annuelle est inférieure à 200 mm et les sols sont pauvres, les agriculteurs ont développé des systèmes d'agriculture complexes parmi lesquels le 'puits de surface'. C'est un système de production à composantes multiples fonctionnant dans un environnement difficile. Dans le 'puits de surface', espace intensément cultivé en milieu aride, les agriculteurs essaient de valoriser au maximum l'eau et l'espace cultivable à proximité.

En combinant plusieurs productions végétales et animales, l'agriculteur de puits de surface réussit à maintenir un équilibre de système de production très performant et à haute valeur ajoutée. Dans ce système, la culture du mil joue un rôle très important. La production de grains est réservée à l'alimentation humaine alors que la paille est utilisée à l'alimentation de bétail et la construction des huttes.

L'adoption de nouvelles technologies par les agriculteurs de ces régions arides (les années 80) a été la cause de l'appauvrissement du sol, la pollution de l'environnement (pesticides, plastiques,...), la monoculture, etc. La serriculture a remplacé le système d'agriculture de puits de surface, par l'introduction de nouvelles variétés à haut rendement, l'utilisation des engrais pour adapter les sols aux besoins nutritifs de ces variétés et l'utilisation d'importants réseaux d'irrigation pour satisfaire leur besoin en eau. Les pesticides sont arrivés peu après pour protéger ces monocultures uniformes contre les insectes nuisibles. Des plans de crédits ont servi, et servent encore, à inciter les agriculteurs à adopter de nouvelles technologies.

Avec le temps, certains agriculteurs ont complètement abandonné leur savoir-faire de culture de puits de surface, fruits d'une longue expérience empirique. Mais ce qui est plus grave et irréparable, c'est l'érosion phytogénétique du patrimoine local qui a touché plusieurs espèces. Ce phénomène ne cesse de s'aggraver d'année en année, pesant ainsi lourdement sur ces régions surtout après que les paysans ont perdu toute confiance aux variétés et espèces introduites.

On reconnaît que les ressources phytogénétiques sont en grande partie la principale matière première des agriculteurs et des scientifiques et qu'elles constituent également une réserve d'adaptabilité génétique, une garantie contre la menace de modification de l'environnement. Pour faire face aux pressions exercées sur cette diversité, l'IRA a entamé des programmes de recherche qui visent la préservation de la biodiversité génétique des régions arides tunisiennes.

Afin de préserver les ressources génétiques du mil local, le présent travail a visé l'étude et la conservation des populations locales du mil cultivées dans les régions arides tunisiennes.

En Tunisie, le mil ne constitue pas l'alimentation de base des populations rurales comme dans d'autres pays africains. Pourtant, il occupe une part très importante des surfaces mises en culture chaque année au centre et au sud du pays. Il est cultivé sur des sols marginaux, pauvres et tolère les eaux saumâtres. De ce fait, il reste la céréale la plus cultivée en irrigué dans les régions arides tunisiennes.

Pour réaliser les différents objectifs de ce travail, on a développé des méthodologies permettant de définir les actions prioritaires et d'atteindre les objectifs de recherche (prospection, évaluation, préservation et sélection). Les prospections organisées ont permis de collecter des échantillons du mil représentant la diversité génétique des populations cultivées dans les régions arides du pays. Le travail d'évaluation a touché les caractères agronomiques des échantillons en utilisant le descripteur du mil (IPBGRI & ICRISAT, 1993).

Pour obtenir une vue d'ensemble des résultats des observations et des mesures effectuées, trois étapes ont été réalisées:

- description générale de la diversité de l'ensemble et repérage des caractères importants;
- regroupement des cultivars basé sur les moyennes et la classification hiérarchique;
- établissement des critères de classification.

Cette étude de la variabilité génétique des cultivars du mil, cultivés dans ces régions arides, montre une variabilité phénotypique importante pour la majorité des caractères étudiés, permettant des progrès immédiats par sélection.

Le travail de sélection est orienté vers la création de trois variétés synthétiques d'un bon rendement ainsi qu'une bonne adaptation aux milieux et aux techniques culturales des petits agriculteurs de puits de surface.

Au cours de la première année de culture, les variétés synthétiques ne donnent pas un rendement aussi élevé que les hybrides, mais elles ont l'avantage de donner des rendements suffisamment élevés au cours des deux ou trois générations suivantes, permettant ainsi le renouvellement des semences en cas de besoin (généralement tous les 3 ou 4 ans). Leur base génétique peut être suffisamment large pour que les maladresses techniques soient tamponnées et la production de semences n'exige pas la mise sur pied d'opérations techniquement délicates.

L'augmentation du rendement en grains par unité de surface est l'objectif majeur de notre sélection, mais dans ce travail on a accordé également une attention particulière aux rendements en fourrage et en paille pour répondre aux besoins secondaires de certains paysans (éleveurs).

Les principaux résultats ont été obtenus d'une part sur la parcelle de sélection de l'IRA de Médenine et d'autre part dans des essais d'évaluation participative chez les agriculteurs.

Au bout de la troisième année de sélection, on dispose d'un matériel végétal amélioré qui pourrait permettre de répondre aux objectifs fixés.

Samenvatting

Landbouwers waar ook ter wereld hebben door de eeuwen geleerd zich aan te passen aan moeilijke tot extreme productievoorwaarden. Zo ook de boeren in Tunesië die in gebieden leven en produceren die minder dan 200 mm regen per jaar ontvangen. Niet alleen is het klimaat er droog, maar de gronden zijn er ook dikwijls weinig vruchtbaar. Hun productiesysteem is dikwijls gebouwd rond waterputten. Zij telen er op intensieve wijze gewassen, dikwijls in combinatie met dieren. Gierst (*Pennisetum glaucum*) is er een van de belangrijke teelten. Gierst wordt er gekweekt voor het graan, maar ook de halmen hebben er belang (voor dakbedekking, en veevoeder). De traditionele teeltsystemen worden meer en meer vervangen door 'modernere' technieken en variëteiten die echter niet altijd even aangepast zijn aan de extreme productievoorwaarden. De nieuwe teelttechnieken putten de grond, maar ook de schaarse watervoorraden, uit terwijl de nieuwe variëteiten de traditionele verdringen. En dit laatste is spijtig. Immers, deze traditionele variëteiten zijn dikwijls heel rustiek, en bijzonder goed aangepast aan de voorwaarden van het milieu waar ze tot ontwikkeling gekomen zijn. Ze zijn niet alleen nuttig voor de traditionele, in dit geval Tunesische, boer, maar kunnen ook belangrijk zijn voor landbouwers die elders in analoge systemen moeten produceren. Met andere woorden: hun eigenschappen kunnen gebruikt worden voor selectiedoeleinden en gewasverbetering.

Het *Institut des régions arides* (IRA, Tunesië) heeft een programma op stapel staan om traditionele variëteiten van een aantal gewassen in kaart te brengen (te karakteriseren) en als uitgangsmateriaal te gebruiken voor gewasverbetering. Gierst is een van de eerste en belangrijkste gewassen waarmee het programma gestart is. Dit werk geeft een neerslag van de voornaamste resultaten die tot nog toe met gierst behaald werden.

In de productiezone van gierst (Zuid-Tunesië) werd uitgebreid plantenmateriaal verzameld, ten einde de volledige diversiteit van de beschikbare variëteiten te leren kennen. Deze verschillende herkomsten werden uitgezaaid en uitgebreid beschreven (descriptors van IBPGR) en ICRISAT). Vervolgens werden de 'beste' herkomsten in groepen verdeeld ten einde 3 synthetische variëteiten te ontwikkelen die zo veel mogelijk de superieure kenmerken van de verschillende herkomsten combineren. Dit selectiewerk werd opgestart in een IRA-proefstation, maar na verloop van tijd werden de bekomen selecties ook uitgetest bij en met lokale boeren (participatieve selectie-benadering). De selectie had tot doel rustieke variëteiten te ontwikkelen. Dit wil zeggen planten die zonder extra *inputs* toch redelijke opbrengsten garanderen ook al zijn de teeltvoorwaarden moeilijk tot extreem (droogte, zoute bodem, arme gronden). De drie 'variëteiten' die zodoende ontwikkeld werden hebben als hoofddoel (1) hoge graanopbrengsten te geven; (2) een redelijke halmopbrengst te garanderen ten einde ook tegemoet te komen aan de wensen van de boeren-veetelers (en constructievereisten van de landbouwers); en (3) gierst met goed gevolg te kunnen combineren met olijfteelt. Het werk stelt de verschillende selectiestappen voor, en behandelt kritisch de behaalde resultaten. Momenteel zit het selectiewerk in een consolidatiefase. De nieuw-ontwikkelde selecties worden getest door de lokale boeren en vinden al een zekere toepassing in de praktijk, wat meteen het succes van dit vrij unieke onderzoekswerk bewijst.

Summary

In the Tunisian arid regions where annual rainfall is less than 200 mm and soils are poor, the farmers developed a complex cropping systems known as '*culture de puits de surface*'. These are complex productions systems with multiple components combining several crop and animal production objectives. Farmers maintain a balance between a very successful of production system and high added value. In this system, pearl millet plays a very important role: the grain assures subsistence food and its straw is used for cattle feeding and the construction of huts.

In the 80s, the farmers of these dry regions adopted new cropping technologies. Greenhouse culture replaced the '*puits de surface*' system by the introduction of new high yielding varieties, the use of chemical fertilizer and the installation of irrigation networks. Chemical pesticides have been introduced later to protect these monocultures against pests and diseases.

Unfortunately, some farmers completely abandoned their traditional cropping system. But the worst has been local germplasm erosion, which affected several species.

To face the pressures exercised on genetic diversity, IRA launched research programs aiming at the conservation of the local genetic biodiversity of Tunisian dry regions. In order to preserve the genetic resources of the local millet, the present work aimed at the study and the conservation of the local landraces of millet cultivated in the arid regions of Tunisia.

Millet does not represent in Tunisia a staple as in other African countries. Nevertheless, it occupies an important part of the cropping area every year in the central and southern part of the country. It is cultivated on marginal soils and supports well brackish water. It thus remains the most cultivated irrigated cereal in the Tunisian dry regions.

We used and developed methodologies defining and guiding priority actions to achieve the research objectives (prospection, evaluation, conservation and selection).

Several prospections allowed collecting samples of millet representing the genetic diversity of Tunisian dry regions landraces.

The evaluation of the agronomic characters of collected samples was done as described by IPBGR and ICRISAT (1993) for millet. The analysis of the observed and measured data has been realized in three stages:

- general description of overall diversity and location of the important characters;
- grouping of landraces by comparison of averages (Duncan test) and hierarchical classification;
- establishment of classification criteria.

This study of the genetic variability of the pearl millet landraces of Tunisian dry regions shows an important phenotypical variability for the majority of the studied characters. Time to flower varied from 30 to 66 days after sowing. Plant height ranged from 59 to 314 cm with a mean of 197.86 ± 0.43 . The number of tillers varied between 0 to 19 per plant. Considerable variation in spike shapes was observed. However, frequency distribution of different spike shapes shows the predominance of lanceolate (23.7%) followed by oblanceolate (23.5%), cylindrical (18.3%), conical (15.7%), candle (8.7%), spindle (6.6%), club (3.1%) and globose (0.3%) shapes. The landraces collected mostly produced large, grey-coloured, obovate seeds, with partly corneous endosperm.

Analysis of variance (ANOVA) was performed to compare variation between the different landraces. The differences are highly significant at $\alpha=0.05$ for all characters studied.

Duncan and hierarchical clustering were carried out to estimate resemblance and to group landraces into homogeneous classes (clusters). The resulting dendrogram shows three principal clusters regrouping landraces according to their geographical origins or farming conditions.

Pearl millet germplasm from Tunisia's arid region presents a wide range of genetic variability. It can be used as a starting basis for breeding programmes to select high yielding varieties tolerating adverse arid conditions.

The selection work was directed towards the creation of synthetic varieties with high yield as well as a good adaptation to the farming systems of '*puits de surfaces*' system.

The synthetic varieties do not produce high yields as hybrids during the first year of cropping, but they have at least the advantage to continue to express sufficient high yield during two or three following generations. So seed renewal is only needed every 3 to 4 years.

The increase in grain yield by unit of area was the main objective of our selection but a particular attention was given to straw and fodder yield in order to meet the secondary needs of certain farmers.

The main results have been records first on station (IRA) and were then confirmed through field tests and participatory evaluation tests with the farmers. At the end of the third year of selection, we obtained an improved plant material whose performances meets the assigned objectives.

TABLE DES MATIERES

GENERALITES

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I

1 La culture du mil	5
1.1 Le mil dans le monde	5
1.2 Le mil en Tunisie	7

CHAPITRE II

2 Botanique	19
2.1 Origine et domestication du mil, <i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.	20
2.2 Taxonomie	24
2.3 La croissance et le développement du mil	30
2.3.1 Stades de croissance	30
2.3.1.1 La phase végétative	30
2.3.1.2 La phase reproductive ou phase de développement de la panicule	31
2.3.1.3 La phase de maturation	35
2.3.2 Morphologie du mil	36
2.3.2.1 Les racines	36
2.3.2.2 Les chaumes	36
2.3.2.3 Les feuilles	37
2.3.2.4 Inflorescence	38
2.3.2.5 Période de maturation	42

CHAPITRE III

3 Qualité nutritive du mil	43
3.1 Composition chimique du mil	43
3.2 Nature et propriétés des constituants chimiques	43
3.2.1 Les hydrates de carbone	44
3.2.2 Les protéines	44
3.2.3 Les lipides	45
3.2.4 Les vitamines	46
3.2.5 Les minéraux	46
3.2.6 Polyphénols et pigmentations	47

CHAPITRE IV

4 Exigences environnementales du mil	51
4.1 Température	51
4.2 Précipitation	51
4.3 Lumière	54

CHAPITRE V

5 Amélioration du mil	55
5.1 Les collections mondiales de mil	55
5.2 Objectifs et méthodes d'amélioration du mil	56
5.2.1 Amélioration des mils traditionnels	57

CHAPITRE VI

6 Stratégies de prospection, évaluation et conservation de la biodiversité, caractérisation des provenances	63
6.1 Organisation des prospections	63
6.1.1 Buts d'une prospection.....	64
6.1.2 Préparation de la prospection	66
6.1.3 Déroulement sur le terrain	66
6.1.4 Bilan de la prospection.....	67
6.2 Évaluation des populations collectées	70
6.2.1 Techniques agronomiques.....	71
6.2.2 Caractères morphologiques analysés.....	72
6.2.3 Typologie des variables choisies	76
6.2.4 Résultats: traitement des observations et méthodes d'analyse statistique.....	77
6.2.4.1 Analyse de caractères séparés.....	77
6.2.4.1.1 Description générale des populations.....	78
6.2.4.1.1.1 Les cultivars de la région de Dakhla (cultivars 1, 2, 9, 10, 11, 14 et 15).....	81
6.2.4.1.1.2 Les cultivars de la région de Jerba (cultivars 3, 4 et 5).....	85
6.2.4.1.1.3 Les cultivars de la région de Zarzis (cultivars 12, 16, 17, et 18).....	88
6.2.4.1.1.4 Les cultivars de la région de Boughrara (cultivars 6, 7 et 8).....	90
6.2.4.1.1.5 Les cultivars de la région de Ben Guerden (cultivar 13).....	92
6.2.4.1.1.6 Conclusion	93
6.2.4.1.2 L'analyse de variance (ANOVA)	94
6.2.4.2 Analyse conjoint des caractères	97
6.2.4.2.1 Comparaison des moyennes et classification hiérarchique	97
6.2.4.2.2 Analyse factorielle.....	102
6.2.4.2.2.1 L'analyse en composantes principales	102
6.2.4.2.2.2 L'analyse factorielle des correspondances	106
6.2.4.2.2.3 Conclusion	108
6.3 La conservation de la biodiversité.....	109
6.3.1 Introduction	109
6.3.2 Stratégie de conservation	110
6.3.2.1 Collection d'origines individualisées	110
6.3.2.2 Réservoir massal	111

CHAPITRE VII

7 Sélection variétale de mil à partir de types locaux des régions arides tunisiennes	113
7.1 Introduction	113
7.2 Problématique.....	114
7.3 Intérêt et limites des méthodes de sélection du mil	116
7.3.1 Les différentes stratégies d'amélioration du mil.....	117
7.3.1.1 Variétés hybrides	118
7.3.1.2 Amélioration des populations en vue de la création de variétés hybrides	119
7.3.2 Les limites des méthodes d'hybridation dans les pays en voie de développement.....	122
7.3.3 Méthodes de sélection associant les paysans aux programmes d'améliorations ..	123
7.3.4 Stratégie de sélection retenue à l'IRA.....	125
7.4 L'application de la sélection 'ear to row' dans les types locaux pour le choix des élites	127
7.4.1 Le principe de la sélection 'ear to row'	127
7.4.2 Les difficultés inhérentes au choix des élites.....	129
7.4.2.1 Sélection multicaractère.....	129
7.4.2.2 Sélection sur index.....	131
7.4.3 Techniques de purification des élites choisies.....	131
7.4.3.1 Les diverses phases de la production des élites et la conservation de la diversité	133
7.4.3.1.1 Constitution des premières lignées (année 1998)	133

7.4.3.1.2 Choix des élites (année 1999)	136
7.4.3.1.3 Présélection des lignées (année 2000).....	139
7.4.3.1.4 Évaluation des lignées de mil présélectionnées (années 2001 et 2002)	140
7.4.3.2 Interprétation biométrique des résultats de sélection	140

CHAPITRE VIII

8 Évaluation participative des lignées présélectionnées à la station expérimentale de l'IRA de Médenine	143
8.1 Introduction	143
8.2 La démarche méthodologique	144
8.2.1 Zones et sites d'expérimentation	145
8.2.2 Matériel végétal.....	147
8.2.3 Conditions expérimentales.....	148
8.2.4 Méthodes d'évaluation des lignées.....	148
8.2.5 Principales caractéristiques d'évaluation	148
8.2.6 Résultats et discussions	149

CHAPITRE IX

9 Étude détaillée de 20 lignées de type fourrage	157
9.1 Introduction	157
9.2 Détermination de la valeur nutritive des aliments	158
9.3 La démarche méthodologique	159
9.3.1 Évaluation à partir des caractéristiques botaniques du fourrage sur pied	159
9.3.2 Évaluation au laboratoire	160
9.4 Résultats et discussions	161
9.5 Résultats vus dans le cadre de la sélection	172

CHAPITRE X

Conclusions	175
1 Principes de base du travail.....	175
1.1 But	175
1.2 Méthode.....	175
2 Bilan pratique, résumé.....	175
3 Conclusions générales	177

Références bibliographiques.....	179
---	------------

Annexe 1	201
Annexe 2	202
Annexe 3	203
Annexe 4	206
Annexe 5	210
Annexe 6	211
Annexe 7	214
Annexe 8	218

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des sous-espèces <i>Pennisetum americanum</i> (L.) Leeke.....	28
Tableau 2: Composition chimique du mil à chandelle	43
Tableau 3: La composition en protéines et acides aminés des grains du mil et du Sorgho.....	45
Tableau 4: La distribution d'azote dans les grains de sorgho et de mil % d'azote totale	45
Tableau 5: La composition en acides gras des cultivars de mil et sorgho	46
Tableau 6: Principaux constituants du grain de mil	47
Tableau 7: Consommations en eau de différents couverts de mil en zone soudano-sahélienne	52
Tableau 8: Récapitulatif des prospections et des échantillons collectés.....	68
Tableau 9: Caractères morphologiques analysés.	73-75
Tableau 10: Fréquences des variables qualitatives de tous les cultivars.....	78-80
Tableau 11: Variables quantitatives des cultivars des cultivars de la région de Dakhla: 1, 2, 9, 10, 11,14 et 15	82
Tableau 12: Variables quantitatives des cultivars de la région de Jerba: 3, 4 et 5	86
Tableau 13: Variables quantitatives des cultivars de la région de Zarzis: 12, 16,17 et 18.....	89
Tableau 14: Variables quantitatives des cultivars Boughrara: 6, 7 et 8	91
Tableau 15: Variables quantitatives du cultivar de la région de Ben Guerden:13	93
Tableau 16: Modèle d'analyse de variance à un seul facteur	94
Tableau 17: L'analyse de la variance à un critère de classification.....	96
Tableau 18: Valeurs d'inertie absolue cumulée des axes de l'analyse et composantes principales	104
Tableau 19: Pourcentage d'inertie (λ) des 5 premiers axes et contribution des caractères dans chaque axe pour l'analyse en composantes principales	104
Tableau 20: Pourcentage d'inertie des axes de l'analyse factorielle des correspondances.....	107
Tableau 21: Origines et performances de quelques variétés hybrides du mil.....	119
Tableau 22: Groupes de travail, indices de sélections et caractères mesurés	133
Tableau 23: Evaluation des meilleures lignées	137
Tableau 24: Caractéristiques des groupes de travail de mil pour les années 1999 à 2002.....	141
Tableau 25: Liste des agriculteurs qui ont mené les essais participatifs (2001 et 2002)	146
Tableau 26: Valeurs moyennes des caractères des lignées évaluées chez les paysans, essai 2001(lignées 20 et 140) et essai 2002 (lignées 120, 133 et 197).....	147
Tableau 27: Rendements moyens en panicules et en paille (kg/ha), pourcentages des rendements par rapport au témoin et test Duncan pour l'essai chez les paysans 2001	151
Tableau 28: Rendements moyens en panicules et en paille (kg/ha), pourcentages de rendements par rapport au témoin et test Duncan pour l'essai chez les paysans 2002.	151
Tableau 29: Rendement en chandelles des lignées testées en % des cultivars, exprimés essai par essai, mais limités aux résultats statistiquement valables, suivant les tableaux 27 et 28.	152
Tableau 30: Le rendement en paille des lignées en % de leur témoin. Résumé des essais statistiquement valables	153
Tableau 31: Les moyennes des caractères morphologiques mesurés et les résultats d'analyses chimiques des 20 lignées étudiées	162
Tableau 32: L'analyse de la variance à un critère de classification	163
Tableau 33: Signification des axes de l'analyse en composantes principales	166
Tableau 34: Pourcentage d'inertie (λ) des 3 premiers axes et la contribution des caractères dans chaque axe pour l'analyse en composantes principales.....	167
Tableau 35: La diversité des critères de sélection dérivés des analyses du tableau 31	172

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Les principales zones de production du mil en Tunisie	8
Figure 2: Effeuilage des tiges	8
Figure 3: Hutte construite avec de la paille du mil	8
Figure 4: Répartition de culture du mil dans les régions arides tunisiennes et zone de prospection	10
Figure 5: Oliviers associés au mil	10
Figure 6: Les déficits pluviaux ont causé la perte de milliers d'oliviers dans les régions arides tunisiennes	10
Figure 7: Oliviers associés au mil supportent mieux les déficits pluviaux que les oliviers voisins	10
Figure 8: Nivellement du sol et confection de planches de culture de mil	13
Figure 9: Des enfants assurant le gardiennage du mil.....	13
Figure 10: Mil défeuillé et choix des panicules pour la culture suivante	13
Figure 11: La récolte de plantes et la séparation des panicules	13
Figure 12: Battage du mil	13
Figure 13: Epouvantail placé sur un arbre pour chasser les oiseaux	15
Figure 14: Chenilles de la panicule (<i>Raghuva albipunctella</i>)	15
Figure 15: Attaque de mildiou (<i>Sclerospora graminicola</i>)	15
Figure 16: Oiseau granivore du mil (<i>Passer domesticus</i>)	15
Figure 17: Des produits fumigeant utilisés pour chasser les prédateurs du mil	15
Figure 18: Une plante du mil avec plusieurs talles.....	19
Figure 19: Répartition de mils sauvages collectés et les zones de fortes densités	21
Figure 20: Espèces <i>Pennisetum</i> cultivées en Afrique-Asie	24
Figure 21: Phases de la croissance et du développement du mil (Maiti & Bidinger, 1981)	32
Figure 22: Développement des racines	32
Figure 23: Le développement de talles	32
Figure 24: Panicule visitée par des abeilles durant la floraison	33
Figure 25: Sénescence rapide de feuilles de certaines lignées	33
Figure 26: Surface extérieure duveteuse d'une gaine	39
Figure 27: La ligule courte d'une feuille du mil	39
Figure 28: Largeur d'une feuille de mil	39
Figure 29: Beau spécimen de panicule ou 'faux épi'	39
Figure 30: Panicules recourbées du mil.....	39
Figure 31: Formes de la panicule	41
Figure 32: Soies de l'involucre	41
Figure 33: Soie de l'involucre longue	41
Figure 34: Deux techniciens de la cellule régionale d'agriculture de Zarzis	66
Figure 35: La parcelle expérimentale de l'Institut des Régions Arides de Ben Guerden	72
Figure 36: Forme des panicules.....	76
Figure 37: Densité de soies	76
Figure 38: Tégument de la graine	76
Figure 39: Forme des graines du mil des régions arides tunisiennes	76
Figure 40: Mil pluvial cultivé dans la région de Zarzis.....	88
Figure 41: Dendrogramme résultant de la classification hiérarchique de 18 cultivars	100
Figure 42: Concurrence en lumière entre olivier et mil	100
Figure 43: Des plantes de mil versées.....	100
Figure 44: Dendrogramme résultant de la classification hiérarchique des origines des cultivars étudiés	101
Figure 45: Les variables quantitatives dans l'analyse en composantes principales	105
Figure 46: Les cultivars étudiés dans l'analyse en composantes principales	105
Figure 47: La dispersion des variables quantitatives et qualitatives sur le plan des axes 1 et 2 dans l'analyse des correspondances	108
Figure 48: Schéma de conservation et de sélection du mil local des régions arides tunisiennes suivi à l'IRA.....	135
Figure 49: La parcelle de sélection du mil (station expérimentale de l'IRA de Médenine).....	136

Figure 50: Schéma de sélection de plantes en années (1999, 2000, 2001, 2002 et 2003).....	138
Figure 51: Représentation graphique des caractéristiques des groupes de travail	142
Figure 52: Sites des essais participatifs avec les paysans (OTC, 1984)	146
Figure 53: Rendements en paille et en panicules pour l'essai 2001	150
Figure 54: Rendements en paille et en panicules pour l'essai 2002	150
Figure 55: Dendrogrammes résultant de la classification hiérarchique des lignées étudiées...	165
Figure 56: Les axes 1 et 2 dans une analyse de correspondances	171
Figure 57: Les axes 1 et 3 dans une analyse de correspondances	171

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP: Analyse en Composantes Principales
ADF: '*Acid Detergent Fibre*', fibre au détergent acide; lignocellulose
ADN: Acide Désoxyribonucléique
AFC: Analyse Factorielle des Correspondances
ANOVA: '*Analysis of Variance*' Analyse de Variance
CB: Teneur en Cellulose Brute
CE: Conductivité électrique
CGIAR: '*Consultative Group on International Agricultural Research*', (GCRAI) Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale
CRA: Centre de Recherches Agronomiques
CRDA: Commissariat Régional pour le Développement Agricole
CVP: Création Variétale Participative
ETM: Évapotranspiration maximale
ETR: Évapotranspiration réelle
EU: Etats-Unis, (USA): '*United States of America*'
EVP: Évaluation Variétale Participative
FAO: '*Food and Agriculture Organisation of the United Nations*', Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GAM: Groupe d'Amélioration du Mil
HPLC: '*High Performance Liquid Chromatography*', Chromatographie liquide d'Haute Performance
IBPGR: '*International Board for Plant Genetic Resources*', Bureau International des Ressources Phytogénétiques
ICRISAT: '*International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics*' Centre international de recherche sur les plantes cultivées des régions semi-arides
IRA: Institut des Régions Arides
IRAT: Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières
IRD, ex-ORSTOM: Institut de Recherche pour le Développement
IPGRI, ex-IBPGR: '*International Plant Genetic Resources Institute*', Institut International des Ressources Phytogénétiques
IPK: '*Institut Für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung*', (*Institute of plant Genetics and Crop Plant Research*)
ISRA: Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
K_c: Coefficient cultural
MAT: Matières Azotées Totales
MM: Matière Minérale
MS: Matière Sèche
NDF: '*Neutral Detergent Fibre*', cellulose au détergent neutre
ODS: Office de développement du Sud
OMVPI: Offices Régionaux de Mise en Valeur des Périmètres Irrigués
ORSTOM: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
OTC: Office de la Topographie et la Cartographie
PDR: Programme de Développement Rural
RFLP: '*Restriction Fragment Length Polymorphism*', (PLFR): Polymorphisme de la Longueur des Fragments de Restriction
PPB: '*Participatory Plant Breeding*', Sélection Participative de Plante
PRGA: '*Participatory Research and Gender Analysis*', (RPAG): Recherche Participative et Analyse du Genre
SERST: Secrétariat d'Etat à la Recherche Scientifique et à la Technologie
SPSS: '*Statistical Package for the Social Sciences*', logiciel de gestion et d'analyse de données statistiques
TJAI: '*Thomas Jefferson Agricultural Institute*'

Généralités

Introduction générale

Notre zone d'étude est la Tunisie présaharienne. Elle fait partie des zones arides où la moyenne annuelle des hauteurs de pluies se situe entre 100 et 200 mm. C'est une zone à hivers tempérés (moyenne du mois le plus froid comprise entre 10 et 20°C), à étés chauds (moyenne du mois le plus chaud comprise entre 20 et 30°C) et présentant 6 à 7 mois secs. La période sèche s'étend de mai à octobre. Elle appartient pour l'essentiel à l'étage bioclimatique méditerranéen aride supérieur avec quelques tendances sahariennes au sud et à l'ouest. Cette aridité climatique est accentuée par une grande variabilité inter-annuelle des pluies et plusieurs journées de 'sirocco' (vent du désert) par an (Le Houérou, 1969; Bourges, 1974; Floret & Pontanier, 1982; Le Floc'h, 1986; Mzabi, 1988; Hénia, 1993; Fontès *et al.*, 1999).

L'instabilité et la variabilité spatio-temporelle du régime pluviométrique confèrent à l'eau un rôle fondamental et décisif dans le processus de développement économique et social de ces régions arides. Face à une telle situation, les habitants de ces régions ont déployé un réel savoir-faire en matière de gestion des ressources en eau et ils font souvent appel aux ressources en eau autres que celles offertes directement par la pluie, pour lutter contre l'aridité climatique.

C'est ainsi qu'ils ont développé des techniques de 'récolte', de stockage et d'utilisation de l'eau avec les périmètres irrigués et les oasis comme exemples importants.

Situées à quelques dizaines de mètres de profondeur, les nappes phréatiques sont en général depuis très longtemps exploitées, à partir des puits de surface '*souanis*', par les populations des régions arides en Tunisie. En effet, les nappes phréatiques ont été depuis des siècles à l'origine de la mise en valeur agricole et de la fixation des populations autour des anciennes villes (Médenine, Jerba, Zarzis, Tataouine...) (Abaab *et al.*, 1993; Nasr, 1995; Abaab & Nasr, 1996). Certaines sont bien connues: nappe de l'île de Jerba, nappe d'El-Gharbat (Zarzis), nappe de Ben Guerden, nappe du Smar de Médenine, nappe *inféro-flux* d'oued Metameur et nappe phréatique d'El Fjè (Mamou, 1989; Yahyaoui, 1998). Elles sont souvent de qualité médiocre (résidu sec en sel compris entre 3 et 8 g/l) à l'exception des '*inféro-flux*'. A l'entrée de la plaine alluviale, le cours d'eau alimente la nappe. A l'aval, c'est la nappe qui est drainée par l'oued. Il s'agit à ce point souvent d'une zone marécageuse où la surface de la nappe est très proche de la surface du sol. On désigne ces nappes par nappes d'*inféro-flux*' (ou d'*underflow*') de certains oueds (le résidu sec est compris entre 1 et 3 g/l). Ces nappes se caractérisent par une alimentation par infiltration des eaux pluviales (8 à 10% de la pluie annuelle) et par un taux de

renouvellement des réserves de l'ordre de 1 à 6 % (Mamou, 1989; Nasr, 1995; Yahyaoui, 1998; Chulli & Ben Dhia, 2003).

Les puits de surface constituent avec leur 6770 ha, ce qui coïncide avec la surface irriguée par ces puits, un des piliers du secteur agricole dans ces zones arides (ODS, 2003). Avec des superficies souvent réduites (1 à 3 ha par exploitation), ce système de production se base principalement sur les cultures maraîchères et secondairement sur les fourrages, les céréales et l'arboriculture, souvent associées à une activité d'élevage diversifié et plus intensif qu'extensif. Dans ce système, on peut apprécier l'importance et le rôle que joue le choix des cultures dans la stratégie de production des paysans. Outre l'adaptation de ces cultures aux conditions difficiles de l'aridité, les produits et les sous-produits de ces cultures jouent un rôle très important dans l'alimentation des hommes et des animaux. Ils s'approprient également aux conditions traditionnelles de transformation, de conservation et l'utilisation de leurs sous-produits dans les divers usages domestiques (chauffage, construction des abris, cuisson des aliments...) (Abaab *et al.*, 1993; Nasr, 1995).

Dès le début des années quatre-vingts du siècle passé, grâce notamment à la création en 1981 des Offices Régionaux de Mise en Valeur des Périmètres Irrigués (OMVPI) et à l'intervention du Programme de Développement Rural (PDR), les régions arides ont connu un développement accéléré de la serriculture dans le but d'accroître les revenus et d'améliorer par conséquent les conditions de vie et de production des agriculteurs de ces régions. Des efforts énormes ont été et sont toujours déployés par les agents de développement et les chercheurs pour initier les paysans aux nouvelles techniques de serriculture, et aux choix des espèces et des variétés les plus adaptées aux conditions édapho-climatiques des régions de cultures. Malheureusement, le mépris de tout ce qui est local et traditionnel, et le succès de la serriculture ont amené des paysans à abandonner complètement leurs savoir-faire de l'utilisation de puits de surface, fruit d'une longue expérience empirique, pour se concentrer sur des activités plus 'modernes' mais souvent moins adaptées.

Le passé récent a montré que l'introduction de la serriculture constitue souvent un changement mal étudié dans des régions arides déjà fragiles ce qui a contribué, entre autres, au bouleversement de l'équilibre agro-écologique et socio-économique de ces régions par:

- une surexploitation des sols pauvres des régions arides;
- une surexploitation des nappes phréatiques: ces nappes, exploitées traditionnellement depuis longtemps, ont vu leur niveau baisser et leur taux de

salinité augmenter dangereusement au cours de ces dernières années avec l'intensification des cultures et l'introduction de motopompes pour subvenir aux besoins des nouvelles espèces et variétés plus exigeantes en eau que les espèces et variétés locales (Seklani, 1976; Mamou, 1989; El Gazzah & Chalabi, 1995; Nasr, 1995; Fontès *et al.*, 1999);

- l'introduction de nouvelles maladies des cultures;
- l'augmentation des charges (achat de semences, plastique, pesticides, etc.); et
- la pollution de l'environnement (pesticides, déchets de plastique, salinité au niveau du sol...) et des eaux souterraines potables.

Mais ce qui est beaucoup plus grave et irréparable, c'est l'érosion phytogénétique du patrimoine local qui a touché plusieurs espèces (Pistrick *et al.*, 1994; El Gazzah & Chalabi, 1995; Loumerem, 1998). Ce phénomène ne cesse de s'aggraver d'une année à l'autre pesant lourdement sur ces régions surtout après que les paysans ont perdu toute confiance aux variétés et espèces introduites inadaptées à leurs conditions culturales extrêmes. Irrévocablement, la pratique de la culture des puits de surface va être menacée par son abandon, en dépit des programmes de développement des cultures irriguées bien appuyées par d'importants financements et lois promulguées pour développer les actions de protection et de restauration des terres. Ainsi, déjà en 2003, environ 1571 puits dans le gouvernorat de Médenine ont été abandonnés dont 680 à Médenine, 350 à Jerba, 175 à Ben Guerden et 95 à Zarzis (ODS, 2003), ce qui signifie une perte en surface cultivée d'environ 1571 ha.

Dans le cadre d'un contrat programme de recherche 'Aridoculture et cultures oasiennes' établi entre l'Institut des Régions Arides et le Secrétariat d'Etat à la Recherche Scientifique et à la Technologie (SERST), un projet de recherche 'Conservation et valorisation des ressources phytogénétiques domestiques' vise la conservation des ressources phytogénétiques locales à travers leur valorisation dans un système de production durable (IRA, 1999). L'une des objectifs de ce projet est la conservation et l'évaluation des populations locales du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) cultivées autour des puits de surface des régions arides, par la mise à la disposition des paysans d'un matériel génétique amélioré à haut potentiel de rendement et supportant assez bien la pression des facteurs adverses.

Chapitre I

1 La culture du mil

1.1 Le mil dans le monde

Le mot mil prêt à confusion. Certains auteurs regroupent dans les mils les sorghos (plantes essentiellement fourragères) et les 'petits' mils ou millets, plantes généralement destinées à l'alimentation humaine. On réserve habituellement le nom de mil à cette dernière catégorie, appelé souvent encore 'petite céréale' (Cerighelli, 1955; De Wet, 1995). En réalité, ces 'mils' comportent au total neuf genres botaniques.

Parmi ces mils, l'espèce de loin la plus importante est *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., le 'mil à chandelle' ou 'mil pénicillaire' (taxonomie, voir 2.2).

Deux autres mils ou millets sont de climat plus tempéré: le 'millet des oiseaux', *Setaria italica* (L.) P. Beauv., et le 'millet commun', *Panicum miliaceum* (L.). Ces deux sont actuellement cultivés sur de plus petites surfaces, mais sont importants dans l'histoire de l'agriculture. Le setaria était surtout cultivé en Chine, déjà avant l'introduction du riz. Le panicum était le mil cultivé en Europe au temps de l'empire romain (Behaeghe, communication personnelle).

Parmi les autres genres, seul l'eleusine', *Eleusine coracana* (L.) Gaertner, a encore une valeur culturelle à l'heure actuelle, de l'Afrique orientale jusqu'à la péninsule indienne, dans des régions d'altitude jusqu'à 2000 m.

Mais la confusion concernant ces espèces est et reste grande. Ainsi, les statistiques, même celles de la FAO, ne font pas toujours la distinction correcte entre les différentes espèces (FAO, 1997). Ceci nous oblige d'utiliser le mot 'mil' au sens large dans le présent chapitre. Néanmoins, dans le reste du texte on réserve le mot mil à la seule espèce *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., d'origine africaine et tropicale (voir 2.1).

La culture du 'mil' (au sens large) remonte en effet à la plus haute antiquité. Il était déjà utilisé et cultivé dans les temps préhistoriques dans beaucoup d'endroits. C'est ainsi qu'il a été identifié dans de nombreuses stations néolithiques (Maurizio (1932), cité par Pernès, 1984). Les données de fouilles dans le site de Dhar Titchilt en Mauritanie (Munson (1976), cité par Pernès, 1983), témoignent de la culture du mil par les populations locales durant une période de deux siècles, de 1000 à 900 av.J.C, sans qu'on ait pu démontrer qu'il s'agissait d'une domestication sur place ou d'une introduction. Des représentations de mil sauvage ont été découvertes sur des poteries datant d'environ 5000 ans dans le centre du Soudan (Stemler (1990), cité par Bezançon *et al.*, 1997).

En Europe, les mils étaient cultivés pour leurs grains servant à l'alimentation humaine. Ils ont néanmoins progressivement perdu toute leur importance. Mais en

Afrique, en Inde et dans d'autres pays de l'Extrême-Orient, le mil a été maintenu en culture sert toujours à la nourriture de nombreuses populations. C'est une céréale de première importance pour toute la zone sahélienne, ainsi que dans une bonne partie de l'Inde où les rendements mondiaux moyens les plus élevés sont obtenus.

C'est la céréale la plus tolérante à la sécheresse. Elle est cultivée dans des régions où la pluviosité annuelle se situe entre 150 et 800 mm. Sa culture couvrait plus de 33,39 millions d'hectares en 2002, qui se répartissent principalement dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique avec 20,6 millions d'hectares (annexe 1) cultivés pour une production de 13,6 millions de tonnes, et de l'Inde où la production du mil atteint 6,15 millions de tonnes sur une superficie de 9 millions d'hectares (Squire *et al.*, 1987; Andrews *et al.*, 1993; Bezançon *et al.*, 1997; FAO, 2003).

En Afrique, 70% de la production provient de l'ouest du continent. Les principaux pays producteurs sont, par ordre d'importance décroissante (annexe1): le Nigéria, le Niger, le Burkina, le Tchad, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. En Afrique de l'Est, le Soudan et l'Ouganda sont les plus gros producteurs, alors qu'en Afrique australe les cultures traditionnelles et donc celle du mil ont quasiment disparu (Bezot, 1965; Bilquez, 1970; Bilquez & André, 1974; De Rouw, 1993; Pham, 2000; Grema, 2002).

En Inde, où le mil arrive au quatrième rang des céréales après le riz, le blé et le maïs, sa culture est importante dans les états du Rajasthan, du Gujarat et du Haryana (Boisseaux & Crassard, 2003; Govindan & Russell, 2003). Comme en Afrique sahélienne, il joue un rôle majeur pour les populations locales dans les régions où les conditions climatiques ne permettent ni au sorgho, ni au maïs, ni au riz de se développer normalement (Harinarayana, 1987; Weltzien *et al.*, 1997).

Le mil a été introduit dans d'autres régions du globe comme les États-Unis (EU), l'Australie, etc. En 1857, le mil est introduit aux EU. Il y constitue vite une plante fourragère appréciée. Il est devenu dans les états du sud, en particulier en Géorgie, grâce aux excellents travaux de la station de Tifton, la plante fourragère annuelle d'été la plus cultivée (Eiche, 1992; Bramel-cox *et al.*, 1995; Pullins *et al.*, 1997; Andrews *et al.*, 1996 & 1998; Myers, 1999; Rahn & Bauer, 2001; Chambliss, 2002; Lee & Hanna, 2002; Teutsch, 2002; Hanna & Wilson, 2003; Rude *et al.*, 2003; TJA, 2003). Sa culture occupe annuellement en Géorgie près de 40.000 ha. Au Nebraska, il est cultivé pour le grain destiné à l'alimentation des volailles et des porcs (Bilquez, 1970; Sedivec *et al.*, 1991; Adeola *et al.*, 1996; Yadav, 1996; Weltzien *et al.*, 1997).

Le mil est aussi cultivé dans les pays d'Afrique du Nord (Tunisie, Algérie, Libye et le Maroc), et en Espagne (Pernès, 1984; Vietmeyer, 1996).

1.2 Le mil en Tunisie

Il est difficile de déterminer quand et par qui fut introduit la culture du mil en Tunisie. Selon Colmeiro (1885, cité par Brunken *et al.*, 1977), le mil a été introduit en Espagne à partir de l'Afrique de Nord après l'invasion de Maures vers le 8^{ième} siècle de notre ère. On peut donc, conclure que le mil était déjà cultivé dans les pays d'Afrique du Nord avant le 8^{ième} siècle.

Les principales zones de production du mil en Tunisie sont les régions du centre et du sud-est du pays (fig. 1).

L'estimation de la production et les superficies du mil n'est pas simple parce que les méthodes de recensement appliquées dans un nombre important des régions du pays ne font pas de distinction entre les chiffres de production du mil et du sorgho. Dans le sud du pays (régions arides) où les pluies sont variables et faibles (200 mm/an ou moins) et les sols légers et peu fertiles, le mil constitue la principale culture céréalière en irrigué (on ne possède malheureusement pas de renseignements précis sur l'importance des superficies consacrées à la production du mil).

D'après les rapports annuels des CRDA 'Commissariat Régional pour le Développement Agricole' (Médenine et Tataouine), la superficie annuellement cultivée en mil serait de 300 ha avec une production totale de 210 tonnes. Le rendement moyen à l'hectare est en effet de 700 kg. Il est très variable d'une région à l'autre, mais il ne dépasse que très rarement les 700 kg/ha.

Le mil s'adapte à de nombreux milieux dans les régions arides. Il est cultivé en été dans les endroits les moins favorables à l'agriculture (sols très pauvres et eaux saumâtres venant des puits de surface), dans les oasis continentales de Tataouine, sur puits de surface à Jéffara, à Médenine et dans les régions littorales (Jerba, Zarzis et Ben Guerden) (fig. 1).

Il a besoin de 60 à 90 jours pour parvenir à maturité. Il supporte très bien les températures élevées des régions arides. Il est plus résistant à la sécheresse que les autres céréales et s'accommode en général aux sols peu fertiles, à condition qu'ils soient perméables (Kumar & Appa Rao, 1987; Loumerem, 1998; Myers, 1999).

Essentiellement auto-consommé, le grain du mil est utilisé pour l'alimentation humaine, tandis que la tige et les feuilles sont utilisées comme fourrage (fig. 2), soit pâturé, soit haché en vert, ou bien séché en foin (Murty & Kumar, 1995).

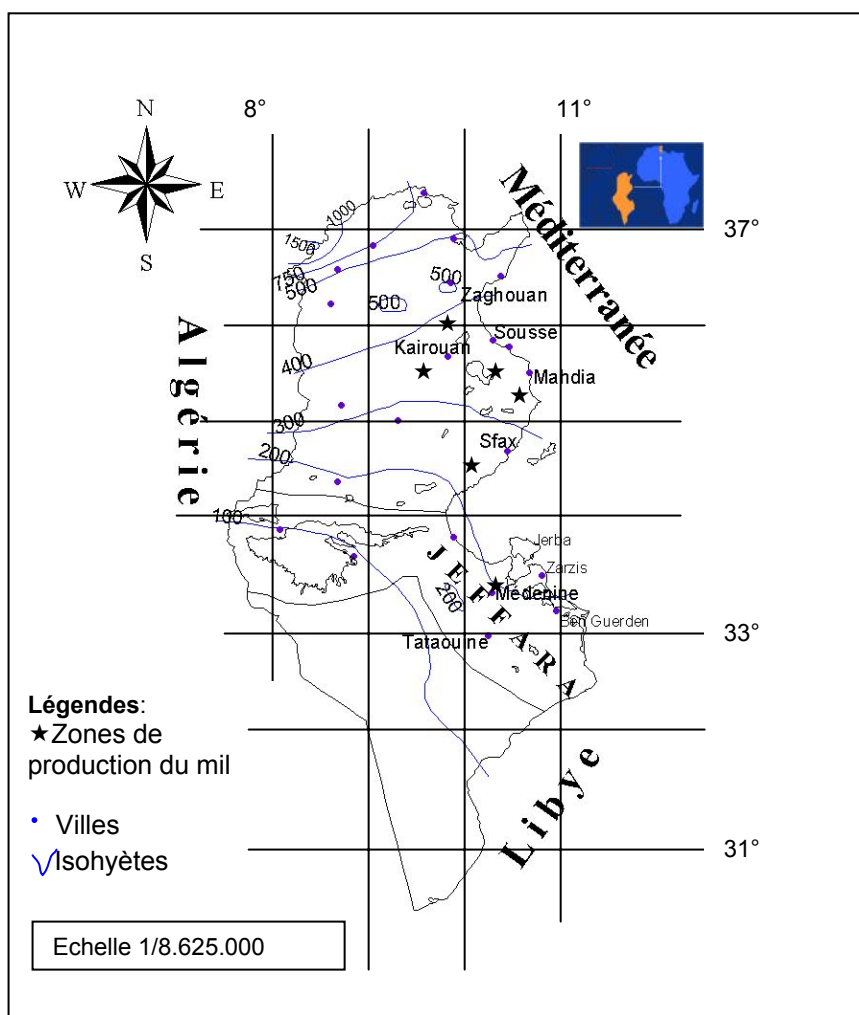


Figure 1: Les principales zones de production du mil en Tunisie



Figure 2: Effeillage des tiges



Figure 3: Hutte construite avec de la paille de mil

Dans certaines régions (Zarzis, Jerba et Ben Guerden), on utilise les tiges comme matériau de construction (fig. 3), alors que les résidus, après la récolte des panicules, peuvent servir de combustible (Loumerem, 1998).

Une bouillie appelée localement '*sahleb*' préparée par ébullition dans l'eau à partir de la farine extraite du grain du mil est un des aliments les plus courants préparés. En général, pour cette utilisation on souhaite des grains de couleur bleue, durs et cornés.

Pendant les fêtes religieuses, la farine du mil constitue la matière première de la préparation de nombreux mets (bouillie avec du lait connue comme '*bouza*', galette appelée '*magrouth*', etc.).

Dans les régions arides tunisiennes, on peut distinguer, en fonction des utilisations de produit du mil par les agriculteurs, trois principales zones de culture:

- Zone A: elle correspond aux régions de Zarzis, Jerba et Ben Guerden (fig. 4), où les agriculteurs préfèrent le mil à important rendement en paille, matière recherchée pour la construction de huttes et de parasols, demandés par les vacanciers de littoral.
- Zone B: c'est la zone de Médenine et Ben Guerden où les agriculteurs cherchent du mil qui talle bien, pour qu'ils puissent avoir un complément de nourriture pour leurs cheptels durant la période la plus critique de l'année où il y a manque de pâturage. Ces agriculteurs pratiquent la culture du mil pour une double fin: avoir des grains pour l'alimentation humaine et le foin pour les besoins de leurs troupeaux.
- Zone C: ce n'est pas une zone bien délimitée, mais elle se constitue par des agriculteurs qui associent la culture du mil aux oliviers. Ces agriculteurs cherchent un mil plus productif en grain et petit par la taille pour diminuer la concurrence mil-olivier pour la lumière et l'aération des frondaisons (les populations locales du mil sont normalement de grande taille).

Dans toutes les régions, le mil est cultivé en irrigué par des eaux saumâtres.

Le système de culture dominant est la culture pure. Mais très fréquemment, on associe le mil à l'olivier pour que ce dernier profite de l'apport en eau et des fertilisants (fig. 5). Durant les années 1999, 2000 et 2001, les déficits pluviaux ont causé la mort de milliers d'oliviers dans les régions arides tunisiennes (fig. 6). La culture du mil en association avec les oliviers a sauvé plusieurs hectares d'oliviers dans les régions de Médenine et Zarzis où ce système est très pratiqué (fig. 7).

Traditionnellement et de façon générale, dans les régions arides, le mil est cultivé en dehors des saisons de pluie, sur des sols irrigués avec une eau saumâtre parvenant de puits de surface. La culture ne reçoit pratiquement pas de fumure (minérale ou organique). Une exception peut être faite pour le mil associé aux oliviers, qui reçoit alors une quantité de fumure minérale variable selon les agriculteurs parce qu'on vise un effet secondaire sur l'olivier.

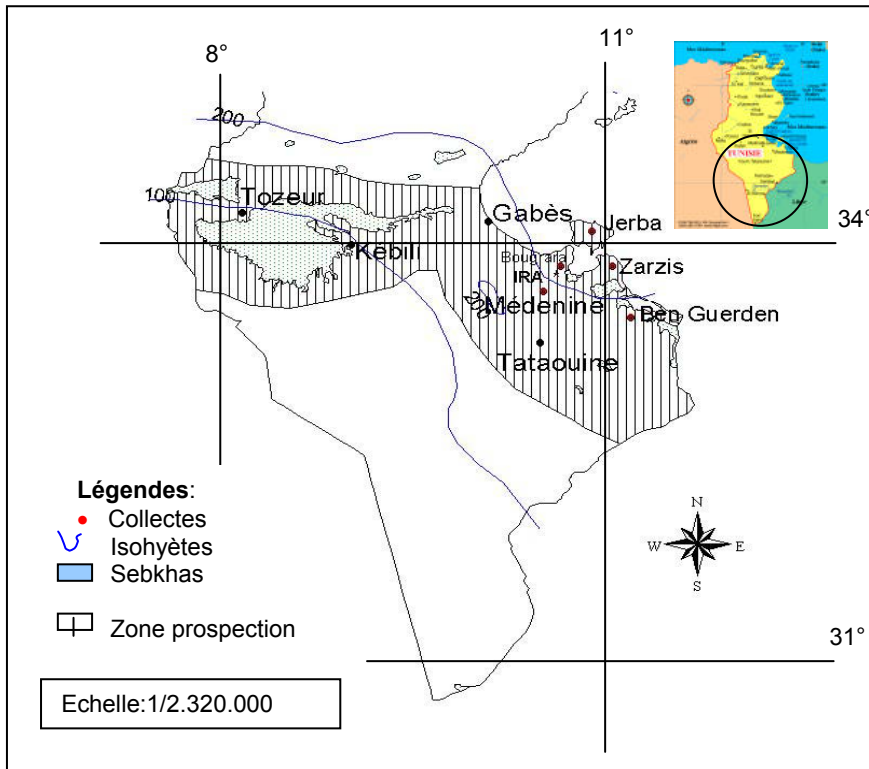


Figure 4: Répartition de culture du mil dans les régions arides tunisiennes et zone de prospection



Figure 5: Oliviers associés au mil



Figure 6: Les déficits pluviaux ont causé la perte de milliers d'oliviers dans les régions arides tunisiennes



Figure 7: Oliviers associés au mil supportent mieux les déficits pluviaux que les oliviers voisins

L'introduction des engrais minéraux dans certaines régions a permis de constater, ces dernières années, un net intérêt pour une utilisation progressive de la fumure minérale (Loumerem, 1998).

La culture du mil est conduite dans le pays suivant diverses méthodes qui sont le fruit d'observations et d'expériences accumulées au cours de nombreuses générations.

Les pratiques culturales sont limitées à des labours superficiels avec une charrue à traction animale ou mécanique (tracteur) pour ameublir la partie superficielle du sol et pour éliminer les mauvaises herbes. Le nivellement et la confection de planches de cultures s'effectuent à la houe à main.

En général, les agriculteurs confectionnent des planches de dimensions variables (5x2 m², dimensions typiques), pour assurer un bon nivellement du sol afin que la répartition de l'eau soit uniforme (fig. 8). Les semis sont toujours effectués manuellement à la volée. Les graines sont recouvertes d'environ 1 cm de terre, puis piétinées pour assurer par pression leur contact intime avec la terre. L'opération s'achève par une première irrigation. Quinze jours après la levée, un démariage de plantes est nécessaire pour assurer une densité de plantes par planche équilibrée (cette densité varie de 200 à 300 plantes par planche). Les dates de semis sont variables suivant les régions. Selon les enquêtes réalisées lors de la prospection, les dates de semis se situent entre mai et fin juillet. Lorsqu'on sème au début du mois de mai, la récolte est précoce et le mil est appelé mil printanier, ou '*badrī*' et si le semis se fait en juillet, la récolte est tardive et le mil est dit estival, ou '*mazouzi*'.

Lorsque les plantes atteignent le stade grains laiteux, les enfants en assurent le gardiennage contre les oiseaux, et ce, jusqu'à la récolte (fig. 9).

La récolte se fait souvent en coupant les tiges à ras du sol. Elles sont ensuite placées en andains après défeuillage afin d'assurer leur séchage (fig. 10). La récolte des panicules s'effectue 5 à 10 jours après la coupe des tiges par les femmes pour les préparer au battage (fig. 11). Les panicules sont battues sur des aires aménagées à cet effet, par un fléau (manuel) ou par les roues de tracteur (fig. 12). Après avoir été vanné, le grain est stocké pour être vendu ou consommé. A la récolte, les panicules les plus longues, les plus saines et les mieux remplies sont sélectionnées pour constituer la semence de la culture suivante.

Les récoltes débutent généralement en août et s'achèvent en septembre. Les rendements sont variables et dépendent des années, des régions, des pressions des différents facteurs adverses et de la technique de culture personnelle du paysan.

Ils dépassent rarement 1000 kg/ha. Le plus grand problème pour la culture du mil dans les régions arides Tunisiennes, est le ravage causé par les oiseaux granivores, soit qu'ils s'abattent sur le semis pour déterrer les graines et s'en nourrir, soit qu'ils attaquent les plantes en pleine maturité.

Le gardiennage des champs, les épouvantails (fig. 13) et les appareils bruiteurs ne permettent pas toujours de chasser ces ravageurs lorsqu'ils attaquent en groupe. Les résultats d'enquête, menée lors des missions de prospection, montrent le pourcentage de dégât varie de 10 à 50%, et peuvent dépasser ces valeurs, surtout sur les productions précoces.

D'autres prédateurs, notamment les chenilles de la panicule (*Raghuva albipunctella*, fig. 14), les foreuses de tiges (*Acigona ignefusalis* et *Sesamia calamistis*) de même que certaines maladies (mildiou: *Sclerospora graminicola*, fig. 15) ou les adventices (chiendent: *Cynodon dactylon*) ou encore les ravageurs de post-récolte occasionnent de nombreux dégâts (Benoit, 1982; Shetty, 1987; Thakur & Chahal, 1987; Mbayé, 1993; Moussa, 2000; Haile & Hofsvang, 2001; Thakur, 2003). Pour faire face à cette pression phytosanitaire sur le mil et pour réduire les dégâts, les paysans ont adopté plusieurs techniques et stratégies. La solution la plus adéquate pour lutter contre les oiseaux granivores (*Columba palumbus*; *Passer domesticus*; *Alauda arvensis*...) (fig. 16), est de cultiver le mil à côté des habitations des producteurs et d'engager toute la famille dans la chasse des oiseaux par tous les moyens disponibles. Pour réduire les dégâts d'autres prédateurs, les paysans utilisent les fumées et un produit fumigène (soufre en poudre) pour chasser les espèces les plus nuisibles (fig. 17).

De nos jours et grâce aux campagnes de vulgarisation du Ministère de l'Agriculture, l'utilisation des insecticides tend à se perfectionner, quoique lentement, car le paysan tient à ses habitudes et n'adopte pas facilement les nouvelles techniques qu'on lui propose.

Une autre contrainte à la culture du mil consiste dans le fait que les paysans utilisent souvent des cultivars à faible potentiel de production. Il s'agit surtout de populations locales ou écotypes qui sont néanmoins constamment améliorées par les paysans, qui produisent leur propre semences. Ces populations ont une base génétique très large, mais ne possèdent pas un potentiel de production élevé.



Figure 8: Nivellement du sol et confection de planches de culture de mil (à gauche vue générale; à droite vue de premier plan)



Figure 9: Des enfants assurant le gardiennage du mil

Figure 10: Mil défeuillé mis en andain pour sécher et choix des panicules pour la culture suivante



Figure 11: La récolte de plantes et la séparation des panicules

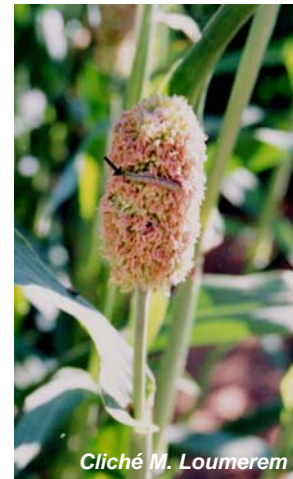


Figure 12: Battage du mil



Cliché M. Loumerem

Figure 13: Epouvantail placé sur un arbre pour chasser les oiseaux



Cliché M. Loumerem

Figure 14: Chenilles de la panicule (*Raghuva albipunctella*)



Cliché M. Loumerem

Figure 15: Attaque de mildiou (*Sclerospora graminicola*)



Cliché M. Loumerem

Figure 16: Oiseau granivore du mil (*Passer domesticus*)



Cliché M. Loumerem

Figure 17: Des produits fumigènes (soufre en poudre) utilisés pour chasser les prédateurs du mil

D'une façon générale, les paysans donnent le nom de la région de culture aux cultivars. On trouve ainsi '*zaghouani*' qui est le mil cultivé dans la région de Zaghouan, '*kayrouani*' (cultivé dans la région de Kayrouan, fig. 1), etc. Dans notre région d'étude, deux principales populations, c'est à dire '*ardhaoui*' ou '*jerbî*', et '*magrebî*' sont les plus cultivées. Le mil '*ardhaoui*' se caractérise par une hauteur moyenne de la plante de 160 cm, avec un maximum de 230 cm. L'épi est long de 6 à 13 cm, de forme cylindrique. La densité des panicules est compacte à intermédiaire avec des graines plus ou moins exposées, ce qui donne aux panicules un fort égrenage à la touche. Les graines sont gris, de forme obovales à globulaires et à texture partiellement cornée (voir 6.2.4.1.1).

Chapitre II

2 Botanique

Le mil est une graminée annuelle. C'est l'unique espèce diploïde avec $x = 7$ ($2n = 14$ chromosomes) de la section *Penicillaria* du genre *Pennisetum* de la famille des *Poaceae*, sous-famille *Panicoideae*, tribu des *Paniceae* (Jauhar (1981), cité par Tostain & Marchais, 1993). Le mil est une plante bisexuée, hermaphrodite, allogame préférentielle grâce à une protogynie prononcée (Pernès *et al.*, 1984; Robert *et al.*, 1992; Andrews *et al.*, 1993; Do, 1994; Rai *et al.*, 1997; CGIAR, 2003).

La plante a un port érigé et possède des tiges épaisses (10 à 40 mm de diamètre à la base). A maturité et suivant les variétés, la taille de la plante varie de 1 à 5 voire 6 mètres de haut. Chaque nœud de la tige porte un bourgeon axillaire susceptible de donner dans certaines conditions une pousse axillaire (talle aérienne). Des racines adventives partent des nœuds de la base de chaque tige. Chaque nœud porte en moyenne 25 racines. Le tallage est important et peut aller jusqu'à 40 tiges par plante (Leonard & Martin, 1963; Béninga, 1993; Do, 1994; Vietmeyer, 1996; Myers, 1999; Chambliss, 2002; CGIAR, 2003; FAO, 2003) (fig. 18).



Figure 18: Une plante de mil avec plusieurs talles

La longueur du cycle de culture, du semis à la récolte, peut s'étendre entre 60 jours, pour les variétés les plus précoces, et 180 jours pour les plus tardives. Le mil se caractérise par une forte aptitude à mettre en place des mécanismes physiologiques qui lui permettent de tolérer la sécheresse:

- par sa grande vitesse d'installation: le mil exploite rapidement les conditions favorables d'humectation du sol par une croissance relativement élevée liée à son cycle photosynthétique en C_4 ;

- une plasticité de développement qui contrôle l'augmentation de la surface foliaire en fonction des conditions favorables de croissance, et évite une consommation excessive de la réserve en eau du sol (Azam-Ali *et al.* (1984), cités par Do, 1994). L'asynchronisme du développement des talles assure un minimum de production finale et même des possibilités de compensation entre brins en cas de périodes sèches en milieu de cycle et avant la floraison (Mahalakshmi *et al.* (1986), cités par Do, 1994; Bidinger *et al.*, 1987);
- un volume d'exploration du sol important par les racines quand les besoins en eau de la plante commencent à augmenter (stade montaison); et
- la sénescence plus ou moins rapide des talles non fructifères, en réduisant la surface foliaire pendant la phase de remplissage des grains, peut permettre une adaptation à la sécheresse, (Siband et Azam-Ali *et al.* (1983 et 1984), cités par Do, 1994). La disponibilité en éléments nutritifs dans l'appareil végétatif (tiges plus feuilles) du mil servirait de tampon face à une réduction de la capacité photosynthétique (Siband *et al.*, 1979; Fussell *et al.*, 1987; Do, 1994; Winkel & Do, 1992; Bezançon *et al.*, 1997).

2.1 Origine et domestication du mil, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.

Les données archéologiques, ethnobotaniques et expérimentales sont encore trop éparses pour que l'histoire du mil puisse être détaillée avec certitude.

Il paraît vraisemblable que le mil a été domestiqué indépendamment en plusieurs zones d'Afrique (Pernès, 1984).

Le 'croissant fertile' africain, du Mali au Soudan, aurait pu être le domaine majeur de cette domestication, d'antériorité décroissante d'est en ouest. Ces événements, difficiles à dater, étaient probablement antérieurs, dans certains cas, à 3000 av.J.C. (Brunken *et al.*, 1977; Pernès, 1983 & 1984; Berthaud & Charrier, 1987; Bezançon *et al.*, 1997).

Les travaux paléo-ethnobotaniques récents au nord du Ghana dans le site de Kintampo, Birimi, témoignent de la domestication du mil dans cette région depuis 3460 ± 200 av. J C (D'Andrea *et al.*, 2001; D'Andrea & Casey, 2002).

Selon Charrier *et al.* (1997) la distribution géographique du mil sauvage, limitée à l'Afrique sahélienne, laisse penser que c'est dans cette zone qu'il a été domestiqué pour donner la céréale que nous connaissons aujourd'hui. Les plus anciens vestiges de mil

cultivé en contact avec du mil sauvage ont été trouvés en Mauritanie et auraient plus de 3000 ans (Amblard & Pernès, 1989). Des empreintes du mil sauvage ont été découvertes sur des poteries datant d'environ 5000 ans dans le centre du Soudan (Stemler, 1980). Différentes analyses génétiques ont montré que le 'syndrome de domestication' dépend d'un petit nombre de gènes liés dont les allèles à l'état récessif permettent l'expression du phénotype cultivé (Pernès *et al.*, 1980). Il y a plusieurs hypothèses sur les centres de domestication du mil: en Éthiopie (Vavilov, 1950), en haut Niger (Murdock, 1959) ou encore dans la région Mauritanie-Sénégal (Stapf *et al.* (1934), cité par Dendy, 1995). Pour Portères (1950) et Harlan (1971) plusieurs domestications indépendantes auraient eu lieu dans un non-centre couvrant tout le Sahel sud-saharien depuis la Mauritanie jusqu'au Soudan région de (Darfour). Au total, les données archéologique, botanique et génétique disponibles à cette date n'ont pas permis de tirer des conclusions définitives, ni de définir avec certitude le ou les centres d'origine et/ou de domestication.

Les travaux sur la morphologie de Brunken *et al.* (1977) et Bilquez (1969) ainsi que des travaux cytogénétiques (Jauhar (1981), cité par Tostain & Marchais, 1993) ont établi que parmi le genre *Pennisetum*, seul le mil sauvage *P. glaucum* subsp. *monodii* pouvait être la source des mils cultivés (Marchais *et al.*, 1993). Or ce mil n'existe qu'au Sahel sud-saharien (fig. 19). Ces auteurs en ont conclu que cette région abrite sans doute le berceau de la domestication.

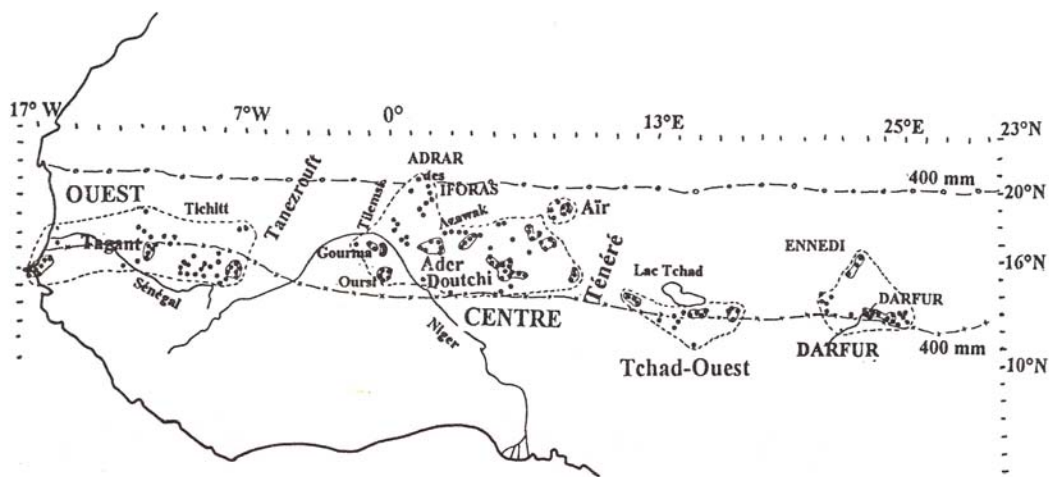


Figure 19: Répartition des échantillons de mils sauvages collectés (.) et les zones de fortes densités (-.-), selon Tostain & Marchais (1993)

De nombreux auteurs, outre les précédents, ont également noté la grande diversité morphologique des mils cultivés en Afrique de l'Ouest (Portères, 1950; Upadhyya *et al.*, 1971), sans évaluation systématique ni quantitative néanmoins. Par contre une telle

évaluation a belle et bien été effectuée à Niamey (Niger) par Marchais *et al.* (1993) sur 267 spécimens cultivés et 118 plantes sauvages choisies pour représenter toute la diversité existant dans les diverses populations de mil. Ils ont montré que les divers types morphologiques pouvaient être regroupés en grandes 'familles' régionales et botaniques pouvant être discriminées dans une proportion globale de 67%. La discrimination est plus facile pour les mils cultivés que pour les mils sauvages, ce qui est normal puisque les sauvages ont tous des valeurs très voisines pour la plupart de leurs caractères botaniques. Elle montre aussi que les mils cultivés ouest africain sont les plus éloignés des mils sauvages par leur morphologie et qu'ils sont différenciés fortement en 5 grands groupes alors que les autres grandes régions géographiques qui abritent des variétés (sauvages et/ou) cultivées comme l'Inde ou l'Afrique australe forment des groupes peu divers et plutôt homogènes. Ces observations montrent aussi que l'Afrique de l'Ouest abrite les plus vieilles civilisations agraires fondées sur la culture du mil, alors qu'en Inde et en Afrique australe, le mil n'est qu'une culture parmi d'autres qui fût introduite récemment. C'est en Afrique de l'Ouest que la domestication est la plus avancée. Il n'est donc pas déraisonnable d'y situer le berceau de la domestication de cette céréale (Marchais *et al.*, 1993).

La structure enzymatique décrite par Tostain & Marchais (1993), donne la même conclusion mais plus en détail. En Afrique de l'Ouest, les mils tardifs forment un même vaste groupe distinct des autres groupes qui contiennent des mils précoces et qui sont très éloignées des mils tardifs. De plus, selon ces analyses le point de contact entre mils cultivés et mils sauvages se situerait dans les régions de Mauritanie, du Sénégal et l'Ouest du Mali. La conclusion la plus simple est qu'il n'y a eu qu'un seul berceau de domestication et que tous les mils cultivés sont issus de mils qui étaient initialement domestiqués dans cette région (Peigne *et al.*, 1993).

L'étude du syndrome de domestication initiée par Pernès (1984) a été abordée par une équipe de chercheurs (Peigne *et al.*, 1993) à différents niveaux: génétique, biologie florale, moléculaire et cytogénétique. Un certain nombre de problèmes demeure quand on examine sa répartition entre différentes lignées: une cartographie du génome du mil a été entreprise pour répondre à ces questions. De plus, la cartographie est une méthode qui devrait permettre de confirmer des hypothèses quant aux sens des processus évolutifs en cause: selon les connaissances actuelles, la domestication à partir des formes spontanées se serait produite en un site unique à l'est de la Mauritanie. Les formes cultivées auraient ensuite migré vers l'est du continent. On peut facilement identifier 5 familles de cultivars bien typés du Sénégal au Mali (Brunken *et al.*, 1977; Hamon *et al.*, 1993).

Le premier qui a écrit sur le mil a probablement été Al-Idrissi (1154, cité par Brunken, 1977), un savant arabe, en décrivant la région d'Abyssinie, dans un compte-rendu de ses voyages en Afrique du Nord et en Espagne. Il a mentionné la culture de deux espèces de mil 'durra' et 'dokhn'. Toujours d'après Brunken (1977), ces deux espèces seraient le sorgho et le mil qui sont encore cultivées de nos jours au Nil.

Dans la littérature occidentale, Leo Africanus, un esclave Maure au service de pape Léo X au 16^{ième} siècle, a décrit (dans un compte d'Afrique du Nord) une céréale trouvée dans une région à l'ouest de Tombouctou. Il mentionnait qu'il n'avait jamais vu cette espèce en Italie, mais qu'il pensait qu'elle était cultivée dans quelques régions d'Espagne.

Conclusion: les anciennes littératures n'offrent pas beaucoup d'informations sur l'origine du mil. Les études récentes sur l'origine et la domestication sont basées sur l'interprétation de l'actuelle distribution de cette culture et son ancêtre sauvage. Trois hypothèses sur la domestication du mil complètement différentes ont ainsi été avancées.

La diversité morphologique du mil a conduit Kaernicke et Werner (1885, cités par Brunken *et al.*, 1977) à conclure que le mil est originaire de l'Afrique, mais sans préciser où et quand a été domestiqué.

Vers les années 1950, Vavilov (cité par Brunken *et al.*, 1977) dans un travail classique sur les origines des cultures, a placé la domestication du mil dans la région montagneuse éthiopienne. Cette dernière hypothèse a été rejetée entre-temps, car l'ancêtre sauvage du mil n'a jamais été observé dans les régions montagneuses de l'Éthiopie. Il s'agissait probablement d'autres mils, *Eleusine coracana* (L.) Gaertner et/ou *Eragrostis tef* (Zucc.) Trott. (Behaeghe, communication personnelle).

Une deuxième théorie avancée par (Murdock (1959), cité par Brunken *et al.*, 1977), est celle qui postule que le mil était cultivé en Afrique de l'Ouest, domestiqué par les populations Mande près de la rivière Niger entre 5000 et 4000 av. JC. Cette hypothèse a été rejetée par (Baker (1962) et Mrigley (1969), cités par Brunken *et al.*, 1977) depuis sa publication, car pendant la période suggérée par Murdock, la végétation dans la zone de la rivière Niger était de type forêt tropicale. Par conséquent, il est peu probable qu'une culture des régions semi-arides comme le mil aurait été domestiquée dans cette région (Marchais *et al.*, 1993).

Aujourd'hui, la plus grande diversité morphologique du mil se trouve au sud de l'Afrique Ouest, au nord de la zone de forêt. Prenant ces faits en considération, (Harlan (1971), cité par Brunken *et al.*, 1977) a suggéré un troisième centre d'origine qui s'allonge de l'Ouest du Soudan au Sénégal. Très tôt, après sa domestication, la culture du mil se

serait alors largement développée dans les régions semi-arides africaines et asiatiques (Marchais *et al.*, 1993).

Le mil est relativement nouveau en Amérique et en Australie. Il a été introduit pour la première fois aux États-Unis (EU) en 1857. Il y est surtout cultivé comme fourrage, dans les plaines côtières du sud-est (Cerighelli, 1955; Pernès, 1984; Vietmeyer, 1996; Pullins *et al.*, 1997; Andrews *et al.*, 1998; Myers, 1999; Rahn & Bauer, 2001; Chambliss, 2002; Lee & Hanna, 2002; Teutsch, 2002; Durham, 2003).

Ci-joint (fig. 20) on trouve la distribution géographique, en Afrique, des types de mil cultivés tels qu'ils sont décrits par Portères (1976, cite par Pernès 1984).

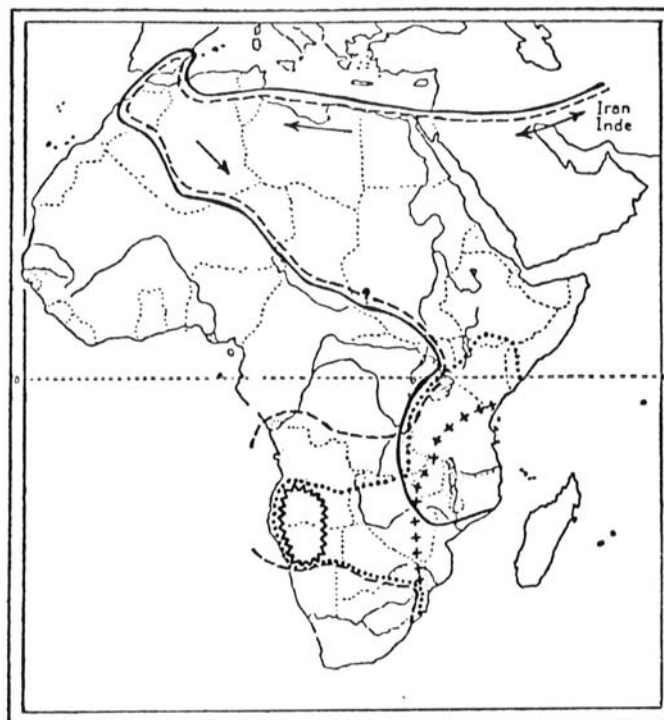


Figure 20: Espèces du genre *Pennisetum* cultivées en Afrique-Asie d'après Portères (1976, cité par Pernès, 1984) — *P. spicatum*; *P. echinurus*; ---- *P. typhoides*; ++++ *P. malacochaete*; wwww *P. alpicauda*

2.2 Taxonomie

Le mil appartient au genre *Pennisetum*, famille des *Poaceae* (*Gramineae*), sous-famille des *Panicoideae* et tribu des *Paniceae*. Le genre *Pennisetum* est constitué par 140 espèces et sous-espèces qui sont réparties dans les régions tropicale et subtropicale. Il est divisé en cinq sections. Le mil appartient à la section *Pennisetum*, qui se caractérise par la présence d'une mince touffe de poils au sommet des anthères et un nombre haploïde de chromosomes qui est égal à 7 ou un multiple de 7. Mais la section *Penicillaria* comprend, en plus des mils céréaliers cultivés, un certain nombre de formes d'aspect

plutôt fourrager, que l'on ne trouve à l'état spontané qu'en Afrique (Brunken, 1977; Pernès, 1984; Tostain & Marchais, 1993; Do, 1994; Hacker, 1995; Bezançon *et al.*, 1997; Rai *et al.*, 1997).

Hutchinson et Dalziel (1962, cités par Pernès, 1984) avaient reconnu, dans la première édition de leur flore de l'Afrique de l'Ouest, l'existence dans cette région de 8 espèces différentes de mils céréaliers cultivés et de 12 espèces non utilisables pour la consommation humaine. Parmi ce dernier groupe, ils décrivent 11 espèces annuelles sans aucune utilisation et une espèce vivace. Cette classification est encore employée de nos jours par certains agronomes qui travaillent en Afrique. Mais elle n'a aucune réalité biologique (Bilquez, 1970; Brunken, 1977).

Le mil est connu sous plusieurs synonymes à savoir: *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.; *Alopecurus typhoides* Burmf.; *Cenchrus pycnostachyus* Steud.; *Cenchrus spicatus* (L.) Cav.; *Chaetochloa glauca* (L.) Scribn.; *Chaetochloa lutescens* Stuntz; *Chamaeraphis glauca* (L.) Kuntze; *Holcus spicatus* (L.); *Ixophorus glaucus* (L.) Nash; *Panicum americanum* (L.); *Panicum coeruleum* Mill.; *Panicum glaucum* (L.); *Panicum lutescens* Weigel; *Panicum spicatum* (L.) Roxb.; *Penicillaria arabica* A. Braun ex Andersson; *Penicillaria ciliata* Willd.; *Penicillaria deflexa* Andersson; *Penicillaria mossambicensis* Klotzsch ex Müll. Stuttg; *Penicillaria nigritarum* Schltld.; *Penicillaria roxburghii* A. Braun ex Müll.; *Penicillaria spicata* (L.) Willd.; *Penicillaria typhoides* Figari & DeNotaris; *Penicillaria typhoides* Schltld.; *Pennisetum americanum* (L.) Leeke; *Pennisetum anchylochaete* Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum cinereum* Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum gambiense* Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum gibbosum* Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum leonis* Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum maiwa* Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum megastachyum* Steud.; *Pennisetum nigritarum* (Schltld.) T. Durand & Schinz var. *deflexum* (Andersson) T. Durand & Schinz; *Pennisetum pycnostachyum* (Steud.) Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum spicatum* (L.) Körn.; *Pennisetum spicatum* (L.) Körn. var. *typhoideum* T. Durand & Schinz; *Pennisetum typhoides* Stapf & C.E. Hubb.; *Pennisetum typhoideum* Rich.; *Setaria glauca* (L.) P. Beauv.; *Setaria lutescens* (Weigel) F.T. Hubb. (Brunken, 1977; Rai *et al.*, 1997; De Wet, 1987; Wunderlin & Hansen, 2003).

L'histoire de la taxonomie du mil a débuté d'une façon confuse par Linnaeus (1753, cité par Brunken, 1977). Durant la première moitié du 19^e siècle, *Penicillaria* est accepté par la plupart des botanistes de l'époque pour désigner le mil.

En 1855, Steudel (cité par Brunken, 1977) a classé *Penicillaria* comme section de *Pennisetum* et il a regroupé toutes les variantes du mil dans une seule espèce polymorphique (*polymorphic species*) *P. typhoideum* (L.) Rich. Plus tard, en 1887, Hackel

(cité par Brunken, 1977) a redéfini les limites de la section *Penicillaria* où il incluait uniquement le mil. Vers l'année 1907, Leeke (cité par Brunken, 1977) ajouta sous cette section *Penicillaria* les espèces sauvages de *Pennisetum* qui se distinguent par la présence d'une touffe de poils sur l'apex des étamines. Ce concept fut renforcé par (Stapf *et al.* (1934) et Pilger (1940), cités par Dendy, 1995).

Hitchcock (1920, cité par Brunken, 1977) a désigné le mil sous le nom de *P. typhoideum* L. Rich avec une appartenance au genre *Pennisetum*.

Stapf (1934, cité par Dendy, 1995), a subdivisé le genre *Pennisetum* en 5 sections: *Gymnothrix*, *Eupennisetum*, *Penicillaria*, *Heterostachya* et *Brevivalvula*. Il a identifié 32 espèces appartenant à la section *Penicillaria* avec six espèces se trouvant en Afrique. Le mil cultivé est inclus dans cette section.

Dans l'espèce *P. glaucum*, Van Der Zon (1992, cité par Bezançon *et al.*, 1997) reconnaît trois sous-espèces:

- *P. glaucum* subsp. *glaucum*, le mil cultivé;
- *P. glaucum* subsp. *violaceum*, la forme sauvage largement présente en Afrique dans la zone sahélienne, de l'Atlantique à la mer Rouge, dans des situations écologiques très variées; et
- *P. glaucum* subsp. *sieberianum*, qui rassemble les formes intermédiaires issues d'hybridations naturelles entre formes cultivées et formes sauvages (Brunken, 1977; Liu *et al.*, 1996; Bezançon *et al.*, 1997).

Harlin et Dewett (1971, cités par Bezançon *et al.*, 1997) ont structuré le complexe d'espèces en pools géniques, dans lesquels ils regroupent les espèces selon leur capacité décroissante de s'hybrider avec la forme cultivée (Combes, 1975; Champigny *et al.*, 1982; De Wet, 1986; Amoukou & Marchais, 1993).

Le genre *Pennisetum* est ainsi regroupé en trois pools géniques, dont le pool primaire est monospécifique et qui rassemble les trois sous-espèces de *P. glaucum* qui s'interfécondent naturellement en donnant des descendances fertiles. En dehors du pool primaire, l'appellation 'mil' doit être évitée, car elle est source de confusion avec des espèces sauvages parfois très différentes par leur biologie du 'mil sauvage' *P. glaucum* subsp. *violaceum*.

Le pool secondaire est constitué de deux espèces, *P. purpureum* et *P. squamulatum*, qui peuvent s'hybrider facilement avec *P. glaucum*.

Le pool tertiaire regroupe les autres espèces du genre (Hanna, 1987; Kumar & Appa Rao, 1987; Marchais & Tostain, 1992; Andrews *et al.*, 1993; Bezançon *et al.*, 1997; Rai *et al.*, 1997; Appa Rao *et al.*, 1998).

En simplifiant la taxonomie du mil, Brunken (1977) a regroupé l'ensemble des mils (mil cultivé et mil sauvage) en une seule espèce biologique (*biological species*) avec trois sous-espèces:

- *Pennisetum americanum* subsp. *americanum*, auquel appartiennent toutes les formes cultivées anciennement décrites sous l'appellation 'typhoides';
- *P. americanum* subsp. *monodii* correspond au mil sauvage et auquel ce rattachent les formes spontanées appelées anciennement '*P. violaceum* Lam.', '*P. mollissimum* Hochst' et '*P. ramosissimum* Steud.'; et
- *P. americanum* subsp. *stenostachum* qui regroupe toutes les formes intermédiaires entre les deux précédentes (Brunken, 1977; Tostain & Marchais, 1985; Kumar, 1987).

Cette classification de Brunken (1977) est la plus fréquemment employée dans les publications et admise par les scientifiques.

Le tableau 1 définit les principales caractéristiques différentielles de ces trois groupes.

Contrairement aux deux autres groupes, il n'y a pas de populations de *stenostachyum* définies comme autonomes stables. On trouve des mils cultivés (*americanum*) dans des zones où les *monodii* n'existent pas et, inversement, des populations sauvages (*monodii*) hors des zones cultivées (Pernès, 1984).

Ces trois 'sous-espèces' ont les mêmes caractéristiques reproductives: allogamie préférentielle avec protogynie et aussi un même nombre chromosomique ($2x = 14$). Ce sont des plantes annuelles, adaptées aux mêmes conditions du milieu (Belliard *et al.*, 1980; Tostain & Marchais, 1993).

Selon Pernès (1984), la classification schématique de Brunken (1977) avait pour but de clarifier et simplifier la situation laissée par les taxonomistes classiques. Cependant, elle ne fait pas ressortir la large diversité des formes cultivées.

Actuellement et taxonomiquement, le mil cultivé est connu sous les noms *P. glaucum*, *P. typhoides* et *P. americanum* sont utilisés indépendamment l'un de l'autre (Spencer & Sivakumar, 1987; Hanna, 1987).

D'après Rai *et al.* (1997), *P. glaucum* (L.) R.Br. est le plus couramment utilisé et le nom le plus correct du mil car d'après De Wet (1987) *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br., Prodr. Fl. Nov. Holl. 1:195. 1810, est le plus ancien nom du mil cultivé.

Tableau 1: Caractéristiques morphologiques des sous-espèces de *Pennisetum americanum* (L.) Leeke selon Brunken (1977)

Organes	Caractéristiques	<i>americanum</i> (cultivé)	<i>monodii</i> (sauvage)	<i>stenostachyum</i> (intermédiaire)
Tige	Vigueur hauteur	Forte Souvent > 3 m	Grêle à forte < 3 m souvent décombante et s'enracinant aux nœuds inférieurs	Forte Souvent > 3 m
Feuilles	Longueur	Souvent > 1 m	La plupart < 1 m	Souvent > 1 m
	Largeur	Max. 7 cm	Max. 2,5 cm	Max. 4 cm
Inflorescence	Forme	Cylindrique à largement elliptique	Cylindrique	Cylindrique
	Longueur	4-200 cm (rarement plus)	2,5-20 cm	5-150 cm (ou plus)
	Largeur	0,8-5,5 cm	0,8-2 cm	1-3 cm
Rachis	Vigueur Largeur	Forte 5-13 mm	Grêle 0,5-1,5 mm	Grêle à forte 1,5-6 mm
Involucres	Persistance	Persistants, restant attachés au rachis à maturité	Caduques, tombant du rachis à maturité	Caduques tombant du rachis à maturité
	Pédicelles	1,1-25 mm	< 0,25 mm	0,2-1,5 mm
	Soies	Souvent plus courte que l'épillet	Plus longues que l'épillet	Plus longues que l'épillet
Epillets	Nombre par Involucre	1 - 9	1 au moins souvent 2	Le plus souvent 2
	Forme	Obovés	Lancéolés	Lancéolés à elliptiques ou obovés
	Longueur	3 - 6 mm	4 - 7 mm	4 - 6 mm
Caryopse	Forme	Obovée, obtus à aigu	Elliptique à lancéolée tronquée, comprimée dorsalement	Obovée à elliptique obtus à tronquée modérément comprimée
	Longueur	2 - 5,5 mm	2 - 3 mm	2 - 4,5 mm
	Largeur	1,6 - 3,2 mm	1 - 1,5 mm	1 - 2,2 mm
	Épaisseur	1,2 - 2,5 mm	0,6 - 1 mm	1 - 2 mm
	Exposition	Exposé ou saillant entre les bractées florales	Etroitement enfermé dans les bractées florales à maturité	Enfermé ou saillant entre les bractées florales
	couleur	Jaune à gris souvent tachetée de pourpre à l'apex	Jaune brunâtre	Jaune à gris souvent tachetée de pourpre à l'apex.

Le mil est connu sous différents noms vernaculaires dans le monde.

En Europe:

- ❖ français: mil, petit mil, mil perlé, mil à chandelle, mil d'Égypte, penicillaire;
- ❖ anglais: pearl millet, cat-tail millet, bulrush millet, spiked millet, candle millet;
- ❖ allemand: Perhirse, Negerhirse;
- ❖ italien: miglio perlato; miglio africano, miglio perlaet;
- ❖ néerlandais: gierst; parelgierst;
- ❖ danois: negerhirse, perlehirse;
- ❖ estonien: vesihaljas kukeleib;
- ❖ hongrois: négerköles;
- ❖ polonais: rosplenica sina;

- ❖ portugais: milhete, milho africano, milho miúdo, painço, peniseto, bajra; et
- ❖ espagnol: mijo negro, mijo perla, mijo candela, panizo negro,
(Leonard & Martin, 1963; Bezançon *et al.*, 1997; Van Damme, 2003).

En Afrique:

- ❖ swahili: maweke, uwele;
- ❖ zulu: amabele, unyaluthi, unyawoti, unyawothi;
- ❖ Tchade: dokane ou dokona, ligui;
- ❖ Sénégal: souna, sania, tiotandé;
- ❖ Kenya: mwere (kikuyu);
- ❖ Benin: ignati, nara, amala;
- ❖ Burkina Faso: iniadi, haini, gouri, kazouya, ouine, dou fouâ;
- ❖ Cameroun: mouri, yadiri;
- ❖ Ghana: nara, zia;
- ❖ Guinée: moutiri;
- ❖ Zambia (Bemba): Mpyoli;
- ❖ Mali: souna, tiotioni, sanio;
- ❖ Niger: boudouma, ba angoure, haini, kirei, soumno, zongo;
- ❖ Nigeria: gero (hausa), emeye (yoruba), maiwa;
- ❖ Togo: ignati, amala;
- ❖ Tunisie: droo, gssab;
- ❖ Afrique du Sud: babala, nyauti, mausa, mahangn, munga; et
- ❖ Sudan: duhun, dukhon.

(Leonard & Martin, 1963; Kumar & Appa Rao, 1987; Clément *et al.*, 1993; Lespinasse *et al.*, 1993; Dendy, 1995; Appa Rao *et al.*, 1996; Rai *et al.*, 1997).

En Asie:

- ❖ Inde: bajara, bajira, bajri (hindi), sajje, chin yü-ku, bajri, sajja, cumbu, ganti;
- ❖ Chinois: jin se gou wei cao, yu gu, zhen zhu su, la zhu bai;
- ❖ Japonais: toujin kibi, kin enokoro, tôjin bie, tôjin hie, parumiretto;
- ❖ Népalais: baajaraa;
- ❖ Thaïlandais: khao fang nok;
- ❖ Vietnamien: lua miêu; et
- ❖ Pays Arabes: dochn ou duchn.

EU: cattail millet, pencilaria, pennicillaria, mand's forage land, bulrush millet, candle millet.
(Leonard & Martin, 1963; Kumar & Appa Rao, 1987; Dendy, 1995; Appa Rao *et al.*, 1996; Rai *et al.*, 1997).

2.3 La Croissance et le développement du mil

2.3.1 Stades de croissance

2.3.1.1 La phase végétative

La phase végétative du mil est de 30 à 50 jours, allant de l'émergence à la formation de la panicule sur la tige principale. Cette phase commence par la germination de la graine et l'apparition des jeunes plantes, et continue jusqu'à l'initiation de la panicule. Les jeunes plantes développent leur système racinaire primaire (racines séminales) et produisent les racines adventices. L'initiation de toutes les feuilles est lancée pendant la phase végétative et, pour des variétés précoces, six ou sept feuilles (y compris la feuille embryonnaire) sont entièrement développées vers la fin de cette phase, des bourgeons de talle sont formés, la feuille primordiale est apparue, et plusieurs talles émergent vers la fin de cette phase. Il y a peu d'élongation au niveau des entre-nœuds, cependant, et le méristème apical reste sur ou en-dessous de la surface de sol (fig. 21). L'accumulation de la matière sèche est presque entièrement confinée aux feuilles et racines.

La germination se produit rapidement dans un sol chaud (20°C ou plus) et humide, et prend alors de 2 à 3 jours. La graine gonfle, son tégument se brise et un coléoptile mince ainsi que la racine primaire apparaissent (Maiti & Bidinger, 1981; Khaleeq *et al.*, 1990; Bacci *et al.*, 1999). Le coléoptile s'allonge, commence à émerger du sol et la première feuille apparaît aussitôt. La jeune plante continue sa croissance, en produisant d'autres feuilles. Le mésocotyle croît durant cette période et un nœud se forme à la base du coléoptile juste en-dessous de la surface du sol 6 à 7 jours après l'apparition du coléoptile. Des racines secondaires commencent à se développer au niveau de ce nœud. Elles se distinguent de la racine primaire par leur diamètre (plus grand) et leur point d'initiation à la base de la tige. Leur nombre varie entre 3 et 5 par tige. Ces racines se développent rapidement pour alimenter la plante, durant sa vie, en eau et éléments nutritifs (fig. 22).

Le tallage débute très tôt, dès le 10^{ième} - 15^{ième} jour après le semis. Les talles prennent naissance à partir du nœud basal dès la sortie des racines secondaires. La première talle apparaît environ 12 jours après son émergence à l'aisselle du coléoptile. Par la suite, les autres talles se développent alternativement au tour de la même tige (fig. 23). Elles suivent un développement identique que la tige principale. Le nombre de talles

arrivant à floraison est fonction de la variété, des conditions environnementales et particulièrement de la densité de plantation.

Certaines variétés développent des talles au niveau des nœuds supérieurs de la tige (appelées des talles nodales) principalement après formation de grain dans la panicule. Ces talles nodales ont, généralement, un cycle de développement court, peu de feuilles et une petite panicule (Maiti & Bidinger, 1981; Khaleeq *et al.*, 1990; Béninga, 1993; Van Oosterom *et al.*, 2002).

L'inflorescence de la tige principale se forme en même temps suivie de celles des talles. Elle se caractérise par un allongement internodal considérable des tiges, par l'apparition des dernières feuilles et se termine par l'apparition de l'épi à l'extrémité de la tige au niveau de la dernière gaine. Le déclenchement floral est marqué par l'élongation du dôme apical et la formation d'un rétrécissement à la base de l'apex. La taille de l'apex au déclenchement floral s'étend de 0,5 mm dans des variétés précoces et à pas moins de 1 mm dans des variétés tardives. La ramification de la panicule débute 1 à 2 jours après le déclenchement floral. Des branches primordiales se forment à la base de la panicule et atteignent le sommet en 3 jours. Par la suite, chaque branche se subdivise pour former 2 épillets et quelques soies (Maiti & Bidinger, 1981).

Après cette période, la croissance de la plante se fait par élongation cellulaire.

2.3.1.2 La phase reproductive ou phase de développement de la panicule

Cette phase comprend l'épiaison, la floraison et la fructification. Elle est marquée par le développement total des feuilles et par la sénescence des feuilles à la base de la tige principale (feuilles âgées). L'élongation de la tige se produit par l'élongation séquentielle des entre-nœuds en commençant à la base. Les talles émergent et subissent l'initiation, le développement des feuilles, etc. suivant le même principe que celui de la tige principale. Les premières talles formées suivent étroitement la tige principale dans leur développement, tandis que le développement des talles tardives est, généralement, inhibé ou même arrêté par la concurrence de la tige principale. Pendant l'élongation de la tige, la panicule subit une série de changements morphologique et développemental distincts: développement des épillets, des fleurons, des glumes, des stigmates, des anthères et finalement la pollinisation, qui marque la fin de cette phase.

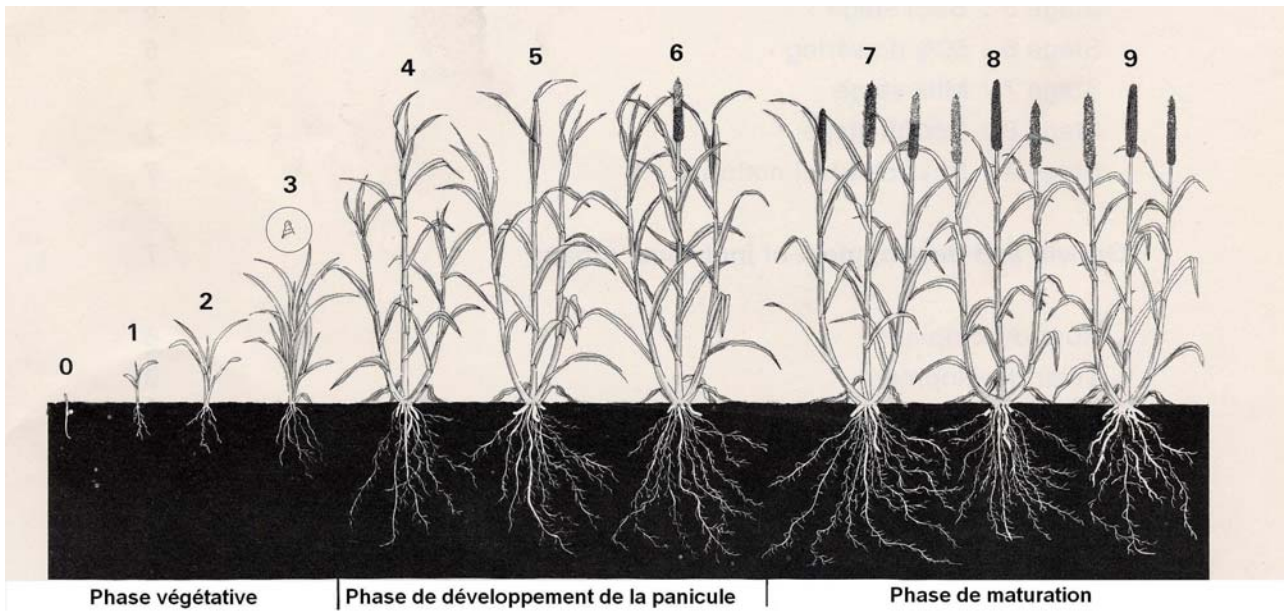


Figure 21: Phases de la croissance et du développement du mil (Maiti & Bidinger, 1981)



Figure 22: Développement des racines

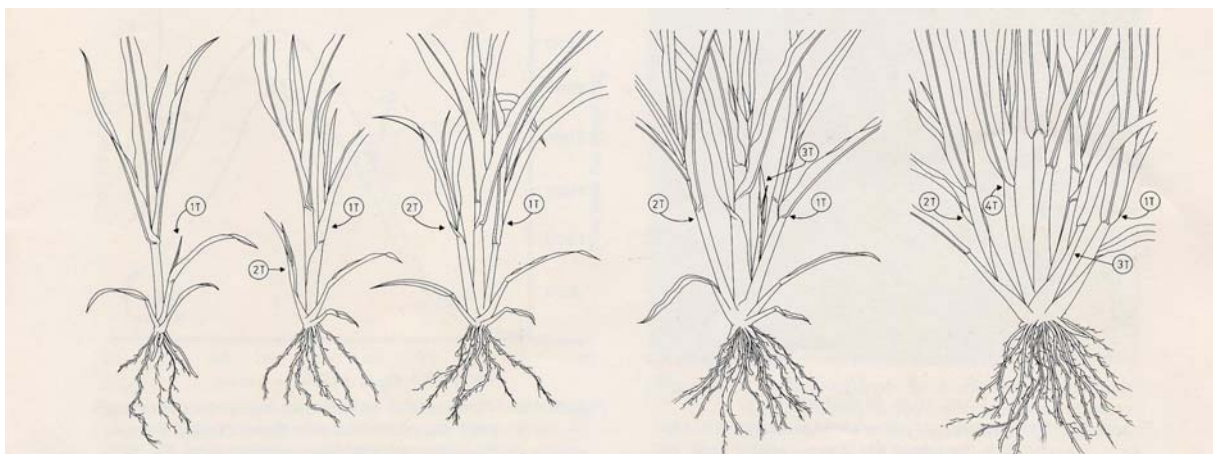


Figure 23: Le développement de talles: 1T= la première talle, 2T= la deuxième talle, etc. (Maiti & Bidinger, 1981)

Environ six à dix jours avant la floraison, la feuille paniculaire se renfle au niveau de la gaine. Durant cette période, l'ensemble de l'épi se développe activement. La panicule commence à fleurir dès son apparition complète. Toutefois, et dans certain cas, tous les stigmates sont déjà mûrs, alors que la panicule se trouve encore dans la gaine foliaire. Un jour après l'émergence complète des stigmates, les anthères commencent leur apparition à partir du haut de l'épi (Bono & Leclercq, 1963; Béninga, 1993).

Le mil est une espèce diploïde, hermaphrodite, préférentiellement allogame avec une protogynie fortement marquée (un fait important de la biologie florale des espèces de *Pennisetum* est leur nature protogyne (*protos* = avant; *gyne*= femme) ce qui signifie que les carpelles (organes femelles) sortent et mûrissent avant les étamines (organes mâles) (Sandmeier, 1993)). La pollinisation est anémophile (pollen disséminé par le vent) et entomophile (pollinisation assurée par les insectes, fig. 24).



Figure 24: Panicule visitée par des abeilles durant la floraison



Figure 25: Sénescence rapide de feuilles de certaines lignées

L'épanouissement de l'anthèse (on appelle anthèse, le moment où la fleur est mûre) s'effectue, en général, à une heure précise, caractéristique de l'espèce. Ce moment

coïncide avec la nuit pour les fleurs nocturnes, ou généralement ce moment se situe pendant le jour. La durée de l'anthèse qui peut être de quelques heures (*Linum Usitalisimum*), d'une nuit (*Oenothera biennis* L.) ou une durée plus longue (plus de 2 mois pour les orchidées). L'anthèse du mil commence après que la plupart ou la totalité des stigmates sont sortis (3 à 5 jours après l'émergence de la panicule). L'anthèse chez le mil s'opère tout au long du jour et de la nuit. La floraison maximale intervient généralement entre 20 heures du soir et 2 heures du matin, avec un maximum à 22 heures. Les stigmates commencent à émerger de fleurons, situés à quelques centimètres du sommet de la panicule. Il faut 2 à 3 jours pour que tous les stigmates émergent. En général, les stigmates restent réceptifs pendant 3 jours. Toutefois, après pollinisation, le stigmate se ratatine en quelques heures. Le processus de l'émission du pollen dure 4 à 7 jours en commençant par les fleurons du sommet de la panicule et termine par les fleurons à la base. Une fois émis, le pollen reste viable pendant environ 7 heures. Un vent violent ou une forte pluie à l'époque de la floraison se traduit par une mauvaise formation des graines, beaucoup de pollen ayant ainsi été emporté avant d'être devenu fécond (Maiti & Bidinger, 1981; Andrews *et al.*, 1993; Bezançon *et al.*, 1997).

2.3.1.3 La phase de maturation

Cette phase commence par la pollinisation des fleurons de la panicule principale et continue jusqu'à la maturité de la plante (panicules de la tige principale et des talles). Durant cette phase, le développement des graines passe par trois stades: Laiteux, début pâteux et fin pâteux ou durci. Durant les six à sept jours après la pollinisation, le grain se développe rapidement et devient visible. Au cours de ce stade, l'enveloppe de la graine s'engorge d'un liquide qui au début, est clair et puis devient laiteux. Le liquide se solidifie au fur et à mesure de l'accumulation de l'amidon et la diminution de la quantité d'eau dans la cellule. Les graines commencent à passer du vert à la couleur qu'elles auront à maturité (20-25 jours après la pollinisation). La fin de la phase est marquée par le développement d'une petite couche de tissu foncée dans la région du hile de la graine tandis que les feuilles les plus basses commencent à mourir.

Il existe des nettes différences variétales liées à la vitesse de sénescence des feuilles qui persistent vertes après la maturité des graines. Chez certaines variétés, toutes les feuilles peuvent être sèches ou presque, au moment où le grain est mûr alors que chez d'autres variétés la plante entière peut rester encore verte (fig. 25).

2.3.2 Morphologie du mil

Le système végétatif aérien du mil est formé d'un certain nombre de talles qui partent d'une zone située au niveau du sol, appelée plateau de tallage. Chaque talle, après un développement complet, est formée d'une tige, feuilles et une inflorescence appelée panicule.

Les feuilles naissent le long de la tige en alternant sur deux lignes opposées et se composent d'une gaine, d'un limbe et d'une courte ligule.

Le système racinaire est de type fasciculé. Les racines sont fibreuses; la racine principale est fine, petite et rapidement remplacée par des racines secondaires qui se répandant très largement dans le sol.

2.3.2.1 Les racines

Au cours de son développement, le mil dispose de deux systèmes racinaires successifs:

- le système de racine primaire est fonctionnel dès la germination; et
- le système de racines secondaires ou du tallage qui est du type fasciculé. Il apparaît au tallage et se substitue progressivement au précédent pour constituer le système racinaire principal de la plante.

En outre, des racines adventives peuvent apparaître plus tard sur les nœuds inférieurs. Elles peuvent être nombreuses si le plant n'est pas en de bonnes conditions de culture. Elles sont utiles principalement au maintien de la tige au sol mais le développement de ces racines pendant la période florale aident la plante à subvenir à ses besoins en eau et éléments nutritifs (Maiti & Bidinger, 1981; Ousmane, 1991).

2.3.2.2 Les chaumes

Le chaume ou la tige (principale et secondaire) est constitué de séries de nœuds alternant avec des entre-nœuds. Il est grêle à très robuste, mesurant de 0,5 à 5 cm de diamètre près de la base, s'amenuisant vers l'extrémité terminale. Sa longueur peut varier de 0,5 m à 6 m au maximum.

Le chaume est solide avec un cortex ou une écorce dure et une moelle plus molle. Les faisceaux vasculaires sont répartis dans la tige (typique pour les monocotyles), mais

ils sont davantage concentrés dans la région périphérique où ils sont tellement rapprochés les uns des autres qu'ils forment presque un anneau continu.

Le nœud se présente comme un anneau à la base de la gaine foliaire: c'est le point d'où part la feuille. C'est un endroit d'anastomose complexe des faisceaux vasculaires de la tige vers ceux de la feuille. Chaque nœud soutient également un bourgeon axillaire, appelé ainsi parce qu'il est situé dans l'axile entre le nœud et la gaine de la feuille. Parfois, les bourgeons se développent en talles axillaires ou secondaires.

Les entre-nœuds du chaume du mil peuvent résorber une partie de la moelle à maturité pour alimenter la feuille. On a alors des pailles creuses à demi-creuses variables selon les variétés.

Les entre-nœuds basaux restent courts et le processus d'élongation est plus rapide au niveau des entre-nœuds terminaux (Maiti & Bidinger, 1981; Do, 1994).

2.3.2.3 Les feuilles

Les feuilles sont distribuées de façon variable le long de la tige du mil: pour certains types, elles sont concentrées près de la base (mil nain), alors que pour d'autres elles sont plus ou moins uniformément disposées le long de la tige. Les feuilles sont disposées à des angles variables avec la tige pour donner des ports érigés, intermédiaires et pendants (IBPGR & ICRISAT, 1993).

Les feuilles naissent le long de la tige en alternant sur deux lignes et se composent d'une gaine, d'un limbe et d'une ligule. La gaine prend origine à un nœud et entoure l'entre-nœud, avant que le limbe ne s'étende vers l'extérieur. La surface extérieure peut être glabre ou duveteuse (fig. 26). La ligule (caractère distinctif des poacées) est une petite languette membraneuse située à la jonction de la gaine et du limbe. Elle est très courte chez le mil (fig. 27).

Le limbe peut être plat ou légèrement incurvé. Ce critère permet de distinguer les variétés.

Les limbes sont larges à la base et s'amincissent progressivement en une fine pointe. Ils sont généralement irrégulièrement duveteux, bien que sur certaines variétés ils peuvent être très velus sur certains, et très glabres sur d'autres (IBPGR & ICRISAT, 1993).

2.3.2.4 Inflorescence

L'inflorescence du mil est un faux épi qui se présente sous forme d'une panicule cylindrique (fig. 29). Sa longueur comme son épaisseur varient beaucoup (fig. 36 et 37). La panicule peut-être courte ou longue, compacte ou lâche. Elle mesure habituellement 20 à 45 cm de long. Dans le descripteur du mil (IBPGR & ICRISAT, 1993) on trouve 9 formes de panicule (fig. 31).

De façon générale, la panicule se trouve verticalement au sommet du chaume, mais peut aussi se recourber (fig. 30).

La panicule est constituée par un rachis (l'axe central), droit, cylindrique, dur, et épais de 8 à 9 mm. Il s'étend sur toute la longueur de l'inflorescence. Il est recouvert de poils doux et courts. Sur ce rachis sont implantés, par l'intermédiaire des pédicelles, les involucre formés par un bouquet de soies contenant les épillets. On compte ordinairement 30 à 40 soies. Une ou deux soies sont parfois nettement plus longues que le reste du verticille (fig. 32). Elles peuvent également être plus épaisses et plus rigides sur certaines lignées (fig. 33).

Chaque épillet a deux fleurs. La fleur inférieure est habituellement mâle, l'autre étant bisexuée. Cette dernière fleur a une large glumelle, une palea (glumelle supérieure), trois étamines et une carpelle à 2 pistils terminés par des stigmates disposés en brosse (Maiti & Bidinger, 1981).

La phase de formation d'épillets débute au stade 'plein tallage', se poursuit par le stade d'initiation florale, et se termine à l'apparition de glumes. La phase du développement floral est caractérisée par la différenciation des organes floraux (glumelles inférieures, puis supérieures, étamines, stigmates); puis par la réalisation de la méiose pollinique. La phase 'méiose – fécondation' est caractérisée par l'épiaison, puis par l'anthèse et la fécondation.

Le déterminant de la montaison chez les céréales est essentiellement d'ordre climatique (Pudelcko *et al.*, 1993). Les températures basses et la photopériode sont les facteurs prépondérants de l'acquisition, par la plante, de l'aptitude à la montaison et au déclenchement effectif de celle-ci.



Cliché M. Loumerem

Figure 26: Surface extérieure duveteuse d'une gaine



Cliché M. Loumerem

Figure 27: La ligule courte d'une feuille du mil



Cliché M. Loumerem

Figure 28: Largeur d'une feuille de mil



Cliché M. Loumerem

Figure 29: Beau spécimen de panicule ou 'faux épi'



Cliché M. Loumerem

Figure 30: Panicules recourbées du mil

Les feuilles sont de longueur variable, en général plus courtes et plus étroites vers le sommet de la tige. Dans la partie inférieure de la région médiane, elles peuvent être aussi longues ou légèrement plus longues que celles de la base de la plante. Les marges sont lisses ou légèrement ondulées, spécialement sur la moitié supérieure. L'extrémité de la feuille peut être érigée ou même pendue. La couleur varie du vert pâle au violet (Sedivec *et al.*, 1991; IBPGR & ICRISAT, 1993).

Les feuilles peuvent atteindre 1 m de longueur pour 1 à 8 cm de large (fig. 28). Le nombre varie grandement suivant les variétés et les individus.

Les feuilles des espèces sauvages sont fréquemment plus longues et plus étroites.

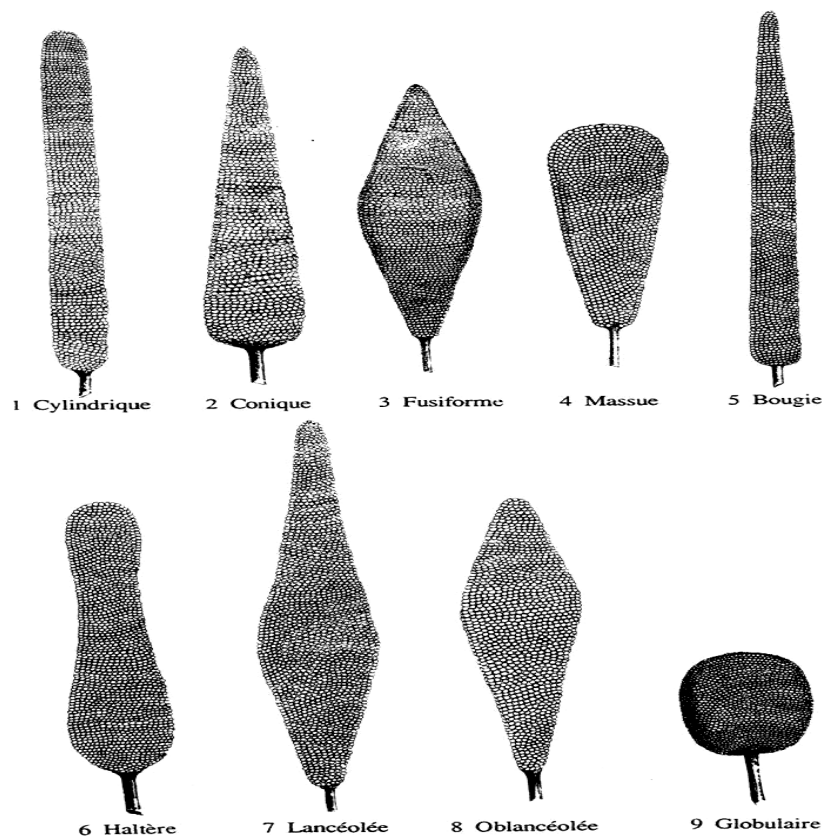


Figure 31: Formes de la panicule du mil (IBPGR & ICRISAT 1993)



Figure 32: Soies de l'involucre



Figure 33: Soie de l'involucre longue

2.3.2.5 Période de maturation

La période de maturation est caractérisée par l'élaboration de substances de réserve (amidon, protéines, etc.) et par la migration de celles-ci vers l'albumen du grain; parallèlement, l'embryon se forme. Au cours de cette période, le grain passe successivement par le stade 'laiteux' (l'amande est encore verte, ayant pris sa forme définitive et l'albumen est laiteux), le stade 'pâteux' (les réserves ont fini de migrer, et le poids de l'eau dans la graine reste sensiblement constant pendant quelques jours), le stade 'demi-dur', le stade 'dur' et enfin le stade de 'surmaturité' qui marque la fin de la dessiccation du grain.

En conditions non limitantes d'alimentation en eau, la durée de la maturation dépend essentiellement de la température ambiante et de la radiation lumineuse. Par contre, tout déficit en eau peut perturber la maturation et occasionner l'échaudage.

Chapitre III

3 Qualité nutritive du mil

Le mil a des grains très nutritifs qui se distinguent par des teneurs élevées en protéine, sans tannin et une valeur énergétique plus élevée que le maïs et le sorgho (Hartman *et al.*, 1990; Stegmeier *et al.*, 1990; Housse *et al.*, 1995; Klopfenstein & Hosney, 1995).

3.1 Composition chimique du mil

D'après Singh *et al.* (1987, cités par Rai *et al.*, 1997), le grain du mil est constitué de 67% d'amidon, 11% de protéines et 5% de lipides. D'autres constituants chimiques du mil figurent dans le tableau 2 avec leurs valeurs de concentration moyenne.

Tableau 2: Composition chimique du mil à chandelle (Cerighelli, 1955)

Constitutions	Balland (1907)				Piédallu (1923)	
	Moyennes (a) (%)		Minima (%)	Maxima (%)	Moyennes	
	État naturel	État sec	État naturel	État naturel	(b)(%)	(c) (%)
Eau	13,06	0,00	11,00	14,00	13,15	13,65
Lipides	4,25	4,89	2,35	6,25	4,50	6,15
Protides	11,65	13,40	8,78	16,10	13,56	7,26
Cellulose	2,16	2,49	1,35	3,85	4,12	4,00
Glucides	67,41	77,53	60,75	71,17	62,26	66,65
Cendres	1,47	1,69	0,80	2,10	2,25	1,90

(a) Moyennes de 7 analyses

(b) Analyse non dosée = 0,16%

(c) Analyse non dosée = 0,39%

Balland (1907, cité par Cerighelli, 1955) a analysé sept échantillons de diverses provenances (Tunisie, Sénégal, Guinée, Congo et Inde), tandis que (Piédaller (1923), cité par Cerighelli, 1955) a fait l'analyse de deux provenances cultivées en France.).

3.2 Nature et propriétés des constituants chimiques

En général, le mil est plus riche en lipides et protéines que le sorgho cultivé dans les mêmes conditions culturales. Les taux d'amidon, fibre et sucre sont comparables. La

valeur énergétique du mil (784 calories/100g) est la plus élevée en comparaison avec les autres céréales (Dupin *et al.*, 1963; Rooney & McDonough, 1987; Gates *et al.*, 1995).

3.2.1 Les hydrates de carbone

Le grain sec du mil comprend environ 70% d'hydrates de carbone qui sont essentiellement composées de l'amidon. L'amidon lui-même est composé de deux tiers d'amylopectine (un composant insoluble qui forme une pâte dans l'eau à la température ambiante) et un tiers d'amylose (un composant soluble qui forme un gel dans la solution aqueuse). L'amylose est constitué de chaînes linéaires d'environ 200 unités d' α D-glucopyranose reliés par des liaisons α 1-4. L'amylose est donc un polymère de maltose. L'amylopectine se présente comme des chaînes d'unités α D- glucopyranose reliés par des liaisons α 1-4 et ramifiées par des liaisons de type α 1-6. Les propriétés d'amidon (pour la cuisson et la coagulation) du mil sont très semblables à celles du maïs et du sorgho (Dendy, 1995; Housse *et al.*, 1995; Klopfenstein & Hosney, 1995; Serna-Saldivar & Liroyd, 1995; Vietmeyer, 1996).

3.2.2 Les protéines

Des analyses faites sur plusieurs types de mil ont montré qu'il est riche en protéines dont des taux variant de 8,6 à 21%; La moyenne étant de 16% (Rooney & McDonough, 1987; Vietmeyer, 1996).

En général, les teneurs en lysine, en thréonine et en sulfure et des acides aminés du mil sont faibles (Tableau 3 et 6). Les teneurs des acides aminés sont variables selon la partie de la graine considérée c'est-à-dire quand on compare germe, son, amidon endospermique et les couches aleurones de la graine. Les protéines du germe sont plus riches en acides aminés essentiels que les protéines de l'amidon endospermique (Dendy, 1995; Housse *et al.*, 1995; Klopfenstein & Hosney, 1995; Serna-Saldivar & Liroyd, 1995; Vietmeyer, 1996).

Jambunathan *et al.* (1981, cités par Rooney & McDonough, 1987) ont montré que les protéines du mil contiennent des teneurs moins élevées de prolamines réticulées que les protéines du sorgho (Tableau 4), ce qui explique la bonne digestibilité des protéines du mil (le coefficient de digestibilité de 89%, contre 60,5% pour le sorgho).

En général, les prolamines du mil contiennent des teneurs plus élevées de lysine et de tryptophane que celles du sorgho (Andrews *et al.*, 1993).

Tableau 3: La composition en protéines et acides aminés des grains du mil et du Sorgho
(1), (2) (Rooney & McDonough, 1987; FAO/WHO, 1973)

Acides aminés	Score (g 16 g ⁻¹ N)	Moy _±	Score d'acides aminés	Score (g 16 g ⁻¹ N)	Moy _±	Score ⁽³⁾ d'acides aminés	Modèle (g 16 g ⁻¹ N)
Lysine	1,06 - 3,64	2,09	38	1,59 - 3,80	2,84	52	5,5
Thréonine	2,12 - 3,94	3,21	80	3,17 - 5,66	4,07	102	4,0
Valine	3,84 - 6,93	5,40	108	4,38 - 7,67	6,01	120	5,0
Méthionine + cystine	1,80 - 2,69	2,36	67	1,43 - 3,96	2,71	77	3,5
Isoleucine	2,85 - 5,05	4,17	104	3,70 - 6,34	4,56	114	4,0
Leucine	10,12-17,60	14,67	210	8,62-14,80	12,42	177	7,0
Phénylalanine + tyrosine	6,11-10,72	8,87	148	6,54-10,80	8,49	142	6,0
Protéine (%)	4,60-20,25	11,98		6,40-24,25	12,30		

(1) déterminé par chromatographie

(2) source: Jambunathan *et al.* (1981)

(3) Pourcentage du modèle suivi

Note: 16 g N = 100 g MAT (protéines brutes); ainsi, g 16 g⁻¹N = g sur 100 g MAT

Tableau 4: La distribution d'azote dans les grains du sorgho et du mil % d'azote total
(Rooney & McDonough, 1987)

Fractions	Sorgho ⁽²⁾ Moyenne	Mil ⁽³⁾ Moyenne
Albumine et globuline ⁽¹⁾	17,4	25,0
Prolamine	6,4	28,4
Prolamines réticulées	18,8	2,7
<i>Glutelin-like</i>	4,0	5,5
<i>Glutelin</i>	35,7	18,4
Résidus	10,6	3,9
Total	92,9	83,9

(1) Jambunathan *et al.* (1981)

(2) Basé sur 3 géotypes, M 35-1, CSH-8 et CSV-3

(3) Basé sur 4 géotypes, PHB-14, BK-560, WC-C75 et Ex-Bornu.

3.2.3 Les lipides

La teneur en lipides libres extraits des grains du mil varie de 3 à 7,4% avec une teneur de 2 à 12 mg/100 g d'acides gras libres. Elle est le double de la quantité trouvée dans des céréales standard plus connues comme le blé. Le lipide du mil est composé d'environ 75% d'acides gras non-saturés (Tableau 5) et de 24% d'acides gras saturés (Rooney & McDonough, 1987; Vietmeyer, 1996).

Tableau 5: La composition en acides gras des cultivars de mil et sorgho (Rooney & McDonough, 1987)

Espèces	No. de cultivars	Palmitique (%)	Stéarique (%)	Oléique (%)	Linoléique (%)	Linoléinique (%)
Sorgho: moyennes	22	12	1	34	50	3
limites		10-14	1-2	28-42	42-56	1-5
Mil: moyennes	65	20	4	26	45	4
limites		18-25	2-8	20-31	40-52	2-5

3.2.4 Les vitamines

Les valeurs des vitamines des grains de mil sont généralement plus basses que celles du maïs, bien que la teneur en vitamine A est tout à fait bonne (0,022 mg/100 g). La teneur en vitamine B 1 (thiamine) varie de 0,375 à 1,006 mg/100 g selon les variétés (Andrews *et al.*, 1993; Serna-Saldivar & Liroyd, 1995; Jayaraman, 2002).

Les grains du mil contiennent 22 équivalents rétinol (RE), ce qui n'est pas remarquable en soi, mais n'importe quelle quantité de vitamine A est bonne pour une céréale (Andrews *et al.*, 1993; Housse *et al.*, 1995; Jayaraman, 2002). Dans les pays du tiers monde, les ressources en vitamine A sont très limitées et le mil peut aider à résoudre ce problème si l'on sélectionne des variétés plus riches en vitamine A (Jayaraman, 2002).

3.2.5 Les minéraux

La quantité de cendre du mil varie de 1,6 à 3,6%. C'est une quantité légèrement plus importante que celle du blé, du riz ou du maïs. Les constituants minéraux sont variables (Tableau 6). Comparé au maïs, le mil se distingue par des quantités plus élevées en phosphore (339 mg/kg en moyenne), le fer (9,8 mg/kg en moyenne) dont la concentration est trois fois plus importante que pour le maïs. La quantité de calcium du mil (37 mg/kg en moyenne) est cinq fois la quantité observée chez le maïs. Des traces de baryum, chrome, cobalt, cuivre, plomb, manganèse, molybdène, nickel, argent, strontium, étain, titanium, vanadium, zinc et d'iode ont également été observées (Rooney & McDonough, 1987; Housse *et al.*, 1995; Klopfenstein & Hosenev, 1995; Serna-Saldivar & Liroyd, 1995; Vietmeyer, 1996).

Tableau 6: Principaux constituants du grain de mil (Rooney, 1987)

Principaux constituants		Principaux constituants	
Humidité (g)	10,0	Manganèse (mg)	0,8
Valeur énergétique (Kc)	353,0	Molybdène (mg)	190,0
Protéines (g)	11,8	Phosphore (mg)	339,0
Carbohydrates (g)	70,0	Potassium (mg)	418,0
Matières grasses (g)	4,8	Sodium (mg)	15,0
Fibres (g)	1,9	Zinc (mg)	2,0
Cendres (g)	2,3	Cystine (%)	1,8
Vitamine A (RE)	22,0	Isoleucine (%)	3,9
Thiamine (mg)	0,3	Leucine (%)	9,5
Riboflavine (mg)	0,2	Lysine (%)	3,2
Niacine (mg)	2,6	Méthionine (%)	1,8
Calcium (mg)	37,0	Phénylalanine (%)	4,1
Chlorures (mg)	43,0	Thréonine (%)	3,3
Cuivre (mg)	0,5	Tryptophane (%)	1,4
Fer (mg)	9,8	Tyrosine (%)	3,0
Magnésium (mg)	114,0	Valine (%)	4,9

3.2.6 Polyphénols et pigmentation

Reichert et Youngs (1979, cités par Rooney & McDonough, 1987) ont signalé que la coloration ardoisée (gris) de la farine du mil est due à la présence de C-glycosylflavonoides. La majorité des pigments flavonoides sont localisés dans l'endosperme périphérique (Mc Donough, 1986). La présence du tannin condensé dans le mil n'est pas signalée, ce qui lui confère une bonne digestibilité. Des analyses faites sur des grains de mil de différente couleur par le réactif '*Folin-ciocalteu* (FC)' ont montré différents taux de phénol. Le grain de couleur bronze contient plus de phénol extractible que le mil à grains jaunes ou bleu-gris. Mais la couleur du péricarpe ne peut pas être utilisée pour indiquer la présence du phénol dans les grains gris et jaunes de mil (Rooney & McDonough, 1987; Vietmeyer, 1996).

Les analyses des graines du mil en utilisant la chromatographie liquide de haute performance (HPLC) ont montré que le mil contient des teneurs élevées en acides féruliques, coumariques, cinnamiques, gentisiques et phénoliques. La teneur en acides phénoliques est plus élevée dans les graines du mil jaune que dans celles des autres couleurs (Rooney & McDonough, 1987; Vietmeyer, 1996).

Bien que sa consommation soit plutôt en déclin, le mil sert encore à la nourriture d'un très grand nombre d'hommes en Afrique et en Inde. La valeur énergétique est de 784 calories/100g, elle est parmi les valeurs les plus élevées des céréales (Cerighelli, 1955; Rooney & McDonough, 1987; Vietmeyer, 1996).

Les résultats des analyses sur la valeur nutritive du mil comparées à celles du maïs et du sorgho, montrent que la valeur nutritive du mil est équivalente à celle du maïs, mais plus importante que celle du sorgho. Ceci est dû à sa richesse en protéines digestibles de bonne qualité et la présence de lipides et autres éléments nutritifs déjà cités.

D'autres études menées sur le mil en Inde ont montré la supériorité nutritive du mil comparé à celle du riz et du blé. Un régime basé sur du mil et des protéagineuses (légumineuses à graines) est meilleur pour le développement de la croissance humaine qu'un régime semblable basé sur le blé au lieu du mil. Toujours en Inde, des chercheurs ont composé des régimes pour des végétariens à base de mil qui ressemblent les repas (à base du mil) consommés par les pauvres de ce pays (Vietmeyer, 1996).

Les travaux de recherche conduits sur des enfants ont montré que tous les sujets nourris avec des régimes à base de mil ont maintenu un équilibre positif en ce qui concerne l'azote, le calcium et le phosphore. En outre, le mil pourrait remplacer 25% du riz dans un régime d'un enfant sans réduire la quantité d'azote, de calcium et de phosphore absorbé par son corps (Vietmeyer, 1996).

Le mil est un excellent fourrage dans les régions où l'on ne peut pas cultiver d'autres espèces fourragères tels que le maïs ou le sorgho (Pullins *et al.*, 1997; Andrews *et al.*, 1998; Miller, 1999; Myers, 1999; Rahn & Bauer, 2001; Andrews, 2002; Hanna, 2002). Des résultats récents montrent que le mil est un bon élément pour être utilisé dans l'industrie de l'élevage aux EU (Myers, 1999; Rahn & Bauer, 2001; Spitaleri *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2002; Durham, 2003; Rude *et al.*, 2003). Il est bien adapté à une multitude de conditions édapho-climatiques de régions arides et la plante tolère bien la sécheresse, les sols acides, résiste aux prédateurs et elle est peu exigeante en azote (Guirand *et al.*, 1980; Ashraf & McNeilly, 1987; Mohamed *et al.*, 1988a; Bationo *et al.*, 1993; Buerkert *et al.*, 1998). Aussi, il peut s'intégrer dans plusieurs systèmes de culture dans les grandes plaines de ces régions: Floride, Georgie, Missouri, Virginie, etc. (Pullins *et al.*, 1997; Andrews *et al.*, 1998; Miller, 1999; Myers, 1999; Hanna, 2000; Rahn & Bauer, 2001; Andrews, 2002; Chambliss, 2002; Lee & Hanna, 2002; Spitaleri *et al.*, 2001; Teutsch, 2002; Durham, 2003; GRDC, 2003; Hanna, 2003; Rude *et al.*, 2003; Tjai, 2003).

D'autres recherches menées en Géorgie (EU) ont montré que le grain de mil peut remplacer le maïs dans la ration des volailles sans réduire le rendement en aliments utiles

'*The feed-conversion efficiency*' et le taux de croissance. En effet, les poules nourries par des grains de mil croissent plus rapidement et elles sont en meilleure santé que celles nourries par les grains du maïs, le sorgho, le triticale et/ou le blé (Andrews *et al.*, 1993).

Ces résultats sont très encourageants, car le maïs est le plus utilisé en aviculture locale dans la région de Georgie d'où la nécessité d'importer de grandes quantités des états du centre ouest, vu que la culture du maïs est peu adaptée aux conditions culturelles locales. Donc, le mil produit localement pourrait bientôt y remplacer le maïs importé (Andrews *et al.*, 1993; Rahn & Bauer, 2001; TJA, 2003).

Chapitre IV

4 Exigences environnementales du mil

Le mil, qui exige de la chaleur pour son développement, a pour caractères de bien supporter les températures élevées, d'être plus ou moins résistant à la sécheresse et de s'accommoder en général des sols peu fertiles, à condition qu'ils soient perméables (Tourte *et al.*, 1963; Bationo *et al.*, 1993; Marschner *et al.*, 1995; Muehling-Versen *et al.*, 1997; Van Oosterom *et al.*, 2003).

4.1 Température

Le mil exige, pour son développement, une somme de température de 2050 à 2550°C. Ses températures de germination sont: 10-12°C (minimum), 37-44°C (optimum) et 44-50°C (maximum) (Cerighelli, 1955; Mohamed *et al.*, 1988a). Le mil supporte mieux que les autres céréales les températures élevées. Le développement floral et la formation des graines se déroulent normalement à des températures élevées à condition que la plante dispose de suffisamment d'eau dans le sol. En général, la plante est sensible à des températures basses (< 10°C) durant les phases de germination et de floraison.

En Afrique, la température optimale pour la culture du mil est supérieure à 30°C dans les régions considérées comme idéales pour cette culture (Mohamed *et al.*, 1988bc; Vietmeyer, 1996).

4.2 Précipitation

La culture du mil est possible dans les régions où les pluies varient entre 200 et 1500 mm/an, mais principalement, elle se concentre dans les régions de 200 à 700 mm/an. Quoiqu'il soit très résistant à la sécheresse, le mil exige qu'il accomplisse son cycle avant la fin de la saison des pluies.

Des caractères morphologique et physiologique contrôlant la croissance, le développement et la consommation en eau de la plante peuvent jouer un rôle important dans la résistance du mil face à des sécheresses intermittentes (Winkel & Do, 1992). Ces caractères pourront ensuite servir de critères d'amélioration variétale et des techniques culturales.

Les besoins en eau sont généralement estimés par l'évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture alimentée en eau en suffisance (Amadou *et al.*, 1994). C'est la valeur de l'évapotranspiration réelle (ETR), dans le cas d'une bonne alimentation en eau de la plante. Lorsque l'eau n'est plus un facteur limitant au niveau de l'absorption des racines, la régulation stomatique est minimale et l'évapotranspiration est maximale. L'ETM dépend donc de la culture considérée, du stade phénologique de cette culture et des conditions météorologiques observées. Dans la littérature, les besoins en eau du mil à ses différents stades de développement sont exprimés sous forme de coefficients culturaux $k_c = ET_m / ET_p$ (en écriture FAO). Il s'agit de comparer, dans des conditions similaires de bonne alimentation en eau, l'évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture donnée, à un stade phénologique donné, avec l'évapotranspiration potentielle d'un gazon (fétuque, manade) maintenu en condition de croissance active (fauché régulièrement, correctement fumé et bien enraciné, sur un sol maintenu à une humidité proche de la capacité au champ). Le coefficient cultural est une valeur dépendante de la culture étudiée, de son stade de développement et des conditions agronomiques. Cette valeur (0,4 à 1,2) est d'autant plus élevée que la culture consomme beaucoup.

Pour avoir une idée sur la consommation en eau du mil, le tableau 7 montre la consommation en eau des différents couverts du mil en zone soudano-sahélienne.

Tableau 7: Consommations en eau de différents couverts de mil en zone soudano-sahélienne (Kalms & Valet, 1975; Dancette, 1983; Serpantié & Milleville, 1993)

Sites	Bambey (Sénégal)		Tillabery (Niger)	Bidi (Ouahigouya) (Burkina Faso)		
	Mil nain GAM	Souna	Sanio	P3 Kolo	Locale	Naata-Balbu
Cycle (j)	75	90	120	105	105	105
Système de culture	intensif	intensif	intensif	intensif	extensif	intensif
Rdt grain potentiel (t/ha)	1,7	2,6	1,7	2,2	0,6	2,5
Non-grain (t/ha)	6,5	7,2	14,6	9	2	7
Taille Max (m)	1,1	2-2,5	3-3,5	2-2,5	2-2,5	2,5-3
Densité (poquets/ha)	100000	15000	10000	<10000	12000	15000
Kc Max	1,10	1,20	0,90	0,90	1,10	-
K'c Max	0,95	1,10	0,82	0,82	0,95	-
ETM (pour ETP moy. 5,5mm/j)	370	445	620	470	275	-

'K'c = ETM / Ev bac, classe A; une transformation est nécessaire pour passer à Kc: le rapport utilisé par Serpantié & Milleville (1993): ETP = 0,85 Ev bac'.

D'après Serpantié & Milleville (1993), 'une culture paysanne extensive économise beaucoup plus d'eau qu'une culture intensive et doit pouvoir mieux supporter une faible offre en pluies, au prix, bien entendu, d'un plus faible rendement potentiel.'

Dans son travail sur la relation entre la résistance à la contrainte hydrique et la teneur en acides aminés libres du mil, Moulineau (1993) a montré qu'une accumulation de proline et une perte d'alanine sont observables lorsque le mil est soumis à une contrainte hydrique sévère. Il en conclut que la proline et l'alanine peuvent être considérées comme marqueurs de stress pour le mil.

Les travaux de recherche sur la résistance du mil à la sécheresse sont multiples et divers (Muchow, 1989; Bois, 1993; Do & Winkel, 1993; Louguet *et al.*, 1993; Ousmane *et al.*, 1993; Ceccarelli, 1994; Manga & Yadav, 1995; Cimmyt, 1999; Bidinger, 2003; Bidinger *et al.*, 2003; GRDC, 2003).

Eldin (1993 & 1994) a étudié l'effet de déficits hydriques sur la récolte du mil au Niger. Bois (1993) a fait des études sur l'effet de la contrainte hydrique sur la photosynthèse du mil. Do & Winkel (1993) ont étudié les mécanismes morpho-physiologiques de résistance du mil à la sécheresse. Ousmane *et al.* (1993) se sont intéressés au rôle du système racinaire dans la résistance à la sécheresse alors que Manga & Yadav (1995) ont étudié l'effet de la taille des semences sur le développement de la plante et la résistance à la sécheresse.

Les données sur différents traits morpho-physiologiques susceptibles d'améliorer la résistance du mil à la sécheresse, analysées et synthétisées par Winkel & Do (1992) et qui proviennent d'une cinquantaine d'articles portant sur les relations hydriques, la synthèse et le transfert de substance, ainsi que le rendement ont permis de distinguer deux types de processus:

- les processus essentiellement morphologiques, agissant à moyen et à long terme, et concourant à la plasticité du développement de l'appareil végétatif (voir 3. 2); et
- les processus physiologiques à court terme, tels que la fermeture partielle des stomates ou l'ajustement osmotique. La fermeture des stomates au cours de la journée limite les pertes en eau par transpiration et évite la déshydratation de la plante.

L'ajustement osmotique implique une accumulation active de solutés dans les cellules, distincte de l'augmentation de concentration qui résulte de la baisse de la teneur en eau. Cette réponse au déficit hydrique permet éventuellement de maintenir la turgescence foliaire à une valeur positive en dépit d'un abaissement du potentiel hydrique du milieu (Do, 1994).

4.3 Lumière

Le mil est une plante à jour court (avec un métabolisme photosynthétique en C₄) quoiqu'il existe des variétés indifférentes à la longueur du jour (Mohamed *et al.*, 1988c; Vietmeyer, 1996). Le mil exige une forte intensité lumineuse. Monteith (1985, cité par Spencer & Sivakumar, 1987) a montré que le développement de la plante de mil est proportionnel à la radiation solaire interceptée par jour.

Au Mexique, la différence de la production en grains entre un semis au printemps et un semis en automne, est expliquée par la longueur de la photopériode (> 13 h) et la différence de température entre le jour et la nuit (Maiti & Soto, 1990).

Dans un travail sur l'équilibre photosynthétique, respiration et énergie critique du mil en zone sahélienne, Puard *et al.* (1983) ont pu montrer qu'un ombrage mutuel (les plantes entre elles) trop important est susceptible de créer des sites consommateurs inhabituels (au niveau de la plante) qui peuvent perturber la distribution normale des solutés et de ce fait, diminuer la productivité de la plante. En outre, les résultats obtenus lors de la mesure de la photosynthèse dans la zone sahélienne de culture du mil montrent une vitesse photosynthétique légèrement supérieure à 40 mg/dm²/h. C'est une valeur assez bonne d'une plante céréalière du type C₄.

Chapitre V

5 Amélioration du mil

Le mil est devenu une plante modèle en biologie végétale dans plusieurs domaines de la recherche: l'étude de la résistance à la sécheresse, de la stérilité mâle cytoplasmique, de l'utilisation de gènes de nanisme, de la régénération des protoplastes ou l'utilisation de l'apomixie pour fixer l'hétérosis (Tostain & Marchais, 1993). Ces études sont surtout menées pour l'amélioration de la culture du mil.

D'après Viemeyer (1996), la plante de mil pourrait être l'un des meilleurs organismes de recherche génétique. Il la compare à la drosophile en zoologie. C'est un outil utile pour l'investigation des interactions génétiques, car la plante de mil:

- est robuste et exige peu d'espace pour se développer, elle peut se développer dans un pot;
- mûrit si rapidement, qu'il est possible d'avoir quatre générations par an. (quelques génotypes fleurissent déjà à 35 jours après plantation, la floraison d'autres peut-être induite avec des jours courts et des températures élevées);
- peut produire 25 inflorescences et plus (une plante simple), chaque inflorescence peut produire 1000 graines;
- produit des fleurs petites, mais idéales pour la manipulation génétique (Viemeyer 1996);
- a des chromosomes grands et faciles à manipuler (Lespinasse *et al.*, 1993); et
- les plantes résultantes de pollinisations croisées grandissent d'habitude avec une vigueur hybride bien prononcée et avec des interactions génétiques claires.

5.1 Les collections mondiales de mil

La diversité génétique naturelle du mil est grande. Le patrimoine héréditaire du genre *Pennisetum* englobe environ 140 espèces et sous-espèces. Ces espèces offrent une grande diversité dans leur système de reproduction (de l'allogamie à l'apomixie), leur longévité (annuelles ou pérennes) et leur niveau de ploïdie. De plus, elles sont distribuées dans des milieux écologiques extrêmement variés (Kumar & Appa Rao, 1987).

Cette richesse biologique suppose l'existence de potentialités agronomiques qui pourraient être exploitées dans l'amélioration du mil. Il existe maintenant une collection de près de 20.503 échantillons de mils cultivés, cultivars traditionnels et mils sélectionnés confondus, originaires de 47 pays, auxquels il faut ajouter 688 échantillons appartenant à 23 espèces sauvages du genre *Pennisetum* (annexe 2). Cette collection a été rassemblée,

grâce aux prospections réalisées par l'ICRISAT, en collaboration avec la FAO, l'IPGRI (ex-IBPGR), l'IRD (ex-ORSTOM) et des instituts de recherche nationaux (Marchais, 1982; Appa Rao *et al.*, 1985, 1986 & 1996; Reddy *et al.*, 1996). Cette collection s'accroît encore et elle est actuellement maintenue et conservée dans son intégralité par le centre indien de l'ICRISAT à Hyderabad. Les collections de travail sont conservées à une température de 18 à 20°C et entre 30 et 40% d'humidité relative, alors que pour la conservation à long terme sur plus de cinquante ans, la température est abaissée à moins 20°C tandis que l'humidité relative est presque nulle. Une partie de cette collection fait l'objet d'une conservation à moyen terme sur vingt ans, à 4°C et 20% d'humidité relative, au centre sahélien de l'ICRISAT de Niamey, au Niger, et à l'IRD de Montpellier en France, essentiellement afin d'assurer les échanges de grains entre instituts (Kumar & Appa Rao, 1987).

La collection des différentes accessions de mil forme une large base génétique pour des programmes d'amélioration, mise à la disposition des sélectionneurs. L'amélioration des méthodes de criblage visant à identifier les caractères intéressants à l'intérieur d'une aussi grande collection permettra de mieux exploiter les ressources génétiques et d'élargir la base génétique de cette culture. Elle était déjà à l'origine de nombreux travaux de recherches. De nouvelles données s'ajouteront encore lorsque de nouveaux chercheurs, en différentes parties du monde, tireront parti de la collection.

5.2 Objectifs et méthodes d'amélioration du mil

En Afrique, on cultive des variétés traditionnelles souvent locales, précoces et tardives, de grande taille, à fort tallage et peu productives (Tourte *et al.*, 1963; Bezot, 1965; Bilquez & André, 1974; Gupta *et al.*, 1983). Les variétés traditionnelles indiennes sont tardives, à paille courte, à faible tallage et peu productive. C'est en Australie et aux États-Unis que les travaux sur la création de nouvelles variétés et hybrides fourragers sont les plus avancés. Le premier hybride à production élevée, était créé en 1960 aux États-Unis par Glenn Burrton (Andrews *et al.*, 1993; Vietmeyer, 1996).

L'amélioration du mil en Inde a été longtemps l'affaire des instituts de recherche nationaux.

Parallèlement, en Afrique, des recherches ont été menées dès 1931 dans le cadre du centre de recherche agronomique de Bambey au Sénégal, pour les pays francophones. Selon Etasse (1966, cités par Niangado *et al.*, 1987) l'amélioration variétale du mil a passé par trois grandes périodes:

- de 1931 à 1951, les travaux ont surtout porté sur l'amélioration des populations locales par sélection généalogique;
- de 1951 à 1959, une section spécialisée pour les céréales fut créée et ayant pour objectif la mise au point d'une méthode de sélection massale complexe utilisable dans les petites stations éloignées de la zone (Bono & Leclercq, 1963); et
- de 1959 à 1961 le Centre de Recherches Agronomiques (CRA) de Bambey cède la place aux services centraux de l'IRAT qui prennent en charge l'élaboration de programmes d'amélioration de mil.

À partir des années 70 du siècle passé, des études ont été menées sur le mil par différents instituts (ICRISAT, IRAT, ISRA, ORSTOM...) au Sahel et en Inde, avec au début une large priorité donnée à l'intensification de la culture (Winkel & Do, 1992).

Les programmes nationaux de recherche sur le mil en Afrique, tout en étant coordonnés par les services centraux de l'IRAT, ont évolué indépendamment mais, avec une certaine similitude des thèmes et objectifs de recherche. Très peu d'attention a été accordée aux problèmes de maladies et de ravageurs puisqu'ils étaient jugés comme ayant une influence peu importante sur les rendements (Bilquez & André, 1974). Depuis lors, les programmes nationaux se concentrent sur trois thèmes principaux: l'amélioration des mils traditionnels, l'amélioration du rapport grain/paille et l'exploitation de la vigueur hybride.

5.2.1 Amélioration des mils traditionnels

Ce programme vise à homogénéiser un caractère donné (cycle, couleur de la graine, caractères de l'épi) chez une ou plusieurs variétés locales. La productivité et la stabilité du rendement sont également évaluées au cours de ces études. Plusieurs méthodes de sélection sont adoptées. C'est ainsi que la sélection massale appliquée à la variété Haini-kirei a mené à la création de deux populations améliorées Haini-kirei normale (HKW) et Haini-kirei précoce (HKP) pour le Niger.

Au Mali, la sélection massale a généré trois populations très précoces: M2D2; M1D2; et M2D1.

Depuis les débuts de l'ère agricole, l'homme a réalisé un choix de certaines plantes qui convenaient mieux à ses goûts, épis plus gros, récolte plus précoce, etc. Lorsque les individus ainsi sélectionnés participent seuls à la réalisation de la génération suivante, avec l'espoir que les qualités objet du choix se retrouvent dans la descendance, ces

individus choisis constituent une élite. Cultivés en mélange, ils serviront de géniteurs à une population que l'on espère améliorer. L'opération prend le nom de sélection massale.

Les cycles de sélection massale peuvent être répétés et donner, pendant un certain nombre de générations, un gain appréciable.

L'efficacité d'une telle méthode est liée à l'héritabilité (probabilité pour qu'un caractère apparent d'un individu soit transmis génétiquement à la descendance de celui-ci, elle varie de 0 à 1) des critères retenus. Si la variance phénotypique est bien plus élevée que la variance génotypique, le choix d'individus dont le phénotype est intéressant peut être totalement sans effet sur le gain génétique à la génération suivante. Par contre, si le coefficient d'héritabilité ($h^2 = \frac{\text{variance génétique}}{\text{variance phénotypique}}$) le concept d'hérédité a été défini

pour savoir si les différences observées entre individus proviennent de variations dans la constitution génétique des plantes ou si elles sont liées aux facteurs du milieu) atteint des valeurs élevées, chaque cycle concentre la sous-population sélectionnée autour du génotype le mieux adapté.

Ce type de sélection se révèle totalement inefficace si on l'applique simultanément à des ensembles de caractères qui sont en corrélation négative (c'est fréquemment le cas pour le rendement et la qualité, par exemple: rendement en matière sèche et teneur en protéines chez la luzerne).

En conclusion, la sélection massale constitue souvent une méthode simple, mais sommaire, d'autant plus efficace qu'elle s'adresse à des critères en nombre limité, en bonne corrélation positive et possédant une bonne héritabilité.

La sélection récurrente avec '*top cross*' était démarrée en 1961 au Sénégal pour l'amélioration de cinq populations de mil: trois précoces (PS 32, PC 33 et PC 28) et deux tardives (PS 34 et 35). Les meilleures descendances de ces trois populations précoces ont ensuite été recombinaées pour donner une population synthétique, Souna 2. A partir de ses descendances, les meilleurs '*top cross*' ont permis de constituer une nouvelle variété synthétique 'Souna 3', la seule variété actuellement commercialisée au Sénégal. Au Niger, cette méthode de sélection récurrente a été utilisée pour l'amélioration de la population locale 'Zongo'. Mais dans les tests de rendements, la variété synthétique 'Zongo' améliorée ne s'est pas montrée supérieure au matériel d'origine. La même méthode de sélection récurrente a permis d'obtenir la variété synthétique PS 71 de 'Saria' au Burkina Faso. Mais, au Mali, cette population synthétique PS 71 ne s'est pas révélée supérieure au témoin (populations locales).

La sélection récurrente avec test des S_1 (ce symbole désigne la première génération auto-fécondée d'un plant ancestral S_0) a permis d'obtenir au Niger le composite inter-variétal 'CIVT', après la recombinaison de S_1 , émanant des cultivars Guerguera, P3 Kolo et Tamangagi. Au Mali, deux cultivars tardifs (M5 et M9) et deux mils précoces (M2 D2, NKK) soumis à cette méthode ont donné des résultats décevants. Par contre au Burkina Faso, les résultats obtenus, avec la recombinaison des populations M9; M12 D1 du Mali et le mil de Dori ont montré un net gain de production.

La création de variétés hybrides de première génération F_1 (F_1 symbole désigne la première génération après un croisement entre deux individus) par utilisation d'une consanguinité (Etat d'un individu résultant d'un croisement entre apparentés) et suivie d'une recherche des meilleures aptitudes à la combinaison présente des inconvénients majeurs (Martin, 1971; Demarly, 1977):

- la variété hybride ne garde, à la fin du programme de sélection, aucune source de variabilité permettant l'initiation d'une sélection ultérieure avec le même groupe de génotypes;
- la création et l'entretien des lignées, ainsi que les tests de descendance des hybridations, constituent un ensemble lourd; et
- la production de semences est coûteuse. Ceci explique que depuis plusieurs années on ait développé d'autres voies d'amélioration et notamment les sélections récurrentes. Ces méthodes sont caractérisées par des brassages cycliques dans un groupe génétique. Ce sont donc des méthodes non généalogiques qui comprennent, pour chaque cycle, deux phases successives:
 - une phase de choix où sont cumulés les effets; et
 - une phase de brassage.

Le cycle 'choix-brassage' est répété tant que l'amélioration de la population initiale P_0 semble efficace; on aboutit ainsi à P_1 , P_2 , P_3 , etc... qui sont autant de pools génétiques améliorés. On peut ensuite opérer comme dans la méthode classique, mais avec une meilleure efficacité.

On distingue plusieurs types de sélection récurrente:

- sélection massale et sélection épi-ligne récurrente;
- sélection récurrente avec autofécondation;
- sélection récurrente réciproque;
- sélection récurrente avec test pleins-frères; et
- sélection récurrente avec 'top cross' (Martin, 1971; Demarly, 1977; Poehlman & Sleper, 1995).

Cette dernière est pratiquée pour la sélection du mil en Afrique (Niangado *et al.*, 1987; Bezançon *et al.*, 1997). Dans cette méthode, le choix porte surtout sur les valeurs d'aptitude générale à la combinaison des géotypes vis-à-vis de la population pollinisatrice.

Le choix de la population pollinique servant de testeur est évidemment très important. Rawling *et al.* (1962, cités par Demarly, 1977) ont montré que, lorsque la sélection visait une augmentation de rendement de la population de départ, le meilleur testeur consistait en un échantillon issu de cette population (de préférence échantillon de faible rendement qui met mieux en évidence les potentialités). Par contre, si l'objectif final est l'obtention d'une variété hybride bien définie, on peut avoir intérêt à prendre comme testeur une population génétiquement éloignée de la population à améliorer qui apportera des linkats (des zones chromosomiques formées de séquences alléliques coadaptées, qui possèdent une stabilité statistique liée à une réduction des taux de recombinaison interne) et des allèles provoquant de fortes interactions.

Le programme axé sur l'amélioration des cultivars locaux a fourni dans la plupart des pays des variétés souvent locales améliorées. Par contre, ces variétés composites ou synthétiques (encadré 1) n'ont pas pu confirmer leur potentialité au niveau paysan. Rares sont les pays où elles ont connu une large diffusion. Les causes de la lente diffusion des variétés améliorées sont multiples. Outre leur faible supériorité marginale par rapport aux témoins locaux en milieu paysan, les variétés n'ont pas été bien suivies au niveau de la vulgarisation pour mieux exploiter leur potentialité.

Vu l'absence de travaux majeurs au niveau de la production de nouvelles variétés de mil performantes dans des conditions limitantes de production (absence ou utilisation limitée d'intrant, sol pauvres) en Afrique et en Tunisie, nous avons nous mêmes entamé un travail d'amélioration, en utilisant le matériel de mil disponible sur place.

Encadré 1: Variétés populations, composites et synthétiques (Martin, 1971; Demarly, 1977; Poehlman & Sleper, 1995)

La variété population: est un groupe d'individus (plantes) d'une même espèce ou variété qui se trouve dans un site ou un champ donné. Ils s'unissent et échangent du matériel génétique. Une population possèdera un patrimoine génétique commun et elle peut être d'origine soit naturelle (comme les variétés indigènes locales); soit sélectionnée (comme les variétés composites ou synthétiques).

Les variétés composites: sont des mosaïques de lignées généralement très proches les unes des autres en ce qui concerne leurs aptitudes agronomiques et leurs qualités technologiques, mais dont les génotypes diffèrent, cependant, pour un certain nombre de facteurs. Les composites présentent un grand intérêt pour les sélectionneurs en tant que source inépuisable d'introductions nouvelles dans les collections de travail. Les lignées entrant dans un composite peuvent être choisies soit sur leurs résultats en essais de rendements, pour leur vaste adaptabilité régionale, leur architecture végétale, leur résistance à la sécheresse, leur résistance aux maladies et aux ravageurs, etc. Il faut attacher une extrême importance à l'évaluation approfondie des lignées avant leur intégration dans un composite.

Un composite peut être basé sur un type variétal unique, diversifié par descendance d'un seul croisement ou peut intégrer plusieurs centaines de lignées. Le nombre de composants retenus dépend du but poursuivi, mais dix à vingt lignées soigneusement choisies donnent satisfaction dans la plupart des cas. Si le composite comporte un grand nombre de lignées diverses, la population sera moins uniforme et moins vigoureuse; mais elle aura une plus grande diversité génétique. Les objectifs du sélectionneur déterminent la façon dont sera réalisé le composite.

Le rendement d'ensemble d'un composite s'améliore au cours des générations successives de sélection, donnant ainsi à la population une valeur supérieure en tant que source de matériel végétal nouveau pour la collection de travail et pour l'usage des agriculteurs.

Une variété synthétique: est une génération déterminée (n) d'une population artificielle résultant d'une ou plusieurs multiplications libres entre un certain nombre de structures reproductibles de manière stable et préalablement sélectionnées (notamment pour leurs aptitudes à la combinaison).

Un sélectionneur qui veut développer des variétés synthétiques devra trouver un compromis pour concilier dans la variété: (1) l'expression de la vigueur hybride; (2) un certain niveau d'homogénéité générale entre les individus; (3) la fixation de caractéristiques spécifiques (physiologiques, agronomiques, technologiques) et (4) la stabilité de la variété au cours des différentes années de sa commercialisation.

Une telle variété aura normalement un bon niveau de rendement ainsi qu'une régularité de réaction vis-à-vis du milieu et des techniques culturales qui donneraient aux utilisateurs une plus grande sécurité.

Chapitre VI

6 Stratégies de prospection, évaluation et conservation de la biodiversité, caractérisation des provenances

Dans ce qui suit, nous allons présenter les hypothèses de travail et les méthodes utilisées dans la caractérisation du matériel de mil collecté en Tunisie, et qui servi à la production de nouvelles lignées améliorées.

Plusieurs problèmes rendent la recherche de systèmes de production durables dans les régions arides difficiles, notamment les importantes pressions qui s'exercent sur les terres et les eaux, le morcellement et la dégradation des terres, et les systèmes d'irrigation mal planifiés et mal construits, qui sont à l'origine de problèmes, tels que la salinisation et la réduction des disponibilités d'eau et d'érosion de la diversité génétique.

Le défi auquel l'Institut des Régions Arides est actuellement et depuis un certain temps confronté, consiste à accroître les productions vivrières et fourragères pour répondre aux besoins d'une population croissante, tout en conservant les ressources d'un environnement très fragile, menacé par la perte et la destruction des terres agricoles, résultant de la croissance démographique et du développement des activités humaines, de la surexploitation à des fins de commerce ou de subsistance, et de l'introduction d'espèces exotiques, susceptible d'entrer en concurrence avec les espèces locales.

En général, les recherches menées sur les ressources génétiques du mil local dans le sud-tunisien se basent sur quatre opérations:

- la collecte du matériel végétal: on collecte les formes cultivées du mil local qui n'ont jamais été utilisées par les sélectionneurs du pays;
- l'évaluation génétique et agronomique du matériel ainsi collecté; puis
- son stockage et sa conservation; et en fin
- son amélioration.

Il n'existait pas encore de collection de grains du mil en Tunisie permettant l'étude génétique et la sélection variétale.

6.1 Organisation des prospections

On reconnaît que les ressources phytogénétiques sont en grande partie la matière première principale des agriculteurs et des scientifiques, et constituent également une réserve d'adaptabilité génétique qui sert de garantie contre la menace de modification de l'environnement.

Il était donc important pour l'IRA d'entamer des programmes de recherches visant la préservation de la biodiversité génétique dans sa région d'intervention, c'est-à-dire les régions arides.

Pour réaliser les différents objectifs nationaux et régionaux en matière de préservation et d'utilisation durable de la diversité biologique et pour faire face aux sources directes et indirectes de pressions exercées sur cette diversité, l'IRA a développé des critères permettant de définir les actions prioritaires. Ces priorités sont définies dans le cadre de stratégies internationales et nationales. Des plans d'action sur la diversité biologique des régions arides ont été développés sur base des informations disponibles et en faisant appel aux critères économique (analyses coût – bénéfice, analyses coût - efficacité, le principe de précaution), scientifique, politique, juridique et institutionnel.

La caractérisation et l'utilisation durable de la diversité biologique, nécessitent d'adapter une approche qui fait appel à la panoplie de mesures et stratégies appropriées qui garantissent une cohérence et coordination entre les différentes mesures prises. Il faut développer des mesures qui s'attaquent '*ex situ*' et '*in situ*' au problème de la préservation de la diversité biologique, au niveau des écosystèmes, des espèces et au niveau des gènes. Cette approche permet de favoriser les activités qui ont un impact positif et de minimiser celles qui ont un impact négatif. En outre, elle contribue à développer les connaissances au niveau de la recherche, le renforcement des compétences techniques et scientifiques et la prise de conscience du public (Icamina, 1993; Maurya, 1997).

6.1.1 Buts d'une prospection

Les prospections sont l'un des moyens et souvent l'unique moyen même pour sauvegarder les espèces et cultures en voie de disparition au travers de leur inventarisation et caractérisation qui peuvent mener à une meilleure connaissance de l'état actuel de leur présence/absence et donc aboutir à leur préservation voire même protection.

Collecter des ressources génétiques ne consiste pas simplement à créer une collection des plantes cultivées et/ou utilisées. Il s'intègre dans un travail d'analyse, conduisant à la définition de stratégies de collecte et de prospection d'une part et à la définition de schémas d'amélioration d'autre part, et ceci grâce à la connaissance génétique de l'organisation des espèces (encadré 2) et des complexes d'espèces (Guillaumet *et al.*, 1984; Berthaud & Charrier, 1987).

Encadré 2: Complexes d'espèces, compartiments et flux de gènes (Pernès & Lourd, 1984; Pernès, 1985; Noirod & Hamon, 1992; Noirod *et al.*, 1993; Renno, 1993; Charrier *et al.*, 1994; Bezançon *et al.*, 1997)

Le complexe d'espèces est constitué par l'ensemble des plantes susceptibles d'associer, dans leurs descendance par hybridation, directement ou indirectement, des constituants de leurs génomes. Des compartiments sont définis dans ces complexes selon le critère suivant: l'hybridation (viabilité et fertilité) réussit avec une probabilité supérieure entre plantes d'un même compartiment qu'entre plantes de compartiments différents. On dit alors qu'il y a un contrôle du flux de gènes entre les compartiments; le degré de contrôle est l'évaluation quantitative du taux d'échanges géniques entre compartiments. Les compartiments ne sont donc pas étanches, par définition; différents contrôles de différents degrés peuvent constituer différentes partitions d'un même complexe (schemas 1 et 2); ces partitions peuvent être soit des inclusions successives (contrôles hiérarchisés) de compartiments, soit des intersections (contrôles multiplicatifs ou en compétition). L'organisation et l'évolution du complexe passe par l'acquisition et la sélection des contrôles conduisant aux partitions les plus efficaces.

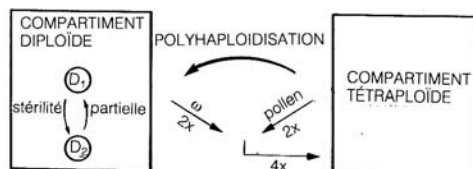


Schéma 1: Exemple de contrôles hiérarchisés (D: sous-compartiments)

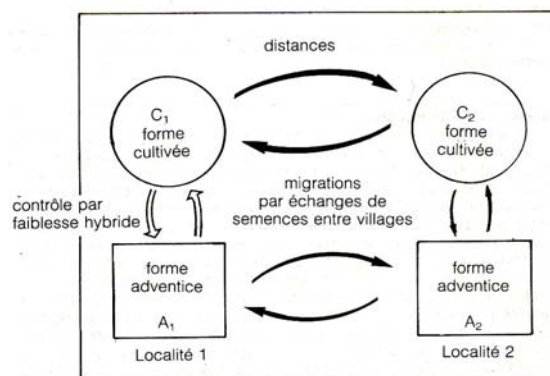


Schéma 2: Exemple de 2 contrôles non hiérarchisés (C: compartiment de l'espèce cultivée, A: compartiment des isolements géographiques)

Un compartiment du complexe d'espèces peut être défini comme une population *mendélienne*. En termes de génétique, une population est un groupe spacio-temporel d'individus de la même espèce s'intercroisant. Quand les croisements ont lieu au hasard on parle de gamodème, d'une unité panmictique, de population mendélienne locale ou simplement de dème. Les flux de gènes résultant des hybridations, directes ou indirectes, ayant lieu entre plantes n'appartiennent pas à un même compartiment. Le transport résulte soit de migrations de sporophytes (graines, boutures...) soit de migrations de pollen.

Dans ce cadre, une stratégie de collecte et de prospection du mil local des régions arides a été développée pour répondre aux objectifs de l'IRA.

Le but essentiel d'une prospection sur le terrain est la collecte de matériel vivant, rassemblant la plus grande variabilité possible. Cette variabilité conditionnera ensuite toutes les phases de l'amélioration proprement dite (Kulakow, 1990).

Un projet de prospection comportera l'objet de la prospection, l'itinéraire, le calendrier, la durée, la période, les modalités de collecte et transport du matériel collecté, les besoins matériels et l'estimation financière des coûts.

6.1.2 Préparation de la prospection

Jusqu'en 1990, les travaux de l'IRA ont essentiellement porté sur l'échantillonnage et l'évaluation de la diversité génétique de quelques espèces locales, en se basant sur des caractères agro-physiologiques. Des collections avaient été constituées depuis 1993 suite à des prospections réalisées par les généticiens (l'allemand Pistrick et horticulteurs-chercheurs de l'IRA), avec l'appui des responsables agricoles des CRDA. Si ces collections étaient au départ majoritairement constituées de cultivars locaux des espèces les plus cultivées dans les régions prospectées, elles se sont enrichies à partir de 1995 d'un grand nombre d'échantillons représentatifs des populations locales du mil collectées dans la quasi-totalité des zones de cultures des régions arides du pays.



Figure 34: Deux techniciens de la cellule régionale d'agriculture de Zarzis

La démarche méthodologique qui a été adoptée comprend trois phases: la recherche bibliographique, la recherche et la collecte de matériel sur le terrain et l'analyse des données collectées.

La recherche bibliographique était faite sur base de documentation obtenue dans plusieurs centres de documentation du pays: l'IRA, l'Institut National de la Recherche Agronomique, l'IRD de Tunis, le Centre National de Documentation Agricole, CRDA régionaux etc.

6.1.3 Déroulement sur le terrain

Au cours de cette phase, la définition des objectifs de collecte, et le choix de l'équipe de recherche-collecte est l'une des plus importantes bases de réussite et de sa bonne réalisation dépendra tout le succès de la mission. Pour le travail présenté ici,

l'équipe a été formée par des chercheurs de l'IRA, des techniciens des CRDA et des meilleurs agriculteurs du mil de la région prospectée (tableau 8).

L'itinéraire de collecte a été établi sur la base de la distribution de la culture du mil. La période de prospection a été définie en tenant compte de la période de maturité des semences et a été établie plus spécialement en fonction de la maturation des cultivars les plus tardifs. Ceci implique (souvent) un passage durant la récolte permet d'apprécier plus facilement la variabilité des cultivars aux champs. A ce moment, les agriculteurs sont aussi plus disponibles pour répondre aux questions.

Avant d'aller sur le terrain, des contacts étaient pris avec les autorités compétentes pour régler les modalités pratiques des déroulements de la collecte et pour être accompagné d'un spécialiste qui pouvait faciliter les contacts avec les paysans de la région prospectée. Le tableau 8 présente la liste des accompagnateurs pour chaque zone prospectée.

Une fois l'exploitation repérée, une enquête semi-structurée était effectuée, auprès du cultivateur, pour comprendre la répartition variétale au niveau de la région. Les informations recueillies comprenaient: les noms du village et de l'agriculteur, l'origine de la semence, les noms vernaculaires des cultivars, les dates de semis et de récolte de chaque cultivar, les techniques culturales, les utilisations, les comportements vis-à-vis les aléas climatiques ou des attaques parasitaires, etc. De plus, on prélevait du matériel végétal de mil.

Le matériel collecté était recueilli et préparé immédiatement et sur les lieux mêmes de récolte. L'identification du matériel est très importante, car 'un matériel non identifié ou mal identifié perd beaucoup de sa valeur' (Pernès, 1984). Ainsi, les échantillons prélevés portent tous un numéro, dans le but de pouvoir retrouver la provenance du matériel, de connaître le type du matériel collecté et de montrer clairement les relations entre les différents échantillons. La localisation géographique était arrêtée avec le plus grand soin possible à l'aide de cartes géographiques.

6.1.4 Bilan de la prospection

à la fin, on a pu constituer une base de données réunissant les observations des différents membres de l'équipe de prospection et notamment:

- l'itinéraire suivi avec une carte précisant l'emplacement et la situation des points de collecte (fig.4 et 52);

- la description des conditions géographique, climatique, édaphique et ethnique des zones prospectées;
- une description du matériel collecté par population accompagnée d'illustrations et des caractéristiques morphologique, édaphique et culturelle de ces populations; et
- des échantillons par agriculteur et par région prospectée (tableau 8 et fig. 4).

Tableau 8: Récapitulatif des prospections et des échantillons collectés

Région prospectée	Collecteurs	Nombre d'échantillons	Nombre de cultivars	de Provenances
Dkhla	Loumerem M, Jouilli A. et Thabet M.	117	7	Magraouia, Etwaycha et Tmassint
Jerba	Loumerem M., Ben Youssef H. et Ben Rached S.	74	3	El Grôo et Ajim
Zarzis	Loumerem M., M'charek A. M., Labiad E. A. et Gattoufi B.	46	4	Hmmadi et Chemmakh
Boughrara	Loumerem M., Bouzbida S., Jouilli A. et Thabet M.	28	3	Boughrara
Ben Guerden	Loumerem M., M'charek A. M. et Nouiri M.	18	1	Ben Guerden
Totaux		283	18	9

Le matériel végétal collecté (283 échantillons) au cours des prospections et qui représente les ressources génétiques du mil cultivé dans les régions arides tunisiennes doit être évalué de façon à répondre à l'ensemble des questions qui pourraient être posées par et pour une utilisation future (Choudhary *et al.*, 1997; Maurya, 1997).

La description et l'évaluation de la diversité génétique sont des préalables indispensables à l'exécution des stratégies d'amélioration ou la mise en place d'activités de gestion des ressources (Lefort-Buson *et al.*, 1988; Lefort-Buson, 1989d; Ejeta *et al.*, 2000). Mais, le plus souvent, ce travail de caractérisation génétique se révèle complexe: variation continue, nombreux gènes en cause, et interactions de l'effet des gènes avec les facteurs du milieu. D'où la nécessité de quantifier la variation observée et de la décrire, à l'aide d'un nombre réduit de paramètres pour qu'elle devienne plus facilement exploitable en sélection (Lefort-Buson *et al.*, 1988).

Dans tout schéma d'amélioration génétique, le sélectionneur ne peut agir qu'en présence d'une certaine diversité génétique des caractères.

L'évaluation doit toucher les caractères agronomiques des échantillons. La question est de savoir comment utiliser les caractères intéressants distribués dans les populations et comment assurer la meilleure conservation.

Les collections à observer sont disposées sur le terrain en une série de petites parcelles (planches de culture), avec quelques lignes (entre cinq et dix) pour chaque échantillon, avec deux répétitions. L'ensemble est disposé sur une même grande parcelle de façon à ce que les observateurs puissent aisément parcourir toute la collection. C'est peu à peu, par le jeu des observations répétées, des allers et retours, de la familiarité avec le matériel végétal, que les caractères à noter prennent forme et que les différences deviennent descriptibles et même codifiables. Des observations successives des caractères 'descripteur du mil' (IBPGR & ICRISAT, 1993) et un d'autres informations systématiques sur les différents échantillons ont permis la constitution d'un dossier répertoriant toutes les données recueillies lors des observations et de mesurer. Cet ensemble de données a ensuite été enregistré et stocké, de façon utilisable et aisément communicable. L'obtention d'une vue synthétique de ce grand ensemble de données s'acquiert en trois étapes:

- la description des grandes orientations de la diversité d'ensemble par repérage des caractères et d'associations de caractères prépondérants. Ces descriptions sont présentées par des représentations graphiques (nuage de points représentatifs des échantillons ou des caractères projetés dans des plans correspondants aux étirements maximaux) et de paramètres (coordonnées des points, mesures de la représentativité de la projection d'un point dans le plan étudié). Les méthodes statistiques types sont des analyses en composantes principales ou des analyses de correspondance;

- la construction d'une classification: pour permettre un échantillonnage acceptable de l'ensemble de la collection, il est commode de réaliser des regroupements, de constituer des classes. Ces méthodes de taxonomie numérique ou de constitution de groupes utilisent diverses approches, avec certains choix arbitraires. Une classification est satisfaisante si la partition de l'ensemble conduit à des regroupements, de manière à ce que les ressemblances d'individus appartenant à un même groupe soient plus grandes que les ressemblances entre individus appartenant à des groupes différents;

- le classement et établissement de critères de classement: les classifications étant faites, il est intéressant de découvrir quels principaux critères ou, quels caractères typiques permettent en gros de définir les groupes, d'en constituer en quelque sorte les

clés de détermination. Ces clés permettront d'introduire des échantillons, qui viendraient s'ajouter ultérieurement et/ou, qui n'avaient pas été pris en compte pour construire la classification. Il s'agit alors de mettre ces échantillons dans des groupes déjà constitués et non plus de créer de nouveaux groupes. La valeur d'indices, utilisés pour construire et définir ces caractères clés, définit l'appartenance de l'échantillon à tel groupe. Les méthodes correspondantes à ce volet sont appelées les analyses discriminantes.

6.2 Evaluation des populations collectées

La diversité génétique ou phénotypique peut être estimée, soit à partir de données recueillies sur les individus collectés ou sur leurs descendances, soit à partir d'information connue a priori sur ces unités tels que l'origine géographique, généalogique, etc. (Lefort-Buson *et al.*, 1988).

La connaissance de l'origine géographique des entités sélectionnées peut rendre partiellement compte de leur diversité génétique. Il est probable que la sélection naturelle ou artificielle pour un caractère dans des milieux assez diversifiés aura conduit à fixer, en partie, des allèles non identiques pour l'ensemble des locus gouvernant ce caractère. Ainsi, la diversité génétique est d'autant plus grande que les milieux de sélection d'une part et les idiotypes sélectionnés d'autre part sont différents.

Par ailleurs, la connaissance de la généalogie des entités permet de donner un ordre de grandeur de leur parenté 'F' (Molécot (1948), cité par Lefort-Buson, 1989ac; Baril & Bergonzini, (1994abc)), ou inversement de leur non apparentement ou distance '1-F'. La diversité sera d'autant plus élevée que les distances entre entités comparées 2 à 2 seront proches de 1. Cet indice de distance donne cependant une image biaisée de la diversité potentielle (Lefort-Buson, 1989e).

L'estimation de la diversité est conditionnée par:

- les facteurs étudiés, définis à partir des individus eux-mêmes ou de leurs descendances. Le choix des facteurs est relativement délicat et conditionne assez souvent la signification de la variation génétique révélée. L'estimation de la diversité phénotypique sera d'autant plus représentative de la diversité génétique que les valeurs phénotypiques seront de bons estimateurs des valeurs génétiques; et
- les choix des caractères, leur nombre et leur nature posent un certain nombre de questions auxquelles seul le sélectionneur, confronté à des objectifs spécifiques peut répondre (Pernès, 1984):

- s'il veut avoir une idée de la diversité globale de son matériel, il utilisera de nombreux caractères;
- s'il souhaite conserver une variabilité maximale pour tous les caractères quelle que soit la valeur des géniteurs pour les caractères économiquement importants tels que le rendement, la diversité ne sera appréciée que pour les caractères secondaires à conserver, non ou peu corrélés à la productivité;
- s'il veut disposer d'une variabilité importante pour différents caractères, en imposant une productivité moyenne minimum à l'ensemble de la population (constitution de populations de départ dans un schéma de sélection récurrente), il recherchera des génotypes relativement productifs, choisis aussi pour assurer une grande diversité pour les autres caractères étudiés.

Quel que soit l'objectif, si l'on est amené à introduire un grand nombre de caractères, on s'efforcera de réduire autant que possible, compte tenu des résultats fournis par l'analyse, la dimension de l'espace de représentation (celle-ci dépend de la part de variation expliquée par chacun des axes). Les interprétations seront dans tous les cas facilitées par une dimension réduite de l'espace retenu (2, 3 ou 4), c'est-à-dire par un petit nombre de directions de variation.

Les conclusions dépendront fortement de la métrique choisie. La métrique euclidienne et la métrique du χ^2 sont couramment utilisées dans l'analyse en composantes principales et l'analyse des correspondances.

6.2.1 Techniques agronomiques

En général, le matériel végétal accumulé au cours des prospections peut être disposé sur le terrain en une série de petites parcelles, comprenant quelques lignes pour chaque provenance (Lecompt, 1965; Lourd *et al.*, 1984; Tomassone, 1995; Kempton, 1997; Kempton & Gleeson, 1997; Mead, 1997; Portman & Ketata, 1997; Patterson, 1997). Dans le cas de la présente étude, l'ensemble a été disposé sur une même grande parcelle expérimentale de l'Institut des Régions Arides de Ben Guerden (fig. 35), de façon à ce que l'on puisse facilement parcourir toute la collection.

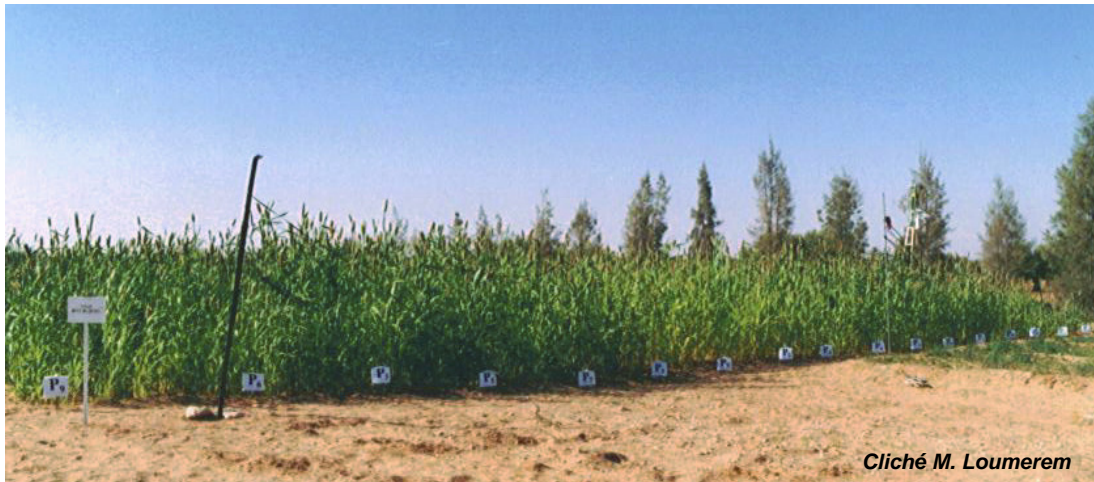


Figure 35: Provenances du mil local disposées sur la parcelle expérimentale de l'Institut des Régions Arides de Ben Guerden

Les grains de chaque panicule ont été semés sur plusieurs lignes dans une planche de culture de 5 m de longueur et de 2 m de largeur. Dans la région d'étude, les agriculteurs pratiquent la technique de planche de culture pour le mil. C'est la meilleure technique pour les cultures en irriguées sur des sols légers et des débits d'eau faibles. Les agriculteurs confectionnent des planches de dimensions réduites pour assurer un bon nivellement du sol afin que la répartition de l'eau soit uniforme. Dans la pratique, le semis se fait à la volée suivi par un démariage des plantes 15 jours après la levée pour assurer une densité de plants par planche bien déterminée. Pour nos essais, on a opté pour le semis en ligne (15 x 50 cm) qui facilite le déplacement entre les plantes lors des mesures

6.2.2 Caractères morphologiques analysés

Nous avons suivi tout au long du cycle végétatif des plantes, divers caractères numérotés de un à 28 et présentés dans le tableau 9, par des mesures biométriques et des évaluations qualitatives sur différentes parties de 10 plantes par ligne en moyenne, descendantes de cette première génération panmictique (reproduction sexuée où les gamètes mâles et femelles se rencontrent de manière totalement aléatoire; se dit d'une population où les individus s'apparient au hasard).

Chaque plante mesurée était marquée par une étiquette, sur laquelle était enregistré le numéro de la ligne suivi par le numéro de la position de la plante dans cette ligne. De plus, nous avons ajouté un 'o' avant ou après le numéro de la plante pour toutes les plantes de tête de ligne et les plantes sans voisins (c'est-à-dire si une plante voisine était manquante).

Après la récolte, les panicules des plantes marquées ont été empaquetées dans des sachets en plastique numérotés et expédiés au laboratoire pour réaliser les mesures d'autres caractères (29 - 45).

Ces caractères ont été choisis par référence au Descripteur du mil fourni par l'IBPGR & ICRISAT(1993).

Tableau 9: Caractères morphologiques analysés (IBPGR & ICRISAT, 1993)

Code du caractère	Signification	Unité de mesure, intervalles ou classes
1- LONG	Hauteur de la plante (mesurée du niveau du sol au sommet de la panicule; au stade pâteux)	cm
2- DIA	Diamètre de la tige (mesurée entre le 3 ^e et le 4 ^e nœud à partir du sommet; au stade pâteux)	mm
3- LONGF	Longueur de la feuille (de la ligule au bout de la feuille, au quatrième nœud sous la panicule de la tige principale; à l'épiaison)	cm
4- LARGF	Largeur de la feuille (au point le plus large de la feuille du 4 ^e nœud de la tige principale; à l'épiaison)	mm
5- LONGG	Longueur de la gaine (du nœud à la base de la ligule de la feuille du 4 ^e nœud en-dessous de la panicule de la tige principale; à l'épiaison)	cm
6- SEPA	Séparation (distance entre deux limbes successifs – 3 ^{ème} et 5 ^{ème} – ligule à ligule divisée par deux au stade pâteux)	cm
7- LONGEN	Longueur de l'entre-nœud de la tige (distance entre le 3 ^e et le 4 ^e nœud; à la récolte)	cm
8- NOMBF	Nombre de feuilles (sur la tige principale; au stade pâteux)	
9- TYPET	Type de tallage (à l'épiaison)	3 Erigé, 5 Intermédiaire, 7 Etalé

Code du caractère	Signification	Unité de mesure, intervalles ou classes
10- NOMB T	Nombre total de talles (nombre total de chaumes, la tige principale incluse; au stade pâteux)	
11- NOMB TP	Nombre de talles productives (nombre d'épis portant des graines)	
12- NOMB TN	Nombre de talles nodales	
13- ASPECT	Aspect de la plante (ensemble des caractères agronomiques de l'introduction; au stade pâteux)	3 Médiocre, 5 Intermédiaire, 7 Bon
14- VERSE	Sensibilité à la verse	3 Faible, 5 Intermédiaire, 7 Elevée
15- POTER FV	Potentiel du rendement en fourrage vert (en considérant le tallage, le feuillage et le volume)	3 Faible, 5 Intermédiaire, Bon
16- FORM C	Forme de la panicule (fig. 31)	1 Cylindrique, 2 Conique, 3 Fusiforme, 4 Massue, 5 Bougie, 6 Haltère, 7 Lancéolée, 8 Oblancéolée, 9 Globulaire, 10 Autres
17- SYN CM C	Synchronisme de la maturité de la panicule (à maturité)	3 Non synchrones, 5 Intermédiaire, 7 Synchrones
18- PORT F	Port de la feuille (à l'épiaison)	3 Erigé, 5 Intermédiaire, 7 Pendant
19- COUL F	Couleur de la feuille (à l'épiaison)	1 Vert pâle, 2 Vert, 3 Vert foncé, 4 Jaune, 5 Rouge, 6 Violet et 7 Panaché
20- PIG MG	Pigmentation de la gaine	1 Vert, 2 Rouge, 3 Violet, 4 Panaché
21- PIG ML	Pigmentation du limbe	1 Vert, 2 Rouge, 3 Violet, 4 Panaché
22- PIG MN	Pigmentation du nœud	1 Vert, 2 Rouge, 3 Violette, 4 Brune
23- PIG MEN	Pigmentation de l'entre-nœud	1 Vert, 2 Rouge, 3 Violette, 4 Brune, 5 Blanche
24- PUB EG	Pubescence de la gaine	3 glabre, 5 Peu velue, 7 Densément velue
25- PUB EN	Pubescence du nœud	0 Absente, 1 Présente
26- PUB EEN	Pubescence de l'entre-nœud	0 Absente, 1 Présente
27- SAVER	Saveur de jus de la tige (au stade pâteux)	3 Inspide, 5 Intermédiaire, 7 Sucrée
28- SENE	Sénescence (à la maturité)	3 Lente, 5 Intermédiaire, 7 Rapide
29- DIST EC	Distance de l'exsertion de la panicule (la distance entre la ligule de la feuille paniculaire et la base de la panicule)	cm

Code du caractère	Signification	Unité de mesure, intervalles ou classes
30 – LONGCH	Poids total des panicules de la plante	g
31- LONGC	Longueur de la panicule	cm
32- DENSC	Densité de la panicule	3 Lâche, 5 Intermédiaire, 7 Compacte
33- GROSC	Grosseur de la panicule (diamètre maximum de la panicule, soies exclues)	cm
34- POIDSC	Poids de la panicule principale	g
35- POIDSG	Poids des graines (pour 1000 graines)	g
36- LONGS	Longueur des soies	3 Courte (sous le niveau de l'apex de la gaine 5 Moyenne (entre 0 et 2 cm au-dessus de la graine) 7 Longue (dépassant la graine de plus de 2 cm)
37- COULS	Couleur des soies	1 Vert, 2 Extrémités foncées 3 Rouge pâle, 4 Rouge, 5 Violet
38- DENSS	Densité des soies (fig. 37)	3 Eparses, 5 Intermédiaire, 7 Dense
39- NOMBE	Nombre d'épillets fertiles par involucre (nombre moyen enregistré au milieu de la panicule)	
40- COULGL	Couleur des glumes de l'épillet	1 Vert pâle, 2 Extrémités rouges, 3 Rouge, 4 Extrémités violettes, 5 Violet
41- EGRE	Égrenage (aptitude au battage de l'épillet à maturité)	1 Égrenage spontané, 2 Egrenage au toucher, 3 Ne s'égrène pas, mais battage facile, 4 Ne s'égrène pas et battage difficile
42- COULG	Couleur de la graine	1 Ivoire, 2 Crème, 3 Jaune, 4 Gris, 5 Gris foncé, 6 Gris-brun, 7 Brun, 8 Violet, 9 Violet foncé, 10 Mélange de grains blancs et gris (sur la même panicule)
43- COUVG	Couverture de la graine (fig. 38)	3 Exposée, 5 Intermédiaire, 7 Recouverte
44- FORMG	Forme de la graine (voir fig. 39)	
45- TEXTA	Texture de l'albumen	4 Principalement cornée, 5 Partiellement cornée, 7 Principalement farineuse



Figure 36:Forme des panicules



Figure 37:Densité de soie



Figure 38:Téguments de la graine

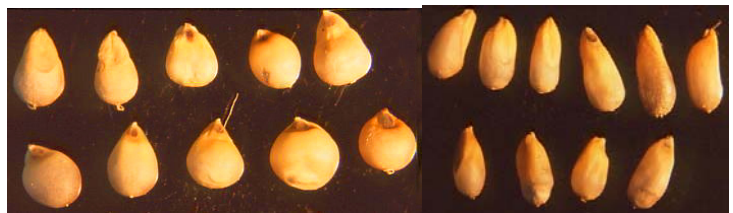


Figure 39:Forme des graines du mil des régions arides tunisiennes

6.2.3 Typologie des variables choisies

Nous avons comparé des caractères continus appelés quantitatifs et de caractères discrets appelés qualitatifs en utilisant des tests statistiques classiques et des méthodes d'analyse multivariable.

Les variables quantitatives sont des mesures ordinales interprétables dont les valeurs possibles sont en nombres infinis. Dans notre étude, les variables quantitatives sont celles de 1 à 7, 29, 30, 31, 33, 34 et 35.

Les variables qualitatives comprennent:

- les variables discrètes qui sont des mesures ordinales dont les valeurs possibles sont en nombre fini (variables 8, 10, 11, 12 et 39);
- les variables stratifiées sont des variables continues ou discrètes catégorisées, en intervalles ou classes (9, 13, 14, 15, 17, 18, 24, 27, 28, 32, 36, 38, 43 et 45);
- les variables ordinales sont des catégories de type 'succession' qui peuvent être ordonnées (16, 19, 20, 21, 22, 23, 37, 40, 41, 42 et 44);

- les variables nominales qui désignent essentiellement des catégories qui n'ont pas d'ordre d'intensité et peuvent être codées en variables 'muettes' (25 et 26).

6.2.4 Résultats: traitement des observations et méthodes d'analyse statistique

Confronté à une série statistique résultant de nombreuses observations, il est nécessaire de représenter ce vaste ensemble de données par quelques données qui les caractérisent aussi bien que possible, mais qui sont cependant en nombre suffisamment faible pour que l'esprit puisse les saisir aisément et permettre des comparaisons avec d'autres séries statistiques de la même nature (Marchais, 1979; Nguyen & Pernès, 1984; Herbert & Vincourt, 1989; Laloë & Lac, 1992; Noiro, 1992; Charmet *et al.*, 1994; Goffinet & Mangin, 1994; Fox *et al.*, 1997; Gleeson, 1997; Kempton & Fox, 1997).

Ces résumés peuvent prendre deux formes particulières:

- le résumé numérique: il s'agira d'étudier des valeurs caractéristiques de la série; et
- le résumé graphique qui est un outil de présentation qui facilite la compréhension des résultats.

6.2.4.1 Analyse de caractères séparés

Analyser des données consiste à étudier séparément ou globalement toutes les informations relatives à un sujet pour en expliquer l'état, faire des diagnostics en mettant en relation les différentes données entre elles et les décomposer en tableaux de données analysables par des méthodes mathématiques moyennant des logiciels informatiques qui permettent de décortiquer ces données et d'en faire des résumés soit numériques, soit graphiques. Ces traitements obéissent à une certaine logique selon les objectifs d'analyse.

Plusieurs méthodes d'analyse ont été utilisées dans le dépouillement des résultats. Les caractéristiques de la diversité des populations étudiées sont d'abord décrites séparément. Des tableaux et graphiques sont élaborés pour caractériser chaque population, puis et pour vérifier l'existence ou non d'effet significatif entre les populations étudiées, des ANOVA variable par variable sont effectuées. Les résultats obtenus sont complétés par des analyses factorielles et de classement.

6.2.4.1.1 Description générale des populations

Cette partie comprend une description des cultivars (tableau 8) par région et par provenance, en vue de présenter les caractéristiques de ces cultivars.

Les principales caractéristiques des descendances de chaque cultivar étudié: le pourcentage de talles, aspect de la plante, sensibilité à la verse, potentiel de rendement en fourrage vert, forme de la panicule, synchronisme de la maturité de la panicule, port et couleur de la feuille, pigmentations de la gaine, du limbe, du nœud et de l'entre-nœud, pubescence de la gaine, du limbe, etc., sont donnés dans le tableau 10 sous forme des fréquences des variables qualitatives et dans les tableaux 11, 12, 13, 14 et 15 sous forme de moyennes, et valeurs minimales et maximales des variables quantitatives.

Tableau 10: Fréquences des variables qualitatives de tous les cultivars

Caractères et Significations	Cultivar1	Cultivar2	Cultivar3	Cultivar4	Cultivar5	Cultivar6	Cultivar7	Cultivar8	Cultivar9	Cultivar10	Cultivar11	Cultivar12	Cultivar13	Cultivar14	Cultivar15	Cultivar16	Cultivar17	Cultivar18	
Type de tallage	sans talles	77,5	56,1	70,5	59,5	50,3	41,8	96,4	69,8	75,6	73,8	52,6	50,3	58,8	32,0	42,4	77,8	57,9	51,9
	érigé	22,5	43,9	29,5	38,6	46,0	50,6	3,6	26,7	22,0	24,6	45,2	45,4	38,5	57,8	46,8	19,3	42,1	45,6
	intermédiaire				2,0	3,7	5,7		3,5	2,2	1,3	2,2	4,2	2,1	9,7	9,9	2,9		2,5
Aspect de la plante	étalé					1,9			0,2	0,3			0,5	0,4	0,9				
	chétif	50,0	100	71,6	15,7	12,0	35,6	26,7	25,6	4,7	13,5	11,9	3,6	16,4	9,5	19,0	18,9	4,4	
	intermédiaire	43,8		26,1	45,8	30,7	51,0	56,4	18,6	15,3	32,7	28,3	29,7	41,2	57,8	45,9	32,5	19,3	27,8
Résistance à la verse	bonne	6,3		2,3	38,6	57,4	13,4	16,9	55,8	80,0	53,8	59,8	66,7	42,5	32,6	35,1	48,6	76,3	72,2
	intermédiaire	67,5	100	62,5	24,8	59,8	31,8	14,4	45,3	53,6	37,7	40,2	61,1	35,5	30,5	21,9	22,6	80,4	55,7
	faible	30,0		22,7	39,9	12,6	7,7	11,3	3,5	16,3	13,4	13,9	11,1	15,0	10,4	15,3	30,9	4,7	19,0
Potentiel de rendement en fourrage	faible	2,5		14,8	35,3	27,6	60,5	74,4	51,2	30,1	48,9	46,0	27,8	49,4	59,1	62,8	46,5	15,0	25,3
	intermédiaire	73,8	100	75,0	18,3	21,5	43,3	36,9	32,6	7,7	27,0	21,3	4,9	20,3	13,3	22,6	26,3	7,5	
	bon	20,0		47,7	23,6	46,4	48,7	10,5	15,1	26,9	24,7	34,3	39,5	53,2	45,4	35,0	19,3	35,4	
Forme de la panicule	cylindrique	6,3		25,0	34,0	54,9	10,3	14,4	57,0	77,1	46,1	54,0	60,8	40,2	33,5	32,1	38,7	73,2	64,6
	conique	77,5	12,2	36,4	10,5	14,7	12,3	8,7	11,6	22,2	15,2	16,9	31,4	29,1	20,1	14,9	9,9	1,6	11,4
	fusiforme	6,3		2,3	12,4	16,9	13,0	11,3	19,8	15,6	21,2	28,8	21,2	14,5	16,1	17,4	2,1	5,0	11,4
	massue	15,0	61,0	46,6	17,6	6,4	4,6	11,3	3,5	8,9	4,8	6,4	3,6	2,3	5,7	4,2	4,9	0,6	7,6
	bougie		4,9	1,1	3,9	1,5	0,8	3,1	7,0	2,0	3,1	2,2	2,0	5,3	7,0	4,4	0,4		2,5
	haltère	1,3		0,7		0,4	1,0		2,7	1,1	0,3	0,3	0,2	4,0	0,4	63,8	88,8		
	lancéolée									0,3									
	oblancéolée			10,2	19,6	35,0	14,6	36,4	30,2	31,3	29,3	26,9	25,5	20,5	22,0	25,8	14,8	2,5	26,6
	globulaire	22,0		3,4	34,0	24,5	53,3	28,2	27,9	17,3	24,6	18,0	16,0	28,1	24,8	32,7	3,7	1,6	40,5

Caractères et Significations	Cultivar1	Cultivar2	Cultivar3	Cultivar4	Cultivar5	Cultivar6	Cultivar7	Cultivar8	Cultivar9	Cultivar10	Cultivar11	Cultivar12	Cultivar13	Cultivar14	Cultivar15	Cultivar16	Cultivar17	Cultivar18	
Synchronisme de la maturité des panicules	sans talles	96,3	73,2	76,1	62,1	50,0	41,8	96,4	69,8	75,3	73,8	52,6	51,0	58,5	31,8	42,3	78,6	57,6	51,9
	non synchr	3,8	19,5	20,5	27,5	20,2	19,2	3,1	17,4	15,3	19,5	28,3	17,3	23,5	29,2	29,6	10,7	14,6	38,0
	intermédiaire		7,3	3,4	10,5	25,5	37,5		5,8	4,7	4,6	14,1	24,5	15,4	38,1	24,9	4,1	8,1	10,1
	synchrone					4,3	1,5	0,5	7,0	4,7	2,1	5,0	7,2	2,6	0,8	3,2	6,6	19,6	
Port de la feuille	érigé	96,3	100	87,5	80,4	77,9	80,1	84,6	66,3	61,2	68,3	64,5	81,0	54,2	78,2	67,9	70,4	74,1	78,5
	intermédiaire	3,8		12,5	19,6	21,2	19,9	15,4	33,7	38,2	31,7	35,5	19,0	45,5	21,8	31,9	28,4	25,9	21,5
	pendant					0,9				0,7				0,3	0,1	1,2			
Couleur de la feuille	vert pâle	76,3	12,2	19,3	7,2	13,5	1,9	0,5		1,8	3,4		1,8		1,8	8,2	1,2		
	verte	3,8	63,4	23,9	14,4	16,6	34,5	63,1	48,8	47,9	50,8	21,3	17,0	50,2	12,9	24,2	63,0	44,9	60,8
	vert foncé	20,0	24,4	56,8	78,4	69,9	63,6	36,4	51,2	50,3	45,8	78,7	83,0	47,9	87,1	74,0	28,8	53,9	39,2
	sans pigmen	93,8	70,7	47,7	80,4	84,7	97,3			99,3	99,6			96,4	98,3	98,5	100	99,7	
Pigmentation de la gaine	verte	6,3	29,3	47,7	19,6	15,3	2,7							3,5	0,6				
	violette			4,5						0,7	0,4			0,2	1,7	0,1		0,3	
	panaché															0,8			
Pigmentation du limbe	sans pigmen	93,8	70,7	52,3	80,4	84,7	97,3							97,0	100	99,4	100		
	verte	6,3	29,3	47,7	19,6	15,3	2,7							2,6	0,6				
	violette													0,3					
	sans pigmen	93,8	68,3	45,5	73,2	82,8	91,6	96,4	80,2	87,2	80,5	91,4	72,2	75,7	77,1	79,2	67,5	55,1	60,8
Pigmentation du nœud	verte	6,3	24,4	46,6	19,6	15,3	2,7						1,0	1,5		0,6	0,4	0,6	
	rouge							3,6											
	violette		4,9		5,9	0,9	3,1		4,7	8,9	14,5	0,6	11,1	11,9	14,4	10,8	18,5	21,8	39,2
	brune		2,4	8,0	1,3	0,9	2,7		15,1	3,9	5,0	8,0	15,7	10,9	8,5	9,4	13,6	22,4	
	sans pigmen	93,8	70,7	52,3	80,4	84,7	97,3							96,7	99,2	99,4	97,1	99,7	
Pigmentation de l'entre-nœud	verte	6,3	29,3	47,7	19,6	15,3	2,7							3,3	0,6	2,1			
	violette																0,8	0,3	
	blanche															0,8			
Pubescence de la gaine	glabre	68,8	87,8	89,8	92,8	90,8	77,8	57,9	65,1	89,6	89,2	93,1	92,2	80,8	91,5	89,1	90,9	99,1	78,5
	peu velue	28,8	12,2	10,2	6,5	7,4	20,3	36,9	24,4	9,1	8,8	6,1	7,5	17,5	7,8	8,8	8,2	0,9	21,5
	dense	2,5			0,7	1,8	1,9	5,1	10,5	1,3	2,0	0,8	0,3	1,7	0,6	2,1	0,8		
Pubescence d'entre-nœud	absente	100						99,0	98,0	98,6				99,7	100	99,1	100		
	présente						1,0	2,0	1,4				0,3	0,3	0,9				
Saveur de jus de la tige	insipide	100			98,0	98,8	98,5	99,0	97,7	95,3	84,1	93,1	99,7	92,6	92,8	92,9	86,4	87,5	
	intermédiaire				1,3	1,2	1,5	1,0	2,3	4,5	14,5	6,9	0,3	6,3	6,1	5,3	11,1	9,7	
	sucrée				0,7					0,2	1,4			1,2	1,1	1,8	2,5	2,8	
Sénescence	lente	12,5	34,1	29,5	57,5	69,9	70,1	78,5	70,9	76,0	61,5	81,2	85,0	58,8	67,2	67,2	31,7	79,4	77,2
	intermédiaire			29,5	23,5	12,3	10,7	10,8	14,0	19,0	24,9	10,5	10,8	25,1	19,9	17,4	28,0	10,3	8,9
	rapide	87,5	65,9	40,9	19,0	17,8	19,2	10,8	15,1	5,0	13,7	8,3	4,2	16,0	12,9	15,4	40,3	10,3	13,9

Caractères et Significations		Cultivar1	Cultivar2	Cultivar3	Cultivar4	Cultivar5	Cultivar6	Cultivar7	Cultivar8	Cultivar9	Cultivar10	Cultivar11	Cultivar12	Cultivar13	Cultivar14	Cultivar15	Cultivar16	Cultivar17	Cultivar18
Densité de la panicule	lâche	2,5	7,3	40,9	1,3	0,9	2,7	2,1	1,2	0,7	1,8	0,8	0,3	1,2	0,6	2,3	1,2	0,9	1,3
	intermédiaire	57,5	53,7	40,9	45,1	31,0	47,1	53,8	29,1	24,2	31,9	28,3	21,9	33,6	29,4	35,9	25,5	13,1	15,2
	compacte	40,0	39,0	59,1	53,6	68,1	50,2	44,1	69,8	75,1	66,3	70,9	77,8	65,3	69,9	61,8	73,3	86,0	83,5
	absentes	37,5	39,0	47,7	40,5	56,1	35,6	28,2	34,9	44,2	31,0	28,0	25,8	37,5	69,3	51,4	71,2	78,8	74,7
Longueur des soies	courte	58,8	56,1	52,3	56,2	35,6	60,2	63,1	53,5	33,6	37,1	42,4	61,1	57,9	28,6	40,1	22,6	12,5	21,5
	moyenne	3,8	4,9		3,3	5,2	4,2	7,7	3,5	9,6	10,1	18,8	10,1	4,0	1,3	4,5	4,5	3,4	3,8
	longue					3,1		1,0	8,1	12,6	21,8	10,8	2,9	0,7	0,8	4,0	1,6	5,3	
	absentes	37,5	39,0	47,7	40,5	56,1	35,6	28,2	34,9	44,2	31,0	28,0	25,8	37,5	69,3	51,4	71,2	78,8	74,7
	verte	2,5																	
Couleur des soies	extrémité foncée					0,3	1,5	3,1	1,2	1,0	3,4	1,4	1,6	0,5		0,6	2,9	1,2	
	rouge pâle	10,0	2,4		1,3	0,9	0,4	6,7	1,2	0,5	2,1	0,8	0,3	1,3	0,6	1,0	2,1	1,6	
	rouge	50,0	58,5	51,1	56,9	38,7	59,4	59,0	58,1	51,3	57,2	59,6	66,3	56,4	29,2	45,3	21,4	11,5	25,3
	violette			1,1	1,3	4,0	3,1	3,1	4,7	3,0	6,3	10,2	5,9	4,3	0,8	1,7	2,5	6,9	
	absente	37,5	39,0	47,7	40,5	56,1	35,6	28,2	34,9	44,2	31,0	28,0	25,8	37,5	69,3	51,4	71,2	78,8	74,7
Densité des soies	éparse	31,3	46,3	44,3	39,2	23,6	41,8	27,7	30,2	15,1	18,5	16,9	25,5	36,4	22,9	26,0	11,1	10,6	13,9
	intermédiaire	20,0	14,6	8,0	12,5	10,1	15,3	22,1	16,3	15,1	14,9	20,2	25,8	16,0	6,4	11,3	9,9	4,0	8,9
	dense	11,3			7,8	10,1	7,3	22,1	18,6	25,5	35,6	34,9	22,9	10,1	1,5	11,3	7,8	6,5	2,5
	vert pâle	81,3	92,7	68,2	92,2	80,1	78,5	88,2	95,3	89,7	85,9	78,4	82,0	73,6	77,8	76,7	81,5	75,7	91,1
Couleur des glumes de l'épillet	extrémité rouge	13,8	7,3	25,0	4,6	15,3	18,8	11,8	3,5	4,2	8,8	8,3	9,2	17,9	18,9	16,4	11,5	7,8	3,8
	rouge					0,6							0,2						
	extrémité violette	5,0		6,8	3,3	3,1	2,3		1,2	6,1	4,3	11,9	8,2	7,8	3,4	6,3	6,2	16,2	5,1
	violette				0,9	0,4				1,0	1,4	0,7	0,7		0,6	0,8	0,3		
	égrenage	12,5	7,3	5,7	12,4	11,7	12,3	4,1	5,8	12,8	11,1	7,8	3,6	5,1	15,0	10,1	2,1	8,4	1,3
Battage	égren. au toucher	60,0	53,7	58,0	62,1	71,2	58,6	65,1	69,8	67,6	60,6	65,7	64,7	69,3	69,3	73,5	67,5	74,5	74,7
	battage facile	15,0	14,6	21,6	19,0	14,4	18,4	28,2	15,1	15,5	22,8	22,7	28,8	20,3	9,7	14,5	28,0	16,2	17,7
	battage difficile	12,5	24,4	14,8	6,5	2,8	10,7	2,6	9,3	4,2	5,5	3,9	2,9	5,3	5,9	1,9	2,5	0,9	6,3
	crème																		2,5
Couleur de graine	jaune											0,7						3,1	2,5
	grise	98,8	97,6	81,8	91,5	85,3	78,2	80,5	93,0	78,0	84,5	89,5	86,6	93,6	86,4	84,7	88,1	75,4	83,5
	gris foncé	1,3	2,4	18,2	8,5	14,7	21,1	18,5	7,0	22,0	15,5	10,5	12,7	6,4	13,6	15,3	11,9	19,0	13,9
	brune					0,8	1,0												
Couverture de la graine	exposée					5,5	7,7	10,3		1,3	0,4			5,1	1,2	1,2	13,1	7,6	
	intermédiaire	96,3		98,9		93,6	85,4	79,5	100	97,6	96,0	99,2	92,2	99,2	94,3	97,4	95,5	82,9	92,4
	recouverte	3,8		1,1		0,9	6,9	10,3		1,0	3,6	0,8	7,8	0,8	0,6	1,4	3,3	4,0	
	Obvale	77,5	48,8	75,0	84,3	79,1	77,4	73,8	73,3	73,8	74,3	79,8	74,5	84,8	79,7	76,4	68,7	53,6	49,4
Forme de la graine	oblancéolée													0,8					
	hexagonale					1,8	22,2		25,6										
	globulaire	22,5	51,2	25,0	15,7	19,0	0,4	26,2	1,2	26,2	25,7	20,2	25,5	15,2	20,3	22,8	31,3	46,4	50,6
Texture de l'albume	princip. cornée				3,9	5,2	2,7	2,1	4,7	2,4	2,3	1,1	1,3	2,1	4,0	1,7	2,1	1,9	
	partiell. cornée	52,5	63,4	87,5	90,2	89,3	75,1	82,6	76,7	81,3	81,7	85,9	84,3	86,9	86,9	83,8	69,1	82,2	94,9
	princip. farineuse	47,5	36,6	12,5	5,9	5,5	22,2	15,4	18,6	16,3	16,1	13,0	14,4	10,9	9,1	14,5	28,8	15,9	5,1

6.2.4.1.1.1 Les cultivars de la région de Dakhla (cultivars 1, 2, 9, 10, 11, 14 et 15)

Deux systèmes de culture de mil sont pratiqués dans la région de Dakhla. La culture pure est la plus répandue dans les localités de Tmassint et Etwaycha, alors que dans le reste de la région, les paysans associent le mil aux oliviers.

Le mil le plus utilisé est le 'Ardhaoui' ou 'Jerb'. Il s'agit de populations locales (ou cultivars) conservées par les paysans et présentant une bonne adaptation aux conditions édapho – climatiques de vigueur dans la région.

Les pratiques culturales sont simples et traditionnelles, mais elles permettent une bonne adaptation de la culture aux conditions du milieu. Cette région est caractérisée par des sols légers, de type peu évolué et par des eaux d'irrigation chargées (10 g en sel / l, CE = ± 14 ms/cm) à faible débit (2 à 3 l/s). Il s'agit de sols relativement profonds résultants d'un apport éolien et qui ont subi une légère évolution manifestée par une redistribution des teneurs en calcaires et en matières organiques.

La technique de la culture en planche pratiquée dans cette région semble être la meilleure sur ces sols légers. Elle permet une bonne répartition de l'eau sur des petites parcelles dont les dimensions sont variables selon la pente. En général, les planches de 8 à 10 m² sont les plus utilisées.

D'une façon générale, les paysans n'appliquent que peu de fumure organique, mais ces dernières années et suite à des résultats encourageants, les fumures minérales sont utilisées pour améliorer les rendements. Les semis sont effectués à la volée, dans la première quinzaine de mai pour avoir une récolte précoce dite 'Bedri' au mois d'août.

Le mil ne nécessite pas beaucoup de soins après le semis. Les activités sont limitées à un éclaircissage des plantes 15 à 20 jours après le semis et une irrigation par semaine. Dès l'initiation des panicules, les membres de la famille s'engagent à chasser les oiseaux (*Columba palumbus*; *Passer domesticus*; *Alauda arvensis*,...), les ennemis les plus redoutables du mil dans ces régions.

Les prospections organisées dans cette région ont permis de collecter 150 épis des 7 cultivars les plus cultivés.

Tableau 11: Moyennes et valeurs minimales et maximales des variables quantitatives des cultivars de la région de Dakhla: 1, 2, 9, 10, 11,14 et 15 (unités voir tableau 9)

Caractères	Cultivar 1			Cultivar 2			Cultivar 9			Cultivar 10			Cultivar 11			Cultivar 14			Cultivar 15		
	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE
Longueur de la plante	102,0	230,0	160,2± 3,7	96,0	191,0	149,1± 2,8	155,0	314,0	232,3± 1,2	132,0	298,0	212,6±1,1	114,0	278,0	212,5± 1,3	84,0	297,0	186,5± 1,1	100,0	282,0	189,2± 0,9
Diamètre de la tige	4,0	11,0	7,0±0,2	4,0	7,0	5,0±0,1	3,0	16,0	7,9±0,1	3,0	12,0	7,1±0,06	4,0	12,0	7,0±0,1	3,0	11,0	6,1±0,1	3,0	11,0	6,3±0,1
Longueur de la feuille	28,0	63,0	44,4±0,9	32,0	48,0	40,2±0,7	32,0	88,0	58,7±0,4	29,0	84,0	52,8±0,3	31,0	90,0	56,5±0,5	20,0	75,0	43,7±0,4	23,0	87,0	45,9±0,3
Largeur de la feuille	18,0	44,0	29,9±0,7	12,0	35,0	29,1±0,6	10,0	60,0	29,8±0,3	10,0	45,0	25,7±0,2	10,0	45,0	24,4±0,3	10,0	42,0	23,9±0,2	10,0	50,0	25,9±0,2
Longueur de la gaine	65,0	145,0	108,7± 2,0	80,0	145,0	104,1± 2,7	75,0	200,0	128,6± 0,7	80,0	210,0	122,4±0,6	75,0	170,0	121,9± 0,8	55,0	180,0	115,9± 0,8	70,0	175,0	114,6± 0,6
Séparation	25,0	59,0	39,0±0,8	24,0	47,0	37,6±0,7	26,0	64,0	46,4±0,3	26,0	92,0	43,7±0,2	31,0	64,0	43,1±0,3	28,0	60,0	43,6±0,3	21,0	58,0	41,8±0,2
Longueur de l'entre-nœud	11,0	27,0	19,7±0,4	15,0	27,0	20,4±0,5	14,0	34,0	22,6±0,1	14,0	33,0	21,5±0,1	14,0	29,0	21,3±0,1	12,0	31,0	21,5±0,1	10,0	29,0	20,5±0,1
Nombre de feuilles	6,0	11,0	7,6±0,1	5,0	9,0	6,7±0,2	7,0	13,0	10,2±0,0	4,0	13,0	9,6±0,0	8,0	13,0	9,9±0,1	4,0	11,0	8,7±0,0	6,0	13,0	9,1±0,0
Nombre total de talles	0,0	7,0	0,6±0,2	0,0	4,0	1,0±0,2	0,0	14,0	0,5±0,0	0,0	7,0	0,5±0,0	0,0	8,0	0,8±0,1	0,0	10,0	1,5±0,1	0,0	12,0	1,4±0,1
Nbre de talles productives	0,0	3,0	0,1±0,1	0,0	1,0	0,1±0,0	0,0	7,0	0,3±0,0	0,0	5,0	0,3±0,0	0,0	6,0	0,4±0,0	0,0	7,0	0,9±0,1	0,0	9,0	0,7±0,0
Nombre de talles nodales	0,0	4,0	0,3±0,1	0,0	2,0	0,4±0,1	0,0	7,0	0,3±0,0	0,0	4,0	0,3±0,0	0,0	5,0	0,5±0,0	0,0	7,0	1,1±0,1	0,0	8,0	1,1±0,1
Longueur de la panicule	6,0	13,0	9,3±0,2	6,0	12,0	8,7±0,2	8,0	29,5	14,6±0,1	7,0	26,0	12,8±0,1	7,0	25,5	13,1±0,1	6,0	22,5	10,6±0,1	6,5	20,5	10,8±0,1
Grosueur de la panicule	10,6	29,1	19,9±0,4	13,0	29,4	20,1±0,5	15,6	47,1	30,6±0,2	12,4	47,2	28,3±0,2	15,4	39,4	27,5±0,2	13,1	47,9	26,3±0,2	12,9	42,5	26,5±0,2
Poids de la panicule	2,0	14,9	7,0±0,3	3,7	14,2	7,8±0,4	8,1	66,5	25,2±0,4	4,5	56,9	18,5±0,3	8,8	41,0	19,5±0,3	1,3	37,3	15,5±0,3	2,5	60,3	15,3±0,2
Poids de 100 graines	0,4	1,6	1,0±0,0	0,6	1,6	1,1±0,0	0,4	2,0	1,2±0,0	0,2	1,9	1,1±0,0	0,6	1,9	1,3±0,0	0,8	1,9	1,3±0,0	0,4	1,9	1,2±0,0
Nombre d'épillets fertiles	1,0	2,0	1,4±0,1	1,0	2,0	1,5±0,1	1,0	4,0	1,7±0,0	1,0	4,0	1,6±0,0	1,0	4,0	1,7±0,0	1,0	4,0	1,6±0,0	1,0	4,0	1,6±0,0

Les deux cultivars de la localité Magraouia (cultivars 1 et 2) se caractérisent par une longueur moyenne de plante respectivement de 160,16 et 149,10 cm, avec un maximum de 230 cm de longueur pour le cultivar 1 et 96 cm comme longueur minimale pour le cultivar 2.

Ces deux cultivars sont cultivés en association avec des oliviers pour la production de graines. L'épi est long de 6 à 13 cm, de forme cylindrique (77,5%) pour le cultivar 1 et fusiforme (61,0%) pour le cultivar 2. La densité des panicules est compacte à intermédiaire, avec des graines plus ou moins exposées ce qui donne aux panicules un fort égrenage à la touche. Les graines sont gris, obovales à globulaires et à texture partiellement cornée.

Les plantes du cultivar 1 sont plus ou moins chétives, avec un potentiel de rendement en fourrage faible (73,8%) et intermédiaire pour le reste, et elles sont très peu sensibles à la verse.

Les plantes du cultivar 2 sont caractérisées par une bonne résistance à la verse (100% non versé), mais d'aspect et de potentiel de rendement en fourrage très faible.

Les plantes du cultivar 2 tallent mieux que les plantes du cultivar 1 ce qui leur confère une bonne résistance à la verse.

Pour les deux cultivars, les feuilles sont de couleur vert pâle, érigées, sans pigmentation et à sénescence rapide. Les gaines sont peu velues et glabres.

Les trois cultivars de la localité Etwaycha (cultivars 9, 10 et 11): Ces trois cultivars sont conduits en culture pure. Ils sont principalement cultivés pour les graines et la paille. La longueur des plantes est en moyenne supérieure à 200 cm, son minimum est voisin de 114 cm (cultivar 11), alors que son maximum peut atteindre 314 cm (cultivar 9). Les plantes se caractérisent par des feuilles longues et larges, peu de talles avec diamètre des tiges important ce qui donne à la plupart des plantes un très bon aspect (80% pour le cultivar 9, 54% pour le cultivar 10 et 60% pour le cultivar 11) et un potentiel de rendement en fourrage élevé (77,1%; 46,1% et 54%). À maturité, les plantes ont une sénescence très lente.

Les plantes du cultivar 10 sont plus sensibles à la verse: 48,9% des plantes ont versé contre 46% pour le cultivar 11 et 30,1% pour le cultivar 9.

La variabilité morphologique des panicules est plus importante que celle observée chez les cultivars de Magraouia. Les panicules sont principalement lancéolés et oblancéolés, mais les autres formes (conique, cylindrique, massue et bougie) sont aussi

présentes avec un pourcentage variable de 0,6% pour les globulaires à 31,3% pour les lancéolés.

Les grains sont gris, obovales et à texture partiellement cornée (81%). Ce sont les caractères les plus préférés par les agriculteurs et les consommateurs des régions arides. Les grains sont aussi peu exposés, ce qui confère aux panicules une aptitude au battage facile, l'égrenage au touché est de l'ordre de (67,6%) pour le cultivar 9, (60,6%) pour le cultivar 10 et (65,7) pour le cultivar 11. Le poids de 100 grains (cultivar 9: 1,2 g, cultivar 10: 1,1 g et cultivar 11: 1,3 g) et par conséquent des panicules est intéressant (Loumerem, 1998).

Ces trois cultivars sont de forme intermédiaire entre la population '*Ardaoui*' pour la couleur et forme des grains, et la population '*Gharbi*' pour l'aspect de la plante et la forme de la panicule.

Les deux cultivars de Tmassint (cultivars 14 et 15): l'élevage est souvent combiné à la production végétale dans cette région. Le pastoralisme repose sur une mobilité du cheptel suivant les rythmes saisonniers marqués. Les troupeaux regagnent durant la saison des pluies les zones de parcours plus ou moins éloignées des terres cultivées, et reviennent sur les champs dès la fin des récoltes. La consommation des résidus de culture et l'apport de fumure animale, constituent un fondement des relations techniques entre agriculture (et en particulier la culture du mil et de l'olivier) et élevage dans cette région.

Les deux cultivars 14 et 15 sont conduits en culture pure, cultivés principalement pour la production de grains et fourrage sur des sols de type isohumique (les sols sont peu colorés en raison de la faible altération climatique qui libère peu de fer, et de la faible teneur en matière organique qui ne dépasse guère 1% (Duchaufour, 1977; Lozet & Mathieu, 1990) et irrigués par des eaux chargées (entre 6 et 9 g/l de sel, (Yahyaoui, 1998)). Ces sols présentent une texture sableuse avec une légère augmentation du taux d'argile en profondeur, une structure mal définie sur tout le profil, mais avec une très bonne perméabilité. Les teneurs en matière organique varient entre 0,2 et 0,5% en surface et 0,05 et 0,1% en profondeur. Traditionnellement, et de façon générale le mil (à l'instar des autres cultures) ne reçoit pratiquement pas de fumure. On note cependant une exception pour cette zone, qui dispose d'un noyau d'élevage, ce qui fait que la fumure organique est appliquée sur la culture du mil. La fumure reçue par les plantes vient soit de l'épandage de fèces ramassées dans les locaux des animaux, soit simplement de la déjection du cheptel lors de sa divagation après récolte.

Les plantes de ces deux cultivars bien typées et distinctes, sont caractérisées par un tallage abondant, avec des tailles peu élevées et des panicules relativement courtes (10,6 et 10,8 cm). Ces panicules sont oblancéolées, avec des grains densément répartis jusqu'au sommet du rachis. Les grains sont gris, gros, obovales et à texture d'albumen cornée. Les caractéristiques des panicules constituent le vrai type '*Ardaoui*'.

Les plantes sont vigoureuses et d'un potentiel de rendement en fourrage élevé. Elles sont sensibles à la verse: 59,1 % des plantes du cultivar 14 et 62,8 % des plantes du cultivar 15 étaient versées.

Les feuilles sont abondantes, longues, larges et de couleur verte foncée. À maturité, la sénescence foliaire est lente.

Ces cultivars sont bien typés pour une culture de mil qui combine production de grains et fourrage.

6.2.4.1.1.2 Les cultivars de la région de Jerba (cultivars 3, 4 et 5)

La culture du mil est très ancienne sur l'île de Jerba. D'après les paysans, la population '*Ardhaoui*' ou '*Jerbi*' cultivée dans le sud tunisien est originaire de l'île où cette culture a jadis connu une grande prospérité. Mais les changements socio-économiques qu'a connu cette région durant ces dernières années, ont négativement influencé la culture de cette espèce. Les activités touristiques, très développées en été ont lourdement pesé sur la culture du mil en absorbant la main d'œuvre familiale. Ces activités (artisanat, travail dans les hôtels) ont amené les paysans à faire un choix en faveur du tourisme et ses activités qui est plus rentable que la culture du mil. Par conséquent, le mil a presque totalement disparu de l'île. Il n'en subsiste plus que quelques foyers de culture à El Grôo et Ajim où les activités touristiques sont limitées voire absentes. L'érosion génétique a donc sévèrement touché le mil de cette région et les meilleurs cultivars se sont perdus.

À El Grôo et Ajim, la culture du mil est l'activité des femmes et des enfants. Les prospections organisées dans l'île ont permis de collecter trois cultivars, c'est-à-dire les 3, 4 et 5.

Tableau 12: Moyennes et valeurs minimales et maximales des variables quantitatives des cultivars de la région de Jerba: 3, 4 et 5 (unités: voir tableau 9).

Caractères	Cultivar 3			Cultivar 4			Cultivar 5		
	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE
Longueur plante	92,00	215,00	140,61±2,56	120,00	246,00	179,44±2,08	136,00	267,00	195,80±1,59
Diamètre tige	4,00	9,00	5,58±0,11	4,00	11,00	6,52±0,13	3,00	12,00	6,91±0,09
Longueur feuille	26,00	57,00	39,80±0,60	27,00	76,00	47,40±0,74	23,00	80,00	50,69±0,48
Largeur feuille	12,00	45,00	26,64±0,53	10,00	42,00	27,43±0,50	10,00	60,00	29,99±0,42
Longueur gaine	75,00	135,00	106,88±1,54	75,00	175,00	114,90±1,38	80,00	175,00	116,66±0,98
Séparation	18,00	50,00	39,25±0,58	26,00	58,00	41,73±0,50	23,00	58,00	42,79±0,29
Longueur entrenœud	14,00	30,00	20,05±0,36	12,00	29,00	20,29±0,25	7,00	30,00	21,15±0,17
Nombre feuilles	4,00	8,00	6,10±0,12	5,00	12,00	8,12±0,12	5,00	13,00	8,60±0,09
Nombre total talles	0,00	4,00	0,49±0,10	0,00	10,00	0,88±0,13	0,00	10,00	1,11±0,09
Nbre talles product.	0,00	3,00	0,23±0,06	0,00	8,00	0,67±0,10	0,00	7,00	0,73±0,06
Nbre talles nodales	0,00	3,00	0,34±0,07	0,00	6,00	0,69±0,09	0,00	8,00	0,68±0,06
Longueur panicule	6,00	15,00	9,40±0,19	7,00	17,00	11,14±0,18	7,00	25,00	11,46±0,15
Grosseur panicule	12,47	29,98	21,83±0,36	10,72	37,21	26,87±0,36	16,19	44,51	28,16±0,27
Poids panicule	4,14	24,63	10,63±0,44	6,10	36,76	15,50±0,45	4,66	43,46	18,05±0,43
Poids 100 graines	0,49	1,69	1,17±0,03	0,42	1,88	1,30±0,02	0,52	1,80	1,23±0,01
Nbre épillets fertiles	1,00	3,00	1,75±0,05	1,00	3,00	1,58±0,04	1,00	4,00	1,69±0,03

De taille peu élevée, les plantes du cultivar 3 sont cultivées sur des sols peu évolués d'érosion, régosoliques à faciès calcimorphe gypseux. Ce sont des sols peu profonds, présentant une texture sableuse avec une légère augmentation du taux du gypse en profondeur. Les teneurs en matière organique sont faibles et la perméabilité est moyenne. Ces sols ont beaucoup influencé l'aspect général de la plante. 75% des plantes de ce cultivar ont un potentiel de rendement en fourrage faible, avec un aspect médiocre (71,6%) et un tallage peu abondant. Les feuilles sont larges et courtes de couleur vert foncé.

Les panicules sont très courtes (de 6 à 15 cm de longueur) et nettement fusiformes. Les grains sont gris et obovales, à texture d'albumen partiellement cornée (87,5%).

Le cultivar 4 provient d'une parcelle entre El Grôo et Ajim, cultivé sur un sol peu évolué, à faciès steppique sur sable calcaire. Il s'agit d'un sol relativement profond résultant d'un apport éolien et qui a subi une légère évolution manifestée par une redistribution des teneurs en calcaire et en matières organiques. Les plantes de ce cultivar sont moyennement hautes (120 à 246 cm), d'aspect général intermédiaire à bon, et moins sensibles à la verse que les plantes du cultivar 3.

Les feuilles sont larges, longues, érigées et de couleur vert foncé. À maturité, la sénescence foliaire des plantes est à 57,5% lente; 23,5% intermédiaire et 19% rapide.

Les panicules sont longues de 7 à 17 cm, de forme homogène à dominance oblancéolée. Quelque 59,5% des panicules sont poilues dont 39,2% à densité de soies éparses, 12,5 % intermédiaire et 7,8% denses. La couleur des soies est de 1,3% rouge pâle, 56,9% rouge et 1,3% violet.

Les grains sont obovales et gris, avec une texture de l'albumen partiellement cornée. Le poids de 100 grains varie de 0,42 à 1,88 g avec une moyenne de 1,3 g. Ce cultivar se distingue par la présence de quelques plantes dont le jus de la tige est sucré (0,7% du total).

Le dernier cultivar 5 est conduit en culture pure pour la production de grains et de fourrage, sur des sols dits siérozems. Ces sols isohumiques complexes saturés sont caractérisés par un gradient inverse de la matière organique et du calcaire en fonction de la profondeur. Ils présentent une texture sableuse avec une légère augmentation du taux d'argile en profondeur. Ils sont moyennement profonds, avec une très bonne perméabilité et une capacité de rétention très limitée (10% maximum). Les teneurs en matière organique varient entre 0,2 et 0,5% en surface et 0,05 et 0,1% en profondeur. 'Les siérozems se comportent en sols fertiles dans la mesure où ils sont artificiellement pourvus en eau par irrigation' (Duchaufour, 1977; Lozet & Mathieu, 1990).

Ce cultivar renferme le meilleur mil rencontré dans cette région. Les plantes ont un très bon aspect général, dont 49,7% avec talles. Elles sont longues et résistantes à la verse. Les feuilles sont nombreuses, larges et de couleur vert foncé. Ces caractéristiques confèrent aux plantes un potentiel de rendement en fourrage très élevé. À maturité, la majorité reste encore verte: 69,9% sont à sénescence lente.

Les panicules sont longues et grandes, et de forme lancéolée à oblancéolée. Elles sont compactes, peu poilues avec des grains densément repartis sur le rachis. Ces derniers sont gris, obovales et partiellement cornés.

Ce cultivar présente les caractéristiques du mil préféré par le '*djerbien*' (habitants de l'île de Jerba, paysans et consommateurs). Selon les paysans, la culture du mil est menacée de disparition dans l'île car les jeunes ne s'y tiennent plus. En plus comparée à d'autres activités la rentabilité du mil devient de plus en plus faible. Cependant, c'est à Jerba que la consommation du mil par habitant est la plus élevée.

6.2.4.1.1.3 Les cultivars de la région de Zarzis (cultivars 12, 16, 17 et 18)

Comme dans l'île de Jerba, les paysans de Zarzis connaissent la culture du mil depuis longtemps. C'est une culture très développée pour la production du grain, paille et fourrage. Dans leur travail 'Utilisation des données enzymatiques et morphologiques pour l'étude des populations et de la domestication des plantes', Trigui *et al.* (1986) ont choisi pour le mil des cultivars de la région de Zarzis et de Sidi-Daoud.

Outre les activités touristiques et de pêche, l'agriculture est une activité principale dans cette région. Les paysans sont connus par leur grand savoir-faire agricole qui est le fruit d'observations accumulées au cours de nombreuses générations.

Les paysans pratiquent les cultures en sec (pluviale) et en irrigué. En sec, la culture de l'olivier est la plus dominante, suivie par celle des céréales (orge et blé) et des cucurbitacées (pastèque et melon). Durant les années très pluvieuses et surtout lors que les pluies sont printanières, le mil y' est cultivé en sec (fig. 40).



Figure 40: Mil pluvial cultivé dans la région de Zarzis

Les cultures irriguées sont limitées aux quelques maraîchages d'hiver et le mil qui est moins exigeant en eaux et sols.

La culture du mil est estivale et familiale et est souvent conduit en plein. Les cultivars se caractérisent par des plantes moyennement élevées, d'un bon aspect général et d'un potentiel de rendement en fourrage élevé. Les panicules sont allongées, plus ou moins cylindriques, très compactes et souvent poilues. Les grains sont gris et grands, et leur albumen se caractérise par une texture partiellement cornée. Ils sont densément repartis le long du rachis ce qui donne aux panicules cette forte compacité.

Quatre cultivars (12, 16, 17 et 18) ont été collectés à Zarzis durant notre prospection.

Tableau 13: Moyennes et valeurs minimales et maximales des variables quantitatives des cultivars de la région de Zarzis:12, 16,17 et 18 (unités: voir tableau 9).

Caractères	Cultivar 12			Cultivar 16			Cultivar 17			Cultivar 18		
	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE
Longueur plante	120,00	274,00	198,30±1,38	102,00	273,00	192,96±1,94	59,00	295,00	200,54±2,05	144,00	263,00	192,92±2,70
Diamètre tige	3,00	10,00	6,76±0,07	4,00	12,00	6,93±0,10	2,00	13,00	7,71±0,10	4,00	12,00	6,61±0,19
Longueur feuille	32,00	82,00	51,18±0,52	28,00	72,00	49,23±0,59	28,00	90,00	53,86±0,58	28,00	60,00	42,59±0,79
Largeur feuille	10,00	40,00	25,05±0,30	15,00	44,00	28,09±0,38	10,00	45,00	28,39±0,35	15,00	40,00	25,89±0,59
Longueur gaine	90,00	180,00	126,98±0,95	60,00	205,00	115,91±1,11	80,00	200,00	128,50±1,03	80,00	175,00	119,11±2,14
Séparation	25,00	53,00	40,93±0,33	13,00	56,00	39,46±0,48	4,00	60,00	39,76±0,47	32,00	53,00	40,06±0,55
Long. entrenœud	12,00	28,00	19,96±0,18	6,00	30,00	19,38±0,27	3,00	29,00	19,32±0,24	13,00	28,00	18,90±0,37
Nombre feuilles	6,00	13,00	9,63±0,06	7,00	13,00	9,51±0,07	6,00	13,00	9,58±0,06	7,00	12,00	9,33±0,12
Nombre total talles	0,00	11,00	1,12±0,10	0,00	3,00	0,35±0,05	0,00	11,00	0,97±0,09	0,00	7,00	0,85±0,14
Nbre talles product.	0,00	6,00	0,63±0,06	0,00	3,00	0,21±0,04	0,00	9,00	0,67±0,07	0,00	3,00	0,43±0,09
Nbre talles nodales	0,00	7,00	0,59±0,06	0,00	2,00	0,09±0,02	0,00	9,00	0,18±0,04	0,00	4,00	0,49±0,09
Longueur panicule	9,00	19,00	12,72±0,13	8,00	26,00	16,64±0,25	11,00	34,00	20,16±0,23	7,00	19,50	11,32±0,23
Grosseur panicule	17,72	37,91	27,76±0,20	17,19	40,30	27,25±0,26	17,73	41,36	28,20±0,25	18,26	37,15	29,67±0,48
Poids panicule	6,61	43,40	20,04±0,34	6,31	56,67	21,57±0,56	3,57	63,55	29,43±0,59	10,42	39,06	18,81±0,69
Poids 100 graines	0,62	1,80	1,23±0,01	0,25	1,91	0,98±0,02	0,24	2,01	1,13±0,02	0,73	1,75	1,32±0,03
Nbre épillets fertiles	1,00	3,00	1,69±0,03	1,00	4,00	1,95±0,03	1,00	4,00	1,99±0,02	1,00	2,00	1,51±0,06

Le cultivar 12 est originaire de Hammadi où il est fréquemment cultivé par les paysans sur des sols souvent profonds, moins sensibles à l'érosion mais très battants, fertiles, riches en potassium et salés en profondeur (Mtimet, 1999). L'apport continu d'amendements organiques et minéraux, et la pratique de l'irrigation ont profondément modifié le profil originel de ces sols. Ils sont actuellement caractérisés par un horizon 'Ap' (horizon de labour) de 20 à 40 cm d'épaisseur, riches en matière organique et en sable fin (Belkhoja *et al.*, 1973; Mtimet, 1999).

Les plantes se caractérisent par un tallage abondant, un nombre élevé de feuilles (10 feuilles par plante en moyenne) de couleur vert foncé et un potentiel de rendement en fourrage élevé. La sénescence foliaire à maturité des panicules est lente. Quarante-cinq pour cent des plantes préservent des feuilles vertes après la récolte des panicules. Ces caractéristiques classent ce cultivar 12 parmi l'une des meilleures populations du mil fourrager.

Les cultivars 16, 17 et 18 sont originaires de Chemmakh. Ils présentent presque les mêmes caractéristiques morphologiques en ce qui concerne la longueur, l'aspect et

le potentiel de rendement en fourrage, la couleur et la forme de grains et la couleur des soies, alors que la variabilité morphologique pour le reste des caractères est nette.

Le cultivar 16 se caractérise par un nombre très faible de talles. 77,8% du total des plantes sont sans talles, alors que plus de la moitié des plantes des cultivars 17 et 18 sont avec talles. La sensibilité à la verse est élevée (46,5%). La sénescence des plantes à maturité est rapide (40,3%) et la texture de l'albumen est partiellement cornée à farineuse (28,8%). Le cultivar 16 présente les meilleurs caractères d'un mil à paille.

Le cultivar 17 est une forme intermédiaire entre le cultivar 16 et 18. La forme des panicules est du type bougie et la pigmentation du nœud est brune (13,6% cultivar 16; 22,4% cultivar 17 et 0% cultivar 18). Il comprend aussi des plantes avec des nœuds pubescents et la saveur du jus de la tige est sucrée. Les panicules présentent des poils longs de couleur variable (extrémité foncée, rouge pâle, rouge) et des grains à texture de l'albumen partiellement cornée à farineuse. Toutes ces caractéristiques lui font ressembler au cultivar 16.

Le cultivar 17 ressemble au cultivar 18 avec un potentiel de rendement en fourrage nettement plus élevé que celui du cultivar 16, un tallage plus abondant et une sénescence des plantes à maturité très lente. D'une façon générale, les plantes de ces deux cultivars ont les caractéristiques d'un mil à fourrage.

6.2.4.1.1.4 Les cultivars de la région de Boughrara (cultivars 6, 7 et 8)

Dans cette région, l'agriculture est une activité secondaire après la pêche. Elle se limite à la culture des oliviers et de quelques espèces maraîchères et céréalières. Le mil est la céréale la plus cultivée.

Le rabattement des nappes phréatiques par manque de pluie et leur sur-exploitation ont causé une salinisation des eaux et des sols (effet de concentration). Par conséquent, la culture des espèces maraîchères a connu un recul. Par contre, les superficies de mil ne cessent d'augmenter ces dernières années à cause de sa résistance aux eaux salées et aux sols pauvres. Il a aussi pu se substituer aux autres espèces céréalières.

Le mil est conduit en plein et en associé avec l'olivier sur différents types de sol. L'irrigation à partir des eaux souterraines a une influence prépondérante sur la typologie de ces sols. Les eaux utilisées sont chargées (7-10 g/l). L'agriculteur, pour éviter de 'charger' le sol en surface, est obligé de pratiquer régulièrement des apports massifs

d'eau, dite de 'lessivage'. En effet, en l'absence de réseau de drainage efficace on assiste à des phénomènes d'engorgements des profils, à des remontées des nappes phréatiques avec concentration des sels en surface et à la formation de croûtes et encroûtements gypseux et calcaires à profondeur moyenne.

Sur ces sols salins à horizons superficiels friables très fréquents dans la région, on a collecté le cultivar 6. Ces plantes sont relativement courtes ($\bar{x} = 167,5$ cm) avec un tallage abondant, mais d'un potentiel de rendement en fourrage moyen par rapport aux autres cultivars d'autres régions. Elles sont très sensibles à la verse avec une sénescence des feuilles à maturité lente. Les panicules sont courtes (6 à 15,5 cm), oblancéolées et poilues. Les soies sont courtes, éparses et de couleur rouge. Les grains sont obovales et hexagonaux, gris à texture de l'albumen partiellement cornée.

Ce cultivar se caractérise par 22,2% des plantes à gaines velues et des nœuds pigmentés en violet (3,1%) et brune (2,7%).

Le cultivar 7 est cultivé sur un sol brun associé à des lithosols sur croûte calcaire. Les plantes sont presque sans talles, de longueur moyenne et d'aspect intermédiaire. Elles sont très sensibles à la verse.

Tableau 14: Moyennes et valeurs minimales et maximales des variables quantitatives des cultivars de la région de Boughrara: 6,7 et 8 (unités: voir tableau 9).

Caractères	Cultivar 6			Cultivar 7			Cultivar 8		
	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE
Longueur plante	109,00	220,00	167,51±1,19	131,00	251,00	190,73±1,46	144,00	239,00	198,28±2,31
Diamètre tige	3,00	10,00	5,48±0,08	3,00	10,00	6,14±0,09	3,00	10,00	6,70±0,16
Longueur feuille	26,00	77,00	42,21±0,45	35,00	71,00	53,36±0,53	34,00	83,00	52,16±1,05
Largeur feuille	10,00	40,00	21,76±0,39	10,00	45,00	24,64±0,38	10,00	45,00	27,27±0,64
Longueur gaine	55,00	160,00	111,76±1,06	70,00	199,00	113,51±1,32	70,00	155,00	115,64±1,78
Séparation	28,00	53,00	41,31±0,31	28,00	58,00	43,19±0,42	28,00	64,00	41,65±0,61
Longueur entrenœud	10,00	42,00	20,62±0,21	13,00	32,00	20,90±0,25	13,00	27,00	20,76±0,29
Nombre feuilles	6,00	11,00	7,98±0,06	6,00	11,00	8,95±0,06	6,00	13,00	9,42±0,13
Nombre total talles	0,00	19,00	1,64±0,15	0,00	1,00	0,04±0,01	0,00	5,00	0,50±0,10
Nbre talles product.	0,00	9,00	1,05±0,10	0,00	1,00	0,01±0,01	0,00	5,00	0,33±0,09
Nbre talles nodales	0,00	13,00	1,11±0,10	0,00	1,00	0,02±0,01	0,00	2,00	0,15±0,05
Longueur panicule	6,00	15,50	9,43±0,11	7,00	22,00	12,11±0,17	7,00	22,00	12,01±0,33
Grosseur panicule	12,81	32,53	22,13±0,24	15,26	38,77	26,53±0,29	18,36	37,69	25,91±0,40
Poids panicule	3,42	28,45	10,17±0,25	4,62	80,67	14,61±0,53	4,89	32,01	15,68±0,59
Poids 100 graines	0,13	1,94	1,23±0,02	0,41	1,84	0,93±0,02	0,18	1,64	1,03±0,03
Nbre épillets fertiles	1,00	3,00	1,43±0,03	1,00	2,00	1,53±0,04	1,00	2,00	1,55±0,05

Les panicules sont polymorphes: cylindriques (8,7%), coniques (11,3%), fusiformes (11,3%), massues (3,1%), bougies (1%), lancéolées (36,4%) et oblancéolées (28,2%). Elles sont poilues avec des soies courtes et de couleur rouge (59%), rouge pâle (6,7%) et violet (3,1%), et avec des extrémités foncées (3,1%). Les grains sont obovales, de couleur gris (80,5%) à gris foncé (18,5%) et de texture de l'albumen partiellement cornée. 15,4 % des plantes produisent des grains principalement farineux.

Les plantes du cultivar 8 sont grandes (\bar{x} = 198,28 cm) dont 30,2 % avec tallage abondant. Elles sont plus résistantes à la verse que les plantes des deux autres cultivars. Le potentiel en rendement de fourrage est élevé et la sénescence foliaire à maturité est lente.

Les graines sont grises, obovales (73,3%) et hexagonales (25,6%). La texture de l'albumen est variable: 4,7% des plantes sont à texture principalement cornée, 76,7% des plantes sont à texture partiellement cornée et 18,6% à texture farineuse.

Certaines plantes de ce cultivar se caractérisent aussi par des gaines velues et des nœuds pigmentés en violet (4,7%) et brun (15,1%).

6.2.4.1.1.5 Les cultivars de la région de Ben Guerden (cultivar 13)

L'activité principale des habitants de cette région est le pastoralisme. Ils disposent de grands parcours collectifs où l'élevage des camélidés et des ovins est très développé.

L'agriculture est une activité secondaire, et concerne principalement l'oléiculture et la culture irriguée sur puits de surface autour du village. Le choix des espèces est dicté par la qualité de l'eau qui est très salée.

Malgré un manque de main d'œuvre familiale (engagée pour le pastoralisme), la culture du mil prospère bien dans cette région et gagne de plus en plus de superficies au détriment d'autres cultures.

Le mil est cultivé sur des sols profonds (40 à 150 cm), reposant sur des encroûtements calcaires. La texture est sablo-limoneuse à sablo-argileuse en surface. La structure est peu développée et offre une grande porosité d'ensemble. Ils possèdent des degrés divers de gradients inversés de matière organique peu abondante et bien décomposée. Leur fragilité et sensibilité à l'érosion éolienne sont grandes.

Tableau 15: Moyennes et valeurs minimales et maximales des variables quantitatives du cultivar de la région de Ben Guerden: 13 (unités: voir tableau 9).

Caractères	Cultivar 13		
	Minimum	Maximum	Moyennes +/- SE
Longueur de la plante	135,00	295,00	196,85±1,01
Diamètre de la tige	3,00	11,00	6,21±0,05
Longueur de la feuille	23,00	72,00	45,55±0,34
Largeur de la feuille	10,00	50,00	26,67±0,24
Longueur de la gaine	60,00	170,00	113,23±0,66
Séparation	28,00	59,00	41,68±0,21
Longueur de l'entre-nœud	12,00	30,00	20,68±0,13
Nombre de feuilles	6,00	13,00	9,34±0,05
Nombre total de talles	0,00	9,00	0,79±0,06
Nombre de talles productives	0,00	8,00	0,32±0,03
Nombre de talles nodales	0,00	6,00	0,57±0,04
Longueur de la panicule	6,00	20,00	11,34±0,09
Grosseur de la panicule	12,56	39,29	25,61±0,16
Poids de la panicule	5,24	45,95	15,69±0,24
Poids de 100 graines	0,51	1,87	1,18±0,01
Nombre d'épillets fertiles	1,00	4,00	1,61±0,02

Le cultivar 13, prélevé dans cette région est caractérisé par des plantes de taille très élevée avec un faible tallage, d'un bon aspect général et d'un potentiel de rendement en fourrage élevé. Ces plantes sont sensibles à la verse (49,4% ont versé). La sénescence foliaire à maturité est lente.

Les panicules sont morphologiquement hétérogènes, principalement cylindriques (29,1%), oblancéolées (28,1%) et lancéolées (20,5%). Elles sont souvent poilues, avec des soies rouges et courtes. Les grains sont obovales, gris avec une texture de l'albumen partiellement cornée. Ce cultivar 13 se distingue par des plantes à nœuds pigmentés en violet et brun, des gaines peu velues et par la saveur sucrée du jus des tiges de quelques plantes (7,5%).

6.2.4.1.1.6 Conclusion

La caractérisation des plantes cultivées dans les mêmes conditions, montre que des gradients morphologiques analogues peuvent être observés pour des caractères

tels que la forme et la dimension des panicules, la forme et la couleur des grains et la longueur des plantes.

D'une façon générale, les grands types variétaux restent significativement distincts bien que très souvent leurs aires de culture se juxtaposent ou se recouvrent. Ce paradoxe peut s'expliquer par le choix des cultivateurs qui ne retiennent pour la semence, parmi les différentes populations cultivées, que les panicules correspondant aux types variétaux qu'ils veulent maintenir et auxquels ils restent attachées.

Concernant le nombre de panicules productives par plante, il est variable d'un cultivar à l'autre et va de 1 à 9. La sénescence foliaire à maturité et le nombre de feuilles sont stables pour les cultivars à vocation fourragère, mais la sénescence sévère des plantes a touché les cultivars qui sont cultivés pour la production de grains et pailles.

6.2.4.1.2 L'analyse de variance (ANOVA)

Nous avons adopté, lors de notre étude, le modèle d'analyse de variance à un seul facteur de classification (effet population), pour essayer de séparer dans la variabilité totale observée celle due aux facteurs inter-populations de celle due aux facteurs environnementaux et génétiques intra-population (variation résiduelle).

Le programme utilisé pour cette analyse est le programme ANOVA (SPSS). Le modèle d'analyse de variance à un seul facteur de classification est présenté dans le tableau 16.

Tableau 16: Modèle d'analyse de variance à un seul facteur

Origine de la variation	Somme des carrés des écarts: SCE	d.d.1	Carrés moyens=CM	F. Calculé
Effet population	(1) = SCE _p $\sum_{i=1} \frac{(\sum_{ij} x_{ij})^2}{n_i} - \frac{(\sum_{ij} x_{ij})^2}{N}$	P-1	$\frac{SCE_p}{P-1} = CM_1$	$\frac{CM_1}{CM_2}$
Effet résiduel	(2) = SCE _r $\sum_{i,j} (x_{ij}^2) - \sum_{i=1} \frac{(\sum_{ij} x_{ij})^2}{n_i}$	N-p	$\frac{SCE_r}{N-p} = CM_2$	
Effet total	(3) = SCE _t $\sum_{i,j} (x_{ij}^2) - \frac{1}{N} (\sum_{ij} x_{ij})^2$	N-1		

Avec X_{ij} = mesure relative au caractère donné pour le $j^{\text{ème}}$ individu de la population i .

P = nombre total des populations (cultivars)

N = nombre total des individus dans l'ensemble des P populations

d.d.l = nombre de degrés de liberté, si nous avons p populations l'effet sera testé ($p - 1$) avec $(N - 1)$ degrés de liberté au total, et $(N - p)$ degrés de liberté pour l'effet résiduel.

Il s'agit de calculer la valeur F_{cal} (F calculé) et de voir si elle ne dépasse pas la valeur seuil fixée F_{th} (F théorique). Deux cas peuvent se présenter:

1^{er} cas: si F_{cal} est inférieur à $F_{\text{th } 5\%}$, le test F est dit non significatif (NS), et l'hypothèse de l'homogénéité des moyennes n'est pas rejetée. Les cultivars sont alors homogènes pour le caractère considéré;

2^{ème} cas: F_{cal} dépasse le F_{th} , le test F est significatif 'S' ou hautement significatif (HS) respectivement pour les $F_{\text{th } 5\%}$ et $F_{\text{th } 1\%}$. Dans ce cas, au moins un cultivar est différent d'un autre.

Dans les deux derniers cas, l'hypothèse d'homogénéité des moyennes n'est pas acceptée: une moyenne au moins est différente d'une autre. Cette situation nous permet de poursuivre l'interprétation statistique des résultats par une comparaison des moyennes deux à deux par le test de DUNCAN.

La variance génétique σ_g^2 est donnée par la relation (Baril & Perrin, 1994; Cilas, 1994b):

$$\sigma_g^2 = \frac{vb - vw}{\bar{n}} \quad (1)$$

vb= Carré moyen interpopulation 'CM₁'

vw= Carré moyen résiduel 'CM₂'

Le coefficient de corrélation r , première approche de l'héritabilité est égal à:

$$\frac{\sigma_g^2}{\sigma_R^2 + \sigma_g^2} \quad (2)$$

σ_g^2 : la variance génétique; et

σ_R^2 : la variance résiduelle.

Il représente la proportion de la variance phénotypique attribuée à la variance génétique. Ce coefficient est d'autant plus grand que la variance résiduelle est faible, et il tend vers la valeur 1 quand la variance génétique est élevée. Tableau 17 résume l'ensemble des résultats obtenus pour l'ensemble des cultivars de toutes les régions.

Les valeurs de F calculées démontrent que pour tous les caractères étudiés, les différences inter-cultivars sont hautement significatives. Les cultivars sont donc statistiquement différents. Ceci n'est pas étonnant, étant donné que d'une part, les

cultivars ont été choisis dans différentes régions, et que d'autre part, on a cherché à collecter la plus grande diversité.

Nous remarquons que pour certains caractères, F présente des valeurs élevées, par exemple: la longueur des plantes (F= 145,13), la longueur des feuilles (109,62), le nombre des feuilles (149,097), la longueur de la panicule (302,988) et le poids de la panicule (133,321). Il s'agit alors de caractères qui différencient le plus les cultivars des différentes régions.

Tableau 17: L'analyse de la variance à un critère de classification.

Variables	Origine de la variation	Somme des carrés des écarts: SCE	Nombre de degrés de liberté (d.d.)	Carrés moyens: CM	F. calculé	Sig.	Variation génétique	r = coefficient de corrélation	Moyenne générale	Minimum	Maximum
LONG	population	1745409,2	16,0	109088,1	145,1	0,00	323,5	0,301	197,9	59,0	314,0
	résiduel	4267797,9	5678,0	751,6							
DIA	population	2248,9	16,0	140,6	60,2	0,00	0,4	0,150	6,7	2,0	16,0
	résiduel	13257,2	5678,0	2,3							
LONGF	population	143173,0	16,0	8948,3	109,6	0,00	26,5	0,245	49,7	20,0	90,0
	résiduel	463461,9	5678,0	81,6							
LARGF	population	20869,5	16,0	1304,3	35,5	0,00	3,8	0,093	26,4	10,0	60,0
	résiduel	208540,0	5678,0	36,7							
LONGG	population	198931,7	16,0	12433,2	41,8	0,00	36,2	0,109	118,7	55,0	210,0
	résiduel	1688373,4	5678,0	297,4							
SEPA	population	18830,6	16,0	1176,9	32,7	0,00	3,4	0,086	42,4	4,0	92,0
	résiduel	204609,3	5678,0	36,0							
LONGEN	population	4327,2	16,0	270,5	23,4	0,00	0,8	0,063	20,9	3,0	42,0
	résiduel	65611,7	5678,0	11,6							
NOMBF	population	3051,4	16,0	190,7	149,1	0,00	0,6	0,307	9,2	4,0	13,0
	résiduel	7262,8	5678,0	1,3							
DISTEC	population	13206,0	16,0	825,4	37,4	0,00	2,4	0,098	9,6	0,0	29,0
	résiduel	125335,8	5678,0	22,1							
LONGC	population	34874,0	16,0	2179,6	303,0	0,00	6,5	0,474	12,5	6,0	34,0
	résiduel	40846,2	5678,0	7,2							
GROSC	population	25253,8	16,0	1578,4	81,8	0,00	4,7	0,194	27,0	10,6	47,9
	résiduel	109614,7	5678,0	19,3							
POIDSC	population	113580,3	16,0	7098,8	133,3	0,00	21,0	0,283	18,1	1,3	80,7
	résiduel	302327,9	5678,0	53,2							
POIDSG	population	45,1	16,0	2,8	38,6	0,00	0,0	0,101	1,2	0,1	2,0
	résiduel	414,7	5678,0	0,1							
NOMBE	population	93,2	16,0	5,8	22,7	0,00	0,0	0,061	1,7	1,0	4,0
	résiduel	1459,6	5678,0	0,3							

En outre, le coefficient de corrélation est sensiblement élevé pour les caractères longueur de la plante (0,30), longueur de feuilles (0,24), nombre de feuilles (0,30), longueur de la panicule (0,47) et poids de la panicule (0,28). Ce sont donc des caractères présentant une plus grande héritabilité que les autres caractères morphologiques.

6.2.4.2. Analyse conjointe des caractères

6.2.4.2.1 Comparaison des moyennes et classification hiérarchique

Pour estimer la ressemblance entre les cultivars, nous avons adopté la méthode de Duncan qui permet de chercher des groupes de cultivars homogènes, en considérant les caractères pour lesquels les valeurs de F se sont avérées significatives.

Le test Duncan, procédure de comparaisons multiples, permet de comparer toutes les paires de moyennes, en contrôlant le risque alpha (α) général à un niveau défini. C'est une procédure par étape, reposant sur une '*Studentized range distribution*'. Bien qu'elle ne fournisse pas d'estimation d'intervalles pour la différence entre chaque palier de moyennes, cette procédure indique quelles moyennes sont significativement différentes les unes des autres (Dagnelie, 1965; Martin, 1971; Bar-Hen, 2001ab; Morin & Findlay, 2001).

Pour un caractère donné, les moyennes des cultivars sont comparées par le test Duncan à 5%. Les résultats de ces tests ont été rassemblés en annexe 3. Plusieurs constatations découlent de l'analyse des tableaux en annexe 3. Tout d'abord, nous remarquons plusieurs types de chevauchements dans le regroupement des cultivars, en particulier pour la hauteur de la plante, la largeur de la feuille, la longueur de la gaine et de l'entre-nœud, le nombre de talles et la grosseur des panicules.

Pour la majorité des caractères, les cultivars 5, 8, 12 et 16 sont groupés: les deux cultivars 12 et 16 appartiennent à la même région (Zarzis) alors que les cultivars 5 et 8 sont cultivés dans deux zones différentes mais voisines (Jerba et Boughrara). Ce regroupement se confirme bien par les récits des paysans de Boughrara qui considèrent que le mil '*djerbien*' est l'origine de leurs mils.

Pour les caractères hauteur de la plante, diamètre de la tige, largeur de la feuille, longueur de la gaine, nombre des feuilles, grosseur et poids de la panicule les cultivars 7, 14 et 15 sont toujours groupés. Ces cultivars se caractérisent par des plantes vigoureuses à longues tiges et feuilles larges. Ils sont cultivés dans les régions de

Dakhla et Bouhrara où les échanges génétiques sont très importants d'un cultivar à un autre voisin (pollinisation anémophile et entomophile) ou d'un paysan à un autre (échange de semences entre voisins et parents).

D'une façon générale, l'évaluation de la diversité morphologique varie selon les caractères considérés. Il serait donc intéressant d'étudier la structure de cette diversité en analysant conjointement l'ensemble des caractères.

Il s'agit alors d'une classification hiérarchique qui réunit l'ensemble des cultivars les plus semblables. Elle utilise les dissemblances ou distances entre objets lors de la formation des classes. À la première étape, lorsque chaque objet représente sa propre classe, les distances entre ces objets sont définies par la mesure de distance choisie. Ces distances peuvent être basées sur une dimension simple ou multiple (Pernès, 1984; Dagnelie, 1986; Charmet *et al.*, 1989-1991-1994 & 1995; Ozias-Akins *et al.*, 1998; Victoria-Feser, 1998).

La distance euclidienne est probablement le type de distance le plus couramment utilisé (Pernès, 1984; Victoria-Feser, 1998). Il s'agit simplement d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel. Elle se calcule selon:

$$\text{Distance (cultivar x, cultivar y)} = (\text{Somme (cultivar } x_i - \text{cultivar } y_i)^2)^{1/2} \quad (3)$$

Le dendrogramme résultant de la classification hiérarchique des 18 cultivars (distances euclidiennes sur les moyennes des caractères étudiés) montre quatre groupes de cultivars qui s'individualisent avec notamment un groupe constitué par le cultivar 9 uniquement:

- le groupe (I) réunit les cultivars 10, 11, 12 et 17 (fig. 41) qui se distinguent principalement par la longueur des plantes. Ces cultivars proviennent des régions de Dakhla (10 et 11) et Zarzis (12 et 17) où la paille du mil est recherchée pour la construction des huttes et parasols (fig. 3). En effet, le mil à paille est très cultivé dans la région de Dakhla pour la production de grains et de paille qui sert pour la construction des huttes. Les tiges, après effeuillage et séchage, sont réunies en nattes par des ficelles et servant pour la couverture de la charpente de la hutte ou bien elles sont vendues aux locateurs de cabanes sur la plage de Bouhrara. À Zarzis, la paille de mil sert aussi à la confection de parasols, d'ombrelles et de brise-vent inerte qui sont appréciés par les vacanciers étrangers, car ils sont des produits traditionnels, biologiques (facilement biodégradables) et non polluants;
- le groupe (II) est constitué par les cultivars 4, 5, 7, 8, 13, 14, 15, 16 et 18.

L'observation de ces cultivars montre qu'il existe un certain nombre de caractères auxquels les agriculteurs ont donné plus d'importance lors de leur sélection des plantes à cultiver. Ces plantes se distinguent par un nombre de talles élevé, des feuilles longues et larges, et des grains lourds.

Les cultivars 14, 15 et 18 forment un sous-groupe caractérisé par des plantes avec un nombre de talles et un poids de grains supérieurs à ceux des autres cultivars du même groupe.

Le deuxième sous-groupe comprend les autres cultivars qui sont aussi à plantes vigoureuses, mais elles sont différentes par la longueur et la largeur des feuilles. En effet, les deux sous-groupes réunissent des cultivars caractérisés par des plantes à potentiel de rendement en fourrage élevé.

On a constaté que les agriculteurs des régions Dakhla et Zarzis ont joué sur le nombre de talles, et par conséquent, le nombre de feuilles pour sélectionner des plantes vigoureuses. Par contre, les agriculteurs des autres régions ont préféré les plantes à feuilles longues et larges comme cultivars fourragers (fig. 44); et

- le groupe (IV) comprend les cultivars 1, 2, 3 et 6 qui sont collectés de trois régions voisines (Jerba, Edakhla et Boughrara) où la culture du mil associée aux oliviers est plus développée (fig. 44).

Suite aux années de sécheresse qu'a connu le sud tunisien et le dessèchement des arbres fruitiers, l'association du mil aux oliviers s'est développée. Ceci a permis de sauver plusieurs milliers d'oliviers qui ont profité de cette association leur apportant de l'eau et des fertilisants (fig. 7).

Malgré les résultats encourageants obtenus par l'utilisation des anciens cultivars, des problèmes ont submergé:

- la concurrence en lumière entre oliviers et plantes du mil (fig. 42);
- la verse des plantes du mil due aux étiolements;
- le développement de maladies cryptogamiques (manque d'aération et augmentation de l'humidité); et
- les travaux d'entretien (irrigation, désherbage, épandage d'engrais, traitement chimique, récolte, etc.) qui deviennent plus compliqués surtout après une verse des plantes (fig. 43).

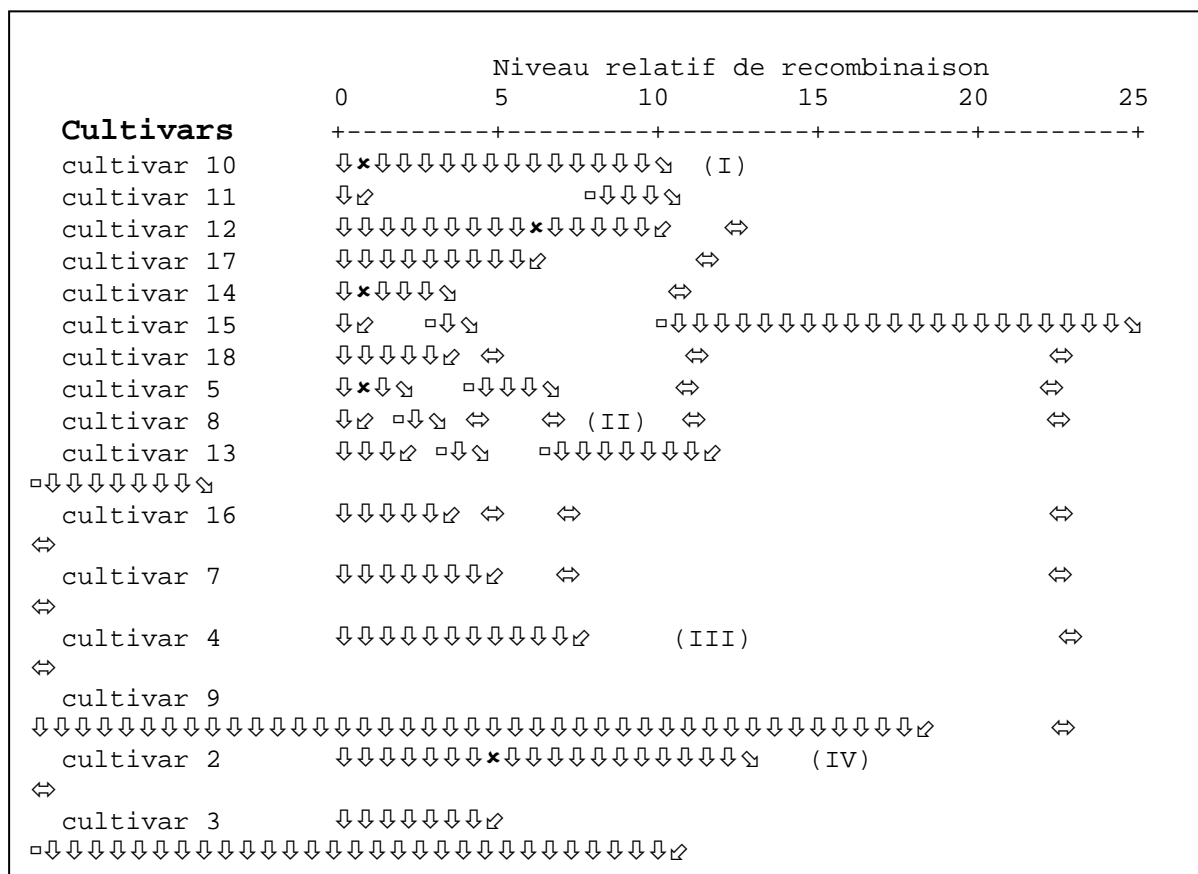


Figure 41: Dendrogramme résultant de la classification hiérarchique de 18 cultivars étudiés (distances euclidiennes sur les moyennes des caractères)



Figure 42: Concurrence en lumière entre olivier et mil



Figure 43: Des plantes de mil versées

Pour palier à ces problèmes, les agriculteurs cherchent des plantes naines pour les associer aux oliviers. De ce fait, de nouveaux cultivars ont été sélectionnés en

choisissant des plantes productives en grains et plus petites de tailles. Ces cultivars peu nombreux sont très recherchés actuellement par les oléiculteurs d'autres régions.

La comparaison des moyennes et la classification hiérarchique ont permis de classer les cultivars entre eux et de construire un dendrogramme donnant les distances euclidiennes des moyennes des caractères étudiés. Il a reparti les cultivars en trois principaux groupes. Les résultats obtenus montrent que chaque groupe a réuni les cultivars les plus semblables choisis par les paysans pour répondre à leurs besoins. On peut facilement distinguer les cultivars sélectionnés par les oléiculteurs (groupe IV) de ceux des éleveurs (groupe III), toutes origines confondues. Donc, les besoins culturaux ont beaucoup influencé les choix des plantes. Ceci permet de penser que les cultivars ainsi groupés ont vraisemblablement des génotypes voisins, au moins pour les caractéristiques étudiées.

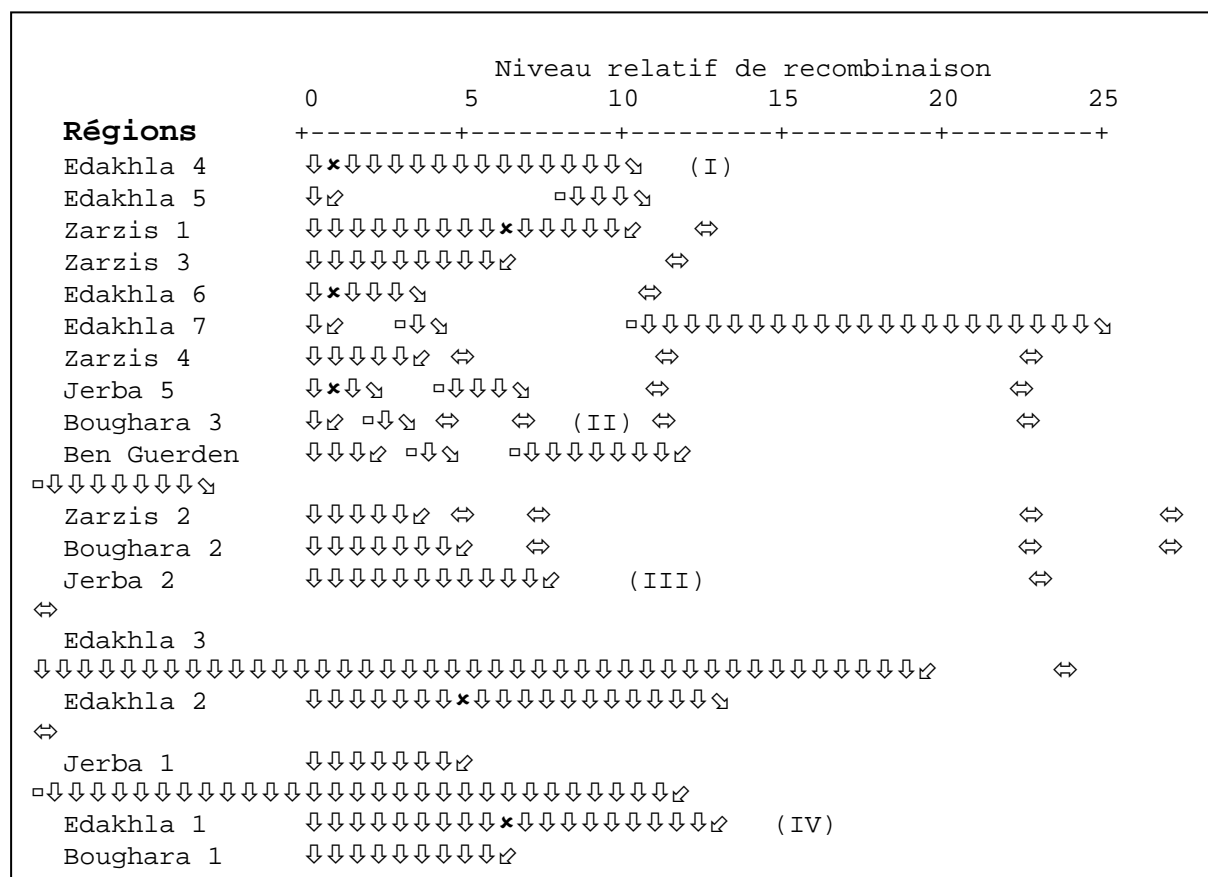


Figure 44: Dendrogramme résultant de la classification hiérarchique des origines des cultivars étudiés (distances euclidiennes sur les moyennes des variables)

En outre, on a remarqué dans le groupe (III) que les paysans ont joué différemment sur les caractères pour la sélection des plantes fourragères. Certains ont

préférentiellement augmenter le nombre de feuilles en sélectionnant des plantes qui tallent beaucoup alors que d'autres ont joué sur la surface foliaire en choisissant des plantes à feuilles plus longues et larges.

On peut aussi signaler que l'association de la culture du mil aux oliviers (plus développée ces dernières années) a poussé les paysans à modifier les anciens cultivars pour qu'ils puissent mieux répondre à leurs besoins (diminuant les problèmes résultant de cette association déjà citée précédemment).

La présentation synthétique d'un grand ensemble de données résultant de l'étude de plusieurs caractères quantitatifs ou qualitatifs sur une population n'est pas facile. Les procédés classiques de la statistique descriptive à une dimension permettent de résumer l'information recueillie sur chaque caractère (variable) pris isolément (paragraphe précédent). En revanche, ils ne permettent pas de décrire l'information globale dont on dispose quand on considère les caractères étudiés dans leur ensemble. Les inter-relations entre les caractères et leurs effets sur la structuration de la population risquent alors d'échapper à l'utilisateur. L'analyse en Composantes Principales (ACP) et l'Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) ont pour but de révéler ces inter-relations entre caractères et de proposer une structure de la population (Dagnelie, 1986; Jambo, 1989; Charmet *et al.*, 1990; Victoria-Feser, 1998).

6.2.4.2.2 Analyses factorielles

Un des intérêts majeurs de ce type d'analyses est de fournir une méthode de représentation d'une population décrite par un ensemble de caractères dont les modalités sont quantitatives (mesures continues; pour une ACP), ou qualitatives (pour une AFC).

6.2.4.2.2.1 L'analyse en composantes principales

Les données de bases sont des variables quantitatives. Elles sont hétérogènes du point de vue de leurs moyennes. Certaines variables sont comptées en centimètres, d'autres en millimètres. En analysant ces données brutes, on ne verra apparaître que les effets dus aux mesures brutes, c'est-à-dire aux unités de mesure. En outre, ces variables sont non seulement hétérogènes quant à leurs moyennes, mais également quant à leur dispersion et leur nature (les unités de mesure sont exprimées en quantités non comparables: g, cm, etc.). Pour résoudre ce problème, on a transformé la matrice

des données. Chaque variable a ainsi été ramenée à un cadre commun de comparabilité: c'est-à-dire que les variables étaient de variance unité et de moyenne nulle. Le tableau est alors transformé en divisant chaque mesure d'une variable par l'écart type de la variable. Dans ce cas, la matrice à diagonaliser devient la matrice des coefficients de corrélation linéaire entre les variables et l'analyse est dite en composantes principales normées (Jambo, 1989; Victoria-Feser, 1998).

Cette analyse a pour but d'extraire l'essentiel de l'information contenue dans le tableau des données, et d'en fournir une représentation sous forme d'image facile à interpréter. Sa caractéristique est de construire de nouvelles variables synthétiques, qui constituent chacune une combinaison linéaire de quelques variables du départ. Elles sont donc les composantes principales qui déterminent les différents axes factoriels.

Les axes factoriels sont fondés sur le calcul des contributions des variables en mettant en jeu l'ensemble des points. Le nombre d'axes à retenir est le nombre d'axes à partir des quels le pourcentage cumulé de variance expliquée (P) est supérieur à une certaine valeur. Le nombre P peut être modulé en fonction du type de données. Dans notre cas on a pris par défaut $P \leq 63\%$.

Les 4 premiers axes ainsi calculés permettent de décrire plus que la moitié de la variabilité d'ensemble (Tableau 18). Au-delà du cinquième, l'inertie de chaque axe est inférieure à ce que représenterait chaque caractère pris individuellement.

Les pourcentages d'inertie des six premiers axes sont les suivants: axe 1= 20,40; axe 2= 15,87; axe 3= 10,87; axe 4= 8,70; axe 5= 6,59; axe 6= 6,08.

L'axe 6 avec seulement 6,086% de l'inertie globale a une contribution inférieure à celle d'un caractère unique (inertie globale/nombre de caractères = $100/16 = 6,25\%$).

Les 5 premiers axes expliquent 62,436 % de la variabilité globale. Les caractères qui contribuent le plus à la définition des axes sont la longueur et le diamètre de la plante, le nombre de talles et les caractéristiques de la panicule.

Le premier axe (long, dia, Nombf et longc), décrit approximativement l'aspect général des plantes (fig. 45). On appellera cette première composante axe du mil à paille.

Le deuxième axe décrit principalement des structures concernant le tallage des plantes. On appellera cette deuxième composante axe du mil à fourrage. Le troisième axe décrit principalement des structures concernant les panicules (poids et grosseur de l'épi, et nombre d'épillets fertiles). On peut donc le considérer comme étant l'axe du rendement où axe du mil à grain.

Tableau 18: Valeurs d'inertie absolue cumulées des axes de l'analyse en composantes principales

Facteurs	% d'inertie	% d'inertie cumulative
1	20,405	20,405
2	15,871	36,276
3	10,870	47,145
4	8,701	55,847
5	6,590	62,436
6	6,086	68,522
7	5,700	74,222
8	5,167	79,389
9	4,419	83,808
10	3,638	87,446
11	3,283	90,729
12	2,947	93,676
13	2,621	96,297
14	1,832	98,129
15	1,369	99,498
16	0,502	100,000

Tableau 19: Pourcentage d'inertie (λ) des 5 premiers axes et contribution des caractères dans chaque axe pour l'analyse en composantes principales

Caractères	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
	$\lambda = 20,4$	$\lambda = 15,8$	$\lambda = 10,8$	$\lambda = 8,7$	$\lambda = 6,5$
LONG*	0,675	-0,121	-0,551	-7,67E-03	-0,172
DIA	0,716	-1,54E-02	-0,103	-0,233	0,229
LONGF	0,427	-0,219	-0,258	-0,427	-0,198
LARGF	0,487	-0,109	6,17E-02	-0,362	0,177
LONGG	0,425	-9,06E-02	3,23E-02	-4,40E-02	0,723
LONGEN	0,352	2,39E-02	-0,541	0,355	0,306
NOMBF	0,516	-0,195	-0,234	-0,264	-0,374
NOMBT	0,298	0,902	0,133	-0,14	-4,73E-02
NOMBTP	0,264	0,808	0,17	-0,136	-1,73E-02
NOMBTN	0,235	0,84	3,48E-02	-3,88E-02	-6,85E-02
DISTEC	-1,58E-02	0,183	-0,272	0,279	-0,131
LONGC	0,503	-0,2	0,282	0,189	-0,312
GROSC	0,582	-0,207	0,451	0,286	-6,71E-02
POIDSC	0,618	-0,234	0,505	0,289	-8,98E-02
POIDSG	0,338	0,209	-8,11E-02	0,672	1,55E-02
NBRE	6,30E-02	-0,171	0,584	-0,238	0,107

(* abréviation voir tableau 9)

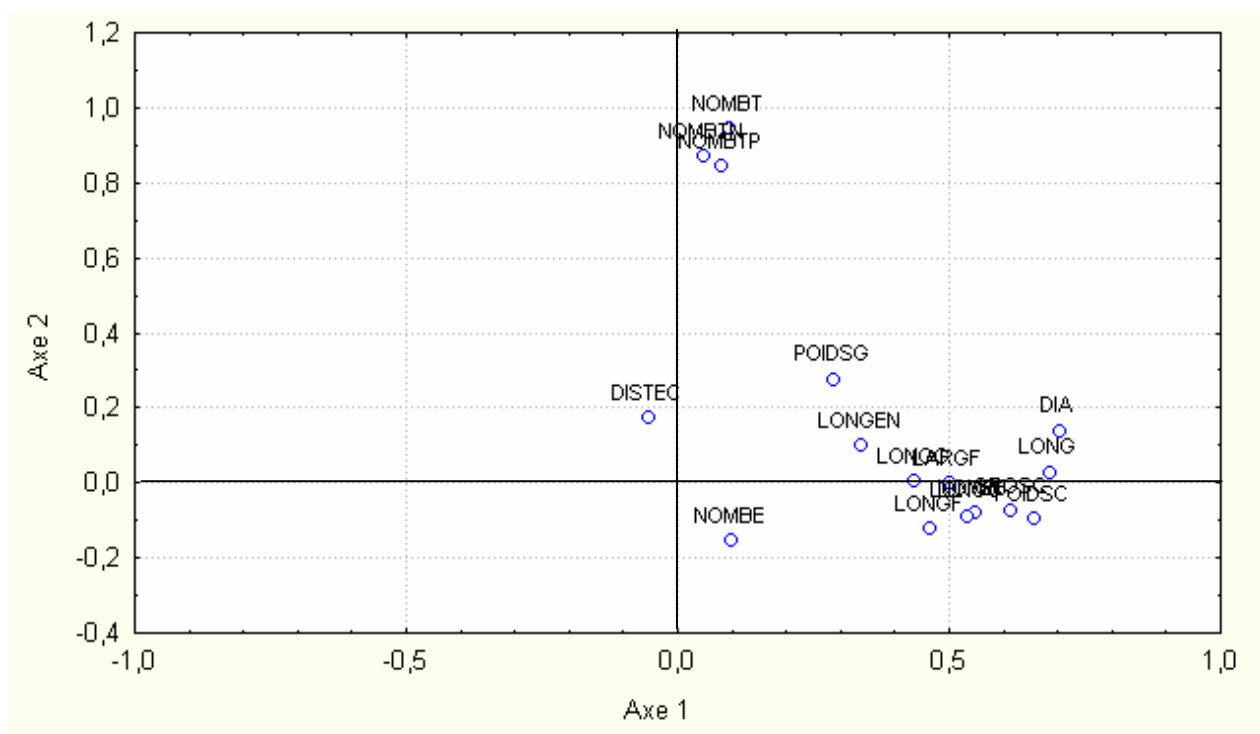


Figure 45: Représentation sur le plan des axes 1 et 2 des variables quantitatives dans l'analyse en composantes principales

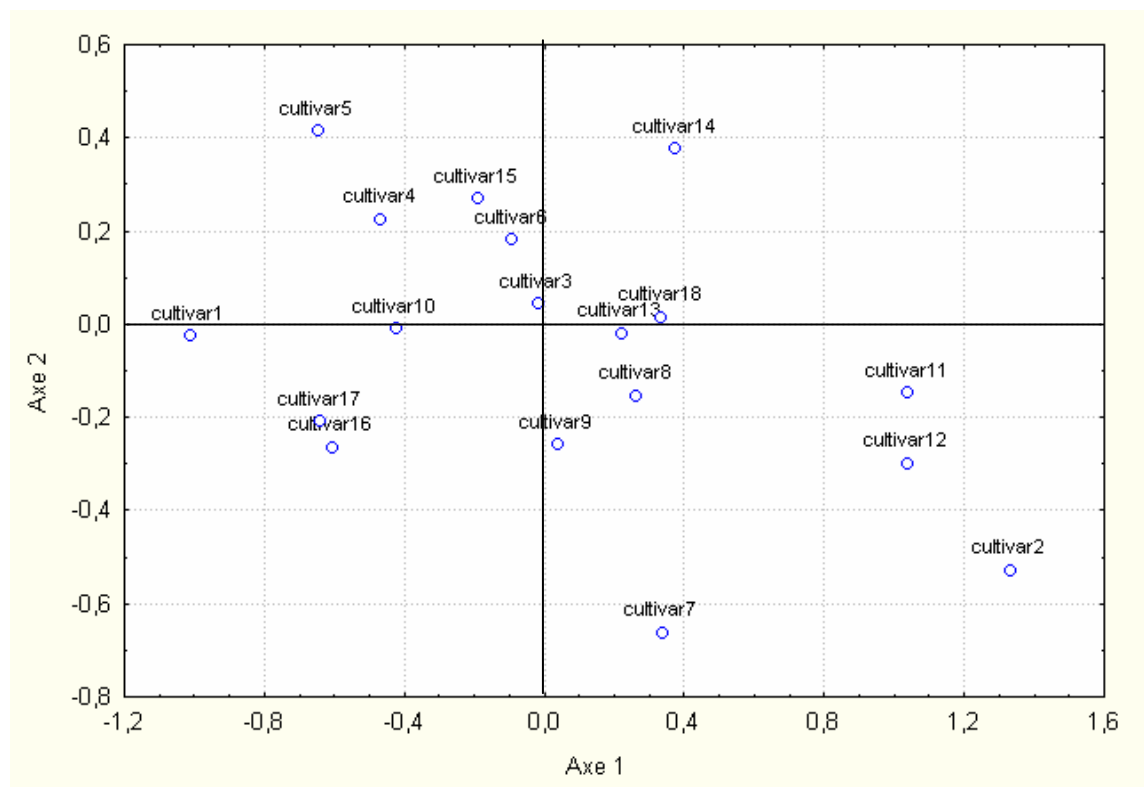


Figure 46: Représentation sur le plan des axes 1,2 des cultivars étudiés dans une analyse en composantes principales

La figure 46 donne la répartition simultanée des 18 cultivars qui ont été projetés dans le système d'axes 1, 2 (36,276% de la variabilité générale). Les cultivars n'ont pas contribué à la définition des axes puisqu'ils sont projetés en variables supplémentaires. Ils sont situés par les 3 premiers axes de façon conforme aux prévisions déduites de la signification des axes.

Cette représentation globale des cultivars souligne l'importance de certains caractères. Mais d'autres caractères peuvent être masqués du fait de leurs corrélations avec les facteurs les plus déterminants de l'analyse en composantes principales. D'où l'importance de l'analyse factorielle des correspondances ci-dessous.

6.2.4.2.2.2 L'analyse factorielle des correspondances.

Le principe de l'analyse factorielle est de réaliser:

- un recodage des données; et
- une simplification des données par ajustement matriciel. En bref, il s'agit d'obtenir, dans un tableau plus synthétique, un résumé de ce qui est contenu dans le tableau initial. Ou encore, on cherche à remplacer un grand nombre de variables par un plus petit nombre de variables explicatives que l'on appelle des facteurs.

Les caractères observés ont été recensés et codés comme indiqué dans le tableau 20.

Le codage des caractères quantitatifs permet d'intégrer les mesures et les observations qualitatives à l'aide des méthodes d'analyse des correspondances. Les pourcentages d'inertie (%) des trois premiers axes sont les suivants: axe 1 = 43,47; axe 2 = 15,04; axe 3 = 12,14 (pour le reste des axes, voir tableau 20)

Les caractères qui contribuent le plus à la définition des axes sont la longueur et le diamètre de la tige pour l'axe 1, le nombre de talles et le nombre de feuilles pour l'axe 2, et la grosseur et la longueur de la panicule pour l'axe 3.

La tendance générale observée ne diffère pas sensiblement de ce que l'on avait observé au travers l'analyse en composantes principales, mais bien avec les groupes des dendrogrammes. Certaines remarques peuvent être faites quant à l'apport des caractères qualitatifs.

Tableau 20: Pourcentage d'inertie des axes de l'analyse factorielle des correspondances

Axes	% d'inertie	% d'inertie cumulative
1	43,47	43,47
2	15,04	58,50
3	12,14	70,65
4	5,03	75,67
5	2,92	78,60
6	2,44	81,04
7	2,36	83,39
8	2,05	85,44
9	1,66	87,10
10	1,51	88,60
11	1,41	90,02
12	1,39	91,41
13	1,26	92,67
14	1,11	93,78
15	1,04	94,82
16	0,99	95,81
17	0,88	96,69
18	0,69	97,38
19	0,64	98,02
20	0,57	98,59
21	0,53	99,11
22	0,41	99,53
23	0,39	99,92
24	0,08	100,00

Le graphique de la figure 47 montre la disposition des variables étudiées. On peut être tenté de voir au travers de cette représentation trois noyaux avec quelques éléments de transition.

L'axe 1 représente l'aspect général de la plante et les caractéristiques de la panicule avec un rôle important joué par la longueur de l'entre-nœud, le diamètre, la verse, le poids des panicules, le poids des grains et l'aspect général des plantes.

L'axe 2 exprime surtout le potentiel de rendement en fourrage (nombre de talles et feuilles).

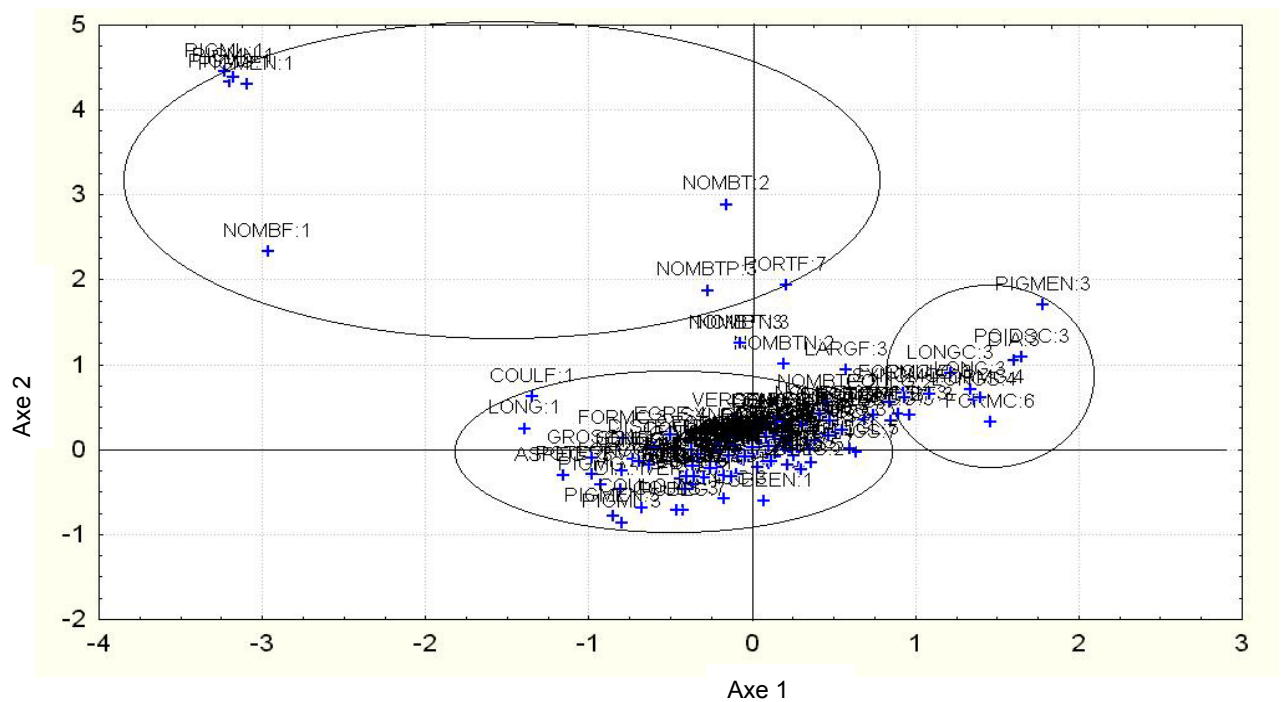


Figure 47: La dispersion des variables quantitatives et qualitatives sur le plan des axes 1 et 2 dans l'analyse des correspondances

L'analyse des correspondances rend bien compte de l'impression visuelle d'ensemble donnée par les cultivars.

Les résultats obtenus par les analyses en composantes principales et des correspondances sont conformes à ceux obtenus par la classification hiérarchique quant à la description des phénotypes des différents cultivars.

6.2.4.2.2.3 Conclusion

L'étude de la variabilité génétique des cultivars de mil provenant des régions arides tunisiennes, d'une part montre une variabilité phénotypique importante pour la majorité des caractères étudiés. D'autre part, les cultivars se regroupent très peu suivant les origines géographique ou écologique, mais plutôt suivant les buts culturelles 'secondaires' poursuivis: paille, fourrage ou combinaison de la culture de mil avec l'oléiculture, toutes origines confondues. On peut en conclure que tous les cultivars se retrouvent à **un seul pool génétique**, éparpillé en 'cultivars' suivant les préférences (l'option, le choix, la sélection) des agriculteurs. Cette constatation donne une base solide à une double conclusion pratique:

- a) dans le but de **la sauvegarde de la biodiversité**, il semble plutôt indiqué de regrouper toutes les origines en une seule population à fécondation libre et maintenue comme telle dans sa région d'origine (voir chapitre 6.3); tandis que
- b) ce même pool peut servir comme **population de base** pour la recombinaison génétique, la production de nouveaux géniteurs et pour **une sélection de nouveaux 'cultivars'** suivant des techniques systématiques (voir chapitre 7).

6.3 La conservation de la biodiversité

Après avoir analysé et évalué les provenances collectées, nous allons maintenant examiner comment conserver le matériel végétal intéressant pour les travaux présents et futurs d'amélioration des plantes.

6.3.1 Introduction

Les problèmes posés par la conservation des ressources génétiques sont d'une grande variété et nombre d'entre eux sont loin d'être résolus (Bilquez, 1969 et 1974; Charrier *et al.*, 1984; Savidan *et al.*, 1984; Kumar & Appa Rao, 1987; Charrier, 1990; Christinck *et al.*, 2001).

D'abord au plan des objectifs à atteindre: doit-on s'en tenir au maintien de l'intégrité génétique ou recréer au contraire les conditions permettant de reproduire les mécanismes évolutifs naturels. Ensuite, au plan des stratégies possibles: optera-t-on pour une conservation centralisée et figée dans une grande 'banque de gènes' contenant le maximum de diversité génétique du complexe étudié ou pour une conservation dynamique dans plusieurs sites géographiques différents. Les études expérimentales en ce domaine sont très insuffisantes, certaines d'entre elles devant être conduites à long terme. Des progrès techniques déterminants ont été réalisés ces dernières années, mais on manque toujours des informations précises sur leurs applications à la conservation des ressources génétiques. Il faut aussi s'attendre à des découvertes en matière d'ingénierie génétique qui pourraient remettre en cause les choix actuels (Pernès *et al.*, 1980; Noirot *et al.*, 1993; El Gazzah & Chalabi, 1995).

6.3.2 Stratégie de conservation

La structure génétique du matériel végétal conservé se modifie dans le temps et dans l'espace selon les méthodes de conservation utilisées. Son évaluation peut être en partie prédite sur base de données théoriques et expérimentales de la génétique des populations.

Les dérives génétiques résultant de la conservation doivent être compatibles avec l'objectif de mettre à la disposition de l'améliorateur de plantes, en permanence des ressources génétiques utiles à la réalisation de ses objectifs de sélection (Kumar & Appa Rao, 1987; Engelmann, 1991; Hamon *et al.*, 1995; Riley, 1997).

Le groupement de populations représentatives des régions de l'aire de distribution du matériel végétal étudié dans une même collection installée en un lieu donné, accroît les pressions de sélection naturelle ainsi que les occasions d'hybridation. La structure génétique des plantes conservées en collection dans un nouvel environnement est déterminée par les différences climatiques, édaphiques ou biotiques avec leurs biotopes originaux, par la longueur du cycle et le mode de reproduction, par la compétition, les maladies et les soins techniques donnés à la culture (Pernès *et al.*, 1980; Aubertin *et al.*, 1996; Maurya, 1997).

Les collections multipliées par voie sexuée peuvent être entretenues soit sous forme *d'origines individualisées* maintenues en autofécondation ou en isolement, soit sous formes *d'un réservoir massal* reconduit en fécondation libre (Pernès *et al.*, 1980).

6.3.2.1 Collection d'origines individualisées

Cette méthode donne la possibilité d'étudier individuellement les composants d'un ensemble de populations, leurs caractéristiques morphologiques, physiologiques, génétiques, cytogénétiques, agronomiques et pathologiques d'intérêt direct pour le sélectionneur et tous les biologistes. Cette méthode de conservation des ressources génétiques est coûteuse en surface et en personnel, mais aisément applicable aux espèces autogames et facilite le choix du sélectionneur. Les difficultés peuvent être largement atténuées par la conservation des graines à long terme (encadré 3), ce qui restreint le nombre de cycles de multiplication et réduit l'érosion génétique qui peut devenir importante suite à des multiplications répétées.

Encadré 3: Aspects pratiques du stockage des graines à long terme (Pernès, 1984)

La solution adoptée par le laboratoire national japonais pour la conservation des ressources génétiques par stockage de graines est la suivante: séchage pour atteindre une teneur en eau de 4 à 6%, ensachage sous vide et stockage en chambre froide à -10° et -1°C. Cette méthode est grandement facilitée par l'emploi de sachets plastiques recouverts intérieurement par une couche de papier aluminium.

Le laboratoire national de stockage de graines de Fort Collins aux Etats-Unis utilise des chambres à air conditionné: stockage à 4°C avec une humidité relative de l'air de 32% et aussi à -12°C. Les containers ne sont pas scellés ce qui facilite les prises d'échantillons successives; il n'y a pas de risque de réhumidification dans cette atmosphère sèche. La sécurité de ce stockage réside dans la maintenance et la réparation immédiate en cas de panne des systèmes de climatisation.

Le jardin botanique royal de Kew (Angleterre) conserve les graines séchées à 35°C pendant 24 heures, puis dans des piluliers stockés en chambre froide à -10°C ou 2° à 5°C.

6.3.2.2 Réservoir massal

La conservation de plusieurs centaines de cultivars ou d'introductions par multiplication individualisée ne peut normalement pas être pratiquée, surtout pas pour les espèces allogames. Le maintien en autofécondation ou en croisement 'frère*sœur' des introductions de mil entraîne une perte de vigueur et de gènes, incompatible avec l'objet de la conservation du complexe d'espèce. D'où l'idée de créer une ou plusieurs populations regroupant la variabilité d'un ensemble d'origines différentes pollinisées artificiellement ou naturellement. Ce réservoir massal diffère des populations panmictiques et se rapporte aux populations composites. Sa valeur initiale dépend de la représentativité des origines par rapport à la variabilité globale du complexe d'espèces.

Dans ce système, la dérive génétique joue un rôle moins important que précédemment et la variabilité n'est pas libérée. Même si certains allèles atteignent des fréquences faibles, ils sont rarement perdus, d'autant que leur valeur sélective s'accroît souvent dans ce cas. On peut réduire le risque de perte d'allèles en plaçant le même réservoir massal dans différents environnements ou en le transférant successivement dans des milieux différents.

La conservation du matériel végétal en réservoir massal s'accompagne d'une adaptation à l'environnement conduisant à un complexe d'espèces coadaptées. Il apparaît plus homogène qu'en réalité; le passage par l'autofécondation est nécessaire pour libérer les gènes récessifs.

Le système de maintien de collections en réservoir massal assure une meilleure intégrité génétique avec des coûts réduits en surface et en main-d'œuvre par rapport au système des origines individualisées.

Ce système modifie les combinaisons de départ pour donner naissance à de nouvelles structures. Cette réorganisation peut être orientée dans des milieux différents (conservation dynamique). Les risques de pertes génétiques peuvent être limités dans ce système en le combinant avec la conservation à long terme des graines recueillies sur les premières générations de multiplication du réservoir massal, ce qui réduit le nombre de cycles de multiplications des plantes annuelles surtout.

Allard (1970, cité par Pernès, 1984) a proposé un système mixte tenant compte des avantages et des inconvénients respectifs de la conservation en 'lignée' et en 'réservoir massal': partir d'un grand nombre de lignées, puis, au fur et à mesure de l'obtention des informations, regrouper en réservoir massal les lignées les moins intéressantes ou à diversité restreinte. Cette conduite de la conservation associe préservation - évaluation - utilisation.

Quand il s'agit de gérer des populations de plantes allogames annuelles tel que le mil il faut constituer des populations réservoirs pas très nombreuses et d'effectifs importants. Ces populations réservoirs doivent présenter une certaine homogénéité qui permet d'assurer la pérennité d'un type variétal bien défini avec des caractéristiques phénologiques données tout en protégeant un polymorphisme sous-jacent important, ce que les cultures traditionnelles ont su nous transmettre à travers tous les cultivars cultivés.

Chapitre VII

7 Sélection variétale de mil à partir de types locaux des régions arides tunisiennes

7.1 Introduction

Le besoin d'augmenter la productivité des espèces cultivées est impératif, car les systèmes industriels de production agricole et horticole sont de plus en plus basés sur la sélection des variétés à hautes performances qui satisfont en tout premier lieu les exigences du marché. Ce mode de culture compromet la diversité génétique des espèces cultivées et conduit à la disparition inexorable de gènes qui pourraient encore jouer un rôle important au profit de l'homme. La conservation de populations locales et traditionnelles est aussi impérative, mais elle ne pourra avoir lieu sans l'intervention gouvernementale (subvention, recherche scientifique, etc.) et en dehors d'un environnement réglementé (Cilas, 1994ab; Beauval, 2001). La protection du patrimoine génétique des espèces cultivées est pour l'instant un sujet d'actualité. Les programmes nationaux et internationaux de conservation de la diversité des espèces cultivées se multiplient et de véritables banques de gènes se constituent un peu partout dans le monde.

Pendant des années, l'existence de ces problèmes a tourmenté les scientifiques, agents de développement, gouvernements et tous les autres intéressés en général, et en Tunisie en particulier, car tous sont partis prenants aux progrès de l'agriculture dans les régions arides et quand il s'agit de lutter contre l'érosion génétique.

À la fin des années' 90, cette préoccupation a stimulé la création d'une série de méthodes de recherche prometteuses pour la préservation et l'amélioration du patrimoine génétique des espèces cultivées. Rappelons que les chercheurs de l'IRA ont entamé une série de recherches sur le mil dont les premières années de travail ont été financées par le Secrétariat d'État à la Recherche Scientifique et à la Technologie avec comme objectifs:

- préservation et amélioration génétique des populations locales du mil;
- amélioration des techniques d'irrigation; et
- étude et amélioration des techniques de battage.

L'amélioration génétique du mil pour les régions arides est envisagée par L'IRA dans un double objectif:

- augmenter le rendement moyen par hectare en grains, paille et fourrage au seuil nécessaire pour permettre d'assurer la préservation des populations locales et la culture de cette espèce dans ces régions (le niveau faible et instable du rendement par unité d'effort compromet la culture du mil dans les régions arides tunisiennes); et
- faire du mil une culture capable de s'intégrer dans un système de culture intensive.

L'IRA a, dans cette perspective, entrepris une série d'actions qui portent sur la diffusion des semences sélectionnées à partir de populations locales.

Les efforts de recherche entrepris au cours des premières années de travail ont été dirigés en priorité vers l'étude de la variabilité génétique de toutes les populations cultivées dans les régions arides tunisiennes (première partie du présent travail). Il apparut toutefois que l'amélioration du mil pour ces régions nécessite un programme de sélection fondé sur les besoins des utilisateurs qui sont assez variables (voir 1.2) et différents en fonction du niveau de développement économique et des habitudes alimentaires. Ils tiennent compte des grands défis auxquels le pays doit faire face aujourd'hui, c'est-à-dire:

- produire plus pour subvenir aux besoins alimentaires des agriculteurs;
- développer des produits qualitativement adaptés aux besoins des consommateurs et éleveurs; et
- créer des variétés adaptées aux différentes conditions agricoles.

7.2 Problématique

Le mil est une plante peu exigeante, s'accommodant à des sols pauvres et secs. Cependant, il est peu productif, du moins dans l'état actuel de sa culture dans les régions arides tunisiennes. Il produit en moyenne 700 kg de grains par ha, ce qui est extrêmement peu, comparé surtout aux rendements obtenus en Asie et en Afrique en général, ou à celui des céréales cultivées dans les autres régions du pays (CRDA, 2003; FAO, 2003).

Pour arriver à maintenir la culture de cette espèce dans ces régions arides et lutter contre l'érosion génétique des populations locales, il sera nécessaire, selon de nombreux experts, d'augmenter le niveau actuel de production de cette culture. L'augmentation du rendement en grains par unité de surface constitue indiscutablement, dans toutes les régions où l'on cultive le mil, le problème le plus

important et le plus urgent à résoudre pour sauvegarder cette culture. Ceci à plus forte raison encore si l'on ambitionne un jour la culture intensive du mil, dans le cadre d'une agriculture de puits de surface durable, où le mil occuperait la place réservée à la principale céréale dans la rotation. Il sera très difficile, et dans de nombreux cas impossible (manque d'eau d'irrigation) voire même peu durable ou économiquement défendable d'atteindre un niveau élevé de production en augmentant seulement les superficies cultivées. La seule solution est donc d'augmenter le rendement. Cette augmentation, qui doit parallèlement permettre un développement durable (améliorer la productivité des plantes et des systèmes de production dans lesquels elles s'intègrent), ne sera possible que par la création continue de variétés plus productives et adaptées aux conditions locales de culture.

Malheureusement, des centaines de cultivateurs dans les régions arides tunisiennes, dont la plupart cultivent de petites parcelles dans des conditions d'exploitation instables et difficiles, n'ont nullement profité des fruits des percées majeures en agronomie, notamment de celles de la fameuse révolution verte se basant sur la sélection génétique des plantes. Aussi, l'adoption de nouvelles variétés (sélectionnées pour d'autres régions) de plantes par cette catégorie de cultivateurs demeure-t-elle incroyablement faible.

La nécessité d'utiliser les terres de façon plus productive entraîne des contraintes sévères au niveau de la possibilité de conserver des populations locales à la ferme (conservation *in situ*). D'autant plus que la conservation à la ferme est mal définie et nombreux sont ceux qui considèrent que la conservation à la ferme n'assure ni une conservation de la diversité génétique de façon fiable et/ou économique, ni un degré suffisant d'amélioration par unité de temps (Manicad, 1996; Bellon, 1997; Szabo', 1999).

Une augmentation de la production à l'hectare est possible soit par l'introduction directe de semences sélectionnées ailleurs, soit par une sélection à partir de matériel génétique local. Souvent, on choisit la première voie (comme pour la pastèque, le melon, la tomate, etc.) qui est la plus simple mais qui a un double inconvénient:

- perte rapide des génotypes locaux; et
- le fait que les variétés introduites sont souvent plus exigeantes en eau et engrais, et peu résistantes aux maladies (exigent des traitements phytosanitaires) et à la salinité des eaux d'irrigations. Souvent ces problèmes ne se présentent qu'après quelques années de cultures, au moment où la

biodiversité locale est définitivement perdue (on peut citer le cas de la pastèque, la tomate, etc.; Daaloul, 1998; Zouaghi *et al.*, 1998; Hamza, 2002).

Pour ces raisons, on a choisi pour le mil l'autre voie d'amélioration qui consiste à sélectionner des variétés plus productives à partir d'un matériel génétique local répondant mieux aux conditions locales extrêmes des régions arides tunisiennes.

7.3 Intérêts et limites des méthodes de sélection du mil

Il est nécessaire, si on veut mener à bien et à un prix raisonnable un programme de sélection, d'étudier les expériences antérieures menées sur l'espèce considérée. Il importe aussi d'accorder une attention particulière aux travaux de sélection menés dans des régions semblables. Il consiste à bien étudier les avantages et les inconvénients des schémas de sélection suivis pour répondre aux objectifs définis pour les conditions de la région visée, ici celle de la Tunisie aride.

Des progrès remarquables ont été réalisés au cours des dernières décennies en matière de la sélection du mil et de son amélioration variétale. Les résultats et les méthodes ont été largement diffusés par L'ORSTOM pour les travaux effectués en Afrique, ICRISAT pour l'Inde et la station de Tifton en Géorgie (EU) (Kumar & Appa Rao, 1987; Niangado *et al.*, 1987; Dave, 1987; Rai & Singh, 1987).

À travers l'analyse bibliographique, il est apparu une nette augmentation de l'intérêt porté essentiellement à l'augmentation des rendements du mil et aux résistances aux maladies. Les méthodes de sélection appliquées sont plus ou moins complexes selon les besoins. Cette complexité dépend à la fois des objectifs de la sélection, de la région ou l'écosystème considéré, et surtout du matériel génétique utilisé (population locale, lignées, matériel introduit...) (Bidingier *et al.*, 1987 & 2003; Fussell *et al.*, 1987; Kumar, 1987; De Rajat & Gautam, 1987).

Dans ce qui suit, il nous semble important dans un premier temps de rappeler rapidement quelques généralités sur les méthodes de sélection utilisées dans l'amélioration du mil et plus particulièrement sur les méthodes utilisées en Afrique et sur celles de l'amélioration des rendements de populations locales dont l'utilisation est relativement récente mais dont les premiers résultats ont été encourageants.

Notons qu'il n'est pas dans notre volonté ici de passer en revue toutes les différentes stratégies d'amélioration. Notre intention est plutôt de présenter, au travers

de quelques exemples, les différents types de sélection utilisés par les sélectionneurs du mil.

7.3.1 Les différentes stratégies d'amélioration du mil

Selon Bilquez (1957), Martin (1971), Demarly (1977) et Poehlman (1995), le sélectionneur dispose de différentes méthodes de travail dont le bon usage dépend à la fois:

- du mode de reproduction de la plante et de la façon dont celle-ci réagit vis-à-vis des différents systèmes d'autofécondation et de croisement;
- des buts à atteindre et qui peuvent être, soit d'homogénéiser une population donnée en fonction d'un caractère donné dont la valeur moyenne doit être conservée, soit de modifier au contraire la valeur moyenne d'un caractère donné ou de corriger un défaut de la plante;
- du degré de variabilité génétique interne dont font preuve les populations, et aussi de la diversité génétique qui existe entre elles;
- des réactions des caractères que l'on veut améliorer (effets additifs, effets de dominance ou effets d'épistasie); et en fin
- des conditions dans lesquelles le matériel amélioré peut être multiplié et mis à la disposition des agriculteurs.

Le mil est, du fait de sa protogynie, une plante chez laquelle les possibilités naturelles de fécondation croisée dominant largement celles d'autofécondation. Il est cependant possible de soumettre la plante à un régime de l'autofécondation exclusif et ceci durant plusieurs générations successives (Bilquez, 1969). Les effets produits par l'autogamie sont dans l'ensemble du même genre que ceux que l'on observe chez les autres espèces allogames. Pokhriyal *et al.* (1966, cités par Bilquez, 1969) ont par exemple trouvé, au cours de leur étude sur les effets produits par l'autogamie sur la variété du mil '*Pusa_Mati*', que bien qu'il y ait eu, après 1, 2 et 3 générations successives d'autofécondation, une baisse progressive des rendements moyens en grains de 19%, 25% et 33% calculé sur l'ensemble des lignées obtenues à chaque génération, il a quand-même été possible de récupérer, après 3 générations d'autofécondation, 4 descendances dont le rendement était aussi bon que celui de la variété d'origine. Ces résultats prouvent simplement qu'il y a chez le mil, ou du moins dans certaines populations de mil, une part importante de la variance attachée au rendement en graines de la plante qui est due à des effets additifs.

Murty *et al.* (1967, cités par Bilquez, 1969) pensent même que la création de nouvelles combinaisons génétiques stables peut être, comme le prouve l'exemple cité, un moyen efficace d'amélioration génétique du rendement en graines chez le mil. Il en résulte différentes stratégies possibles:

- exploiter au maximum cet effet d'hétérosis par la création des variétés hybrides; et/ou
- former des variétés qui sont des populations en pollinisation libre. Ces populations pouvant être basées sur:
 - un mélange de plantes sélectionnées pour leurs bonnes propriétés (sélection massale); et/ou
 - un mélange de descendances comparées entre elles (il s'agit alors d'une variété synthétique).

7.3.1.1 Variétés hybrides

Certains sélectionneurs considèrent la création d'hybrides F_1 comme la seule méthode qui puisse permettre d'aboutir à de très hauts rendements en grains chez le mil, parce qu'étant la seule qui puisse permettre d'utiliser au maximum l'effet d'hétérosis qui apparaît dans cette espèce.

Il n'y a pas de doute que l'on puisse trouver chez le mil des hybrides F_1 dont la production en graines l'emporte sur celle de leurs deux parents et aussi sur celle des populations d'où ces deux parents tirent leur origine. De nombreux exemples sont portés dans le tableau 21.

Le développement de lignées mâles stériles chez le mil par les chercheurs de la station de Tifton en Georgie '*Tif 13A*' et '*Tif 23A₁*' a permis d'initier une large utilisation commerciale d'hybrides dont la culture a été recommandée sur de vastes portions des territoires en Georgie (EU) et en Inde (Bilquez, 1969; Dave, 1987; Hanna, 1987; Rai & Singh, 1987; Dujardin & Hanna, 1989; Yadav, 1996).

Les différents résultats acquis chez le mil dans l'étude de l'effet hétérosis utilisé pour une plus grande production de graines conduisent à la conclusion que, si l'exploitation d'hybrides F_1 faits à partir de parents choisis pour leur bonne aptitude à la combinaison est un excellent moyen de parvenir à un rendement en graines élevé. Il paraît cependant souhaitable que les parents utilisés aient été dotés au préalable du maximum de gènes dominants complémentaires favorables pour les caractères qui

composent le rendement et dont la variation comporte une large part d'additivité (Bilquez, 1969; Kumar, 1987; Kumar & Appa Rao, 1987; Witcombe, 1988; Clément, 1997).

Tableau 21: Origines et performances de quelques variétés hybrides du mil

Hybrides	Origine et année	Performances	Références
HB ₃ = J104 * Tift 23A ₁	Inde (Jamnagar, 1968)	précoce et résistante à la sécheresse ; sensible aux attaques de mildiou (<i>Sclerospora graminicola</i>); rendement en grain: 1610 kg/ha (75 à 88% > aux rendements de cultivars locaux)	Dave, 1987
BJ ₁₀₄ = MS5141a *	Inde (Delhi, 1977)	précoce et résistante à la sécheresse; résistante au mildiou; et rendement en grain: 2110 kg/ha	Dave, 1987; Manga & Yadav, 1995
MBH 110= 2*PL2	Inde (Mohyco, 1981)	bien adaptée aux conditions de cultures des paysans; résistante au mildiou; rendement en grain: 2260 kg/ha	Dave, 1987; ICRISAT, 1996
ICMH 84814	Inde (centre de l'ICRISAT, 1985)	semblable à la variété BJ104, mais plus résistante aux maladies; rendement en grain: 2100 kg/ha	Singh <i>et al.</i> , (1987 & 1994); Jain <i>et al.</i> , 1991; Hash, 1994; Rai & Rao, 1998
MX001	Australie, 1974	précoce et plante vigoureuse; produit de bon fourrage	Douglas (1974, cité par FAO, 2003)
P99= <i>P. purpureum</i> * <i>P. americanum</i>	Uganda, 1979	excellent fourrage; riche en protéines (9,8% <i>crude protéine</i>); rendement en fourrage: 20726 kg/ha	FAO, 2003
HGM100= 'Tift90'D ₂ A ₁ E ₁ '*Tift8677'	EU (Georgie, centre de recherche de Tifton, 2000)	valeur nutritive élevée; se conserve bien par ensilage; rendement en grain: 3709,92 kg/ha	Hanna, (2002 & 2003); Teare <i>et al.</i> 1993; Utley <i>et al.</i> , 1995
FMH2	Canada (le sud de Québec, 1996)	bon fourrage; riche en protéines; rendement en fourrage 12000 kg/ha	Banks & Stewart, 2002
Tifleaf3	EU (Georgie, centre de recherche de Tifton, 2002)	qualité supérieure de fourrage; tolérance élevée à la sécheresse; résistante au charbon du mil (<i>Tolyposporium penicillariae</i>); rendement en fourrage considérable	Hill <i>et al.</i> , 1995; Hanna, 2003

7.3.1.2 Amélioration des populations en vue de la création de variétés hybrides

Les travaux faits sur le plan génétique pour tenter d'améliorer le rendement en grains des mils cultivés traditionnellement en Afrique ont consisté à tenter de relever le niveau du rendement moyen des populations locales par simple sélection de types plus performants à l'intérieur de celles-ci. L'amélioration a longtemps été basée sur la sélection massale. Son emploi a néanmoins été presque partout un échec (Niangado *et al.*, 1987). La raison d'après Bilquez (1969), était l'application de cette méthode à des

populations naturelles qui n'avaient pas toujours un degré de variabilité suffisant malgré les apparences, et surtout parce que l'amélioration s'est souvent faite sur base de caractères qui n'avaient pas un degré d'héritabilité suffisant.

Dans le passé, l'amélioration a été trop focalisée sur le rendement considéré comme un tout. Or on sait aujourd'hui que le rendement est un caractère qui a une héritabilité d'autant moins bonne qu'il entre dans sa variance une large part d'effets de dominance et d'épistasie qui ne sont pas fixables par hérédité (Bilquez, 1970).

L'échec de la sélection massale a amené les chercheurs en Afrique à utiliser des méthodes de sélection ayant prouvé leur succès dans d'autres régions (EU et l'Inde).

Le fait que le mil est une plante allogame, il paraît normal d'appliquer des méthodes faisant intervenir l'effet d'hétérosis. Plusieurs sortes d'hybrides ont ainsi été expérimentées (hybrides entre lignées autofécondées, hybrides entre lignées autofécondées et populations, hybrides entre populations améliorées par une sélection massale entreprise les années précédentes...) et principalement deux sortes de sélection ont été mises en place dans la plupart des pays africains comme le Mali, le Niger, le Sénégal, etc.:

- sélection récurrente simple; et
- sélection récurrente réciproque (encadré 4).

Pour arriver à des résultats intéressants, plusieurs schémas de sélection ont été développés pour l'obtention de souches de mil suffisamment homogènes d'une part et pour pouvoir les soumettre à des tests d'aptitudes spécifiques à la combinaison d'autre part.

La sélection récurrente apparaît comme la méthode la plus rationnelle pour améliorer un caractère quantitatif, ou polygénique, dans les variétés. Les recombinaisons résultant des intercroisements à chaque cycle de sélection permettent un progrès génétique à long terme avec une sélection efficace sur plusieurs caractères (Compton *et al.*, 1987; Rattunde *et al.*, 1989; Weltzien *et al.*, 1995; Bezançon *et al.*, 1997; Rai *et al.*, 1997).

La sélection récurrente avec test '*top cross*' a été employée dès 1961 au Sénégal, puis au Niger, au Mali et au Burkina (Niangado *et al.*, 1987). Cette méthode fondée sur une sélection sur la valeur additive est simple puisque la population elle-même est prise comme testeur: les plantes sélectionnées au sein de la population de départ sont pollinisées par l'ensemble de la population (il y'a un '*top cross*' avec la population). On obtient des familles dont les meilleures sont sélectionnées; les plantes mères de ces familles étant ensuite intercroisées pour constituer la génération suivante.

Parmi les nouvelles variétés ainsi créées, peu se sont montrées supérieures au témoin (cultivar local). C'est ainsi qu'il y'a eu recours à la sélection récurrente avec test sur descendance. Cette méthode est très efficace pour les caractères additifs et permet également de sélectionner ou de contre-sélectionner les allèles récessifs masqués par l'état hétérozygote: des individus choisis pour leur phénotype dans la population de départ sont alors autofécondés. Ce sont leurs descendance qui sont jugées sur leur valeur propre. Les meilleures familles sont croisées à la génération suivante pour donner la nouvelle population. Les nouvelles variétés ainsi créées ont présenté un net gain de productivité au Niger et au Burkina (Bilquez, 1969).

Encadré 4: Définition, principe, avantage et type de sélection récurrente (Martin, 1971; Demarly, 1977; Baudouin, 1994; Poehlman & Sleper, 1995)

Sélection récurrente: terme généralement employé en amélioration des populations.

1/ Définition: des méthodes développées à partir de 1940, d'une part par Jenkins (1935, cité par Demarly, 1977), d'autre part par Sprague (1952, cité par Demarly, 1977), sont caractérisées par des brassages cycliques dans le groupe génétique visé.

2/ Principes: c'est une méthode d'amélioration développée pour concentrer des gènes favorables dispersés sur un certain nombre d'individus. Elle consiste à mettre ensemble et à intercroiser des lignées pour favoriser les recombinaisons génétiques et obtenir un maximum d'hétérosis pour les caractères recherchés. Chaque cycle de sélection comporte trois étapes:

a/ production de descendance par autofécondation ou par toute autre méthode de croisement; b/ évaluation de ces descendance; c/ recombinaison des descendance sélectionnées. La sélection continue cycle après cycle, tant qu'une variabilité suffisante persiste. On obtient ainsi une population améliorée, que l'on peut qualifier de synthétique, et qui peut faire l'objet d'un nouveau cycle de sélection récurrente.

3/ Avantage de la méthode: sur la sélection massale, elle a l'avantage d'utiliser au mieux l'héritabilité existant dans la population par intercroisement de descendants issus d'individus à haute potentialité. Sur la sélection pedigree, elle a l'avantage, du fait des intercroisements, de restreindre les effets de l'autofécondation sur la réduction de la variabilité génétique.

Surtout utilisée pour le maïs, la sélection récurrente est valable pour d'autres plantes à pollinisation croisée (allogames).

4/ Types de sélection récurrente:

- sélection récurrente pour le phénotype. C'est la plus simple, se basant sur les phénotypes, elle ne convient qu'à des caractères hautement héréditaires;
- sélection récurrente pour l'aptitude générale à la combinaison. C'est l'autofécondation et hybridation avec un testeur (population locale) ayant une large base génétique;
- sélection récurrente pour l'aptitude spécifique à la combinaison. Elle diffère de la précédente par le choix du testeur, qui sera cette fois une lignée parfaitement fixée et dont la valeur a été prouvée;
- sélection récurrente réciproque. Cette méthode a été élaborée en 1949 par Comstock *et al.* (cités par Martin, 1971) Elle est pratiquée lorsque l'on fait une sélection récurrente entre deux populations génétiquement différentes avec pour objectif l'amélioration des deux populations pour leur aptitude à la combinaison aussi bien générale que particulière. La confrontation des deux populations peut être réalisée sous forme de 'top cross', le pool pollinique de la population A_0 fécondant quelques plantes femelles choisies dans B_0 et réciproquement. Le choix porte sur la valeur des descendance de ces top cross. Celles qui sont retenues, de part et d'autre, constituent en brassage panmictique les populations améliorées A_1 et B_1 du premier cycle. On engage alors un deuxième cycle.

Lorsqu'on travaille sur l'amélioration des populations locales, certains sélectionneurs pensent qu'il est peut être intéressant d'introduire des variétés et populations étrangères que ce soit d'autres régions de l'Afrique, de l'Inde ou des EU pour induire des effets recherchés d'hétérosis (Kumar, 1987; Ndoye & Ruparao, 1987; Nwasike, 1987; Béninga, 1993; Baril & Bergonzini, 1994de).

C'est ainsi que le mil américain mâle stérile 'Tift 23 A₁' a été introduit en Afrique et en Inde par les sélectionneurs du mil pour l'hybridation avec des populations locales (Bilquez, 1969; Dave, 1987; Hanna, 1987; Rai & Singh, 1987; Rai *et al.*, 1998ab; Dujardin & Hanna, 1989; Yadav, 1996).

7.3.2 Les limites des méthodes d'hybridations dans les pays en voie de développement

Quelle que soit la méthode utilisée pour la création de variétés hybrides, leur exploitation commerciale demeure toujours un problème à résoudre. En effet, cela exige que l'on produise et que l'on distribue chaque année aux cultivateurs la quantité de semences hybrides nécessaire à emblaver la totalité de leurs champs. C'est une opération qu'il n'est pas toujours facile de réaliser dans des pays en voie de développement où l'on est confronté souvent à une absence de toute organisation effective de multiplication et de distribution des semences améliorées (Bono *et al.*, 1978; Spencer & Sivakumar, 1987; Béninga, 1993).

Les travaux de sélection des hybrides de mil en Afrique se sont souvent révélés décevants, à l'exception de l'Afrique de l'Ouest. Ouendeba *et al.* (1993) ont ainsi montré à partir de cinq populations locales de mil que l'effet hétérosis l'augmentation de rendement varie entre 25% et 81% pour les dix combinaisons testées.

Bilquez (1970) rapporte pour le mil ce qui suit: 'bien que les méthodes faisant intervenir l'hybridation contrôlée pour l'exploitation de l'effet hétérosis eussent dû être appliquées tout naturellement sur cette plante allogame, elles furent jugées, en Afrique, trop prématurées. En effet, la technicité du paysannat local ne permettait pas d'envisager l'utilisation des hybrides, surtout dans des sols beaucoup trop pauvres qui ne convenaient pas à des hybrides d'exprimer toute leur potentialité'.

Sur base du raisonnement et des arguments donnés plus haut, il fut donc décidé de mettre au point une sélection massale complexe. Cette dernière, encore utilisée, a subi de nombreuses modifications au fur et à mesure que des sélectionneurs se succédaient pour l'amélioration de cette espèce en introduisant d'autres techniques de

sélection (Bono & Leclercq, 1963; Bilquez, 1970; Rattunde *et al.*, 1989; Bezançon *et al.*, 1997).

L'approche utilisée dans la présente étude a été conçue de telle manière à ce qu'elle produise des variétés améliorées qui répondent aux besoins des paysans sans limiter la diffusion des semences améliorées.

Il existe des exemples de variétés hybrides de mil en Afrique qui sont diffusées et acceptées par les paysans, mais à une échelle trop limitée pour que cela ait des répercussions sur la production globale. Ce faible taux d'acceptation trouve au moins trois explications selon Bezançon *et al.* (1997):

- les variétés améliorées ne répondent pas toujours aux souhaits des paysans;
- les techniques culturales traditionnelles ne permettent pas aux variétés sélectionnées d'atteindre leur plein potentiel; et
- les services de multiplication et/ou de diffusion des semences font défaut.

Les facteurs qui limitent cette bonne diffusion sont le coût élevé des semences, et le manque de personnel qualifié. Par conséquent, la diffusion est freinée par des coûts élevés d'une part et parce qu'elle n'est pas systématiquement accompagnée de la vulgarisation de l'information nécessaire auprès des paysans, d'autre part. De plus, ces paysans ne semblent pas toujours en exprimer la demande et/ou ne sont pas impliqués dans l'amélioration (Trouche *et al.*, 2001). Toutes ces conditions ont amené Bilquez (1970) à conclure que la création des hybrides F₁ de mil en Afrique était prématurée.

7.3.3 Méthodes de sélection associant les paysans aux programmes d'améliorations

Quelle que soit la méthode utilisée pour créer une variété, il est nécessaire d'accorder une attention particulière aux besoins des utilisateurs qui sont souvent assez variables dans les pays en voie de développement, une même variété devant servir plusieurs buts. Selon la plupart de sélectionneurs, Il est important d'associer les paysans aux programmes de sélection pour qu'ils puissent participer à la définition des critères d'amélioration et l'évaluation des nouvelles variétés issues des programmes d'amélioration (Matlon, 1987; Witcombe, 1997; Hocde *et al.*, 2001; Sêkloka *et al.*, 2001; Vom Brocke *et al.*, 2001; Harris, 2002; Gurung, 2003).

En effet, bien souvent, des caractéristiques importantes à leurs yeux, comme la production fourragère (exemple des paysans de la région de Boughrara (voir

6.2.4.1.1.4)), échappent au sélectionneur qui produit des variétés pour la production de grains (Gallais, 2001; Beauval, 2001; Temple *et al.*, 2001; Lançon, 2001).

Avant d'initier son programme d'amélioration du mil en Afrique de l'Ouest, l'ICRISAT avait réalisé une enquête sur les préférences des paysans. Elle a révélé que ceux-ci souhaitent disposer de variétés d'environ 2,5 mètres de hauteur, qui donnent de nombreuses talles productives et de longues panicules avec de gros grains, sur un cycle inférieur ou égal à cent jours. Mais les préférences des paysans varient d'une région à l'autre, d'où l'intérêt d'une évaluation multilocale des variétés (Clément-Demange *et al.*, 1994ab; Cooke, 1995; Bezançon *et al.*, 1997).

En 1994 et dans le cadre du Réseau de l'Afrique de l'Ouest et du Centre Africain de Recherche sur le Mil, un projet a été lancé afin d'étudier les conditions socio-économiques dans lesquelles sont mis en œuvre les systèmes de culture à base de mil. L'exécution de ce projet était essentiellement fondée sur la réalisation d'enquêtes, et d'expérimentation en station de recherche et en milieu paysan, pour l'évaluation économique des techniques culturales, l'étude de la pérennité de certains systèmes de culture à base de mil, l'amélioration de la productivité du mil et la formation des paysans (Bezançon *et al.*, 1997).

Le travail d'amélioration du mil en Afrique a été orienté vers la création de populations synthétiques qui, même si elles n'ont pas un rendement aussi élevé que celui des hybrides simples au cours de leur première année de culture, ont du moins l'avantage sur ceux-ci de continuer à manifester des rendements suffisamment élevés au cours de deux ou trois générations suivantes, et qu'on doive prévoir de faire le renouvellement des semences seulement tous les 3 ou 4 ans.

Les échecs des hybrides en Afrique sont en partie attribuables à l'insuffisance de concertation entre sélectionneurs et utilisateurs paysans. La sélection participative est une réponse à cette critique: elle consiste à associer plus étroitement le petit agriculteur des zones marginales à la création du matériel génétique nouveau (CRDI, 2001; Fleury, 1999).

Voici assez brièvement résumé, les principaux problèmes qui se posent à l'amélioration des populations locales du mil et les directions du travail possibles.

Mais il y a une question que nous ne nous sommes pas encore posée, bien qu'elle soit une question capitale: quelle est la méthode de sélection la plus pertinente pour améliorer le mil des régions arides tunisiennes?

7.3.4 Stratégie de sélection retenue à l'IRA

Si les systèmes de culture et les modes d'exploitation du sol des régions arides tunisiennes doivent demeurer encore longtemps ce qu'ils sont actuellement, il est inutile de développer des programmes de sélection coûteux sur le mil. On peut cependant étudier la possibilité de concilier dans une variété:

- l'expression de la vigueur hybride;
- un certain niveau d'homogénéité générale entre les individus;
- la fixation de caractéristiques spécifiques intéressantes (physiologique, agronomique, technologique); et
- la stabilité de la variété au cours des différentes années de son utilisation.

Une telle variété devrait avoir un bon niveau de rendement ainsi qu'une régularité de réaction vis-à-vis du milieu et des techniques culturales, tout en répondant aux besoins des utilisateurs de ces régions marginales. En d'autres termes, elle doit être plastique (adaptation) et rustique (pouvoir survivre dans des conditions marginales).

La stratégie d'amélioration du mil local des régions arides tunisiennes suivie à l'IRA suit cette logique et en utilisant l'approche suivante: (1) sélection de lignées de bonne qualité en station et (2) mise à la disposition des paysans des variétés 'à l'essai' et suivi d'une variété synthétique. La stratégie suivie vise une simplicité méthodologique pour le sauvegarde d'un polymorphisme important à l'intérieur du résultat. Ce polymorphisme reste un garant contre des contraintes diverses.

La sélection des lignées a été basée sur le principe '*ear to row*':

- les premières années, on a fait des observations portées plutôt sur des plantes individuelles, dans le cadre d'une étude sur la biodiversité (voir 6-2-2). Ensuite, on a réalisé une hybridation utilisant du matériel de provenance diverse. Les meilleures plantes issues de ces hybridations étaient choisies pour semer les lignes l'année suivante. Le choix se faisait donc plutôt sur la base d'une sélection massale (fig.48);
- après deux ans de sélection, les observations visuelles par lignées ont pris plus d'importance: les meilleurs individus ont été choisis dans les meilleures lignées. Un an plus tard, des mesures de production par ligne ont complété les observations; et
- la sélection a été faite sous un treillis (fig. 49) protégeant les plantes contre les oiseaux. Ceci oblige de travailler sur une parcelle limitée, avec l'impossibilité de faire des 'parcelles' par lignée. Ainsi, chaque lignée était limitée à une ligne,

répétée en deux blocs. Pour minimiser l'effet de 'voisinage', les lignées ont été regroupées dans les blocs par ordre phénotypique (grandeur, type grain, fourrage ou paille, tardiveté). De cette manière, on ajoutait un plus: une bonne recombinaison des gènes entre lignes semblables, mais sans la nécessité de faire des années d'hybridation pour les différentes techniques appliquées lors de cette sélection '*ear to row*' (voir 7.4).

La formation de 'variétés à l'essai' avait pour but d'arriver à une variété synthétique. Les deux premières années d'essais chez les paysans, les 'variétés' étaient des 'descendances' directes des lignées, sans hybridation contrôlée entre elles. En le faisant, on comptait sur le fait que le semis en lignes simples assurerait une hybridation automatique suffisante pour avoir un effet de sélection (voir 8.2.6).

Sur base d'une sélection avancée, le '*remnant seed*' des six meilleures lignées, de phénologies semblables ont été récoltées pour être semées côté à côté, afin de provoquer une hybridation spontanée. La descendance de cette parcelle devait fournir les 'semences de base' de la première variété synthétique.

La justification de la stratégie choisie est double:

- d'une part, des possibilités d'infrastructure restreintes qui obligeaient de réduire le travail au minimum, tout en recherchant un maximum de résultat; et
- le fait que le matériel local n'avait pas subi une sélection préalable sur des bases scientifiques, mais présentait encore une grande diversité (la plupart des agriculteurs produisent leurs propres semences, tout en choisissant des plantes qui présentent les caractères de leur propre choix); permet d'espérer une amélioration significative avec des moyens restreints, sur base d'une recombinaison et d'une sélection.

Le but du travail est la création de variétés synthétiques. A ce but, les lignées élites constituant le noyau de départ de la variété synthétique doivent être choisies pour une série de caractéristiques morphologiques et de développement assez homogènes. Notons que ces choix n'ont de signification que si ces qualités possèdent une bonne héritabilité (Martin, 1971; Demarly, 1977; Poehlman & Sleper, 1995).

Les synthétiques possèdent en effet deux avantages précieux. D'une part, leur base génétique est normalement suffisamment large pour que les problèmes liés aux insuffisances des techniques culturales et l'absence d'intrants soient tamponnés. D'autre part et en dehors d'une surveillance précise du noyau de départ (qui peut se

réaliser en station), la production de semences n'exige pas la mise sur pied d'opérations techniquement délicates.

La maîtrise des paramètres génétiques au niveau des synthétiques a fait des progrès énormes et leurs performances peuvent être très proches de celles des hybrides F_1 (Demarly, 1977; Gallais, 1992; Rowe & Hill, 1999). 'Elles permettent une certaine utilisation du phénomène d'hétérosis, mais la difficulté est bien de déterminer le nombre optimal de parents, tel qu'il soit suffisamment élevé pour limiter la dépression de consanguinité au cours des générations de multiplication, et suffisamment faible pour permettre une certaine sélection entre toutes les variétés synthétiques possibles pour un nombre de parents donné' (Gallais, 1992).

7.4 L'application de la sélection '*ear to row*' dans les types locaux pour le choix des élites

Tous les systèmes récurrents sont basés sur une répétition de cycles, chaque cycle réalisant une recombinaison génétique et aboutissant à un choix de géniteurs pour le cycle suivant. Dans une sélection avancée, on choisit souvent des systèmes récurrents où la recombinaison et le choix des géniteurs se font en générations différentes; ces systèmes nécessitent deux ou trois ans par cycle et obligent à des fécondations contrôlées. Par contre dans le système '*ear to row*' appliqué sur des allogames, on réalise la recombinaison et le choix des géniteurs dans la même génération en fécondation libre.

7.4.1 Le principe de la sélection '*ear to row*'

Il consiste à semer les semences d'une plante retenue ('*ear*') en ligne ('*row*') ou en parcelle juxtaposée à d'autres descendances analogues. Les observations se concentrent sur le comportement de ces lignes et on choisit à l'intérieur des meilleures lignes les plantes qui correspondent le mieux au type recherché pour le cycle suivant. Ce système simple et rapide a beaucoup d'avantages pour une culture peu améliorée: un grand profit est que l'on peut ainsi traiter un maximum de géniteurs par unité de travail, et garder une biodiversité bien plus large qu'avec des systèmes plus sophistiqués.

Ce système est un des toutes premières méthodologies de sélection qui a été utilisée et est très proche au travail de sélection entrepris vers 1850 par Vilmorin (cité par Behaeghe, communication personnelle) sur le betteraves sucrières. Depuis, cette

méthode s'est répandue en Europe et le reste du monde. Ainsi, elle a été utilisée pour la première fois sur le maïs par Hopkins en 1896 à la station expérimentale d'agriculture d'Illinois (EU) pour améliorer la teneur en protéine et en huile (Behaeghe, communication personnelle).

Depuis, la méthode a été étudiée et décrite sous différentes nominations et variantes avec ses avantages et inconvénients. Ainsi, pour réduire l'effet de l'environnement sur les choix, les essais sur plusieurs sites sont conseillés (Martin, 1971; Demarly, 1977; Poehlman & Sleper, 1995; Márquez-Sanchez, 1998). Mais dans la pratique, il y a toujours le dilemme entre le nombre de géniteurs que l'on peut traiter et le nombre de répétitions (une ou plusieurs stations).

Cette méthode est simple, et facile, et peut être appliquée aussi bien aux espèces allogames qu'autogames. Pour les autogames, il faut partir d'une population F_2 obtenue par des croisements artificiels pour arriver finalement à des lignées pures.

Les meilleures lignées pour les caractères intéressants constituent une élite, cultivées en mélange, elles serviront de géniteurs à une variété synthétique.

En prenant certaines précautions on arrive à un résultat comparable (c'est-à-dire une variété stable) à celui obtenu par des sélections récurrentes plus strictes, comme décrites plus haut, mais avec des moyens très simples et répondant aux conditions et exigences locales (Martin, 1971; Gallais, 1992).

On peut remarquer que le '*ear to row*' ne sélectionne que la demi-hérédité-maternelle, puisque la fécondation est libre résultant en une demi-hérédité de la population. Cet 'inconvenient' est contrebalancé par deux effets:

- chaque génération constitue un cycle complet dans la sélection récurrente tandis que les autres systèmes demandent 2 ou 3 ans par cycle; et
- ce panmixie préserve une grande biodiversité au niveau de la génération suivante et de la variété résultante.

'*Ear to row*' appliqué sur allogames, ne donnera pas le genre de variétés exigées pour des cultures où la sélection est fort avancée et commercialisée, mais elle est tout à fait indiquée pour des cultures où l'on n'a pas encore fait un grand travail de sélection. En plus, on préserve la biodiversité nécessaire pour une sélection future plus poussée; et surtout, on sauvegarde la biodiversité en soi, biodiversité qui risquerait de se perdre dans les 'petites' cultures à sélection poussée. C'est aussi la méthode la plus utilisée pour la conservation des populations locales (Martin, 1971).

D'une façon générale, on a essayé d'obtenir avec des moyens limités un résultat qui se rapproche du but agronomique de la sélection récurrente: remembrement des

gènes à l'intérieur d'une population de base, sélection des combinaisons les plus intéressantes et en conservant la diversité des populations locales de base.

7.4.2 Les difficultés inhérentes au choix des élites

Face à un nombre considérable d'informations concernant les individus que l'on a soumis à la sélection du mil c'est-à-dire: plusieurs variables, plusieurs lieux, plusieurs choix des paysans,... on se pose donc la question de savoir comment exploiter cette information de manières pertinente et efficace aussi bien pour sélectionner que pour mieux connaître les caractéristiques des populations manipulées. Une réponse à cette question s'articule autour de:

- la formalisation statistique de l'objectif de sélection; et
- la recherche d'une stratégie qui optimise les objectifs de recherche formulés.

7.4.2.1 Sélection multicaractère

Si le rendement élevé en grains par unité de surface reste l'objectif de sélection majeur, il est nécessaire d'accorder également dans ces travaux d'amélioration du mil en régions arides tunisiennes une attention particulière aux rendements en fourrage et en paille pour répondre aux besoins des paysans.

En outre, la sélection menée vise aussi l'élimination des principaux défauts des populations locales tel que la sensibilité à la verse et aux maladies, les épis mal dégagés, le grain trop petit et le battage difficile.

Le grand objectif de la présente amélioration est de faire évoluer dans un sens favorable la moyenne des caractères quantitatifs d'intérêt économique dans les populations étudiées.

La valeur économique d'une variété donnée est déterminée par plusieurs caractères. Il est donc nécessaire de chercher une technique de sélection qui tienne compte de la complexité de la situation et donne les meilleurs résultats possibles non pas pour un seul caractère, mais pour le complexe de caractères auquel correspond la valeur économique. La sélection unicaractère semble très peu intéressante, car l'amélioration d'un caractère peut avoir des effets indirects sur des caractères qui n'ont pas été pris en compte par le sélectionneur dans l'évaluation des unités candidates. Toutefois, les résultats de sélection sur un caractère montrent souvent des effets secondaires favorables sur des caractères qui ne sont pas directement visés tels que

l'augmentation de la teneur en protéines du grain parallèlement au poids de 1000 grains chez le blé (*Triticum ssp.*) (Bush, 1992), et du poids de 1000 grains parallèlement au rendement chez le soja (*Glycine max*) (Sumarno, 1986). Mais le plus souvent, ces effets secondaires sont négatifs, et peuvent aller jusqu'à remettre en question l'intérêt du progrès réalisé sur le caractère visé.

D'une manière plus générale, même si globalement le niveau de la population a été amélioré pour un caractère, cela s'accompagne presque toujours d'effets parasites sur des caractères annexes comme la hauteur et la précocité (par exemple quand on vise l'augmentation du rendement). Ce phénomène est dû à l'aspect unicaractère de la plupart des schémas de sélection.

Par contre, les effets secondaires négatifs de la sélection sont absents quand il s'agit de schémas basés sur une sélection multicaractère avec index. Il n'existe que peu de cas où le principal caractère sélectionné n'est corrélé avec aucun autre caractère. C'est la sélection multicaractère seule qui permet de contrôler un ensemble de caractères et d'obtenir un progrès général (Le Cohec, 1990; Kervella *et al.*, 1991). Kervella *et al.* (1991) ont comparé différentes procédures de sélection uni- et multicaractère chez le blé (*Triticum ssp.*) et a conclu que la première approche permet souvent le meilleur progrès sur le caractère considéré mais qu' à cause d'effets indésirables sur les autres, elle est globalement moins intéressante.

Pendant les deux premières années de notre recherche (tableau 24), on a appliqué un système d'index mathématique. Mais, comme on ne connaît pas le degré d'héritabilité des caractères suivis, ni les corrélations entre caractères, la pondération se faisait un peu arbitrairement, sur base de l'importance donnée par les agriculteurs à chaque caractère.

Après l'application de l'index de sélection et le contrôle direct des individus, il s'avérait utile de procéder à certains repêchages de quelques plantes. Finalement, on est revenu à une sélection multicaractère graduelle et progressive:

- à la récolte, on éliminait une série de lignées de faible production, sensible à la verse et/ou aux maladies mais, après l'évaluation des résultats chiffrés une nouvelle élimination était faite;
- tenant compte de la qualité de la lignée, certaines plantes étaient retenues sur base d'une qualité spécifique individuelle, surtout le poids de l'épi principal; et
- toutes les plantes retenues étaient alors criblées sur tous leurs caractères, pour rechercher les meilleures combinaisons, tout en les regroupant en types selon

les critères: grain, fourrage, paille et tardiveté, pour finalement en retenir les 200 meilleurs pour constituer le cycle suivant.

7.4.2.2 Sélection sur index

C'est une méthode de choix d'individus que l'on peut utiliser dans un travail de sélection. Un index de sélection est calculé en choisissant les caractères les plus importants à sélectionner au sein d'une ou plusieurs populations en leur donnant une importance numérique relative. Les meilleurs individus sont ceux dont la valeur de l'index est la plus élevée. Les indices de sélection sont définis comme des combinaisons linéaires de valeurs génétiques non-observables (\hat{g}) prédites par régression sur des 'prédicteurs phénotypiques' (observables). Leur forme générale suivant Baradat *et al.* (1994):

$$I = \sum b_i \hat{g}_i \text{ avec } I: \text{ indice de sélection et } b: \text{ poids de pondération} \quad (4)$$

Ces techniques de sélection sur index sont utilisées quand l'objectif principal est de progresser sur une combinaison linéaire de caractères cibles. On peut ou non hiérarchiser les observations en 'caractères cibles' que l'on cherche à améliorer et 'caractères prédicteurs' qui servent à affiner la prédiction des valeurs génétiques des caractères cibles. Les n caractères cibles sont pondérés par des coefficients de manière à obtenir un progrès génétique optimal pour chacun de ces caractères (Sampoux, 1989; Sampoux *et al.*, 1989; Baradat *et al.*, 1994; Cilas *et al.*, 1994; Verschave & Cilas, 1994; Ravel & Charmet, 1996).

La productivité (grain, paille et fourrage) et la résistance à la verse, aux eaux saumâtres et aux maladies de mil des régions arides tunisiennes demeurent les principaux caractères à améliorer.

7.4.3 Techniques de purification des élites choisies

À partir de la collection de base (9000 plants) collectée en 1996, on a formé trois collections dites actives ou 'de travail' en tenant compte des besoins et des critères utilisés par les paysans de la région et que l'on a appelées groupe mil à grains, groupe mil à paille et groupe mil à fourrage.

Les trois groupes ont été formés en utilisant des provenances choisies et regroupées selon les caractères suivants:

- 1) le groupe mil à paille, se distingue par la longueur des plants, le diamètre de la tige, la longueur de l'entrenœud, le nombre de talles, ...;
- 2) le groupe mil à fourrage, pour lequel importent les dimensions linéaires des feuilles, le nombre de talles, un degré de sénescence des plants à maturité des grains faible,...; et
- 3) le groupe mil à grains, qui peut se distinguer par la longueur et le diamètre du rachis de la panicule, et la grosseur et le poids des grains.

Pour chaque groupe on a défini un index de sélection:

$$I = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (5)$$

Les $b_1 \dots b_n$ sont les poids de pondérations des caractères $x_1 \dots x_n$.

La détermination des pondérations de chaque caractère dépend d'une part d'une estimation suffisamment précise de la valeur génétique des caractères à améliorer et de l'attribution d'une valeur économique relative à chacun de ces caractères d'autre part. En d'autres termes, les poids de pondération ont été définis de façon arbitraire et en se basant sur une logique et les préférences données par les paysans (annexe 4) mais, aussi sur la théorie et la pratique agricoles et génétiques.

Pour le calcul des indices, on a combiné à chaque fois deux caractères cibles, qui ont été associés à d'autres caractères prédictifs, afin d'améliorer la précision des valeurs génétiques de ces caractères cibles (tableau 22).

Pour le groupe mil à grain, les deux caractères cibles étaient la production en grain et la qualité des grains. L'index de sélection de ce groupe (I_g) a été défini par les poids de pondération suivants:

- 60% du poids total de la pondération a été attribué au caractère production en grains;
- 20% à la qualité des grains (14% poids de 1000 grains et 6% couleur des grains); et
- 20% à la résistance à la verse.

Les deux caractères cibles pour le groupe mil à fourrage sont la production en grains et la production en fourrage dont les poids de pondérations sont respectivement:

- 50% provenant de la production en grains; et

- 50% pour la production en fourrage répartie comme suit: 20% nombre de feuilles, 11% largeur des feuilles, 9% longueur des feuilles, 5% nombre total de feuilles et 5% degré de sénescence des plantes à maturité (en valeur négative). Enfin, le groupe mil à paille est pondéré en attribuant:
 - 50% à la production en grains; et
 - 50% à la production d'une paille de bonne qualité caractérisée comme suit: 25% longueur de la plante, 20% diamètre de la tige principale et 5% le nombre des talles en valeur négative.

Tableau 22: Groupes de travail, indices de sélections et caractères mesurés

Groupes	Indices de sélection	Caractères mesurés		
		caractères	abréviation	unité
mil à grain	indice de sélection Grain (I_g) = 60% production des graines + 20% verse + 14% poids de 1000g + 6% couleur des graines	production grains verse poids de 1000 grains couleur des graines	prdgrs Vr pds1000 g Coulgr	g estimation g estimation
mil à paille	indice de sélection Paille (I_p) = 50% production des graines + 25% pour la longueur des plantes + 20% pour le diamètre de la tige principale + 5% pour le nombre de talles - en valeur négative-	production grains longueur plantes diamètre tige principale nombre de talles	prdgrs longpts diatigprin nbretalles	g cm mm nombre
mil à fourrage	indice de sélection fourrage (I_f) = 50% production des graines + 6% pour la longueur des feuilles + 11% pour la largeur des feuilles + 3% pour la longueur de la gaine + 20% pour le nombre des feuilles + 5% pour le nombre total de talles + 5% pour la sénescence - en valeur négative-	production grains longueur feuilles largeur feuilles longueur gaine nombre feuilles nombre total talles sénescence	prdgrs longflles largflles longgaine Nbreffles Nbretotalles Sén	g cm cm nombre nombre estimation

7.4.3.1 Les diverses phases de la production des élites et la conservation de la diversité

7.4.3.1.1 Constitution des premières lignées (année 1998)

Durant l'année 1998, neuf mille (9000) plants issus du semis de panicules collectés auprès des paysans de la zone mil (6.2.1) ont été caractérisés et décrits selon le 'Descripteur du mil de l'IBPGR & ICRISAT' (1993). Ils étaient considérés comme une collection de base des ressources génétiques du mil des régions arides tunisiennes qui a été mise en sécurité '*ex situ*' pour conserver, à long terme, la variation génétique à des fins scientifiques et comme une base pour des sélections futures.

Sur base de leurs qualités supérieures, 216 plants ont été choisis pour former la population principale. Les indices de sélection calculés sur ces 216 plants, ont permis de répartir ces plants sur des groupes d'individus homogènes et aux nombres réduits (fig. 48). Il s'agissait donc d'une sélection de plantes individuelles (sélection massale) sur base d'un indice de sélection (voir 7.4.3). Finalement, on a obtenu les groupes suivants:

- ❖ groupe mil à grain avec 48 plantes;
- ❖ groupe mil à fourrage avec 33 plantes;
- ❖ groupe mil à paille avec 36 plantes; et un
- ❖ groupe dit 'spécial' de 99 plantes choisies pour enrichir la variabilité génétique des trois autres groupes.

Ces premiers sous-échantillons forment les collections actives sur les quelles le travail de sélection a été effectué.

Les plants restants ont été groupés par provenance pour former une collection de 'réserve'.

Comme déjà stipulé avant, d'une façon générale, la méthode de travail suivie est née d'une préoccupation de compromis entre la recherche d'un progrès génétique à court terme et le maintien d'une forte variabilité. En raison des objectifs poursuivis, elle présente bien des ressemblances avec la sélection récurrente. À chaque génération, les meilleurs descendants sont choisis en nombre limité dans les lignées retenues après évaluation. Ces individus constituent les populations du cycle suivant. Le mélange des meilleures lignées sélectionnées dans la population principale représente le noyau d'une variété synthétique.

Ce plan de sélection s'applique à deux populations complémentaires:

- la première dite 'de réserve' ouverte aux génotypes nouveaux (proviennent de nouvelles collectes chez les paysans); et qui devait rester très variable; et
- la seconde formée par les trois sous-populations formées sur base des indices de sélection, dite 'principale' relativement homogène.

Plusieurs éléments permettent ainsi de maintenir suffisamment de variabilité pour ne pas éroder trop rapidement un capital génétique initialement très riche:

- le fait de maintenir une population de réserve qui reste en pollinisation libre chaque année permet d'alimenter sa variabilité;
- la pollinisation naturelle favorise la recombinaison de gènes entre provenances;
- la méthode de sélection choisie maintient la variabilité inter-populations (provenances) et intra-populations.

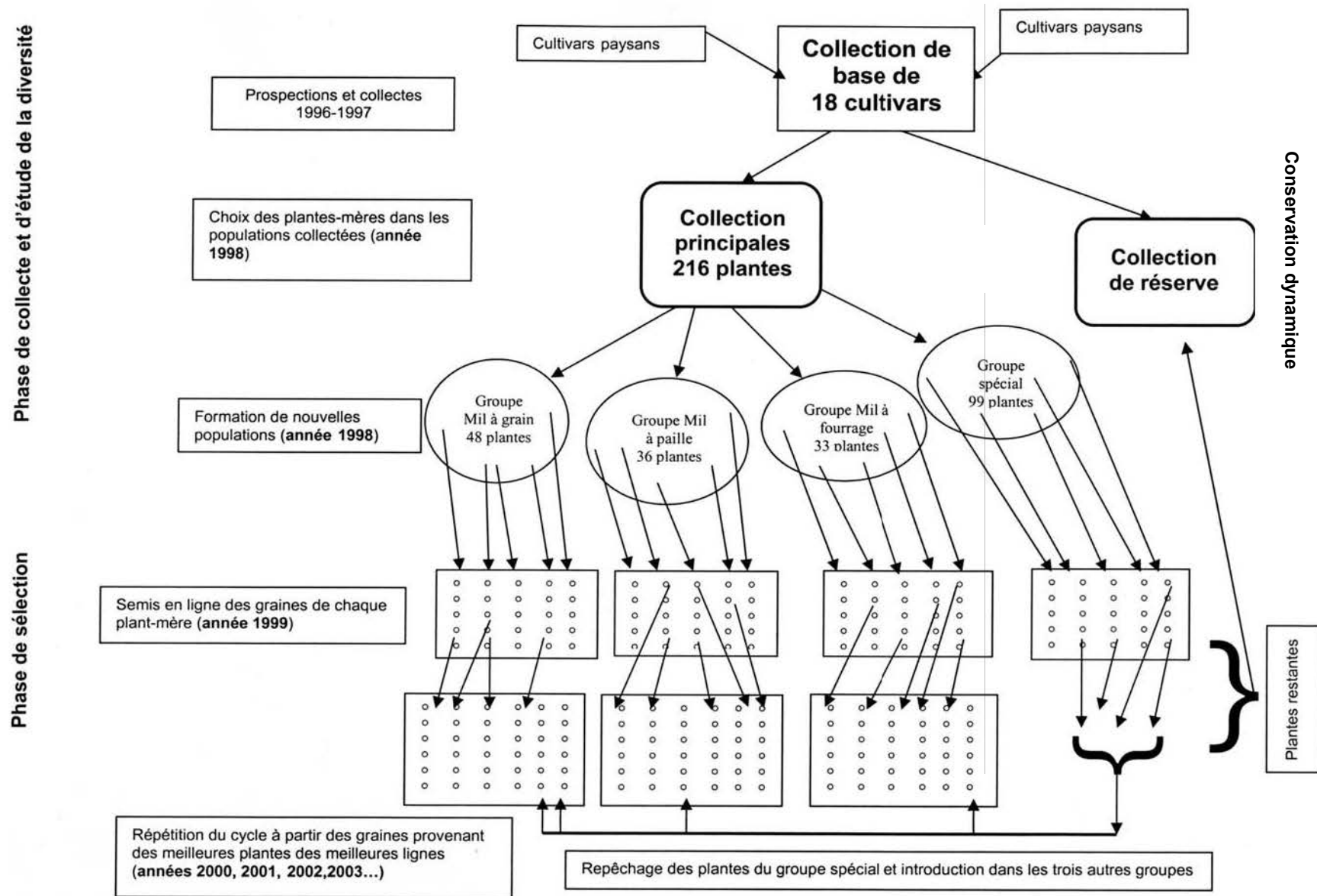


Figure 48: Schéma de conservation et de sélection du mil local des régions arides

L'objectif de cette partie du travail est de mener des sélections sur index à l'intérieur de ces trois groupes pour l'obtention d'élites homogènes qui seraient les futurs parents des noyaux de départ de trois variétés synthétiques destinées aux groupes d'agriculteurs identifiés dans la première partie du travail:

- une variété caractérisée par des plants de petite taille pour les paysans qui associent la culture du mil à grain aux oliviers;
- une variété à un potentiel élevé de production en fourrage pour les paysans qui pratiquent une activité d'élevage; et
- une variété pour les agriculteurs qui aiment produire de la paille de bonne qualité qui permet la construction de huttes et parasols.

7.4.3.1.2 Choix des élites (année 1999)

Les meilleurs individus retenus sur base des valeurs d'indices de sélection les plus élevés ont été semés en lignes et séparés en deux blocs (fig. 49).

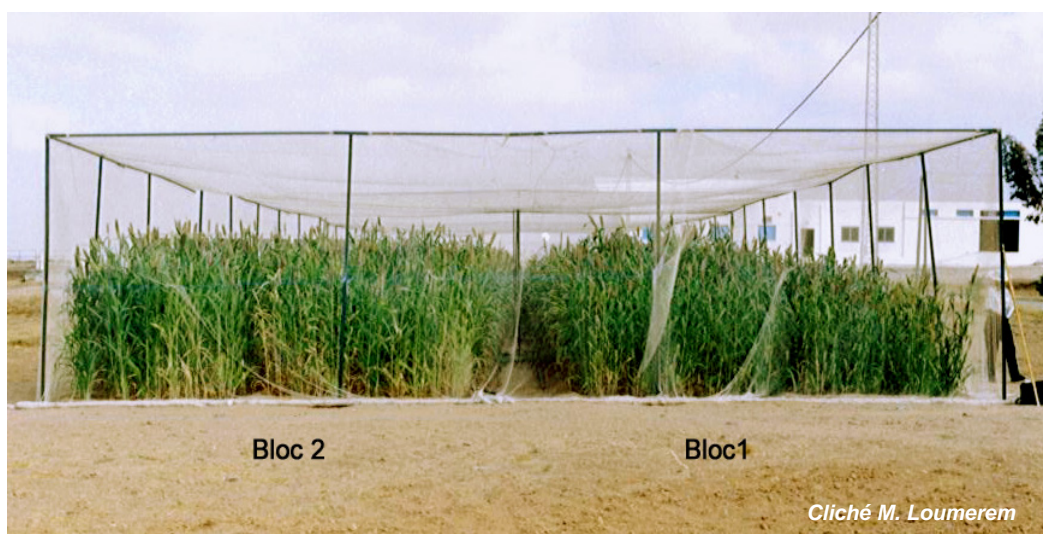


Figure 49: La parcelle de sélection du mil (station expérimentale de l'IRA de Médenine)

A partir de ce deux blocs, on a comparé les lignes issues de plantes sœurs entre elles, et les individus d'une même ligne entre eux, ce qui a permis d'avoir une indication sur l'homogénéité atteinte. Les éliminations se sont faites sur le base de cette homogénéité et en tenant compte des facteurs intéressants pour le but poursuivi (résistance à la verse et aux maladies, précocité...). Ainsi, quand l'uniformité des lignées retenues au cours des années successives est satisfaisante, on passe à la multiplication de toute la lignée et on procède aux essais comparatifs. Durant l'année 1999, les individus de ces groupes ont été testés dans la parcelle expérimentale de

l'IRA de Médenine. Le semis a été fait sous-abri (filet anti-oiseaux) avec deux répétitions (fig. 49). Dans le premier bloc, les plants d'un même groupe (grains, paille ou fourrage) ont été repartis selon les longueurs croissantes des individus d'une même lignée suivis par des plants du deuxième groupe et ainsi de suite et ce pour diminuer la concurrence en lumière. Dans le 2^{ème} bloc, les individus étaient repartis aléatoirement dans leur groupe respectif.

Des mesures et observations ont été faites sur 1155 plants (descendants des 216 individus testés en année 1) selon les caractères cibles ayant servi pour définir les indices de sélection (voir 7.4.3). Les données obtenues ont servi pour une classification des lignées et les individus comme suit: tous les plants extrêmes de chaque lignes (premier et dernier plant de la même ligne) et les autres plants sans voisins (plants isolés) ont été réunis dans un seul groupe que l'on a appelé groupe d'individus (I) et le reste des plants a formé le groupe des meilleures lignées (L). Pour choisir les meilleures lignées qui répondent aux objectifs de sélection, un tableau d'évaluation des lignées a été dressé, comprenant les caractéristiques suivantes (tableau 23, annexe 5).

Tableau 23: Evaluation des meilleures lignées

hétérogénéité des plantes	biomasse des plantes à 1et 1,5 m de longueur	Épiaison	résistance à la verse	rendement (g/ligne)	qualité de graines	nombre total plantes
1: très hétérog. 2: hétérogène 3: homogène 4: très homog.	A: faible B: intermédiaire C: bon	1: 57 à 59 jours 2: 46 à 56 jours 3: 38 à 45 jours	1: 50% plantes versées 2: 0-10% plantes versées 3: pas de verse	1: < 500 g 2: 500-1000 g 3: > 1000 g	4: autres couleurs 5: gris foncé	≥ 20 < 20

Cette phase de sélection des meilleures lignées est la partie la plus lourde du travail. Tout d'abord, il est nécessaire d'établir un système d'évaluation du progrès génétique basé sur la valeur d'appréciation des lignées.

Les individus des lignées les mieux classées ont formé un groupe à part sur lequel 70% des individus de la génération suivante ont été choisis. Le reste des individus non-choisis de ce groupe (L) a été ajouté au groupe des individuelles (I) dont 30% des individus restants ont été choisis parmi les meilleurs. Il s'agissait donc d'une combinaison de la méthode de sélection sur la base des lignées et en partie d'une sélection massale (fig. 50).

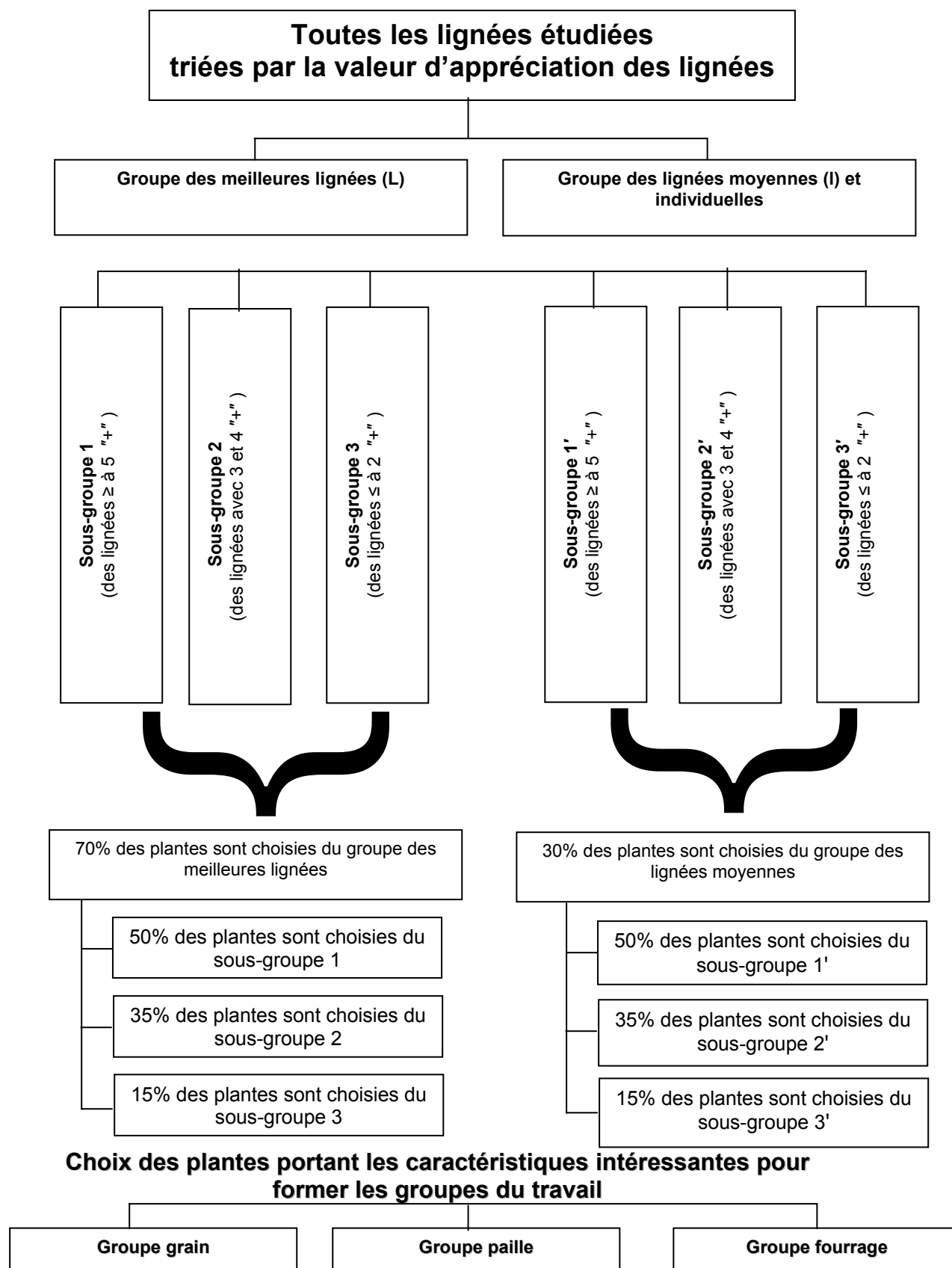


Figure 50: Schéma de sélection de plantes en 1999, 2000, 2001, 2002 et 2003

Cette méthode permet d'atteindre un progrès et de maintenir suffisamment de variabilité dans ce capital génétique local initialement très riche qui risque d'être appauvri par la sélection. Dans les deux groupes (meilleures lignées (L) et individus (I)), les plants de la nouvelle génération de sélection sont choisis en utilisant les mêmes indices de sélection pour constituer de nouveau les 3 groupes du travail (futurs variétés synthétiques).

7.4.3.1.3 Présélection des lignées (année 2000)

Le travail d'évaluation et de sélection s'est poursuivi en 2000. À la fin de la campagne 1999, on a retenu 199 plants (population principale) dont 54 plants appartenant au groupe du mil à grain, 64 plants au groupe de mil à fourrage, et 81 plants étaient les plus homogènes en caractères cibles du mil à paille. Les grains d'épis de ces plants ont été semés en lignes séparées en deux répétitions comme pendant la campagne culturale précédente avec une légère modification au niveau de la répartition des plants dans le deuxième bloc du semis. Durant la campagne culturale 1999, on a semé les plantes aléatoirement dans le deuxième bloc ce qui a engendré une concurrence en lumière entre les plants provoquant des étiolements des plants des lignées génétiquement de petite taille et qui se trouvaient logés entre les plants d'autres lignées de grande taille. L'étiolement des plants a engendré la verse mécanique de ces derniers. Pour éviter la concurrence en lumière et afin de cultiver les plants du deuxième bloc dans des conditions comparables à celles du premier bloc, on a rectifié la répartition des plants comme suit: chaque groupe de plants (groupe paille, fourrage et grain) a été subdivisé en sous-groupes de plants de même taille. Lors du semis, la répartition aléatoire des plants a été effectuée au sein de ces sous-groupes de telle façon que les lignées de même taille se trouvaient voisines. Par conséquent, la verse due à l'étiolement du plant était éliminée. Cette même répartition des lignées a été maintenue pour la suite des campagnes culturales.

Avant la récolte, une présélection des lignées a été effectuée sur la base d'observations visuelles faites pendant le développement des plantes. Dans les lignes retenues, 3 à 7 plantes étaient récoltées et mesurées individuellement et le reste de la ligne était récolté en masse.

7.4.3.1.4 Evaluation des lignées de mil sélectionnées (années 2001 et 2002)

L'évaluation des lignées de mil présélectionnées s'est poursuivie pendant les années 2001 et 2002 dans le but de former des groupes de plants homogènes et génétiquement distincts. Seules les lignées qui répondent aux objectifs de sélection ont été retenues par les mêmes processus de sélection.

Une sélection sévère a été appliquée sur les lignées versées ou trop hétérogènes qu'on a éliminé sans évaluation des plantes correspondantes.

7.4.3.2 Interprétation biométrique des résultats de sélection

Le nombre de lignes, le nombre d'individus et les valeurs des indices de sélections (min, max et la moyenne) pour chaque groupe de travail (grain, fourrage et paille) et pour les 4 années de sélection sont présentés dans le tableau 24.

Durant la première année de sélection (1999), on a étudié un 'groupe spécial' qui regroupait 99 individus choisis dans 90 lignes (descendances de première génération). Ce groupe représentait une grande diversité avec des caractéristiques que l'on a voulu maintenir pour améliorer les autres groupes.

Comme le montre le tableau 24, la répartition des individus performants du 'groupe spécial' sur les groupes grain, fourrage et paille (fig. 48) durant l'année 2000 a beaucoup influencé les valeurs des indices de sélection qui ont atteint des valeurs maximales extrêmement élevées surtout pour le groupe mil à fourrage (377,92) et le groupe mil à paille (353,33). Ceci peut être expliqué par un effet d'hétérosis entre les individus du 'groupe spécial' et les individus des groupes de travail initiaux.

En examinant le tableau 24, on remarque aussi que le nombre de lignes diminue progressivement alors que le nombre d'individus augmente d'une année à l'autre. En effet, plus la ligne est homogène pour les caractères étudiés, plus on choisit d'individus de cette même ligne.

Tableau 24: Caractéristiques des 3 (4 pour 1999) groupes de travail de mil pour les années 1999, 2000, 2001 et 2002

Années	Groupes	Nombre lignes étudiées	Nombre d'individus	Indices de sélection des plantes retenues		
				Min	Max	Moyennes
1999	Grain	34	48	73,34	206,07	121,87
	Paille	27	36	26,87	149,07	67,46
	Fourrage	22	33	69,86	300,83	125,44
	Spécial	90	99			
2000	Grain	26	54	56,04	218,94	100,04
	Paille	37	81	88,89	353,33	142,75
	Fourrage	44	64	99,48	377,92	148,14
2001	Grain	13	55	59,68	219,30	104,70
	Paille	13	75	88,31	177,00	123,25
	Fourrage	9	47	90,44	195,20	135,30
2002	Grain	13	80	125,10	258,35	151,13
	Paille	13	90	117,82	228,74	137,81
	Fourrage	9	30	168,50	274,46	198,64

Durant les années 2001 et 2002, on a appliqué une sélection très sévère sur les lignes en éliminant complètement celles qui comprenaient des individus hétérogènes pour les caractères de sélection. Pour l'année 2002, le groupe mil à fourrage n'a été représenté que par 30 individus suite à une sélection sur les caractères nutritifs de fourrage appliquée sur ce groupe et qui a permis d'éliminer les individus les moins intéressants.

Les valeurs moyennes des indices de sélection augmentent d'une année à l'autre (fig. 51), ce qui explique bien l'amélioration obtenue pour les caractères formant ces indices. On a aussi pu remarquer une diminution de la différence entre les valeurs maximales et les valeurs minimales, ce qui reflète l'augmentation de l'homogénéité des individus choisis pour former ces groupes.

Ces résultats montrent bien que la sélection 'ear to row' permet d'améliorer le mil local. Les résultats obtenus à la station expérimentale de l'IRA de Médenine sont encourageants. On a observé généralement un progrès sur les 4 ans de sélection pour l'ensemble des caractères cibles. Mais il nous a semblé utile de compléter ces résultats par des tests précoces.

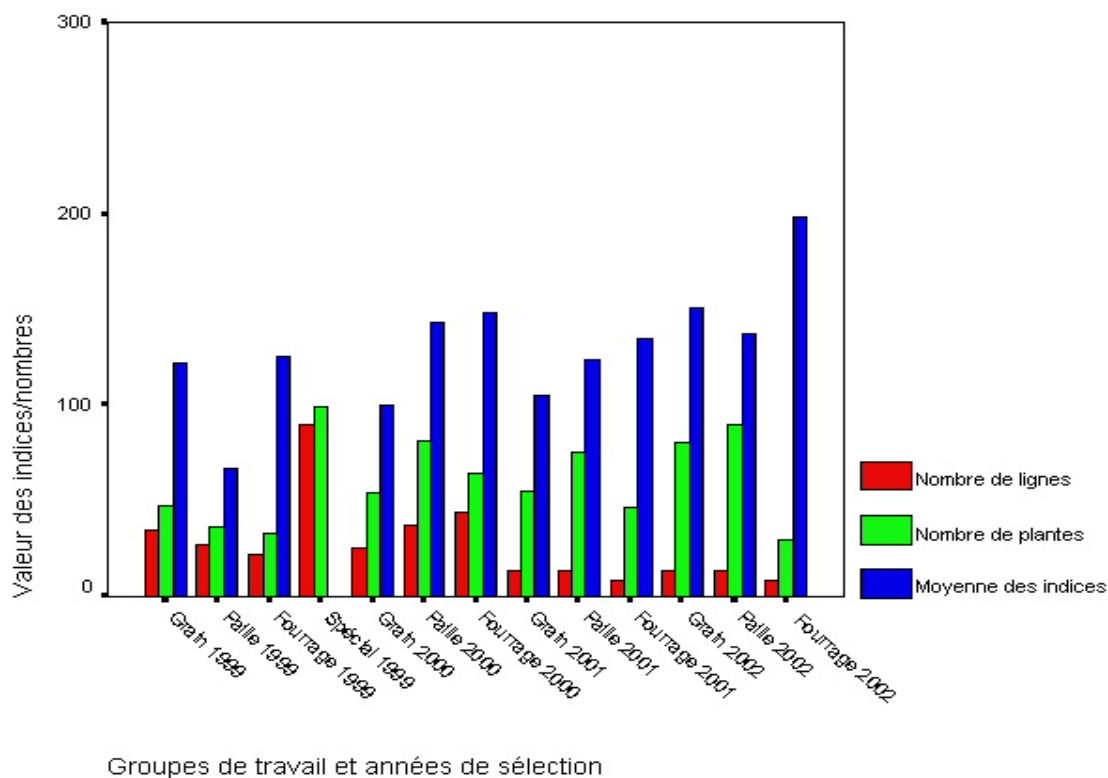


Figure 51: Représentation graphique des caractéristiques des groupes de travail

En effet, l'objectif final de ce travail d'amélioration est d'obtenir un matériel performant hautement producteur et tolérant aux stress environnementaux de la zone cible. Les voies utilisées pour y parvenir sont souvent longues. Donc, un certain nombre de tests sont recherchés en vue d'accélérer le processus d'amélioration et de raccourcir ainsi la durée de sélection.

Les tests précoces utilisant des caractères cibles comme paramètres peuvent constituer un moyen de prédiction et d'évaluation efficace du progrès obtenu. Deux tests ont ainsi été effectués sur les lignées les plus prometteuses:

- un test sur la qualité nutritive des fourrages des lignées mil à fourrage; et
- un test d'évaluation participative des lignées sélectionnées (jusqu'en 2004) dans les conditions de culture des paysans.

Chapitre VIII

8 Evaluation participative des lignées sélectionnées à la station expérimentale de l'IRA de Médenine

8.1 Introduction

L'existence de fossé entre sélectionneurs et petits paysans a stimulé la création d'une série de méthodes de recherche novatrices et prometteuses désignées sous le vocable de l'évaluation variétale participative ou 'EVP' (en anglais '*Participatory varietal selection*') (Sthapit & Joshi, 1996ab; Witcombe, 1996; Van Veldhuizen *et al.*, 1997; Toomey, 1998 & 1999; Reij & Waters-Bayer, 2001). 'Il s'agit en fait de ne plus voir dans le fermier qui cultive son champ strictement un destinataire muet de la technologie, mais de l'inviter plutôt... comme un partenaire dans la recherche (Ashby, 1986; Ashby *et al.*, 1987).

Sous le chapiteau de la RPAG (Recherche Participative et Analyse du Genre) plusieurs chercheurs - dans les universités, instituts de recherche, organisations non-gouvernementales...- s'appliquent à évaluer et à formuler des méthodes et des dispositifs organisationnels pour la recherche participative dans les domaines de la sélection des plantes et de la gestion des ressources naturelles (De Boef *et al.*, 1993; Bellon, 1997; Maurya, 1997; Riley, 1997; Tchawa & Kamga, 2001).

Witcombe *et al.* (1996) suggèrent que l' 'EVP' est une méthode rapide et peu coûteuse pour déterminer les variétés les mieux adaptées aux conditions et les plus prisées par les paysans. Il s'agit de faire participer des paysans à l'évaluation de certaines variétés expérimentales juste avant leur mise en circulation officielle.

Par ailleurs, la méthode de PPB (*participatory plant breeding*) - en français 'SP': sélection participative ou 'CVP': Création variétale participative-, est une méthode qui associe les paysans au programme de sélection dès les premières phases de la recherche, lors des croisements ou des sélections des plantes prometteuses à partir de populations dont les caractéristiques génétiques n'ont pas encore été fixées dans de nouvelles variétés (Elings, 1999; Ahmadi *et al.*, 2001; Brummer, 2001; Hocde, 2001; Lançon, 2001; Sperling *et al.*, 2001; Trouche, 2001).

Au Rajasthan (Inde), par exemple, les travaux de recherche participative menés par les scientifiques de l'Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-Arides (ICRISAT) ont montré la préférence des fermiers pour un vaste

ensemble de types génétiques du mil, plutôt que pour une ou deux variétés seulement. En outre, ces fermiers ont clairement précisé qu'il leur faut du mil qui pousse sans difficulté dans les sols infertiles et sablonneux qui caractérisent la région. Ce type de définition a amené l'ICRISAT à modifier ses méthodes pour tester les variétés de façon à mieux respecter et suivre les conditions de culture des fermiers (Choudhary *et al.*, 1997; Toomey, 1998 & 1999; Vom Brocke *et al.*, 2001; Labouisse & Caillon, 2001).

La méthode PPB est largement appliquée en Inde et en Amérique Latine où les résultats sont très encourageants. Elle est appliquée aussi bien sur les espèces allogames qu'autogames. Weltzein *et al.* (1997) ont ainsi réussi à sélectionner participativement avec l'aide des paysans des variétés de mil en Inde, Joshi *et al.* (1997) ont travaillé sur le maïs. Valdivia *et al.* (1996, cités par Sthapit & Joshi, 1996b) ont utilisé la méthode PPB sur des espèces à multiplication végétative comme la pomme de terre. Cette méthode s'est rapidement répandue dans d'autres régions.

Au Népal, la première variété de riz 'Machhapure-3 (Fuji102/chhmrongdhan)' sélectionnée par la méthode PPB a été mise en circulation officielle dès 1991 (Joshi *et al.*, 1997). En Syrie, Ceccarelli *et al.* (1996) ont sélectionné plusieurs lignées d'orge sous différentes conditions environnementales et avec la participation des fermiers. Au Bénin, le progrès génétique obtenu au Centre Permanent d'Expérimentation D'Okpara (Bénin) par des sélections participatives en collaboration avec des producteurs du coton est comparable à celui obtenu selon une méthode classique (Sêkloka *et al.*, 2001).

D'après Witcombe *et al.* (1996) et Sthapit & Joshi (1996a), la PPB est la méthode la plus sûre pour la création de variétés intéressantes. Toutefois, elle est coûteuse en parcelles et personnel. Vu que les moyens disponibles pour la sélection du mil en Tunisie sont limités, on a choisi la méthode 'EVP' pour associer les paysans des régions visées au choix des variétés présélectionnées. Suite aux enseignements tirés de la bibliographie sur la sélection participative, on a décidé d'impliquer, dès le début des travaux de sélection, les paysans pour l'évaluation de nouvelles lignées sélectionnées en milieu réel.

8.2 La démarche méthodologique

Le dispositif méthodologique s'est fixé les objectifs suivants:

- ❖ tester le potentiel adoptif des nouvelles lignées;
- ❖ caractériser les possibilités d'adoption en fonction de la diversité des milieux;
- ❖ analyser les déterminants de cette adoption; et

- ❖ révéler les savoirs endogènes sur la gestion de la diversité variétale.

Un objectif de deuxième niveau était de tirer des conclusions sur le comportement des lignées ou de nouvelles variétés que l'on pourrait introduire dans les différentes zones.

8.2.1 Zones et sites d'expérimentation

Les tests ont été conduits dans la zone sud-est du pays où le mil est la céréale dominante. De 2001 à 2003, neuf tests ont été conduits dans quatre sites: Essaadane, El fjè, Boughrara et Tajerjimt (fig. 52) proches du milieu de sélection (c'est-à-dire la station de sélection de l'IRA de Médenine).

Les paysans-expérimentateurs ont été choisis en concertation avec les chercheurs du Laboratoire des Sciences Humaines de l'IRA et les techniciens du Commissariat Régional au Développement Agricole de Médenine. Parmi les critères de choix des paysans, une condition de base était leur implication active dans la culture du mil depuis plusieurs années. Au total, sept paysans ont été choisis pour mener ces tests et environ trente autres paysans et paysannes ont participé à l'évaluation des lignées proposées (tableau 25).



Figure 52: Sites des essais participatifs avec les paysans (OTC, 1984)

Tableau 25: Liste des agriculteurs qui ont mené les essais participatifs (années, 2001 et 2002)

Années	N°	Nom	Régions	Date de semis	Date de récolte
2001	1	ELKORCHANI Mabrouk	Essaadane	02/05/2001	30/07/2001
2001	2	BEN SLAMA Ahmed	Tajerjimt	09/05/2001	30/07/2001
2001	3	RHOUMA Salem	Boughrara	15/05/2001	10/08/2001
2001	4	YAHIA Khalifa	El fjè	23/05/2001	14/08/2001
2001	5	BOUFALGHA Mohamed	Sidi Maklouf	Essai échoué	
2002	1	YAHIA Khalifa	El fjè	13/05/2002	04/08/2002
2002	2	ESSID Belquacem	Tajerjimt	14/05/2002	02/08/2002
2002	3	SOUOIUDE Ali ben Abdallah	Boughrara	15/05/2002	01/08/2002
2002	4	BEN SLAMA Ahmed	Tajerjimt	15/05/2002	02/08/2002
2002	5	ESSID Khalifa	Tajerjimt	15/05/2002	02/08/2002

8.2.2 Matériel végétal

Sur l'ensemble des deux années, 5 lignées (20, 120, 133, 140 et 197) présélectionnées à l'IRA (en 2000 et 2001) et 7 populations 'traditionnelles' ont été évaluées par ces tests. Les lignées testées étaient des obtentions du programme d'amélioration des populations locales à l'IRA (voir 7.3.4). Pour ce travail, nous avons choisi de proposer seulement du matériel de type paille et car dans cette région, les systèmes de culture 'mil à fourrage' et 'mil paille' sont bien distincts. Ces lignées ont été choisies pour avoir déjà montré durant les essais en station des performances satisfaisantes pour les caractères suivants: résistance à la verse et aux maladies, productivité considérable et une bonne qualité de paille, et grain (tableau 26).

Comme indiqué antérieurement, les paysans des régions arides tunisiennes utilisent quotidiennement les différentes parties du mil pour, entre autre, la confection d'objets domestiques et artisanaux, comme matériel de construction d'habitat ou pour l'élevage et le tourisme.

Tableau 26: Valeurs moyennes des caractères des lignées évaluées chez les paysans, essai 2001(lignées 20 et 140) et essai 2002 (lignées 120, 133 et 197)

N° ligné	Codes	Long	Diam	Nbmfeuil	Nbtallepro	Pdschand/lig	Lmchprin	Pdsm1000g	Coulgraine	Nbjoursflo	biom1m	biom1,5m	Verse
140	842-2*135/12	262,96	9,61	9,09	0,87	1,78	22,96	12,64	4	59	C	C	6
20	854*16/9	230,15	10,75	7,75	0,70	1,24	20,20	12,11	4	50	B	B	6
120	265*334/15	238,43	12,43	9,57	1,14	1,17	27,29	12,21	5	52	C	C	5
133	839*265/13	264,57	12,97	9,57	1,29	1,33	21,14	12,39	5	52	C	C	5
197	770*243/15	213,11	10,35	8,11	2,00	0,98	19,11	11,54	5	52	C	C	6

Long= longueur de la plante [cm] (mesurée du niveau du sol au sommet de la panicule);

Diam= diamètre de la tige [mm] (entre le 3^{ème} et le 4^{ème} nœud à partir du sommet);

Nbmfeuil= nombre moyen de feuilles par plante;

Nbmtallepro= nombre moyen de talles productives par plante (nombre moyen de talle avec de panicules portant des graines par plante);

Pdschand/lig= poids sec des panicules par ligne [kg];

Lmchprin= longueur moyenne de la panicule principale [g];

Pdsm1000g= poids moyen de 1000 graines [g];

Coulgraine= couleur de la graine (4= gris, 5= gris foncé);

Nbjoursflo= nombre de jours du semis à la floraison;

Biom 1m= aspect des plantes à 1m de longueur moyenne (a= faible, b= moyen et c=bon);

Biom 1,5m= aspect des plantes à 1,5m de longueur moyenne (a= faible, b= moyen et c=bon); et

Verse= sensibilité à la verse (0= toutes les plantes versées, 6= pas de plantes versées)

8.2.3 Conditions expérimentales

Dans chaque essai, les lignées ont été évaluées en comparaison avec une variété locale (cultivar) proposée par les paysans partenaires. Ces derniers ont effectué deux cycles d'évaluations en 2001-2002 et en 2002-2003. Dans la région d'étude, les paysans pratiquent la technique de la planche de culture pour le mil (fig. 8). C'est la meilleure technique pour les cultures en irriguées sur des sols légers et des débits d'eau faibles. Les paysans confectionnent des planches de dimensions réduites pour assurer un bon nivellement du sol afin que la répartition de l'eau soit uniforme. Le semis se fait à la volée suivie d'un démariage des plantes 15 jours après la levée pour assurer une densité bien déterminée des plants par planche (la distance entre les plants visée est de 20 cm). Les essais étaient menés en blocs complètement aléatoires où les lignées à tester étaient soumises aux mêmes conditions culturales que les populations locales. Le dispositif comprenait 3 blocs subdivisés en 3 planches de culture de 1,5 x 4 m² de dimension. Les lignées étaient réparties d'une manière complètement aléatoire dans chaque bloc. Le paysan partenaire choisissait la parcelle et la date de semis de l'essai. Chaque essai était conduit selon les pratiques culturales habituelles du paysan chargé du suivi. Après les semis, qui ont été réalisés avec l'appui d'un technicien de l'IRA, chaque essai a été entièrement géré par le paysan.

8.2.4 Méthodes d'évaluation des lignées

Pendant la culture du mil, la grande majorité de l'évaluation était assurée par les paysans eux-mêmes. Les rendements en grains étaient mesurés par l'équipe de recherche de l'IRA. Ce travail était réalisé en collaboration avec les chercheurs du Laboratoire des Sciences Humaines de l'IRA. Des fiches d'enquêtes avaient été élaborées pour pouvoir évaluer le caractère agro-économique du mil d'une façon générale et des lignées améliorées d'une façon spéciale (annexe 4).

8.2.5 Principales caractéristiques d'évaluation

Dans chaque essai, les paysans-expérimentateurs ont tout d'abord évalué les lignées au champ, pendant tous les stades de développement de la plante et pour les caractères agronomiques et de productivité suivants: vigueur, précocité, résistance aux

ravageurs, tolérance aux eaux saumâtres, résistance à la verse, productivité en grains et paille, et qualité des pailles pour l'alimentation des animaux et pour la construction des huttes.

8.2.6 Résultats et discussions

Suivant les conditions de réalisation des essais (préparation du sol, apports de fumure organique et fertilisation minérale, qualité et quantité d'eau d'irrigation), on a regroupé les essais en deux catégories:

- deux essais chez des paysans en condition limitantes (sols pauvres, eau très chargée en sel, faible fertilité);
- huit essais réalisés chez des paysans en conditions culturales plus favorables (eau d'irrigation moins chargée en sel, sols plus fertiles, mains-d'œuvre suffisante, etc.).

Sur les dix essais mis en place, un essai a totalement échoué avant la récolte. La motopompe est tombée en panne ce qui a obligé le paysan à l'abandonner. Pour le reste des essais, on a pu observer une bonne concordance entre les conclusions des différents paysans pour l'appréciation du rendement en panicules, de la précocité, de la grosseur et la couleur des grains, de la résistance à la verse et aux maladies et de la qualité de paille pour les animaux.

Les performances des lignées et cultivars locaux évaluées sur sept sites, exprimées suivant les rendements moyens des panicules et de paille obtenus, sont représentées dans les figures 53 et 54.

Néanmoins, un calcul statistique sur les 9 essais pris ensemble n'est pas valable: à chaque essai le témoin (cultivar du paysan) est différent et les lignées ne sont pas les mêmes pendant les deux années de l'expérience. Il faut donc faire le calcul pour chaque essai séparément. Les résultats de ces calculs sont présentés sous forme de test Duncan aux tableaux 27 et 28.

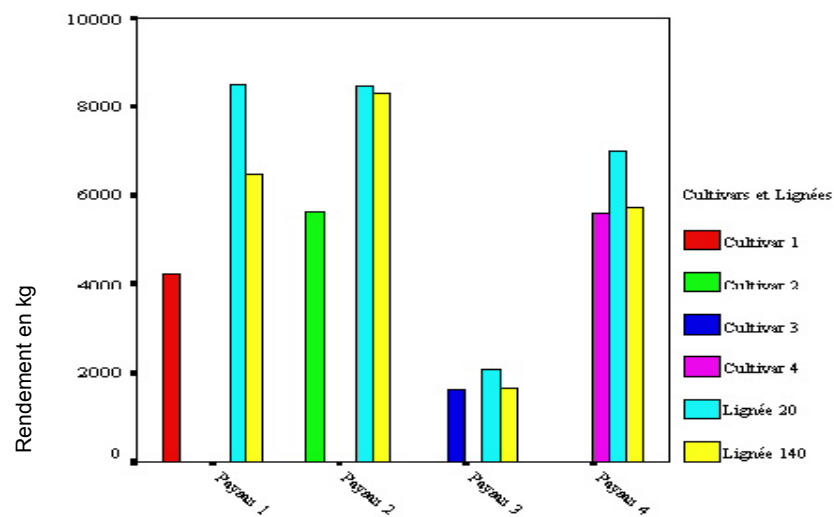
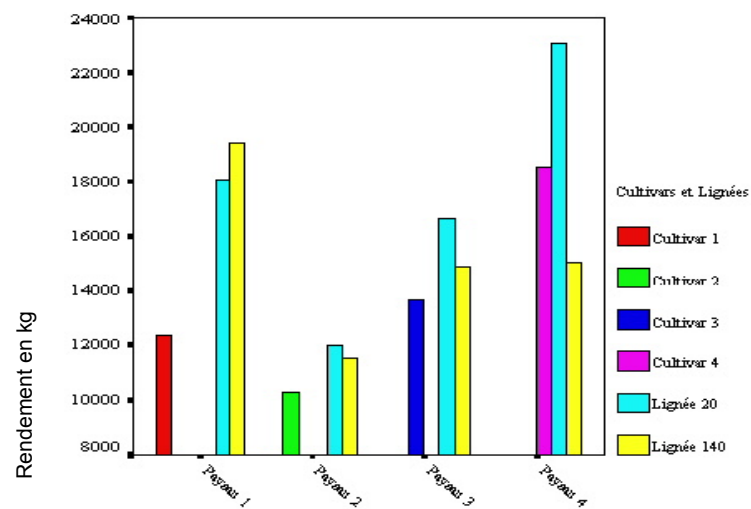


Figure 53: Rendements moyens pour l'essai 2001, en paille (kg/ha)

et en panicules (kg/ha)

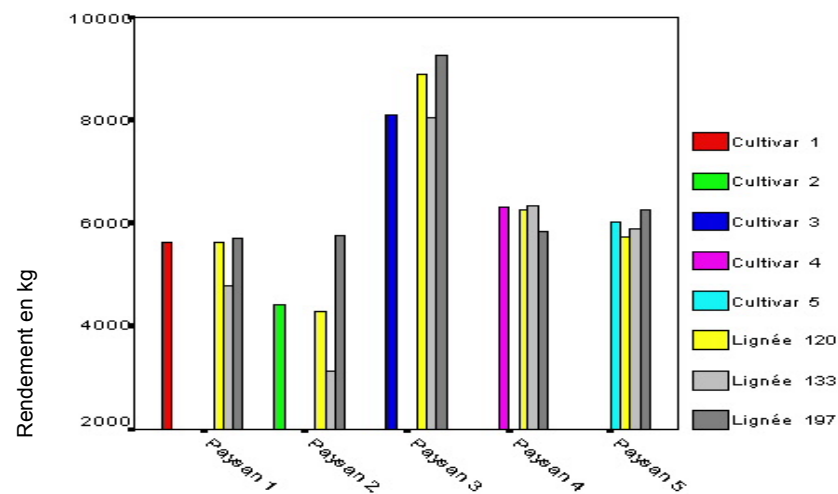
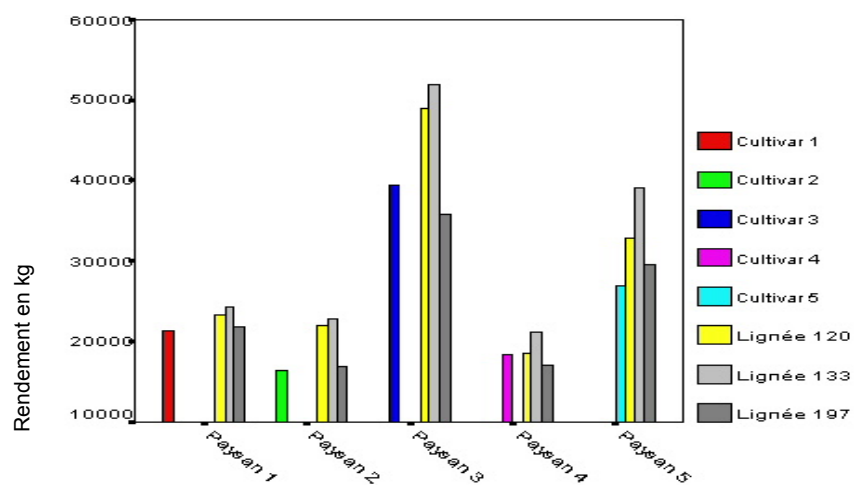


Figure 54: Rendements moyens pour l'essai 2002, en paille (kg/ha)

et en panicules (kg/ha)

Tableau 27: Rendements moyens en panicules et en paille (kg/ha), pourcentages des rendements par rapport au témoin (cultivar paysan) et test Duncan pour l'essai 2001 chez les paysans

Lignées et témoin	Rendement en panicule												Rendement en paille											
	Agriculteur 1			Agriculteur 2			Agriculteur 3			Agriculteur 4			Agriculteur 1			Agriculteur 2			Agriculteur 3			Agriculteur 4		
	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan
20	8514	202	a	8482	150	a	2071	128	a	7007	125	a	18061	146	a	12011	116	a	16659	122	a	23023	124	a
140	6500	154	b	8303	147	a	1674	103	b	5706	102	ab	19389	157	a	11519	112	a	14850	108	b	15015	81	c
Témoin	4222	100	c	5636	100	b	1622	100	b	5606	100	b	12333	100	b	10324	100	b	13697	100	c	18519	100	b

Tableau 28: Rendements moyens en panicules et en paille (kg/ha), pourcentages de rendements par rapport au témoin (cultivar paysan) et test Duncan pour l'essai 2002 chez les paysans

Lignées et témoin	Rendement en panicule															Rendement en paille														
	Agriculteur 1			Agriculteur 2			Agriculteur 3			Agriculteur 4			Agriculteur 5			Agriculteur 1			Agriculteur 2			Agriculteur 3			Agriculteur 4			Agriculteur 5		
	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan	kg/ha	% Témoin	t-Duncan
120	5644	100	a	4293	97	b	8880	110	a	6262	99	a	5750	96	a	23250	109	a	21936	133	ab	48879	124	a	18519	101	ab	32835	122	b
133	4791	85	a	3128	71	c	8048	100	a	6347	100	a	5887	98	a	24383	115	a	22812	138	a	51936	132	a	21078	115	a	39081	145	a
197	5727	102	a	5779	131	a	9244	114	a	5852	93	a	6263	104	a	21700	102	a	16962	103	bc	35794	91	b	17126	93	b	29479	109	bc
Témoin	5645	100	a	4416	100	b	8083	100	a	6321	100	a	6016	100	a	21291	100	a	16507	100	c	39395	100	b	18376	100	c	26972	100	c

On voit dans les tableaux 27 et 28 que durant l'année 2001, les différences sont significatives pour les 4 essais (sur 4), aussi bien pour la production de chandelles, que pour la production de paille. En 2002, les résultats étaient moins concluants, puisque pour les chandelles, un seul essai (sur 5) donne des différences statistiquement valables, en occurrence l'agriculteur 2. Par contre, pour la production de paille, 4 essais ont donné des résultats significatifs. Ce 'manque' de résultats en 2002 s'explique par deux causes:

- 1) les lignées, mises en essai en 2002, se sont avérées plus tardives que la moyenne des cultivars-témoins. La tardiveté augmente le potentiel du rendement, mais les agriculteurs définissent la fin de l'irrigation et choisissent la date de récolte par rapport à leur propre cultivar, ce qui a entraîné un mauvais remplissage des lignées tardives, 120 et 133. Pour cette raison ces deux lignées ne peuvent pas être retenues pour le facteur 'production chandelles'. Ce facteur précocité a moins d'influence sur la production de paille. Parmi les lignées à l'essai en 2002, seul la lignée 197 était, pour le caractère précocité, plus ou moins comparable aux cultivars.
- 2) Après les succès remarquables de 2001, les agriculteurs ont distribué le grain des lignées testées, en vue d'améliorer leur propre cultivar. En 2002, on nous avait en outre signalé un beau champ de mil à une distance de plus de 50 km des essais; à la visite, l'agriculteur expliquait que ces semences provenaient de ces essais. Cet enthousiasme de la part des agriculteurs est très réconfortant, mais laisse quelques doutes sur la valeur comparative des cultivars-témoins en 2002.

En tout cas, et du point de vue des résultats, on ne peut interpréter que des essais présentant des différences statistiquement valables. Les tableaux 29 et 30 résument ces données, en donnant la production des lignées en pourcentage des cultivars –témoins pour les essais valables.

Tableau 29: Rendements en chandelles des lignées testées en % des cultivars paysans, exprimés essai par essai, mais limités aux résultats statistiquement valables, suivant les tableaux 27 et 28

Essai:	2001-1	2001-2	2001-3	2001-4	2002-2
Lignée 20	202	150	128	125	
Lignée 140	154	147	103	102	
Lignée 197					131

Les deux lignées testées en 2001 sont largement positives, avec un score très élevé pour la lignée 20 qui produit en moyenne 51% de plus que les témoins respectifs. Le score de cette lignée est bon aussi bien dans de bonnes conditions que dans de mauvaises conditions (agriculteur 3). En 2002, seul un essai donne des différences valables pour les chandelles (agriculteur 2). La lignée 197, la seule valable pour des raisons de maturation à la récolte, a un rendement en chandelles 31% au-dessus de son témoin.

Rappelons que ces résultats ont été obtenus sans avoir fait des contrôles de rendement sur des parcelles en station. On a brûlé toutes les étapes en passant de la ligne à l'agriculteur. Le but n'était pas de sortir une variété, mais de tester le potentiel de la méthode de sélection, en faisant un test dans des conditions de culture normale. Au regard des résultats obtenus, ce potentiel d'une sélection pour un meilleur rendement en grain semble évident. Les marges pour une sélection orientée vers la précocité est aussi présente: le tableau 31 donne des mesures de 20 lignées de type fourrager; dans ce petit groupe, l'épiaison démarre entre 44 et 56,5 jours après semis.

Tableau 30: Le rendement en paille des lignées en % de leur témoin. Résumé des essais statistiquement valables

Essai:	2001-1	2001-2	2001-3	2001-4	2002-2	2002-3	2002-4	2002-5
lignée 20	146	116	122	124				
lignée 140	157	112	108	81				
lignée 120					133	124	101	122
lignée 133					138	132	115	145
lignée 197					103	91	93	109

Pour la paille (tableau 30), la tardiveté n'est pas une raison pour exclure les lignées 120 et 130, et 4 essais sur 5 donnent des différences statistiquement valables en 2002.

Deux conclusions se dégagent du tableau 30:

1) il semble bien possible d'augmenter la production en paille, mais il se pourrait qu'une sélection unilatérale se payerait par une perte de précocité. Néanmoins la lignée 20 prouve qu'une bonne combinaison d'un rendement en chandelles, rendement en paille et précocité reste possible;

2) on aura peut-être intérêt, dans un travail de sélection, à tempérer la production de paille pour s'intéresser plus au rapport chandelles/paille. Actuellement le

rapport épi/paille est en moyenne 1 sur 5 avec une diversité d'au moins 1/3 à 1/7,5 pour les 20 lignées fourragères du tableau 33. Des marges de sélection sont donc largement présentes pour ce caractère aussi.

Suite aux essais de la 1^{re} année, les lignées 20 et 140 sélectionnées à l'IRA et évaluées chez quatre paysans ont été jugées par ces derniers meilleurs que leurs cultivars pour le rendement en panicules, la résistance à la verse, la production de paille de bonne qualité (plusieurs talles et feuilles restent encore vertes à maturité). Toutefois, la couleur des grains et la tardiveté de ces lignées étaient des caractères mal appréciés par les paysans.

Les critères de choix des lignées ont été en premier lieu la précocité (les lignées tardives sont exposées à un mauvais remplissage des grains, aux attaques des oiseaux et des punaises de panicules, et elles exigent plus de journées de travail et d'irrigation que les lignées précoces), la couleur et la grosseur des grains (les grains 'bleu' et grands sont les plus vendus sur le marché local à des prix plus élevés), et le rendement en grains et paille.

À l'issue de toutes ces évaluations, les paysans ont tiré des conclusions sur le travail d'amélioration. Ils ont exprimé leurs préférences parmi les lignées testées et ont choisi celles qu'ils désiraient cultiver (et utiliser comme géniteur pour améliorer leurs propres populations traditionnelles) à nouveau au cours de la campagne suivante.

Les lignées sélectionnées à l'IRA et proposées à certains agriculteurs du mil des régions arides tunisiennes ont permis d'identifier dans la majorité des essais un matériel végétal qui répond en grande partie aux besoins des paysans. Il s'agit d'une amélioration de la productivité (paille et panicule) avec une bonne valeur agronomique générale et une qualité des grains satisfaisante.

Les limites des lignées proposées sont toutefois apparues sur tous les sites d'évaluations, comme aucune des lignées n'a pu démontrer des performances de précocité supérieures aux cultivars locaux sur les deux années d'essai.

Ce travail d'évaluation participative des lignées du mil a d'abord permis d'échanger et d'enrichir les connaissances sur la plante et les conditions de culture avec celles des paysans. Les paysans ont pu observer de nouvelles lignées du mil ayant des caractéristiques différentes de leurs propres cultivars, ce qui a pu susciter chez eux l'importance de l'amélioration génétique de leurs propres cultivars et d'améliorer certaines techniques culturales.

Du côté de la recherche, les nouvelles connaissances acquises à travers ce travail ont concerné les critères de choix des variétés et leur hiérarchisation par les

paysans, et le comportement des différentes lignées dans des conditions différentes de celles de la parcelle de sélection de l'IRA de Médenine.

Chez ces paysans, les exigences par rapport à la couleur et grosseur des grains, l'aptitude facile au décorticage et surtout la précocité semblent très fortes, et en conséquence, un matériel sélectionné ayant les mêmes caractéristiques de grains et précocité que les cultivars locaux, est généralement préféré à une variété à haut rendement en grains et paille mais plus tardive.

Les premiers résultats de l'impact de ce travail sont encourageants. Ils serviront à mieux définir les objectifs de sélection futurs. Cette expérience d'évaluation variétale participative a aussi apporté des enseignements pour aller plus loin dans une démarche de sélection participative du mil dans les régions arides tunisiennes en impliquant beaucoup plus de paysans et sites d'essais.

Chapitre IX

9 Étude détaillée de 20 lignées de type fourragère

L'amélioration génétique du mil jusqu'à présent a été centrée sur l'augmentation de la productivité en grains et accessoirement sur la résistance aux maladies. Cependant, d'autres caractéristiques comme la qualité gustative et l'utilisation d'autres parties de la plante n'ont été que peu étudiées et n'ont pas fait l'objet de programme d'amélioration. Or, les paysans des zones arides utilisent quotidiennement les différentes parties de la plante du mil pour entre autre la confection d'objets domestiques et comme supplément de fourrage pour leurs cheptels (fig. 2 et 3).

Pour répondre aux besoins de certains paysans, on a entamé un travail de sélection sur le mil local pour la création de variétés qui combinent une bonne production en grains et en fourrage.

L'élimination de génotypes peu productifs en fourrage a été réalisée d'une façon simple (voir 7.4.2.2) sur un grand nombre de plantes. Ainsi, un progrès génétique suffisant en rendement en biomasse aérienne totale des plantes a été obtenu.

Les résultats de sélection (années 2000 et 2001) ont permis de retenir 20 lignées de mil à fourrage. Ces lignées comprennent les plants les plus homogènes pour les différents caractères cibles, soit: un nombre élevé de feuilles et talles, longueur et largeur des feuilles, potentiel de rendement en fourrage élevé et une sénescence lente de la plante à la maturité des panicules.

9.1 Introduction

À chaque objectif d'amélioration correspond toujours un schéma de sélection qui lui est adapté, mais la longueur du cycle de sélection que l'on a suivi sur le mil local fait que l'emploi d'un test précoce peut de toute évidence réduire considérablement la durée totale du cycle de sélection. En général, une sélection pour les caractères de qualité alimentaire doit débuter dès les premières générations de la sélection pour éviter que l'on obtienne à la fin un matériel qui n'a pas les caractéristiques requises (Kouamé, 1991; Clément-Demange *et al.*, 1994a, Verschave & Cilas, 1994; Driouich *et al.*, 2002).

L'objectif global du présent travail de sélection est de parvenir à une augmentation considérable de la production en grains et en fourrage à partir d'un choix précoce des lignées les plus productives (grains) avec des qualités nutritives meilleures (fourrage).

Les sélectionneurs peuvent estimer la valeur nutritive à l'aide d'infra-analyseurs, appareils permettant de tester rapidement de nombreuses plantes. D'autres paramètres comme l'appétibilité du fourrage peuvent être mesurés au cours de la sélection. Ce dernier paramètre mesure l'envie des animaux pour une variété et leur envie de la consommer. Il est testé avec des animaux soit en 'cafétéria d'auge' où plusieurs lignées sont mises à la disposition des animaux, soit en parcelles pour reproduire des conditions de pâturage comme dans la pratique (Carew *et al.*, 1980; Graham & Wilson, 1980; Andrieu *et al.*, 1979; Gérard *et al.*, 1997, Gérard & Buerkert, 1999; Gérard *et al.*, 2001).

9.2 Détermination de la valeur nutritive des aliments

La valeur énergétique d'un fourrage dépend avant tout de sa teneur en matière organique digestible et par là du coefficient de digestibilité de cette matière organique. La digestibilité est le principal facteur influençant la valeur alimentaire d'une variété fourragère (Eichhorn *et al.*, 1986; Anderson *et al.*, 1988; Moore *et al.*, 1995). Celle-ci varie considérablement selon le stade végétatif et l'âge de la plante et, pour un stade ou un âge donné, selon la variété et aussi selon le mode de récolte et de conservation.

La mesure de la digestibilité '*in vivo*' en utilisant des animaux est longue et très onéreuse (Dicko, 1980; Simon, 1982; Tecator, 1995). Par conséquent, il vaut mieux commencer par des méthodes de laboratoire permettant de prédire la digestibilité et la valeur énergétique des lignées de manière plus rapide et à coût faible.

Pour juger leurs qualités nutritionnelles, des analyses sont nécessaires pour déterminer la qualité de fourrage réellement consommé par les animaux et la contribution des différentes parties de la plante (feuilles, tiges, et épis) dans sa valeur alimentaire totale (Boudet, 1978; Andrieu, 1979; Gillet, 1980; Graham & Wilson, 1980; Le Houérou, 1980; Pizarro *et al.*, 1984; Warndorff, 1985; Bélanger & McQueen, 1995; Tedonkeng *et al.*, 1997).

L'évaluation de la qualité nutritive des plants des 20 lignées retenues comme type 'mil à fourrage' (tableau 31), devrait permettre de classer les lignées selon leurs valeurs alimentaires. Le choix représente néanmoins une large diversité en hauteurs et précocité. Les résultats peuvent démontrer la diversité sur le plan nutritif, ainsi que les possibilités de sélection sur ce critère. Cette possibilité n'est pas évidente; pour le maïs par exemple il est plutôt rare qu'on fait une sélection précoce sur base des qualités nutritives des parties végétatives (Behaeghe, communication personnelle).

9.3 La démarche méthodologique

L'essai a été conduit à l'Institut des Régions Arides de Médenine dans une parcelle protégée par un filet anti-oiseaux. Le semis des grains des lignées à tester a été effectué en ligne au début du mois de mai, suivi d'un démariage des plants 15 jours après la levée.

Trente jours après la 1^{re} irrigation, celle-ci est devenue régulière toutes les semaines jusqu'à la récolte. Nous sommes partis avec une quinzaine d'individus pour chaque lignée qui était disposée en 2 répétitions randomisées.

9.3.1 Evaluation à partir des caractéristiques botaniques du fourrage sur pied

Les différentes parties de la plante et l'âge sont les deux caractéristiques principales qui déterminent la digestibilité de la plante sur pied et permettent donc de l'estimer. L'année, le lieu de culture et la variété, ont aussi une influence sur la digestibilité d'une espèce à un stade donné du cycle de végétation (Boudet, 1978; Dicko, 1980; Jarrige, 1980; Le Houérou, 1980). Andrieu *et al.* (1979, cités par Jarrige, 1980) ont pu calculer des équations linéaires ou curvilignes entre la digestibilité et l'âge, et entre la digestibilité et la production des tiges et l'épi. La constitution morphologique de la plante est un bon critère pour déterminer la digestibilité de la plante sur pied surtout quand elle est associée à l'âge. Elle explique notamment qu'à âge égal, les variétés tétraploïdes, un peu plus feuillues, sont un peu plus digestibles que les variétés diploïdes de même précocité, ou qu'à la montaison les variétés précoces sont un peu plus digestibles que les variétés tardives de la même espèce (Demarquilly & Jarrige, 1981; Ward, 2001).

Les évaluations morphologiques de ces lignées sur pieds ont été limitées aux caractéristiques suivantes:

Long=longueur de la plante [cm] (mesurée du niveau du sol au sommet de la panicule);

Diam= diamètre de la tige [mm] entre le 3^{ème} et le 4^{ème} nœud à partir du sommet;

Nbmfeuil= nombre moyen de feuilles par plante;

Nbmtallepro= nombre moyen de talles productives par plante (nombre moyen de talle avec de panicules portant des graines par plante);

Pdschand/lig= poids des panicules par ligne [kg];

Pdschand/pt= poids moyen des panicules par plante [g];

Pdsmchprin= poids moyen de la panicule principale [g];

Pdsm1000gr= poids moyen des 1000 graines [g];

Coulgraine= couleur de la graine (4= gris, 5= gris foncé);

Initia= nombre de jours du semis à l'émergence des panicules;

Nbjoursflo= nombre de jours à la floraison;

Biom 1 m= aspect des plantes à 1 m de la hauteur moyenne (a= médiocre, b= intermédiaire et c= bon);

Biom 1,5 m= aspect des plantes à 1,5 m de la hauteur moyenne (a= médiocre, b= intermédiaire et c= bon);

Pdst= poids total des plantes (épis, tiges et feuilles) par ligne à la récolte [kg];

Pdsfeuil= poids des feuilles à la récolte/ligne [kg];

Pdstige= poids des tiges à la récolte/ligne [kg].

(Les symboles sont utilisés dans les tableaux ci-dessous)

Après la récolte des panicules, les parties restantes des plants (les chaumes) ont été rassemblées par lignée, étiquetées et expédiées au laboratoire des sciences animales de l'IRA pour la suite de l'évaluation.

9.3.2 Evaluation au laboratoire

Les analyses suivantes ont été effectuées sur des feuilles, des tiges et sur la plante entière (méthodes d'analyses: voir annexe 6):

- taux de matière sèche (MS);
- taux de matière minérale (MM);
- teneur en matières azotées (MAT);
- teneur en cellulose brute (CB);
- teneur en '*Neutral Detergent Fibre*' (NDF); et
- teneur en '*Acid Detergent Fibre*' (ADF).

(les symboles utilisés sont: MS feuilles; MM feuilles; MAT feuilles; CB feuilles; NDF feuilles; ADF feuilles; MS tiges; MM tiges; MAT tiges; CB tiges; NDF tiges; ADF tiges).

L'analyse chimique des plants doit faire ressortir le montant brut des divers éléments nutritifs présents. Ces valeurs ne sont néanmoins utiles que si l'ingestion et la digestibilité des plants sont connues (Graham & Wilson, 1980; Lamers *et al.*, 1996; Schroeder, 1996). Ainsi, pour le mil récolté à maturité, la production fourrage se limite en pratique aux seules feuilles, la tige étant trop dure pour être mangée.

La teneur en cellulose brute est généralement un bon critère de l'indigestible pariétal d'une plante donnée parce qu'elle est liée positivement à la teneur en parois et à la teneur en lignine. Elle ne détermine néanmoins qu'une partie des parois des plantes, constituées principalement par la cellulose, l'hémicellulose et la lignine.

Pour mieux caractériser les parois des plantes, des analyses des parois (NDF) et de la lignocellulose (ADF) sont conseillées.

L'ADF '*Acid Detergent Fibre*': mesure la fraction surtout cellulosique obtenue par ébullition en milieu acide d'un échantillon d'aliment. Elle est la plus utilisée en raison de

sa rapidité. 100 – ADF donne une bonne approximation de la digestibilité. Les lignocelluloses contiennent la totalité de la lignine.

L’NDF représente la teneur en parois totales, ou ‘*Neutral Detergent Fibre*’: c’est la fraction insoluble renfermant toutes les parois cellulaires végétales qui restent après qu’un échantillon d’aliment a bouilli dans une solution au détergent neutre (méthode d’analyse, annexe 6). Elle donne une valeur supérieur à 100 - NDF est un bon critère de la digestibilité (Demarquilly & Jarrige, 1981). Cette estimation de la digestibilité est souvent utilisée pour la comparaison de différentes provenances à l’intérieur d’une espèce donnée. Elle est donc tout indiquée pour l’étude comparative des lignées étudiées ici.

9.4 Résultats et discussions

Le test précoce est un moyen technique rapide utilisé par les sélectionneurs pour prévoir les conclusions d’une expérimentation. Il doit s’intégrer dans le schéma expérimental d’amélioration pour augmenter l’efficacité de la sélection (Kouamé, 1991; Verschave & Cilas, 1994). Les moyens techniques qu’on a utilisés (mesure des caractères morphologiques et analyses chimiques) ont permis d’obtenir des données susceptibles d’être analysées statistiquement (Tableau 31).

Nous avons procédé tout d’abord à des analyses de variance (ANOVA) variable par variable. Elles ont été effectuées pour vérifier l’existence ou non de différences significatives entre ces lignées, suivies des comparaisons des moyennes en vue de regrouper les lignées les plus homogènes. Le travail d’évaluation a été complété par les analyses factorielles et de classement.

Pour la plupart des caractères étudiés, les différences entre les lignées n’étaient pas significatives. On peut conclure qu’elles se comportent statistiquement de la même façon (tableau 32). Cette homogénéité peut s’expliquer par l’effet de la sélection et l’amélioration intensive menée sur ces lignées durant les années antérieures.

Six caractères seulement présentent une valeur de F significative. Il s’agit de:

- ❖ la longueur totale des plantes;
- ❖ le diamètre de la tige des plantes;
- ❖ la longueur des panicules;
- ❖ le poids de 1000 graines;
- ❖ le nombre de jours de l’émergence des panicules; et
- ❖ le nombre de jours à la floraison.

Tableau 31: Les moyennes des caractères morphologiques mesurés et les résultats d'analyses chimiques des 20 lignées étudiées

Lignées	Code ou origine	Longueur plante, cm	Diamètre tige, mm	Nombre Feuilles	Nombre Talles Prod/pl.	Pds Chand/ligne, kg Récolte	Long Chand Prin, cm	Pds Chand/plante, g	Pds Chand Prin, g	Pds 1000 Graines, g	Coul Grain, 4 claire 5 foncé	Jours Semis-->Epiaison	Jours Semis-->Floraison	Biomasse 1m, 3=bon	Biomasse 1,5 m 3=bon	pPds Végét, kg Récolte	Verse 5=résistant	Pds Total/ligne kg Récolte	Pds Feuill/ligne, kg Récolte	Pds Tige/ligne, kg Récolte	MS feuilles, %	MAT feuilles, %	CB feuilles, %	ADF feuilles, %	NDF feuilles, %	MS tiges, %	MAT tiges, %	CB tiges, %	ADF tiges, %	NDF tiges, %
3	770*243/15	178	10	7,8	2,3	0,879	15	76	35	11	4	51	54	2,0	2,0	3,0	5	3,9	0,7	2,4	57,7	7,2	26,9	35,1	61,5	33,3	5,9	34,4	41,9	68,3
10	838-1*351/6	182	9	8,7	2,2	0,579	15	77	30	13	4	44	51	3,0	2,5	2,8	5	3,4	0,8	2,1	58,8	6,6	25,5	35,6	61,3	36,3	4,4	35,5	42,7	72,3
14	861*357/3	207	11	9,0	2,2	0,735	18	87	41	10	4	55	60	2,0	1,5	3,0	4	3,7	0,9	2,1	55,1	6,5	28,8	38,0	62,4	35,6	2,2	34,5	42,1	68,4
18	861 *357/3	215	11	9,3	1,8	0,771	18	86	43	11	4	55	60	2,5	2,0	3,0	5	3,8	0,8	2,3	62,8	7,5	27,7	38,6	64,2	35,3	2,9	31,9	43,1	68,5
19	861*357/3	220	10	9,2	2,2	0,988	19	94	40	10	4	46	54	3,0	2,5	4,4	5	5,4	1,0	3,4	60,2	6,8	27,0	38,4	61,5	33,2	2,3	32,1	42,9	73,2
25	271 *325/4	212	11	8,5	1,4	1,037	23	87	47	14	4	44	49	3,0	3,0	3,1	4	4,1	0,7	2,3	56,3	7,0	26,5	31,2	61,8	34,8	3,4	38,3	46,2	74,8
46	257-1*46/2	231	12	9,6	1,6	0,723	19	81	36	13	4	46	52	3,0	3,0	5,3	5	6,0	1,0	4,3	55,7	6,2	26,3	35,6	51,6	30,2	3,9	37,5	45,7	71,2
49	770*243/6	217	12	9,0	1,4	0,888	17	70	37	12	4	51	58	3,0	3,0	5,1	5	6,0	1,0	4,1	58,8	7,4	25,9	36,8	59,8	33,0	4,2	44,1	49,1	69,7
64	861*357/3	191	10	7,7	1,5	0,597	20	70	39	11	4	51	54	3,0	2,5	3,0	6	3,6	0,7	2,3	53,9	6,4	27,5	35,0	67,1	33,2	3,9	40,6	45,2	67,1
75	839*265/13	204	11	9,5	1,4	0,817	21	95	47	11	5	57	60	3,0	3,0	4,2	4	5,0	0,9	3,3	52,4	6,0	29,7	38,0	63,6	32,6	5,1	37,9	47,0	72,1
93	770 RS	211	11	9,0	1,5	0,699	15	84	40	10	5	52	55	2,0	2,5	2,8	3	3,5	0,8	2,0	61,4	7,6	27,5	38,2	64,9	42,4	4,1	41,3	46,6	74,6
107	770*243/6	240	12	9,6	1,4	0,797	19	85	41	15	4	51	54	3,0	3,0	3,9	5	4,7	0,9	3,0	58,0	6,6	25,3	37,5	55,3	36,2	3,3	41,2	46,1	71,6
122	361*357/3	227	11	8,7	0,5	0,802	21	56	46	11	4	52	55	3,0	3,0	3,7	4	4,5	1,2	2,6	52,0	6,3	27,4	36,9	60,5	32,7	3,6	36,2	49,9	71,8
125	271-2*257/7	222	11	8,8	1,5	0,786	16	75	39	12	4	44	51	3,0	3,0	4,2	5	5,0	0,9	3,3	62,2	7,1	26,1	35,2	57,9	32,7	4,8	40,7	39,6	60,9
126	265*334/15	219	12	8,7	1,2	0,775	18	76	46	12	4	46	49	3,0	3,0	4,1	3	4,9	1,0	3,1	52,8	7,1	27,8	35,9	61,5	32,8	4,5	38,1	44,9	74,0
133	839*265113	273	13	10,3	1,1	1,137	23	90	54	13	4	46	54	3,0	3,0	7,0	5	8,1	1,4	5,6	55,4	6,4	27,2	36,0	60,2	38,2	4,5	38,8	46,8	75,2
159	265*334/15	239	13	9,8	1,2	0,918	17	81	50	11	5	57	60	3,0	3,0	5,9	4	6,8	1,2	4,7	60,4	6,4	28,2	36,7	63,2	31,7	4,4	38,6	45,8	70,7
167	256-2*57/12	209	11	8,5	1,4	0,615	15	70	34	14	5	51	56	2,0	3,0	4,3	5	4,9	1,0	3,2	54,0	7,6	25,1	30,9	58,6	38,6	4,1	32,9	47,3	74,5
173	810*3816	216	11	8,8	1,2	0,826	20	82	48	13	4	49	55	2,5	3,0	4,3	5	5,1	1,0	3,3	58,2	7,0	26,7	36,2	62,1	32,1	3,9	39,4	46,2	67,7
184	870-1*109/2	184	10	7,9	0,7	0,693	17	52	37	12	5	46	51	2,0	3,0	3,4	5	4,1	0,9	2,6	60,1	9,2	27,3	35,3	61,2	32,0	5,1	36,3	44,0	73,0

En réalité, pendant la sélection (voir 7.4.3) on n'avait pas utilisé ces caractères comme critère de sélection des plantes pour améliorer le groupe mil à fourrage.

Tableau 32: L'analyse de la variance à un critère de classification

Variables	Somme des carrées des écarts SCE	Carrés moyens CM	F calculé	Sig.
Long	18627,52	980,39	2,45	0,03
Diam	36,77	1,93	2,89	0,01
Nbmfeuil	16,87	0,88	1,93	0,08
Nbmtallepro	8,65	0,45	1,42	0,22
Pdschand/lig	0,78	4,12E-02	0,86	0,63
Longmchprin	225,56	11,87	4,42	0,00
Pdschand/pt	4857,03	255,63	0,42	0,97
Pdsmchprin	1370,32	72,12	1,25	0,31
Pdsm1000gr	79,16	4,16	10,06	0,00
Coulgraine	5,90	0,31	1,55	0,17
Initia	664,00	34,94	2,51	0,02
Nbjoursflo	508,87	26,78	2,20	0,04
Bio1m	7,40	0,38	0,86	0,62
Bio1,5m	7,47	0,39	1,74	0,11
Pdst	54,35	2,86	1,50	0,19
MS feuille	419,16	22,06	0,29	1,00
MM feuilles	219,73	11,56	1,60	0,15
MAT feuilles	19,08	1,00	0,61	0,85
CB feuilles	50,45	2,65	0,86	0,62
ADF feuilles	162,91	8,57	1,44	0,21
NDF feuilles	435,77	22,93	0,86	0,62
MS tiges	315,49	16,60	1,61	0,15
MM tiges	445,86	23,46	1,33	0,26
MAT tiges	31,97	1,68	0,91	0,58
CB tiges	412,66	21,71	1,41	0,23
ADF tiges	247,05	13,00	0,97	0,53
NDF tiges	456,59	24,03	1,38	0,24

(Nombre de degrés de liberté (ddl)= 19)

Les résultats de la comparaison des moyennes par le test Duncan au seuil de $\alpha = 5\%$ sont présentés en annexe 7. Nous avons obtenu plusieurs types de chevauchements dans le regroupement des lignées, en particulier pour la longueur moyenne de la plante et de la panicule, le poids moyen de 1000 graines, le taux de matière sèche de la tige, et le taux moyen de la matière minérale et l'ADF.

Les lignées 46, 159, 107 et 133 forment un groupe assez homogène pour la majorité des caractères étudiés. Les plantes de ces lignées sont caractérisées par leur

plus grande longueur moyenne avec un nombre moyen de feuilles élevé et un nombre moyen de talles productives faible. Ceci peut être expliqué par l'origine de ces lignées qui appartiennent aux populations traditionnelles de mil à fourrage (que l'on a décrit dans la première partie du travail). Par contre, les lignées 3, 10, 14, 19, 64 et 184 appartiennent aux populations des agriculteurs qui ont joué sur le nombre de talles (par conséquent le nombre de feuilles) pour sélectionner des cultivars à potentiel de rendement en fourrage élevé. Les plantes de ces lignées tallent plus que celles des autres lignées et produisent un nombre important de feuilles (7 feuilles par talle en moyenne). Elles fleurissent en moyenne 53 jours après le semis, à l'exception de la lignée 14 qui fleurit 7 jours après les autres. Dans le premier groupe, les lignées 133 et 159 semblent les plus productives, avec une production moyenne de 0,917 et 1,137 kg de panicules tandis que dans le deuxième groupe, les lignées 3 et 19 sont les plus productives avec un poids moyen des panicules d'ordre respectif de 0,88 kg et 0,99 kg.

Il reste à signaler que les lignées 46, 107 et 133 fleurissent à la même période: en moyenne 53 jours après le semis. Par contre, la lignée 159 à une floraison plus tardive tout comme celle de la lignée 14 du premier groupe: son nombre moyen de jours du semis à la floraison est de 60 jours.

La période de floraison est un caractère important et primordial d'une part pour la sélection d'espèces allogames comme le mil, tandis qu'elle détermine le choix des lignées d'une future variété synthétique d'autre part.

En ce qui concerne les analyses chimiques, on a trouvé que les lignées 46, 107, 133 et 159 se regroupent deux à deux pour le taux de matière minérale tige, la teneur en matière azotée totale tige, teneur en '*neutral detergent fibre*' feuilles et teneur en cellulose brute feuilles. Toutefois, les lignées 46 et 107 se regroupent pour le taux de matière sèche feuille, la teneur en '*neutral detergent fibre*' et le taux de matière sèche feuilles, alors que les lignées 133 et 159 se trouvent regroupées pour les teneurs en cellulose brute tige, l'ADF feuilles et la teneur en matière azotée.

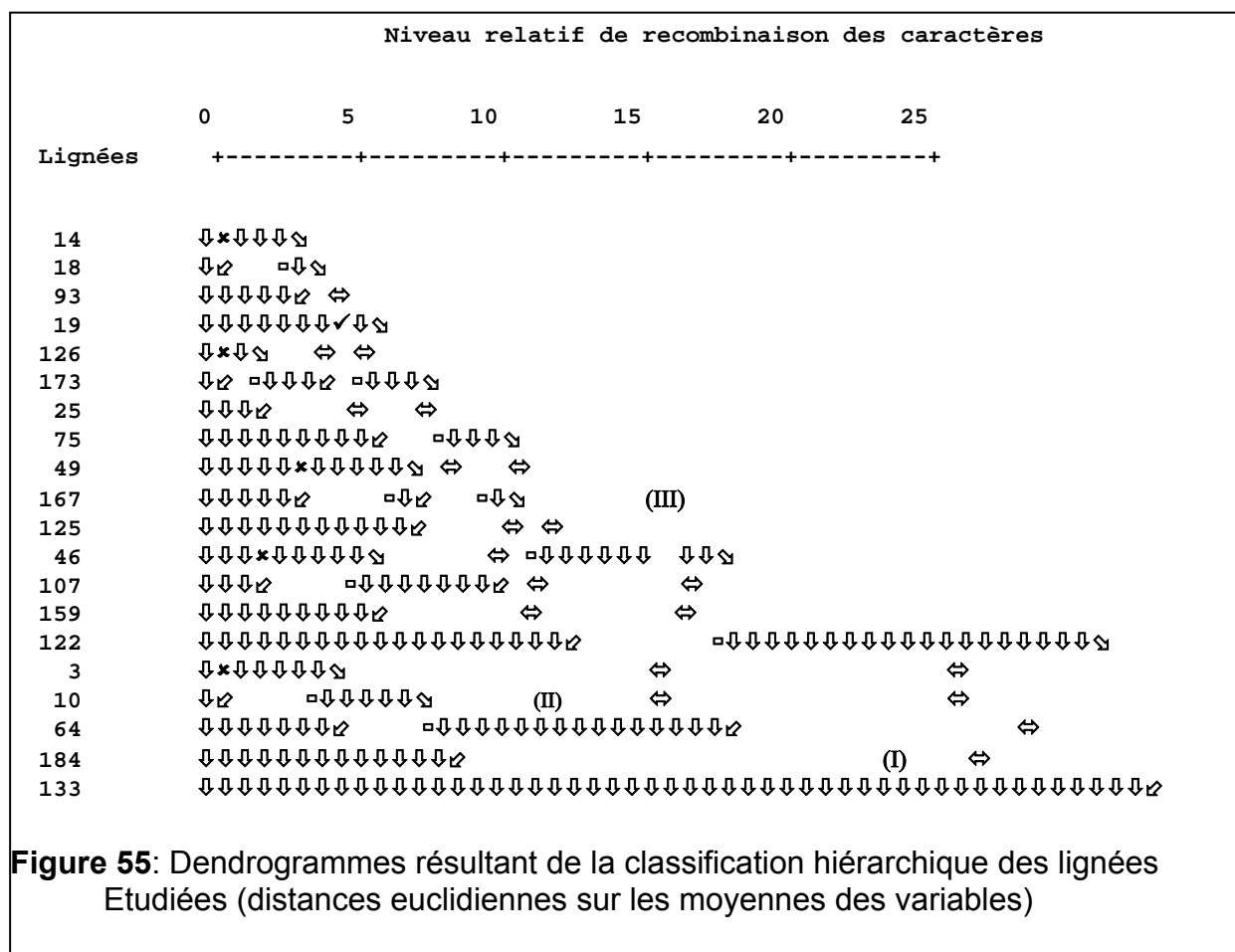
Les lignées 3, 10, 14, 19 et 184 sont distinctes des autres pour leur teneur en matière azotée totale feuille, la teneur en '*neutral detergent fibre*' feuille et tige, la teneur en cellulose brute feuille et tige, les ADF feuille et tige, et le taux de matière sèche.

Tous ces résultats de regroupement des lignées aident à la création des variétés synthétiques et permettent de choisir les meilleures combinaisons.

En considérant l'ensemble des caractères étudiés, nous avons construit un dendrogramme de classification des lignées (fig. 55) en analysant conjointement les caractères morphologiques et chimiques.

L'analyse cluster est utilisée dans un but purement descriptif. En décrivant les groupes formés par cette analyse, on obtient un ensemble d'informations qui pourraient être utile pour expliquer d'autres résultats.

L'analyse cluster peut utiliser différentes manières pour calculer la distance entre des groupes et fait intervenir divers algorithmes d'agrégation. Dans la mesure où l'intérêt est d'obtenir les groupes les plus contrastés possible, la méthode du '*complete linkage*' (la distance entre deux groupes est donnée par celles entre les objets les plus éloignés dans les groupes) et celle de Ward (minimisation de la variance intra-groupe) sont les plus adaptées (Pernès, 1984; Victoria-Feser, 1998).



Le dendrogramme résultant de ces analyses fait apparaître nettement trois groupes. Un groupe (II) formé des 4 lignées 3, 10, 64 et 184 qui rejoint un autre grand groupe (III) à un niveau relatif de recombinaison de 15 (fig. 55). La lignée 133 a donné un groupe à part à un niveau relatif de recombinaison de 25.

Pour étudier les interrelations entre les caractères et leurs effets sur la structuration de la lignée, on est passé à des analyses en composantes principales ce qui nous a permis d'extraire l'essentiel de l'information contenue dans le tableau des données et d'obtenir une représentation sous forme d'image plus facile à interpréter (figures 56 et 57).

Trois axes factoriels ont été retenus, permettant de décrire 67,4 % de la variabilité globale (tableau 35).

Tableau 33: Signification des axes de l'analyse en composantes principales

Facteurs	% d'inertie	% d'inertie cumulée
1	29,3	29,3
2	24,1	53,4
3	14,0	67,4
4	7,5	75,0
5	6,5	81,5
6	4,4	85,9
7	3,2	89,1
8	3,0	92,2
9	2,1	94,3
10	1,8	96,1
11	1,0	97,1
12	0,9	98,0
13	0,6	98,6
14	0,5	99,1
15	0,4	99,5
16	0,3	99,7
17	0,1	99,8
18	0,1	99,9
19	0,1	100,0

Les caractères qui contribuent le plus à la définition des axes sont le nombre des talles productives, le poids des panicules de toutes les plantes de la ligne en kg, le poids de panicules/plante en g, le poids de la panicule principale en g, la biomasse des plantes à 1,5 m de longueur, et MATF, MMT et MATT (tableau 34).

La première composante est un axe de la composition chimique des plantes (MATF, MMT et MATT). La deuxième composante est un axe qui décrit principalement l'aspect morphologique des plantes (nombre de talles productives, poids de

panicules/plante (g) et la biomasse des plantes à 1,5 m de longueur totale des plantes). Enfin, la troisième composante est un axe de rendement en grains.

Tableau 34: Pourcentage d'inertie (λ) des 3 premiers axes et la contribution des caractères dans chaque axe pour l'analyse en composantes principales

Caractères	Axe 1	Axe 2	Axe 3
	$\lambda = 29,30$	$\lambda = 24,10$	$\lambda = 14,02$
Long	-0,049021	0,039840	0,008638
Diam	-0,021074	0,043020	-0,001744
Nbmfeuil	-0,022600	-0,001461	0,015352
Nbmtallepro	0,051467	-0,253255	0,146977
Pdschand/lig	-0,086135	0,005707	-0,013815
Longmchprin	-0,051921	0,011322	-0,046039
Pdschand/pt	-0,061165	-0,089528	0,049337
Pdsmchprin	-0,069730	0,016372	-0,064680
Pdsm1000gr	0,027089	0,052969	0,054440
Coulgraine	0,067285	-0,004661	-0,017664
Initia	0,028956	-0,034307	-0,041874
Nbjoursflo	0,022104	-0,030246	-0,027542
Bio1m	-0,046698	0,029642	0,016587
Bio1,5 m	0,030901	0,070403	0,027086
MS feuille	0,043216	-0,013459	0,021037
MM feuilles	0,059622	0,066618	0,016767
MAT feuilles	0,093761	0,011000	-0,005021
CB feuilles	0,024444	-0,023117	-0,025965
ADF feuilles	0,021276	-0,022662	-0,006654
NDF feuilles	0,042721	-0,033203	-0,030957
MS tiges	0,032704	-0,022923	0,014532
MM tiges	0,102596	0,075090	0,099679
MAT tiges	0,136153	0,044878	0,008957
CB tiges	0,033541	0,032584	0,014086
ADF tiges	0,025813	0,018753	-0,021966
NDF tiges	0,027069	-0,002431	-0,004931

Les corrélations des caractères avec les axes factoriels 1,2 et 3 ont permis de représenter les lignées dans un premier plan, défini par les axes 1 et 2, puis dans un deuxième plan, défini par les axes 1 et 3. Le premier plan restitue 53,41% de la variabilité globale et le deuxième plan restitue 49,34% de la variabilité avec une inertie de 29,31% sur l'axe 1, 24,1% sur l'axe 2 et 14,03 % sur l'axe 3.

La figure 54 (1^{ier} plan) donne la répartition simultanée des 20 lignées, projetées dans le système d'axes 1 et 2 (53,41% de la variabilité globale), et permet de dégager 4 groupes qui se détachent clairement sur le graphique:

- les lignées 3, 10, 49, 64, 93, 125, 167 et 184 semblent se regrouper pour les caractères de l'analyse chimique, surtout la matière minérale et la matière azotée, mais divergent pour l'aspect morphologique des plantes (axe 2). Donc, deux sous-groupes de lignées se forment selon leur répartition sur l'axe 2. Le premier sous-groupe est formé par les lignées 49, 125 et 167 qui ont corrélé positivement avec le nombre moyen de talles, poids moyen de panicules et biomasse à 1,5 m de longueur de plantes. Le deuxième sous-groupe, formé par les lignées 3, 10, 64 et 93, a contribué négativement à l'axe 2; par conséquent la corrélation de ces lignées avec les caractères morphologiques des plantes était négative. La présentation de toutes les lignées dans le deuxième plan (axe 1-3) montre un regroupement total des lignées, toutefois les lignées 10 et 125 ont fortement et positivement corrélé avec l'axe 3, alors que les lignées 64 et 49 ont corrélé négativement avec le même axe.
- les lignées 14, 18, 19, 46, 75, 107, 122, 126, 133, 159 et 173 corrént négativement avec l'axe 1 et forment deux sous-groupes bien distincts. Le sous-groupe '3' est formé par les lignées 46, 107, 126, 159 et 173, qui corréle positivement avec l'axe 2, tandis que le sous-groupe '4' avec ses lignées 14, 18, 19 et 75 corréle fort négativement avec ce même axe 2 qui représente la morphologie des plantes. La présentation de ces lignées dans le deuxième plan montre toujours deux sous-groupes, mais avec une permutation de la lignée 19 qui rejoint les lignées 46 et 107 restantes du sous-groupe 3. Ce groupe de lignées corréle positivement avec l'axe 3. Tout le reste des lignées se trouve dans le sous-groupe 4 par leur corrélation négative avec cet axe 3 qui explique en partie le rendement en grains des plantes.
- Il reste à signaler que la lignée 122 a corrélé positivement avec l'axe 2 et négativement avec l'axe 3.

Tous ces résultats s'expliquent par les corrélations des caractères étudiés et leur contribution à chaque axe. Toutefois, ces caractères qui rangent les groupes dans le même sens ne sont pas nécessairement corrélés entre eux et peuvent donc être éloignés dans l'ACP. Par conséquent, un test de corrélation semble nécessaire pour mieux expliquer le regroupement des lignées et répondre à l'un des objectifs de ce travail qui est d'étudier des liaisons entre les variables morphologiques et les variables

chimiques, dans le but d'arriver à déterminer une variable des analyses chimiques par une autre morphologique. C'est un résultat qui sera très utile pour la suite du travail de sélection.

L'outil le plus souvent utilisé pour étudier ces liaisons est le coefficient de corrélation linéaire, appelé aussi coefficient de corrélation de Bravais-Pearson (Collin, 1998; Grasland, 2000; Bar-Hen, 2001a).

La matrice globale de corrélations des caractères est donnée en Annexe 8. Ce tableau est riche en données; nous en tirons ici trois conclusions:

- 1) On y remarque pas mal de corrélations significatives, qui pourraient être introduites et utilisées dans des index de sélection. Au chapitre 7.4.2.2 on n'avait retenu qu'une pondération 'économique'. La formule pourrait maintenant être améliorée en introduisant des caractères non économiques, mais hautement corrélés à de facteurs économiques, résultant à un autre plan de pondération.
- 2) Les paramètres métriques et pondéraux sont souvent hautement corrélés entre eux. On pouvait s'y attendre, mais il faut en tenir compte lors de la sélection, par exemple quand on veut sélectionner des plantes plus courtes, donc dans un sens contraire à ce groupe de caractères liés. Il faudra chercher à dissocier certains facteurs.
- 3) Moins attendu et plus remarquables sont les diverses corrélations significatives du 'poids 1000 graines' avec deux groupes de caractères: (i) corrélation hautement négative avec la tardiveté (épiaison et floraison); (ii) corrélation hautement significative avec la teneur cellulose brute, ADF et NDF des feuilles, trois bons indices de l'(in-)digestibilité des feuilles. On peut traduire en termes agronomiques: (i) des lignées précoces ont tendance à produire de graines plus grosses; (ii) des lignées portant des feuilles plus vertes (plus digestibles) à la récolte ont tendance à avoir des graines plus grosses.

Ces dernières formulations nous amène à l'interprétation de ces constatations. Il est connu en céréaliculture qu'il est important de garder des feuilles bien vertes pendant le 'remplissage' des graines. Ceci est d'ailleurs la raison d'un traitement fongicide sur le blé souvent appliqué à ce moment du développement. Les corrélations du 'poids 1000graines' aux facteurs 'précocité' et 'feuilles vertes' nous fait conclure que, pour le mil, on pourrait arriver au même résultats par la sélection: des lignées à floraison précoce, combinée à une maturation lente. Une valeur ajoutée serait alors une meilleure qualité fourragère des feuilles.

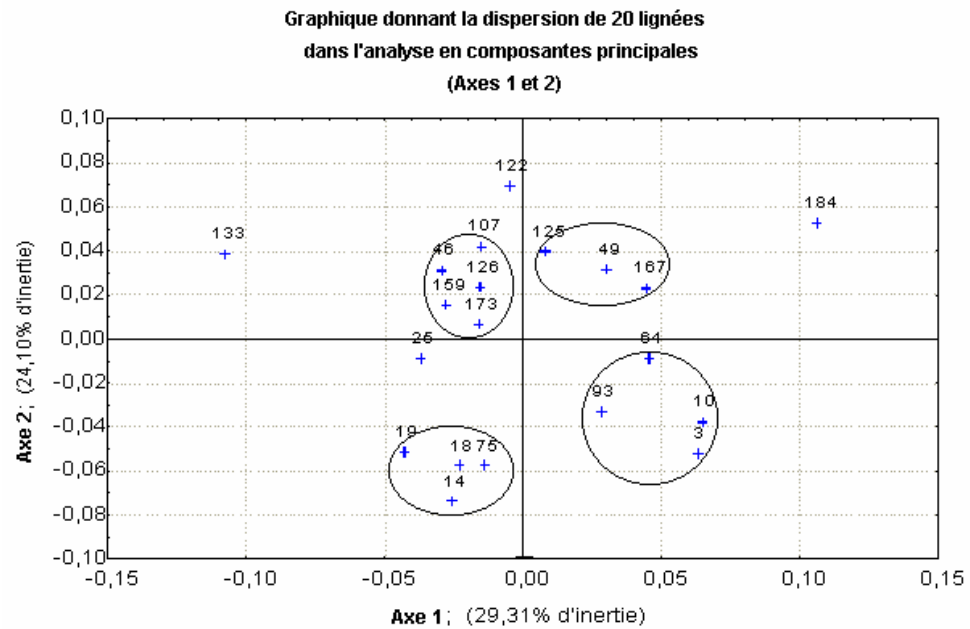


Figure 56: La dispersion des lignées sur le plan des axes 1, 2 dans une analyse de correspondances

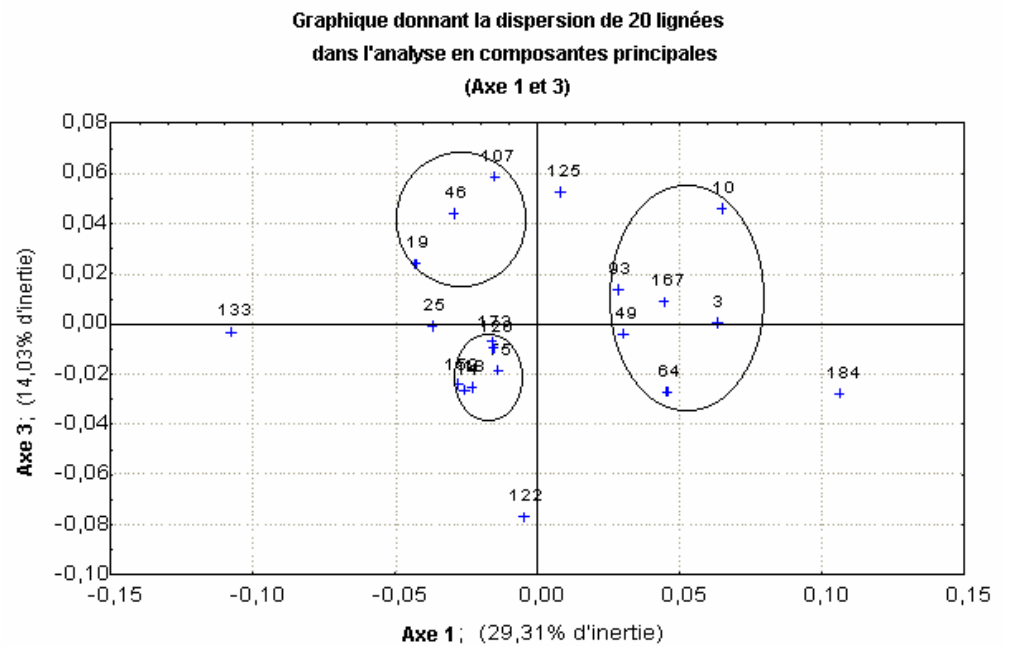


Figure 57: La dispersion des lignées sur le plan des axes 1, 3 dans une analyse de correspondances

9.5 Résultats vus dans le cadre de la sélection

Les résultats présentés dans cette partie du travail se rapportent directement aux hypothèses de recherche. Les analyses ont porté sur 20 lignées au sein du groupe mil à fourrage, sélectionnées à l'Institut des Régions Arides de Médenine. Ces lignées avaient toutes obtenu un score élevé aux tests d'évaluation morphologique basée sur les indices de sélection pour le fourrage. Elles représentent en plus la diversité génétique des populations de mil local. Le tableau 35 donne les résultats orientés sur possibilités de sélection. Ce tableau a été fait au travers de divers calculs sur bases des données du tableau 31:

Tableau 35: La diversité d'une série de critères de sélection dérivés des analyses présentées au tableau 31

Lignées	PdsChand/ligne, kgRécolte	JoursSemis-->Floraison	pPdsVégét, kgRécolte	1/Paille/epi	PdsFeuil/ligne, gSec	100-NDFFeuilles	PdsTiges/ligne, gSec	PdsTigesFeuilles/ligne, gSec	100-NDFTiges	MSfeuillesDig/ligne, g	MAFfeuilles/ligne, g	MStigesDig/ligne, g	MATtiges/ligne, g	MstotalDig/ligne, g	MATotal/ligne, g
3	0,879	54	3,0	1/3,4	404	38,5	799	1203	31,7	156	29,1	253	47,2	409	76,2
10	0,579	51	2,8	1/4,8	470	38,7	762	1233	27,7	182	31,0	211	33,5	393	64,6
14	0,735	60	3,0	1/4,1	496	37,6	748	1244	31,6	186	32,2	236	16,4	423	48,7
18	0,771	60	3,0	1/3,9	502	35,8	812	1314	31,5	180	37,7	256	23,5	436	61,2
19	0,988	54	4,4	1/4,5	602	38,5	1129	1731	26,8	232	40,9	303	26,0	534	66,9
25	1,037	49	3,1	1/3,0	394	38,2	800	1195	25,2	151	27,6	202	27,2	352	54,8
46	0,723	52	5,3	1/7,3	557	48,4	1299	1856	28,8	270	34,5	374	50,6	644	85,2
49	0,888	58	5,1	1/5,7	588	40,2	1353	1941	30,3	236	43,5	410	56,8	646	100,3
64	0,597	54	3,0	1/5,0	377	32,9	764	1141	32,9	124	24,1	251	29,8	375	53,9
75	0,817	60	4,2	1/5,1	472	36,4	1076	1547	27,9	172	28,3	300	54,9	472	83,2
93	0,699	55	2,8	1/4,0	491	35,1	848	1339	25,4	172	37,3	215	34,8	388	72,1
107	0,797	54	3,9	1/4,9	522	44,7	1086	1608	28,4	233	34,5	308	35,8	542	70,3
122	0,802	55	3,7	1/4,6	624	39,5	850	1474	28,2	246	39,3	240	30,6	486	69,9
125	0,786	51	4,2	1/5,3	560	42,1	1079	1639	39,1	236	39,7	422	51,8	658	91,5
126	0,775	49	4,1	1/5,3	528	38,5	1017	1545	26,0	203	37,5	264	45,8	468	83,2
133	1,137	54	7,0	1/6,2	776	39,8	2139	2915	24,8	309	49,6	531	96,3	839	145,9
159	0,918	60	5,9	1/6,4	725	36,8	1490	2215	29,3	267	46,4	437	65,6	703	111,9
167	0,615	56	4,3	1/7,0	540	41,4	1235	1775	25,5	224	41,0	315	50,6	539	91,7
173	0,826	55	4,3	1/5,2	582	37,9	1059	1641	32,3	221	40,7	342	41,3	563	82,1
184	0,693	51	3,4	1/4,9	541	38,8	832	1373	27,0	210	49,8	225	42,4	435	92,2
<i>moy.</i>	<i>0,803</i>	<i>55</i>	<i>4,0</i>	<i>1/5,0</i>	<i>538</i>	<i>39,0</i>	<i>1059</i>	<i>1596</i>	<i>29,0</i>	<i>210</i>	<i>37,2</i>	<i>305</i>	<i>43,0</i>	<i>515</i>	<i>80,3</i>

On peut conclure du tableau 35 que: a) la 'digestibilité' est exprimée par $100 - \text{NDF}$, qui a une valeur moyenne basse de 39 pour les feuilles. Mais comme ce facteur varie entre 35 à 48 pour un groupe de 20 échantillons. Il y a certes une marge pour la sélection; nous suggérons donc d'insérer ce critère comme facteur de sélection; b) lié au précédent on peut calculer la matière sèche digestible produite sous forme de feuilles, par

$$\text{PdsFeuilles en gMS} * 100 - \text{NDF feuilles} / 100. \quad (6)$$

Ce facteur varie fortement de 124 à 309 g/ligne de matière sèche digestible en feuilles, rien que pour les 20 lignées étudiées. Les possibilités de sélection sont donc très larges; c) la MATfeuilles est pour une bonne partie similaire au caractère précédent, mais en partie dissociée, voir la dernière lignée 184, qui, par sa teneur en %MAT qui s'élève à 9,2 (tab. 31), est la plus élevée en production MATfeuilles, combinée à une valeur moyenne pour le caractère précédent; d) la précocité se lit en jours semis→floraison. La moyenne de 55 jours est plutôt tardive. Néanmoins, même parmi ces types fourragères, il y a deux lignées avec des durées semis-floraison qui sont inférieures à 50; et e) le rapport épi/paille présente une possibilité de sélection pour une augmentation de la production de graines, et donc une augmentation du revenu, sans augmentation de la biomasse; ce facteur se lit dans le tableau sous forme de $1/X$, X étant paille/épi. On constate une diversité de 1/3,4 à 1/7,3. Là aussi, la population qu'on a formée, présente de larges possibilités pour une sélection mieux ciblée.

Parmi les lignées, il faut attirer l'attention sur les possibilités de la lignée 133. Cette lignée a la plus haute production en chandelles combinée à la plus haute production en matière digestible en feuilles. Ces bons caractères sont combinés à une tardiveté relative. Or, on a déjà rencontré cette lignée au chapitre 8. On peut en déduire des possibilités d'amélioration manifestes, mais aussi que la sélection doit concorder à la technique culturale pour pouvoir retenir un plus grand profit de la sélection. Dans les conditions de la zone étudiée, cela veut dire: une irrigation supplémentaire, combinée ou bien à un semis plus précoce ou bien à une récolte un peu plus tardive.

Le cas analogue se présente pour la relation verse et fumure: une sélection pour une meilleure résistance à la verse permet d'augmenter les quantités de fumure données à la culture.

Chapitre X

Conclusions

1. Principes de base du travail

Les recherches, entamées il y a huit ans, étaient basées sur un double choix bien prémédité:

1.1 *But*: étudier et sauvegarder la biodiversité locale du mil, une culture en régression au début de l'étude, mais tolérante à la salinité des eaux des puits locales. En plus, étudier la potentialité intrinsèque de ce matériel génétique en vue d'une sélection de semences améliorées.

1.2 *Méthode*: faire cette étude en étroite collaboration avec des agriculteurs expérimentés. En réalité, ces agriculteurs étaient les meilleurs spécialistes à consulter, surtout mais pas seulement dans un contexte de manque d'études scientifiques locales à ce sujet. Cette collaboration a été recherchée à trois stades cruciaux du travail: la collecte du matériel de base, le choix des critères de sélection, et les essais de lignées expérimentales dans la culture courante. La collaboration s'est montrée fructueuse dans les deux sens. Les agriculteurs se sont vivement intéressés aux résultats obtenus sur le terrain et en ont tiré des conclusions immédiates en intégrant des semences provenant des chandelles des essais à leur propres semences.

2. Bilan pratique, résumé

2.1 Le *matériel de base* collecté auprès des agriculteurs s'est avéré très diversifié génétiquement, avec une grande variabilité morphologique (niveau plante), ainsi que des caractères culturels. Ces origines ne se regroupent pas suivant un système géographique, mais plutôt suivant les cultivateurs individuels. En principe, chaque agriculteur produit ses propres semences, à partir d'un choix personnel de chandelles à la récolte. Il en résulte une diversité relative d'idées sur le type recherché, et suivant des buts secondaires: qualités de la graine, la paille ou un supplément en fourrage. L'étude sur un grand nombre de paramètres, permet de conclure que tout le matériel confondu peut être regroupé dans un seul pool génétique, éparpillé en 'cultivars' à l'échelle des agriculteurs. De l'autre côté, on peut en espérer qu'un remembrement génétique pourrait produire des géniteurs améliorés par la recombinaison des caractères. Ce même pool aurait donc un double but: la sauvegarde de la biodiversité et une population de base pour la sélection.

2.2 Les deux premières années du travail d'amélioration étaient destinées à la *recombinaison*, avec le semis des descendance en lignes, une fécondation libre, mais combinée à une sélection plutôt individuelle. Par la suite, on est passé à une sélection 'ear to row' avec une évaluation pondérale des lignes, des cotations visuelles et des marquages de plantes individuelles, suivie d'un choix des meilleures plantes dans les meilleures lignes. Ainsi, on a recherché des lignées de type 'paille' et d'autres de type 'fourrage' tout en regardant la production grain comme premier critère de choix, et en tenant compte de la qualité des graines. Comme le semis se faisait en ligne simple avec fécondation libre et allogame, on gardait une grande diversité génétique à l'intérieur des lignées sélectionnées, tout en cherchant une certaine homogénéité morphologique. Après une série d'essais 'toute autofécondation forcée', on a écarté cette technique (diminution drastique de la diversité génétique). On a aussi écarté l'objectif de créer des variétés 'hybrides'; le but était plutôt d'arriver à une variété synthétique par la recombinaison de quelques lignées morphologiquement semblables. On voulait garder une diversité à l'intérieur de la variété, comme support de la biodiversité, l'adaptabilité aux conditions inégales des terrains et des attaques, et l'acceptabilité par les cultivateurs.

2.3 Finalement, afin d'évaluer le *potentiel* d'amélioration, on a multiplié quelques bonnes lignées en petites parcelles pour les tester en conditions de culture traditionnelle, sans faire des essais classiques en station. Ce choix s'est fait sur base des principes préétablis combinés avec le manque de moyens dans la station expérimentale. La culture traditionnelle en 'planches' facilite la répétition de parcelles d'essais à l'intérieur du champ de l'agriculteur. La première année donnait à 100 % des différences significatives, avec la meilleure lignée produisant en moyenne 151% des 'cultivars' propres aux agriculteurs. La deuxième année les résultats étaient moins significatifs: 1 seul essai donna des différences valables, la meilleure lignée donnant quand-même 131% du cultivar local pour le facteur 'production de chandelles'. Les possibilités d'amélioration à partir du matériel local semblent donc prouvées.

2.4 Le dernier chapitre donne, pour 20 lignées, des *analyses détaillées* sur les chandelles, feuilles, tiges (avec la digestibilité), le rapport épi/paille, MAT ou cellulose brute. Tous ces caractères ont montré une très grande variabilité, souvent plus grande que ce que l'on rencontre habituellement dans les cultures. Ces résultats prouvent des

possibilités, dans une région à grande carence en fourrage au moment des récoltes du mil. Ils démontrent en même temps qu'il y a d'autres approches possibles pour l'amélioration de la production en grain.

2.5 Sans qu'on puisse actuellement présenter des variétés, le travail effectué s'est montré très efficace quand on considère les *agriculteurs locaux*. Dès la première année d'essai en culture, la récolte des bonnes lignées a été redistribuée par les agriculteurs entre eux, et utilisée en remplacement ou en mélange avec leur propres 'cultivars', rendant ainsi la comparaison plus difficile pour la deuxième année d'essais. En plus, on a constaté une augmentation spectaculaire de la surface cultivée en mil dans la région.

3. Conclusions générales

Le choix délibéré des principes de base (une amélioration des semences uniquement à partir de matériel végétal local, avec des méthodes d'amélioration très proches des agriculteurs, tout en sauvegardant la biodiversité) se distancie en première instance de la méthodologie rigoureuse habituelle d'un doctorat. Néanmoins, la volonté d'introduire une approche scientifique dans cette étude a bien renforcé la valeur des conclusions.

3.1 Le bien-fondé de la lutte pour *la conservation de la richesse génétique locale*. On a pu constater que la biodiversité du mil local du Sud de la Tunisie est bien plus grande qu'on aurait pu croire sans cette étude et qu'elle peut former une bonne base de départ pour un développement futur. En effet, il y a 25 ans, la culture du mil était concentrée sur l'île de Jerba (fig. 52), qui a abandonné par la suite une bonne partie de ses cultures annuelles, pour s'orienter au tourisme. Il n'était pas exclu que le mil aurait suivi la voie des populations locales des tomates et des cucurbitacées, qui ont tout simplement disparues, si on n'avait pas entamé le présent travail. De plus, on a constaté que, pour ces cultures, les semences d'origine étrangère nécessitent une irrigation en eau potable onéreuse. Par contre, le mil se comporte très bien avec de l'eau de puits locale. Ceci peut être un stimulant pour un travail de sauvegarde organisé pour d'autres plantes cultivées ou naturelles, par exemple pour la sauvegarde ou le rétablissement et la revalorisation de la zone steppique.

3.2 De plus en plus, on cultive le mil sur le continent, en *combinaison avec les oliviers*, avec un double effet supplémentaire: (i) une irrigation dont profitent aussi les oliviers, et (ii) un recouvrement du terrain diminuant l'érosion éolienne.

3.3 Il apparaît de plus en plus que la sélection du mil devrait être accompagnée d'une *étude des techniques culturales* du mil. Trois exemples: (i) afin de diminuer la compétition en lumière avec l'olivier, sélectionner une paille plus courte et/ou établir des cultures du mil respectant une distance vis-à-vis des oliviers (± 17 arbustes par ha); (ii) augmentation de la résistance à la verse combinée à une plus grande quantité de fumure. (iii) profiter du potentiel productif provenant de la tardiveté tout en augmentant ou le rapport épi/paille ou la production de fourrage, par un avancement dans le temps du semis ou un recul de la récolte.

3.4 On espère que le travail de *sélection pourrait continuer* en vue de la création de réelles variétés, de préférence à but spécifique (fourrage, paille ou culture sous oliviers).

3.5 On espère aussi que ce travail pourrait être un *support pour d'autres personnes* travaillant dans des régions en développement, sur des cultures non industrialisées. Il nous semble établi qu'une sélection douce du matériel sur place, en ne changeant rien aux techniques culturales, peut être une bonne première approche d'une amélioration culturelle, qui peut éveiller un intérêt positif au niveau des paysans, tout en nous informant à temps de problèmes dont on est pas toujours conscient dans les conditions artificielles de recherche dans les stations expérimentales.

Bibliographie

Références bibliographiques

- Abaab A., M. Ben Salah, N. Nasr & M. Sghair 1993. Caractérisation des milieux et des systèmes des zones arides et désertiques Tunisiennes. Cours spécialisé 'Développement des zones arides et désertiques', IRA, CIHEAM-IAMM: 25pp.
- Abaab A. & N. Nasr 1996. Dynamique des systèmes Agro-pastoraux et développement en zones arides. Pages 474-480, in Acquis scientifiques et perspectives pour un développement durable des zones arides. Revue des régions arides, ISSN 0330-7956.
- Adeola O., D. King & B.V. Lawrence 1996. Evaluation of pearl millet for swine and Ducks. Pages 177-182 in J. Janick (éds). Progress in new crops. ASHS press, Alexandria, VA.
- Ahmadi N., L. Baudouin, H. Hocde, J. Lançon & G. Trouche 2001. Analyse des cas présentés par les groupes de travail de l'atelier. Pages 86-93 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001, France.
- Amadou M., P. Cellier, B.A. Monteny & J.P. Lhomme 1994. Estimation de l'évapotranspiration d'une culture de mil à l'aide d'un modèle de couvert épars. X^e Journées hydrologiques ORSTOM, Fonds documentaire 010008350: 20pp.
- Amblard S. & J. Pernès 1989. The identification of cultivated pearl millet (*Pennisetum*) amongst plant impressions on pottery from Oued Chebbi (Dhar Oualata, Mauritanie). Afr. Archaeol. Rev 7: 117-126.
- Amoukou A.L. & L. Marchais 1993. Evidence of a partial reproductive barrier between wild and cultivated Pearl millets (*Pennisetum glaucum*). Euphytica. 67: 19-26.
- Anderson B., J.K. Ward, K.P. Vogel, M.G. Ward, H.J. Gorz & F.A. Haskins 1988. Forage quality and performance of yearlings grazing switchgrass strains selected for differing digestibility. J. Anim. Sci. 66: 2239-2244.
- Andrews D.J. 2002. Decorative pearl millet, developed at University of Nebraska-Lincoln, earns All-America Selections Gold Medal. IANR's Agricultural Research Division and INTSORMIL, a U.S. Agency for International Research Project. University of Nebraska news release. <http://www.seedquest.com/news/releases/2002/september/4795.htm>.
- Andrews D.J., W.W. Hanna, J.F. Rajewski & V.P. Collins 1996. Advances in grain pearl millet: Utilization and production research. Pages 170-177 in J. Janick (éds), Progress in new crops. ASHS Press, Alexandria, VA.
- Andrews D.J., B. Kiula & J.F. Rajewski 1993. The use of protogyny to make hybrids in pearl millet. Pages 122-126 in J. Janick and J.E. Simon (éds). New crops. Wiley, New York.
- Andrews D.J., J.F. Rajewski & K.A. Kumar 1993. Pearl millet, New feed grain crop. Pages 198-208 in J. Janick and J.E. Simon (éds), News crops. Wiley, New York.
- Andrews D.J., J.F. Rajewski & S.C. Mason 1998. Grain Pearl Millet, A new crop being developed at UNL. Extended vision, January/February 1998 edition. University of Nebraska-Lincoln, <http://ardc.unl.edu/jan98.htm>: 2pp.
- Andrieu J., C. Demarquilly & Erna Wegat-litre 1979. Tables de prévision de la valeur alimentaire des fourrages. Pages 41-59 in Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants. Centre de Recherches Zootechniques et Vétérinaires de Theux, 63110 Beaumont. Imprimerie Jouve, 18, Saint-Denis, 75001 Paris, France.
- Appa Rao S., M.H. Mengesha & D. Sharma 1985. Collection and evaluation of pearl millet (*Pennisetum*) germplasm from Ghana. Economic Botany, 39(1): 25-38.
- Appa Rao S., M.H. Mengesha & K.N. Reddy 1996. Diversity in pearl millet germplasm from Cameroon. Genetic resources and crop evolution 43: 173-178.
- Appa Rao S., M.H. Mengesha & K.N. Reddy 1998. Développement et caractérisation de pools génétiques à caractères spécifiques chez le millet à chandelles. Bulletin des ressources phylogénétiques, 113: 23-26.

- Appa Rao S., M.H. Mengesha, P.K. Sibale & K. N. Reddy 1986. Collection and evaluation of pearl millet (*Pennisetum*) germplasm from Malawi. *Economic Botany*, 40(1): 27-37.
- Ashby J.A. 1986. Methodology for the participation of small farmers in the design of on-farm trials. *Agricultural Administration* 22: 1-19
- Ashby J.A., C.A. Quinos & Y.M. Rivera 1987. Farmers participation in on-farm varietal trials. Workshop on 'Farmers and Agricultural research: complimentary methods', IDS, University of Sussex, 26-31, July 1987.
- Ashraf M. 1994. Breeding for salinity tolerance in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 13(1): 17-42.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists) 1973. Changes in Official Methods of Analysis Made at the Eighty-sixth. Annual Meeting, 3rd supplement to 11th Edition. *Official Methods of Analysis-AOAC. Journal of the AOAC*, Vol. 56, N°2, 1973: 463-507
- Aubertin C., A. Alpha, O. Robert, A. Caron, C. Lévêque, F. Verdeaux & F. D. Vivien 1996. Coût incrémental et protection de la biodiversité. Etude réalisée à la demande du fonds français pour l'environnement mondial et du ministère de l'environnement. ORSTOM, F 010005660: 34 pp.
- Bacci L., C. Cantini, F. Pierrini, G. Maracchi & F.N. Reyniers 1999. Effects of sowing date and nitrogen fertilization on growth, development and yield of a short day cultivar of millet (*Pennisetum glaucum* L.) in Mali. *European Journal of Agronomy* 10: 9-21.
- Banks S. & T. Stewart 2002. Forage Pearl Millet. Ministry of Agriculture and Food, Ontario, Factsheet © Queen's Printer for Ontario, ISSN 1198-712x, <http://www.gov.on.ca/OMAFRA/english/crops/facts/98-045.htm>: 3pp.
- Baradat Ph., Th. Labbé & J-M. Bouvet 1994. Méthodologie de la sélection: Conception d'index pour la sélection réciproque récurrente: aspects génétiques, statistiques et informatiques. Pages 101-150 in *traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.*
- Bar-Hen A. 2001a. Probabilité et Statistique pour le DEA Biosciences. http://www.imep-cnrs.com/avner/Dea_u3/Dea_u3.html. Université Aix-Marseille III, France.
- Bar-Hen A. 2001b. Processus Statistique pour le DEA Environnement Marin. <http://www.imep-cnrs.com/avner/publication.html>. Université Aix-Marseille III, France.
- Bar-Hen A. 2002. Méthodes mathématiques pour les sciences de la vie. Cours de DEUG, <http://www.imep-cnrs.com/avner/publication.html>. Université Aix-Marseille III, France.
- Baril C. & J.C. Bergonzini 1994 a. De la génétique des populations à la génétique quantitative: Les modèles génétiques. Pages 9-24 in *traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.*
- Baril C. & J.C. Bergonzini 1994 b. De la génétique des populations à la génétique quantitative: Appréciation de la valeur génétique. Pages 25-37 in *traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.*
- Baril C. & J.C. Bergonzini 1994 c. De la génétique des populations à la génétique quantitative: Le modèle quantitatif. Pages 47-55 in *traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.*
- Baril C. & J.C. Bergonzini 1994 d. De la génétique des populations à la génétique quantitative: Formalisation de Barton et Turelli. Pages 57-62 in *traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.*

- Baril C. & J.C. Bergonzini 1994 e. De la génétique des populations à la génétique quantitative: Théorème fondamentale de la sélection. Pages 39-45 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Baril C. & A. Perrin 1994. De la génétique des populations à la génétique quantitative: Evolution de la variance génétique additive dans une population soumise à la sélection. Pages 63-68 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Bationo A., M.P. Sedogo, A. Buerkert & E. Ayuk 1993. Recent achievement on agronomic evaluation of phosphorus fertilizer sources and management in the West Africa semi-arid tropics. In Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions. Proceedings of the SCOPE workshop, 15-19 Novembre 1993, Dakar, Senegal. Montpellier, France, CIRAD, 406: 99-108.
- Baudouin L. 1994. Stratégies d'amélioration, état d'avancement des schémas de sélection: Sélection récurrente réciproque chez le palmier à huile. Pages 217-225 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Beauval V. 2001. Participer à des schémas de sélection participative impulsés par des chercheurs: Quels intérêt et implication pour les agriculteurs. Pages 100-104 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001.
- Behaeghe T. 2003. Communication personnelle. Professeur émérite, FLTBW/UGent. Coupure links 653 B-9000 Gent België, E-mail: tillo.behaeghe@pandora.be.
- Behaeghe T. 2004. Communication personnelle. Professeur émérite, FLTBW/UGent. Coupure links 653 B-9000 Gent België, E-mail: tillo.behaeghe@pandora.be.
- Bélangier G. & R.E. McQueen 1995. Digestibility and cell wall concentration of early- and late-maturing timothy (*Phleum pratense* L.) cultivars. Agriculture and Agri-Food Canada, Research Center, P.O. Box 20280, Fredericton, New Brunswick, Canada E3B 4Z7. Canadian journal of plant science: 107-112.
- Belkhoa K., L. Bortoli, J.P. Cointepas, P. Dimanche, A. Fournet & A. Mori 1973. Sols de la Tunisie: Les Sols de la Tunisie septentrionale. Bulletin de la division des sols N°5. 185pp.
- Belliard J., E. Nguyen Van & J. Pernès 1980. Analyse des relations génétiques entre formes spontanées et cultivées chez le mil à chandelle. Annales de l'amélioration des plantes. 30(3): 229-251.
- Bellon M.R. 1997. On-Farm Conservation as a Process: An Analysis of Its Components. International Development Research Center, Ottawa, Canada; Books, Using Diversity: 10 pp.
- Béninga M.B. 1993. Bilan des travaux d'amélioration variétale en Cote d'Ivoire. Pages 21-32 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Benoit M. 1982. Oiseaux de mil. Editions de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM). Collection mémoires n° 95, Paris: 119pp.
- Berthaud J. & A. Charrier 1987. De la domestication à l'amélioration des plantes. Techniques traditionnelles, Techniques 'modernes', ORSTOM, fonds documentaire, N°24522: 10pp.
- Bezançon G, J.F. Renno & K. Anand Kumar 1997. Le mil. Pages 457-482 in André Charrier, M. Jacquot, S. Hamon et D. Nicolas (éds). l'amélioration des plantes tropicales. CIRAD et ORSTOM.
- Bezot P. 1965. L'amélioration des variétés et des techniques culturales des céréales au Tchad. ORSTOM, fonds documentaire, N°22409: 8pp.

- Bidinger F.R. 2003. Breeding Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) Experimental Varieties for Terminal Drought Stress Environments. http://www.icrisat.org/text/research/grep/homepage/archives_cd/archives/pmdse.html: 3pp.
- Bidinger F.R., S. Chandra & V. Mahalakshmi 2003. Genetic improvement of tolerance to terminal drought stress in Pearl Millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). Genetic Resources and Enhancement Program; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT); Patancheru PO, Andhra Pradesh 502 324, India. http://www.Cimmyt.Cgiar.org/ABC/map/research_tools/wsmolecular/workshopmolecular/wsdroug htGeneticImp.html: 7pp.
- Bidinger F.R., V. Mahalakshmi, P. Soman & B.S. Talukdar 1987. Breeding for adaptation to environmental stress. Pages 269-279 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andhra Pradesh 502 324, India.
- Bilquez A.F. 1957. La production expérimentale des mutations et son rôle dans l'amélioration des plantes ORSTOM, Fonds documentaire N°28126: 7pp.
- Bilquez A.F. 1969. Méthodes d'amélioration des mils. Rapport de synthèse au cours de la réunion du groupe de travail réunis par l'IRAT à Ouagadougou, ORSTOM. Fonds documentaire N°28135: 24pp.
- Bilquez A.F. 1970. Aspect général des recherches sur les mils en Afrique. Séminaire 'mil-Sorghos', Bambey 31 août –4 septembre 1970, ORSTOM. Fonds documentaire N°05495: 7pp.
- Bilquez A.F. 1974. Amélioration des mils au Sénégal. Synthèse des résultats obtenus au cours des quatre premières années de travail et conclusions générales. ORSTOM, I.R.A.T fonds documentaire N°7949: 57pp.
- Bilquez A.F. & F. André. 1974. Une arme dans la lutte contre la faim 'Amélioration des mils'. Projet FED SE 21501525, ORSTOM, fonds documentaire, N°28093: 10pp.
- Bois J.F. 1993. Effets de la contrainte hydrique sur la photosynthèse du mil. Pages 161-171 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Boisseaux T. & O. Crassard 2003. Le secteur des Céréales en Inde. Missions économiques, Fiche de synthèse. © MINEFI-DREE/TRESOR, New Delhi 110021 Inde: 6pp.
- Bono M., J. D'arondel de Hayes & R. Vandevenne 1978. Le coût des semences sélectionnées et conditionnées d'espèces vivrières. *Agronomie tropicale* 2(33): 155-173.
- Bono M. & P. Leclercq 1963. Méthodes d'amélioration variétale des mils et sorghos utilisées au CRA Bambey. *Agronomie tropicale* 1: 33-52.
- Boudet G. 1978. Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères (3^e édition). Institut d'élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux. Imprimerie Jouve, 7, du Louvre, 75001 Paris: 145pp.
- Bourges J. 1974. Aperçu sur l'hydrologie de Centre et Sud tunisiens: Réseau d'observation et crues exceptionnelles. DRE/ORSTOM, Tunis: 74pp.
- Bramel-Cox P.J., J.D. Hancock, K.A. Kumar & D.J. Andrews 1995. Sorghum and millets for forage and feed. Pages 325-355 in David A V Dendy (éds). Sorghum and millets chemistry and technology. American association of cereal chemists, Inc. St Paul, Minnesota, USA.
- Brummer C. 2001. Principles of plant breeding. Lecture notes, 1204 Agronomy Hall Iowa State University Ames, IA 50011, 515-294-1415, brummer@iastate.edu: 521pp.
- Brunken J.N., J.M. De Wet & J.R. Harlan 1977. The morphology and domestication of pearl millet. *Economic botany* 31: 163-174.
- Brunken J.N. 1977. A systematic study of *Pennisetum* sect. *Pennisetum* (gramineae). *American journal of botany* 64(2): 161-176.
- Buerkert A., M. Bagayoko, A. Bationo & H. Marschner 1998. Site-specific differences in the response of cereals and legumes to rock phosphate, crop residue mulch and nitrogen in the

- Sudano-Sahelian zone of West Africa. In Soil Fertility Management in West African Land Use Systems, G. Renard, A. Neef, K. Becker and M. von Oppen (Editors); Niger, 4-8 March 1997 © Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, ISBN 3-8236-1272-7 (1998): 53-59.
- Bush D.S. 1992. The role of Ca⁺ in the action of GA in the barley aleurone. In: CM Karssen, LC Van Loon, and D Vreugdenhil, eds. 'Progress in plant growth regulation: Proceedings of the 14th International conference on plant growth substances, Amsterdam, 21-26 July, 1991.' Pp; 96-104. Kluwer Academic Pub; Dordrecht, The Netherlands.
- Carew B.A.R., A.K Mosi, A.V. Mba & G.N. Egbunike 1980. Potentiel des fourrages ligneux dans l'alimentation des petits ruminants en zone forestière humide et en savane secondaire au Nigeria. Pages 301-305 in Les fourrages ligneux en Afrique état actuel des connaissances. Colloque sur les fourrages ligneux en Afrique, Addis Abeba, 8-12, 1980, Éthiopie.
- Ceccarelli S. 1994. Specific Adaptation and Breeding for marginal conditions. Euphytica 77: 205-219.
- Ceccarelli S., S. Grando & R.H. Booth 1996. International breeding programmes and resource-poor farmers: crop improvement in difficult environments. Proceeding of a workshop on participatory plant breeding, 26-29 July 1995. In Eyzaguirre, P & Iwanaga, M (eds.), Participatory plant breeding: 99-116.
- CRDI (Centre de Recherches pour le Développement international) 2001. La sélection végétale participative sur les versants montagneux du Népal. IDRC explore # 980002: 4pp.
- Cerighelli R. 1955. Cultures tropicales (tome I): plantes vivrières. Librairie J-B. Baillière & Fils, 19, Haute feuille: 635 pp.
- CGIAR (Groupe Consultatif pour la Recherche Agricole Internationale) 2003. Millet, http://www.cgiar.org/research/res_millet.html
- Chambliss C.G. 2002. Producing Millets and Sorghums. Cooperative Extension Service, Institute of Food Agricultural Sciences. University of Florida. Edis, <http://www.edis.ifas.ufl.edu>: 4pp.
- Champigny M.L., E. Bismuth & C. Sarda 1982. Analyse des relations géniques entre formes spontanées et cultivées chez le mil à chandelle. Croissance, accumulation d'amidon chez les parents et chez les hybrides réciproques de première génération entre un écotype de *Pennisetum mollissimum* Hochst (forme spontanée) et une forme cultivée *Pennisetum americanum* (L.) Leeke. Agronomie 2(4): 365-372.
- Charmet G. & F. Balfourier 1991. Further evaluation of exotic germplasm of perennial ryegrass for use in French plant breeding programmes. Euphytica 57: 67-76.
- Charmet G., F. Balfourier & A. Bion 1990. Agronomic evaluation of a collection of French perennial ryegrass populations: multivariate classification using genotype X environment interactions. Agronomie 10: 807-823.
- Charmet G., F. Balfourier & P. Monestiez 1994. Hierarchical clustering of perennial ryegrass populations with geographic contiguity constraint. Theoretical and applied genetics 88: 42-48.
- Charmet G., A. Bion & F. Balfourier 1989. Agronomic evaluation of perennial ryegrass wild populations from Ireland for use French plant breeding programmes. Agronomie 9: 985-991.
- Charmet G. & B. Debote 1995. Breeding value of base populations derived from 'contiguous' clusters in perennial ryegrass. Plant breeding 114: 235-238.
- Charrier A. 1990. Pollen et ressources génétiques. Bull. soc. bot. Fr 137 (2): 101-104.
- Charrier A., J. Berthaud, A. Ghesquière & S. Hamon 1994. La diversité génétique chez les plantes cultivées des régions tropicales. In C.R. Academie Agricole 8(80): 25-35.
- Charrier A., M. Jacquot, S. Hamon & D. Nicolas 1997. L'amélioration des plantes tropicales. CIRAD et ORSTOM, ISBN 2-87614-292-9: 483 pp
- Charrier A., M. Lourd & J. Pernès 1984. La conservation des ressources génétiques. Pages 193-228 in Jean Pernès avec la collaboration de A. Charrier, D. Combes, J.L. Guillaumet, J.M. Leblanc, M. Lourd, E. Nguyen Van, Y. et G. Second (éds) Gestion des ressources génétiques

- des plantes. Tome II. Manuel. Diffuseur: Technique et documentation - LAVOISIER, 11, Lavoisier 75384 Paris cedex 08.
- Choudhary M.K., E. Weltzien & M.M. Sharma 1997. Evaluating pearl millet varieties with farmers in Barmer district. IDRC: Resources: Books, Catalogue: Using diversity: 9pp.
- Christinck A., E. Weltzien, K. vom Brocke, K.G. Kshirsagar & P.J. Bramel-Cox 2001. Participatory methods for collecting germplasm: Experiences with farmers in Rajasthan, India. Bulletin de ressources phytogénétiques, FAO-IPGRI, N°. 121: 1-9.
- Chulli B. & H. Ben Dhia 2003. Les caractéristiques hydrologique de l'aquifère côtière du Gabès dans le sud Tunisien. Tecnologia de la intrusion de agua en acuíferos costeros: Países Mediterráneos © IGME. Madrid 2003. ISBN. 84-7840-470-8: 53-57
- Cilas C. 1994 a. Méthodologie de la sélection: Dispositifs expérimentaux adaptés aux essais de sélection chez le cacaoyer. Pages 151-160 Traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Cilas C. 1994 b. Modèles statistiques et estimation: Estimation des variances génétiques et des héritabilités pour différents de croisements. Pages 71-88 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Cilas C., Ph. Verschave & D. Berry 1994. Quelques applications et perspectives stratégiques: Recherche d'un index de sélection pour deux caractères (production et résistance à la pourriture brune des cabosses) chez le cacaoyer. Pages 333-341 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- CIMMYT (*Centro Internacional de Mejoramiento del Maiz Y del Trigo 'International Maize and wheat Improvement Center'*) 1999. D. Sorghum and Pearl Millet. Workshop on Molecular Approaches for the genetic Improvement of Cereals for Stable Production in Water-Limited Environments.
http://www.cimmyt.cgiar.org/abc/map/research_tools_results/wsmolecular/wsdroughtfinalrep/WSdroughtFinalRep8.htm
- Clément J.C. 1997. Les variétés traditionnelles de mil en Afrique sahélienne, facteurs de stabilité et de variation. Pages 133-142 in gestion des ressources génétiques des plantes en Afrique des savanes Bamako-Mali. ORSTOM. Fonds documentaire N°010017263.
- Clément J.C., G. Bezançon & G. Billard 1993. Prospections des mils cultivés et des mils sauvages de l'Afrique de l'ouest. Pages 9-19 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Clément-Demange A., D. Nicolas, Y. Savy, M. Gnagne & H. Legnaté 1994a. Estimation de la valeur génétique appliquée à la sélection précoce chez *Hevea brasiliensis*. Pages 201-214 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Clément-Demange A., F. Rivano, D. Nicolas, M. Gnagne & H. Legnaté 1994b. Stratégies de sélection chez l'hévéa. Pages 227-242 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Collin J. 1998. Calcul des contrastes polynomiaux par régression. Note technique sur l'analyse statistique de résultats d'expériences, Complément au cahier de laboratoire du cours, Dispositifs expérimentaux (BVG-60678). Département de phytologie, Université LAVAL.
- Combes D. 1975. Polymorphisme et modes de reproduction dans la section des *Maximae* du genre *Panicum* (Graminées) en Afrique. Mémoires ORSTOM N°77: 99pp.

- CRDA (Commissariat Régional pour le Développement Agricole) 2003. Rapport d'activité. Gouvernorat de Médenine: 133 pp
- Compton W.A., M.A. Thomas-Compton & D.J. Andrews 1987. Practical recurrent selection in cross-pollinated crops. Pages 107-119 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Cooke R. 1995. The reasons for variety identification. Pages 1-17 in Colin W. Wrigley (éds), Identification of Food-Grain varieties. Published by the american association of cereal chemists, Inc. St.Paul, Minnesota, USA.
- D'Andrea A.C. & J. Casey 2002. Pearl Millet and Kintampo Subsistence. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, U.S.A. African Archaeological Review, Septembre 2002, vol. 19, no. 3(27): 147-173.
- D'Andrea A.C., M. Klee & J. Casey 2001. Archaeobotanical evidence for pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in sub-Saharan West Africa. Antiquity 75: 341-348.
- Daaloul M. A. 1998. Les semences et les jeunes plantes (en langue arabe). Revue de l'agriculture N° 15, Mai 98: 30-32
- Dagnelie P. 1965. A propos de quelques méthodes de comparaisons multiples de moyennes. Biom. Prascim., 6: 115-124
- Dagnelie P. 1986. Théorie et méthodes statistiques, Applications agronomiques. vol.2, Les presses agronomiques de Gembloux, A.S.B.L. Belgique: 463pp.
- Dancette C. 1983. Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. Agronomie Tropicale, 38 (4): 281-294
- Dave H.R. 1987. Pearl millet hybrids. Pages 121-126 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- De Boef W., K. Amanor, K. Wellard & A. Bebbington 1993. Cultivating Knowledge. Genetic diversity, farmer experimentation and crop research. Intermediate Technology Publications, London: 206pp.
- De Rajat & R.C. Gautam 1987. Management practices to increase and stabilize pearl millet production in India. Pages 247-253 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- De Rouw A. 1993. Elaboration du rendement du mil au Niger, justifications du programme et premiers résultats. Pages 245-254 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- De wet J.M.J. 1987. Moderator's Overview. Pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in Africa and India. Pages 3-4 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- De Wet J.M.J. 1995. Minor cereals. Pages 202-207 in J. Smartt & N. W. Simmonds.(éds). Evolution of crop plants. Longman scientific & technical.
- De Wet J.M.J., J.R. Harlan & D.E. Brink 1986. Reality of infraspecific taxonomic units in domesticated cereals. The systematics association. N°29: 212-221.
- Demarly Y. 1977. Génétique et Amélioration des plantes. ISBN: 2-225 45 760-3, © MASSON, Paris: 287pp.
- Demarquilly C. & R. Jarrige 1981. Panorama des méthodes de prévision de la digestibilité et de la valeur énergétique des fourrages. Pages 41-59 in I.N.R.A. Publ., 1981. Imprimerie JOUVE, 18, Saint-Denis, 75001 Paris, France.
- Dendy A.V. D. 1995. Sorghum and the millets: production and importance. Pages 11-26 in David A V Dendy (éds). Sorghum and millets chemistry and technology. American association of cereal chemists, Inc.St Paul, Minnesota, USA.

- Dicko M.S. 1980. Les mesures de la production secondaire des pâturages: un exemple d'application dans l'étude d'un élevage du système extensive au Mali. Pages 245-251 in Les fourrages ligneux en Afrique état actuel des connaissances. Colloque sur les fourrages ligneux en Afrique, Addis Abeba, 8-12, 1980, Éthiopie.
- Do F. 1994. Réponse écophysiologicals de cultivars de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à une sécheresse de fin de cycle en zone sahélienne: Conséquences sur la stabilité du rendement. Thèse docteur de l'Université Paris VII: 264 pp.
- Do F. & T. Winkel 1993. Mécanismes morpho-physiologiques de résistance du mil à la sécheresse. Intérêt d'une approche agrophysiologique et résultats expérimentaux. Pages 187-204 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture ' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Driouich A., R. Bengueddour, A. Ouassou, H. Bengueddour & M. Ouhssine 2002. Utilisation du rapport K^+ / Na^+ comme critère physiologique pour une sélection précoce des variétés de blé dur (*Triticum durum* desf) tolérantes au traitement salin. Sciences Lettres. Vol. 4, N° 1, octobre 2002: 13pp.
- Duchaufour P. 1977. Pédologie: 1. Pédogenèse et classification. Masson et C^{ie}, éditeurs (ISBN: 2-225-47.432-x), Imprimé en Belgique par Georges Thone à Liège: 459pp.
- Dujardin M. & W.W. Hanna 1989. Crossability of pearl millet with wild *Pennisetum* species. Crop sciences 1(29): 77-80.
- Dupin H., J. Toury, R. Giorgi & J. Cros 1963. Étude des aliments de l'ouest Africain, envisagés sous l'angle de l'apport en protéines. Extrait des annales de la nutrition et de l'alimentation. 3(17): 10-15.
- Durham S. 2003. New strain of pearl millet. Agricultural Research Magazine-vol. 51, N° 2:1-3.
- Eiche C. 1992. Double crop for northern Indiana. New crops news. 1(2): 1-2.
- Eichhorn, J.M., L.J. Coleman, E.J. Wakayama, G.J. Blomquist, C.M. Bailey, & T.G. Jenkins, 1986. Effects of breed type and restricted versus ad libitum feeding on fatty acid composition and cholesterol content of muscle and adipose tissue from mature bovine females. J. Anim. Sci. 63: 781pp.
- Ejeta G., R.A Hautea & J.F. Seitzer 2000. System wide Review of Plant Breeding Methodologies in the CGIAR. ICRISAT Sub-Panel Report, Patancheru, India, March 14-18,2000: 43pp.
- El Gazzah M. & N. Chalabi 1995. Ressources génétiques et amélioration des plantes. Pages 123-129 in Quel avenir pour l'amélioration des plantes? Ed.AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris © 1995: 520pp.
- Eldin M. 1993. Analyse de l'effet des déficits hydriques sur la récolte du mil au Niger conséquences agronomiques. Pages 149-160 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Eldin M. 1994. Analyse des risques de déficit hydrique au cours des différentes phases phénologiques du mil précoce au Niger. Pages 17-30 in bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale (éds). John Libbey Eurotext, Paris.
- Elings A. 1999. Some theory and practice of participatory- variety-selection and plant breeding. Community Biodiversity Development and Conservation Programme (CBDC), Centre for Plant Genetic Resources, The Netherlands (CGN), DLO-Center for Plant Breeding and Research (CPRO-DLO) Droevendaalsesteeg, P.O Box 16, 6700 AA Wageningen, The Netherlands: 110pp.
- Engelmann F. 1991. In vitro conservation of tropical plant germplasm - a review (*Pennisetum glaucum*). Euphytica. 57: 227-243.
- FAO 1997: L'économie Mondiale du Sorgho et du Mil: Faits, Tendances et Perspectives, <http://www.fao.org/docrep/w1808f/w1808f00.htm>

- FAO 2003. La production et la surface du mil dans certains pays et dans le monde pour les années 2000, 2001 et 2002 (<http://apps.fao.org/page/form?collection=Production.Crops.Primary&Domain=Production&servle t=1&language=EN&hostname=apps.fao.org&version=default>)
- FAO 2003. *Pennisetum americanum* (L.) Leeke: <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/DATA/pf000297.htm>
- FAO/WHO. 1973. Energy and Protein Requirements. FAO/WHO Technical Report Series N° 522, Geneva
- Fleury J. 1999. Les montagnes: hauts lieux d'une biodiversité menacée. Un flash du CRDI, N° 2, septembre 1999: http://www.idrc.ca/media/MountainBio_f.html: 11pp.
- Floret C. & R. Pontanier 1982. L'aridité en Tunisie présaharienne: climat, sol, végétation et aménagement. Travaux et documents de l'OROSTOM N°150: 544pp.
- Fontès J., M. Aizpuru, J.L. Carayon, P. Laring, S. Guinko & M. Hien 1999. L'amélioration variétale et les autres actions contribuant à la sécurité alimentaire en Tunisie, en matière de céréales. Cahiers Sécheresse, 10 (1): 27-33.
- Fox P.N., J. Crossa & I. Romagosa 1997. Multi-environment testing and genotype X environment interaction. Pages 117-138 in R.A Kempton. et P.N. Fox (éds). Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall.
- Fox P.N., R. Mead., M. Talbot & J.D. Corbett 1997. Data management and validation. Pages 19-39 in R.A Kempton. et P.N. Fox (éds). Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall.
- Fussell L.K., P.G. Serafini, A. Bationo & M.C. Klaij 1987. Management practices to increase yield and yield stability of pearl millet in Africa. Pages 255-268 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Gallais A. 1992. Pourquoi faire des variétés synthétiques. Agronomie 12: 601-609.
- Gallais A. 2001. Contribution à la réflexion sur l'adaptation des méthodes et des dispositifs à la sélection participative. Pages 120-122 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001.
- Gates R.N., W.W. Hanna & G.J. Gascho 1995. Evaluation of grain pearl millet plant components. Forage quality of grain pearl millet. Annual report: 104-114.
- Gérard B. & A. Buerkert 1999. Aerial photography to determine fertiliser effects on pearl millet and Guiera Senegalese's growth. Printed in the Netherlands, © Kluwer Academic Publishers. Plant and Soil 210: 167-177.
- Gérard B., A. Buerkert, P. Hiernaux & H. Marschner 1997. Non-destructive measurement of plant growth and nitrogen status of pearl millet with low-altitude aerial photography. Soil Sci. Plant Nutr., 43: 993-998.
- Gérard B., P. Hiernaux, B. MuehlingVersen & A. Buerkert 2001. Destructive and non-destructive measurements of residual crop residue and phosphorus effects on growth and composition of herbaceous fallow species in the Sahel. Printed in the Netherlands, © Kluwer Academic Publishers. Plant and Soil 228: 265-273.
- Gillet M. 1980. Les graminées fourragères: description, fonctionnement, application à la culture de l'herbe. Station d'amélioration des plantes fourragères de Lusignan I.N.R.A. Imprimerie Bayeusaine, 8-12, Royal 14401:
- Gleeson A.C. 1997. Spatial analysis. Pages 68-85 in R.A Kempton. et P.N. Fox (éds). Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall.
- Goffinet B. & B. Mangin 1994. Modèles statistiques et estimation: Sélection et modèle mixte. Pages 89-97 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des

plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.

Govindan A. & C. Russell 2003. India Grain and Feed Annual 2003. USDA, Global Agriculture Information Network, Foreign Agricultural Service, GAIN Report # IN 3012: 23 pp.

Graham N.H. & D. Wilson 1980. Méthodes de mesure de la production secondaire des fourrages ligneux. Pages 253-257 in Les fourrages ligneux en Afrique état actuel des connaissances. Colloque sur les fourrages ligneux en Afrique, Addis Abeba, 8-12, 1980, Éthiopie.

Grasland C. 2000. Initiation aux méthodes statistiques en sciences sociales. <http://ibm2.cicrp.jussieu.fr/grasland/STAT98/STAT98.htm>. Université Paris VII / UFR GHSS/ France.

GRDC (Grains Research and Development Corporation) 2003. Pearl millet a crop for drought conditions. Copyright © 2003 SeedQuest newsrelease, <http://www.seedquest.com/News/releases/2003/january/5277.htm>

Grema A.K. 2002. Productivity of pearl millet-cowpea intercrops in North East Nigeria. Institute of water and environment, © Cranfield University: <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/students/grema.htm>

Guillaumet J.L. & J. Pernès 1984. Stratégie de prospection. Pages 109-123 in Jean Pernès avec la Collaboration De A. Charrier, D. Combes, J.L. Guillaumet, J.M. Leblanc, M. Lourd, E. Nguyen Van, Y. et G. Second (éds) Gestion des ressources génétiques des plantes. Tome II. Manuel. Diffuseur: Technique et documentation - LAVOISIER, 11, Lavoisier 75384 Paris cedex 08.

Guirand G., F. Ganry & G. Limous 1980. Etude au moyen de ¹⁵N de l'influence de l'enfouissement répétée de compost de paille de mil sur la disponibilité de l'azote d'un sol sableux tropical. Agronomie tropicale 35 (3): 215-219.

Gupta S.C., A.T Ndoye & D.J. Andrews 1983. Essais variétaux sur le mil au Sénégal. L'Agronomie tropicale 38 (3): 229-232.

Gurung B. 2003. La sélection végétale participative sur les versants montagneux du Népal. IDRC reports, ressources Himalaya. http://www.idrc.ca/reports/prn_report.cfm?lang=f&article_num=691: 4 pp.

Hacker J.B. 1995. Tropical and subtropical grasses. Pages 229-234 in J. Smartt & N. W. Simmonds (éds). Evolution of crop plants. Longman scientific & technical.

Haile A. & T. Hofsvang 2001. Survey of *lepidopterous* stem borer pests of sorghum, maize and pearl millet in Eritrea. Crop protection 20: 151-157.

Hamon S., S. Dussert, M. Noirot, F. Anthony & T. Hodgkin 1995. Core collections - accomplishments and challenges-. Plant breeding abstracts 8 (65): 1125-1133.

Hamon S., M. Noirot & F. Anthony 1993. 'Core collections': Situation et perspectives. Pages 85-93 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.

Hamza N. 2002. Etat actuel de la production des semences en Tunisie (en langue arabe). Revue Tounes El Khadra N° 204, Janvier-Fevrier 2002:12-13.

Hanna W.W. 1987. Utilization Of wild relatives of pearl millet. Pages 33-42 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.

Hanna W.W. 2000. Pearl Millet Grain Hybrid Performance. The Georgia Agricultural Experiment Stations, College of Agricultural and Environmental Sciences, The University of Georgia. Research Report, Number 670, Januar, 2001.

Hanna W.W. 2002. Breeding Pearl Millet with Improved Performance and Stability. USDA-ARS, Tifton, GA, Germplasm Enhancement and Conservation, <http://intsormil.org/2000amlrpt/2000ars-204.pdf>: 63-66pp.

Hanna W.W. 2003. Pearl millet hybrids for forage. CGBRU: <http://www.cpes.peachnet.edu/fat/pearlmillet.htm>.

- Hanna W.W. & J. Wilson 2003. New Strain of Pearl Millet. Agricultural Research Magazine, February 2003-vol.51, no 2: 7-14.
- Harinarayana G. 1987. Pearl millet in Indian agriculture. Pages 5-17 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502-324, Andhra Pradesh, India.
- Harlan J. R. 1971. Agricultural origins: centers and non-centers. Science 14: 468-474.
- Harris D. 2002. Farmer participatory research and development. Expertise of the Center for Arid Zone Studies, University of Wales, BANGOR. http://www.cazs.bangor.ac.uk/english/expertise/fampar_e.htm: 2pp.
- Hartman P.D., G.L. Kuhl, J.P. Shroyes & D.L. Fjell 1990. Yield and nutritional quality of nine summer annual forages. Cattlemen's day 1990, report of progress 592. Agricultural Experiment Station Kansas State University, Manhattan, http://www.oznet.ksu.edu/forage/pubs/R592_81pdf:123-125.
- Hash C.T. 1994. Current status and strategy for promoting hybrid sorghum and pearl millet technology. Pages: 46-60 in hybrid research and development needs in major cereals in the Asia-Pacific region. Rapa publication 994/21.
- Hénia L. 1993. Climat et bilans de l'eau en Tunisie: Essais de régionalisation climatique par les bilans hydriques. Publication de l'Université de Tunis I, série Géographie, Tunis, Tunisie: 391 pp.
- Herbert Y. & P. Vincourt 1989. Mesures de la divergence génétique. Distances calculées sur des critères biométriques. Pages 23-37 in Marianne Lefort-Buson et D. de Vienne.(éds). Les distances génétiques. Estimations et applications. (INRA) Institut national de la recherche agronomique, 149, de Grenelle - 75007.
- Hill G.M., W.W. Hanna & R.N. Gates 1995. Grazing performance and forage yields of 'TIFLEAF 2' pearl millet and a new three-way hybrid pearl millet. Animal & Dairy Science, CAES,UGA, 1995 Annual Report, http://www.ads.uga.edu/annrpt/1995/95_136.htm: 136-140.
- Hocde H. 2001. Point de vue des participants sur la sélection participative avant l'atelier. Pages 24-27 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001.
- Hocde H., J. Lançon & G. Trouche 2001. Synthèse des questions posées par les participants sur la sélection participative. Pages 94-97 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001.
- Housse L.R., M. Osmanzai, M.I. Gomez, E.S. Monyo & S.C. Gupta 1995. Agronomic principles. Pages 27-68 in David A V Dendy (éds). Sorghum and millets chemistry and technology. American association of cereal chemists, Inc. St Paul, Minnesota, USA.
- Icamina P. 1993. Un Vieux savoir à partager. CRDI: Ressources: Explore 1 (21): 4pp.
- ICRISAT 1996. A New Generation of Pearl Millet on the Horizon. <http://www.Worldbank.org/html/cigar/newsletter/oct96/6millet.html>: 3pp.
- IRA (Institut des Régions Arides) 1999. Rapport d'activités et programme de travail. 4119 Médenine-Tunisie: 78pp.
- IBPGR & ICRISAT 1993. Descriptors for Pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. ISBN 92-9043-136-9, Via delle Sette Chiese 142 00145 Rome Italy: 43pp.
- Jain R.P., S.B. Chavan, B.S. Talukdar & D.J. Andrews 1991. Registration of 'ICMS 7703' pearl millet. Published in crop science. 5 (31): 1381-1382.
- Jambo M., D. Stern & S. Ho Tan 1989. Exploration informatique et statistique des données. Collection Technique et Scientifique des Télécommunications. Centre National d'Etudes des Télécommunications, © BORDAS et C.N.E.T.-E.N.S.T, ISBN: 2-04-018840-1, Paris: 505pp.
- Jarrige R. 1980. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants, besoins alimentaires des animaux, valeur nutritive des aliments. INRA, Paris, 2^e édition, ISBN:2-85340-288-6, France.

- Jayaraman K.S. 2002. Naturel 'golden millet' rivals 'golden rice'. SciDevNet, © Bio-Scope.org 2000-2003,
http://www.bio-scope.com/disp_doc_prn.cfm?id=DB85C7A316944B20BCC1AFCE89544856:
 2pp.
- Joshi K.D., R.B. Rana, M. Subedi, K.B. Kadayat & B.R. Sthapit 1997. Addressing diversity through farmer participatory variety testing and dissemination approach: A case study of chaite rice in the Western hills of Nepal. IDRC. Resources Books, Catalogue, Using diversity: 21pp.
- Kalms J.M. & S. Valet 1975. Détermination des besoins en eau de différentes cultures vivrières et industrielles dans les conditions pédoclimatiques des terrasses du Niger à Tillabery. INRAN Niamey (Niger): 45pp.
- Kempton R.A. 1997. Interference between plots. Pages 101-116 in Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall.
- Kempton R.A. & P.N. Fox 1997. Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall: 191pp.
- Kempton R.A. & A.C. Gleeson 1997. Unreplicated trials. Pages 86-100 in R.A Kempton. et P.N. Fox (éds). Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall.
- Kervella J., I. Goldringer & P. Brabant 1991. Sélection récurrente chez les autogames pour l'amélioration des variétés lignées pures: une revue bibliographique. Agronomie 11: 335-352.
- Khaleeq, B., W.D. Stegmeier & R.L. Vanderlip 1990. Stand establishment in relation to seeding mesocotyl and coleoptile length in pearl millet. Page 152 in J. Janick and J.E. Simon (éds), advances in new crops. Timber press, Portland, OR.
- Klopfenstein C.F. & R.C. Hosney 1995. Nutritional properties of sorghum and the millets. Pages 125-169 in David A V Dendy (éds). Sorghum and millets chemistry and technology. American association of cereal chemists, Inc. St Paul, Minnesota, USA.
- Kouamé B. 1991. Problèmes soulevés par les tests précoces de la productivité. Pages 109-119 in L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext. Paris © 1991.
- Kulakow P.A. 1990. Simply inherited genetic variation in grain amaranth. Page 150 in J. Janick and J. E Simon (éds), advances in new crops. Timber press, Portland, OR.
- Kumar K.A. 1987. Brief Overview of Pearl Millet Hybrids in Africa. Pages 284 in Proceedings of the International Pearl millet Workshop, 7-11 Apr 1986, ICRISAT center, India (J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds)). Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India: International crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (cp 870379).
- Kumar K.A. & S. Appa Rao 1987. Diversity and utilization of pearl millet germplasm. Pages 69-82 in Proceedings of the International Pearl millet Workshop, 7-11 Apr 1986, ICRISAT center, India (J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds)). Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India: International crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (cp 870379).
- Labouisse J-P. & S. Caillon 2001. Une approche de la conservation *in situ* par l'étude d'un système semencier informel: cas du cocotier au Vanuatu (pacifique Sud). Pages 64-73 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001, France.
- Laloë F. & C. Lac 1992. Statistique impliquée. Edition de l'ORSTOM, institut Français de recherche pour le développement en coopération, collection Colloques et Séminaires.
- Lamers J., A. Buerkert, H.P.S Makkar, M. von Oppen & K. Becker 1996. Biomass production, and feed and economic value of fodder weeds as by-products of millet cropping in a sahelian farming system. Expl Agric. Vol. 32:317-326.
- Lançon J. 2001. Pour une conception élargie de la sélection participative. Pages 8-18 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001, France.

- Le Floch E. 1986. Carte bioclimatique de la Tunisie. Sous la direction de M. Gounot, CNRS Montpellier, France
- Le Houérou H.N. 1969. La carte phyto-écologie de la Tunisie centrale au 1/500.000. ORSTOM, Paris.
- Le Houérou H.N. 1980. Composition chimique et valeur nutritive des fourrages ligneux en Afrique tropical occidentale. Pages 259-263 in Les fourrages ligneux en Afrique état actuel des connaissances. Colloque sur les fourrages ligneux en Afrique, Addis Abeba, 8-12, 1980, Éthiopie.
- LeCohec F. 1990. Variabilité génétique, hérédités et corrélations de 15 caractères d'une population de clones de topinambour (*Helianthus tuberosus* L.). Agronomie 10: 797-806.
- Lecompt M. 1965. L'expérimentation et les engrais, Les bases de l'expérimentation et les modes de calcul statistique: 91pp.
- Lee D. & W.W. Hanna 2002. Pearl millet for grain. Extension Crop & Soil Science; USDA-ARS, Bulletin 1216/ June, 2002, <http://www.ces.uga.edu/pubcd/B1216.htm>: 7pp.
- Lefort-Buson M. 1989 a. Distance génétique et hétérosis. Mise en évidence d'une relation entre hétérosis et divergence génétique. Pages 111-118 in Marianne Lefort-Buson et D. de Vienne (éds). Les distances génétiques. Estimations et applications. (INRA) Institut national de la recherche agronomique, 149, de Grenelle - 75007.
- Lefort-Buson M. 1989 b. Distance génétique et hétérosis. Aspects théoriques. Pages 119-130 in Marianne Lefort-Buson et D. de Vienne (éds). Les distances génétiques. Estimations et applications. (INRA) Institut national de la recherche agronomique, 149, de Grenelle - 75007.
- Lefort-Buson M. 1989 c. Mesures de la divergence génétique. Identité: parenté et consanguinité. Pages 13-21 in Marianne Lefort-Buson et D. de Vienne (éds). Les distances génétiques Estimations et applications. (INRA) Institut national de la recherche agronomique, 149, de Grenelle - 75007.
- Lefort-Buson M. 1989 d. Distance génétique et hétérosis. Utilisation des critères biométriques. Pages 143-157 in Marianne Lefort-Buson et D. de Vienne (éds). Les distances génétiques. Estimations et applications. (INRA) Institut national de la recherche agronomique, 149, de Grenelle - 75007.
- Lefort-Buson M. 1989 e. Distance génétique et hétérosis. Utilisation des coefficients de consanguinité et de parenté. Pages 131-141 in Marianne Lefort-Buson et D. de Vienne (éds). Les distances génétiques. Estimations et applications. (INRA) Institut national de la recherche agronomique, 149, de Grenelle - 75007.
- Lefort-Buson M., Y. Hebert & C. Damerval 1988. Les outils d'évaluation de la diversité génétique et phénotypique. Agronomie 8 (3): 173-178.
- Leonard W.H. & J.H. Martin 1963. Cereal crops. The Macmillan company, New York Collier-Macmillan Limited, London. 679-767.
- Lespinasse R., E. Martel, M.T. Peigne & A. Sarr 1993. Hétérochromatine, chromosomes B: Implication des formes sauvages du mil sur l'utilisation des ressources génétiques. Pages 141-148 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Liu C.J., K.M. Devos, J.R. Witcombe & T.S. Pittaway 1996. The effect of genome and sex on recombination rates in *Pennisetum* species. Theoretical and applied genetics 93: 902-908.
- Louquet P., N. Canale, S. Desagher, D. Contiour-Ansel & D. Laffray 1993. Tolérance protoplasmique et activité de la phosphoenol pyruvate carboxylase foliaire de cultivars de mil soumis à des contraintes hydriques contrôlées. Pages 219-232 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.

- Loumerem M. 1998. Inventory of some cultivated landraces threatened by genetic erosion in southern Tunisia. *Plant Genetic Resources Newsletter* 113: 8-12.
- Lourd M., J. Pernès, Y. & G. Second 1984. Evaluation directes en collections et traitement des observations. Pages 137-167 in Jean Pernès avec la Collaboration de A. Charrier, D. Combes, J.L. Guillaumet, J.M. Leblanc, M. Lourd, E. Nguyen Van, Y. et G. Second (éds) *Gestion des ressources génétiques des plantes. Tome II. Manuel. Diffuseur: Technique et documentation - LAVOISIER, 11 Lavoisier 75384 Paris cedex 08: 346pp*
- Lozet J. & C. Mathieu 1990. *Dictionnaire de science du sol: Technique et Documentation. Deuxième édition, LAVOISIER, 11 Lavoisier, F-75384 Paris cedex 08: 384pp.*
- Maiti R.K. & F.R. Bidinger 1981. Growth and Development of the Pearl Millet Plant. *Research Bulletin N° 6. ICRISAT Patancheru P.O., Andhra Pradesh 502324, India: 14pp.*
- Maiti R.K. & G.G.L. Soto 1990. Effect of four sowing dates on growth, development and yield potentials of 15 pearl millet cultivars (*Pennisetum americanum* L. Leeke) during autumn-winter seasons in Marin, N.L., Mexico. *Journal of experimental botany* 233(41): 1609-1618.
- Mamou A. 1989. Rôle des nappes phréatiques du sud tunisien dans la lutte contre la désertification. Pages 1-17 in séminaire national sur la lutte contre la désertification, IRA Médenine Tunisie.
- Manga V.K. & O.P. Yadav 1995. Effect of seed size on developmental traits and ability to tolerate drought in pearl millet. *Journal of Arid Environment* 29: 169-172.
- Manicad G. 1996. Biodiversity Conservation and Development: The collaboration of formal and non-formal institutions. *Biotechnology and Development Monitor* 26: 15-17.
- Marchais L. 1979. Contribution aux méthodes d'analyse en génétique quantitative aux techniques de sélection et à la connaissance du petit mil (*Pennisetum typhoides*). Thèse de grade de docteur ingénieur en amélioration des plantes. Université Paris-sud, centre d'Orsay: 406pp.
- Marchais L. 1982. La diversité phénotypique des mils penecillaires cultivés au Sénégal et au Mali. *Agronomie tropicale* 37(1): 68-77.
- Marchais L. & S. Tostain 1992. Bimodal phenotypic structure of two wild pearl millet samples collected in an agricultural area. *Biodiversity and conservation* 1: 170-178.
- Marchais L. S. Tostain & I. Amoukou 1993. Signification taxonomique et évolutive de la structure génétique des mils penicillaires. Pages 119-127 in Serge Hamon éds). *Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture'* ORSTOM Editions, Paris, France.
- Màrquez-Sanchez F. 1998. Expected Inbreeding with Recurrent Selection in Maize: I. Masse selection and Modified Ear-to-Row Selection. Pages in *Crop Sci.* 38: 1432-1436.
- Marschner H., F.P. Rebařka, H. Hafner & A. Buerkert 1995. Crop residue management for increasing production of pearl millet on acid sandy soils in Niger, West Africa. R.A. Date et al. (eds), *Plant Soil Interactions at Low pH: 767-770.*
- Martin J.P. 1971. Introduction à l'amélioration des plantes. Cours, école nationale supérieure agronomique-Abidjan ORSTOM. Fonds documentaire N° 22409:163pp.
- Matlon P.J. 1987. Making millet improvement objectives fit client needs: Improved genotypes and traditional management systems in Burkina Faso. Pages 233-245 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). *Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.*
- Maurya D.M. 1997. Participatory breeding, on-farm seed management and genetic resource conservation methodology: a sustainable agricultural R & D model IDRC; Resources; Books; Catalogue: Using divercity: 9pp.
- Mbayé D.F. 1993. Contraintes phytosanitaires du mil dans le Sahel: état des connaissances et perspectives. Pages 173-186 in Serge Hamon (éds). *Le mil en Afrique "diversité génétique et*

- agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture" ORSTOM Editions, Paris, France.
- McDonough C.M. 1986. Structural characteristics of the mature pearl millet (*Pennisetum americanum*) caryopsis. M.S. thesis, Texas A & M University, college Station, Texas, USA.
- Mead R. 1997. Design of plant breeding trials. Pages 40-67 in R.A Kempton. et P.N. Fox (éds). Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall.
- Miller V. 1999. Pearl millet promising feed grain option. University of Nebraska-Lincoln Agricultural Research Division: <http://ard.unl.edu/rn/0399/millet.html>: 3p.
- Mohamed H.A., J.A. Clark & C.K. Ong 1988 a. Genotypic differences in the responses of tropical crops. Germination characteristics of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) and pearl millet (*Pennisetum typhoides* S & H) Journal of experimental botany 205(39): 1121-1128.
- Mohamed H.A., J.A. Clark & C.K. Ong 1988 b. Genotypic differences in the responses of tropical crops. Seedling emergence and leaf growth of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) and pearl millet (*Pennisetum typhoides* S & H) Journal of experimental botany 205(39): 1129-1135.
- Mohamed H.A., J.A. Clark & C.K. Ong 1988 c. Genotypic differences in the responses of tropical crops. Light interception and dry matter production of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S & H) Journal of experimental botany 205(39): 1137-1143.
- Moore K.J., K.P. Vogel, T.J. Klopfenstein, R.A Masters & B.E. Anderson 1995. Evaluation of four intermediate wheatgrass populations under grazing. Agron. J. 87: 744-747.
- Morin A. & S. Findlay 2001. Biostatistiques appliquées. Notes de cours Bio 4518, Version Automne 2001. Département de biologie, Université d'Ottawa. <http://simulium.bio.uottawa.ca/Bio4518/Documents/Bio4518/Notes> de cours version Automne 2001. pdf: 296pp.
- Moulineau C. 1993. Variations sous contrainte hydrique de la teneur en acides aminés libres foliaires du mil. Pages 233-244 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Moussa H. 2000. Les problèmes phytosanitaires du mil '*Pennisetum americanum*. L' cultivé dans les régions arides tunisiennes. Rapport de stage, année universitaire 2000-2001: 34pp.
- Mtimet A. 1999. Atlas des sols tunisiens. INRAT_Tunisie: 165pp.
- Muchow R.C. 1989. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment. Effect of water deficits. Field Crops Res. 1989;20: 207-219.
- Muehling-Versen B., A. Buerkert, A. Bationo & H. Marschner 1997. Crop residue and phosphorus management in millet based cropping systems on sandy soils of the Sahel. G. Renard, A. Neef, K. Becker and M. von Oppen (Editors); Niamey, Niger, 4-8 March 1997, © Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, ISBN 3-8236-1272-7: 31-40.
- Murdock G. 1959. *Africa. Its Peoples and their Culture History*. New York, McGraw-Hill: 263pp.
- Murty D.S. & K.A. Kumar 1995. Traditional uses of sorghum and millets. Pages 185-219 in David A V Dendy (éds). Sorghum and millets chemistry and technology. American association of cereal chemists, Inc. St Paul, Minnesota, USA.
- Myers R. 1999. Pearl Millet 'A new Grain Crop Option for Sandy or Other Moisture Limited Conditions'. Published by the Jefferson Institute, <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/articles/ji-millet.html>: 5pp.
- Mzabi H. 1988. La tunisie du Sud-Est 'Géographie d'une région fragile marginale et dépendante'. Thèse de doctorat d'Etat en Sciences Humaines et Sociales, Université de Tunis, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Département de géographie: 444pp.

- Nasr N. 1995. Dynamique des systèmes de production dans le Sud-Est Tunisien: Du système pastoral au système agro-pastoral. In Les Oasis au Maghreb mise en valeur et développement. Chahier du C.E.R.E.S. série Géographique n° 12, Tunis 1995: 269-279.
- Ndoye M. & G. Ruparao 1987. Les insectes ravageurs du mil en Afrique de l'Ouest et les moyens de lutte. Pages 83-194 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet orkshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Nguyen V. E. & J. Pernès 1984. Les bases des données et leur exploitation statistique. Pages 238-283. Gestion des ressources génétiques des plantes. Tome II. Second (éds).Manuel. Diffuseur: Technique et documentation - LAVOISIER, 11, Lavoisier 75384 Paris cedex 08.
- Niangado O. & O. Botourou 1987. Amélioration variétale du mil en Afrique de l'Ouest. Pages 83-94 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Niangado O., Traoré K.A. & Yattara K. 1987. Les systèmes de production à base de mil au Mali et son amélioration au point de vue création variétale. Co-publiées par l'institut d'économie rurale (IER) et l'institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides (ICRISAT) B.P. 34 Bamako, Mali.
- Noiro M. 1992. Utilisation de l'analyse factorielle des correspondances en génétique quantitative. Notion de phénotypes majeurs. ORSTOM, 36014: 5 pp.
- Noiro M. & S. Hamon 1992. Contraintes imposées à l'amélioration des plantes par la diversité des modes de reproduction au sein des complexes d'espèces. ORSTOM. Fonds documentaire N°37672: 12pp.
- Noiro M., S. Hamon & F. Anthony 1993. L'obtention d'un core collection de caféiers. Définition des groupes d'échantillonnage et méthodologie. ORSTOM, fonds documentaire, N°39134: 8pp.
- Nwasike C.C. 1987. Pearl millet male-steriles and hybrids in Nigeria. Pages 284 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- ODS (Office de Développement du Sud) 2003. Le Gouvernorat de Médenine en chiffres. Ministère du développement et de la coopération internationale. 103pp
- OTC (Office de la Topographie et de la Cartographie Tunis) 1984. Carte de gabes, échelle 1/200000, feuille N° 32.
- Ouendeba B., G. Ejeta, W.E. Nyquist, W.W. Hanna & K.A. Kumar 1993. Heterosis and combining ability among African pearl millet landraces. Crop Sciences, 33:735-739.
- Ousmane S.D. 1991. Rôle du système racinaire dans la résistance du mil à la sécheresse, mémoire de fin de première année de formation à la recherche. Institut des radio-isotopes. Université se Niamey. ORSTOM. Fonds documentaire 010012733: 31pp.
- Ousmane D.S., R. Emmanuel & P. Marini 1993. Rôle du système racinaire dans la résistance à la sécheresse chez le mil: analyse de la rhizogenèse post-florale. Pages 205-218 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Ozias-Akins P., D. Roche & W.W. Hanna 1998. Tight clustering and hemizyosity of apomixis-linked molecular markers in *Pennisetum squamulatum* implies genetic control of apospory by a divergent locus that may have no allelic form in sexual genotypes. PNAS Online Carl Zeiss. 9(95): 5127-5132.
- Patterson H.D. 1997. Analysis of series of variety trials. Pages 139-161 in R.A Kempton. et P.N. Fox (éds). Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, hapman & Hall.
- Peigne M.T., J. Enjalbert, T. Robert, A. Ricroch, R. Lespinasse, M. Sandmeier & A. Sarr 1993. Cartographie génétique du mil. Pages 129-139 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique

'diversité génétique et agro-hysiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.

- Pernès J. 1983. La génétique de la domestication des céréales. *La Recherche* 63(14): 910-920.
- Pernès J. 1984. Centres de ressources génétiques et formation des personnels de gestion. Pages 295-345 in Jean Pernès avec la collaboration de A. Charrier, D. Combes, J.L. Guillaumet, J.M. Leblanc, M. Lourd, E. Nguyen Van, Y. et G. Second (éds) *Gestion des ressources génétiques des plantes. Tome II. Manuel. Diffuseur: Technique et documentation - LAVOISIER, 11, Lavoisier 75384 Paris cedex 08.*
- Pernès J. 1985. Evolution des plantes cultivées: l'exemple des céréales. *La vie des sciences, comptes rendu, série générale* 2(5): 429-447.
- Pernès J., D. Combes & J. Belliard 1984. Le mil. Pages 159-210 in Jean Pernès avec la collaboration de J. Berthoud, G. Bezançon, A. Charrier, D. Combes, J.M. Lourd, Y. et G. Second (éds) *Gestion des Ressources génétiques des plantes. Tome I. Monographie Technique et documentation - LAVOISIER, 11, Lavoisier 75384 Paris cedex 08.*
- Pernès J. & M. Lourd 1984. Organisation des complexes d'espèces. Pages 7-92 in Jean Pernès avec la collaboration de A. Charrier, D. Combes, J.L. Guillaumet, J.M. Leblanc, M. Lourd, E. Nguyen Van, Y. et G. Second (éds) *Gestion des ressources génétiques des plantes. Tome II. Manuel. Diffuseur: Technique et documentation LAVOISIER, 11, Lavoisier 75384 Paris cedex 08.*
- Pernès J., E. Nguyen Van, M. Beninga & J. Belliard 1980. Analyse des relations génétiques entre formes spontanées et cultivées chez le Mil à chandelle (*Pennisetum americanum* (L.), Leeke, *P. mollissimum* Hochst). *Annales de l'amélioration des plantes* 30(3): 253-269.
- Pham J.L. 2000. Le programme mil au Niger. Domestication et dynamique de la diversité des ressources génétiques des plantes. L'IRD Actualité Programme partenariat sites hébergés infothèque.
- Pistrick K., M. Loumerem & M. Haddad 1994. Field studies of plant genetic resources in South Tunisia. *Plant Genetic Resources Newsletter* 98:13-17.
- Pizarro E.A., R.R Vera & Y.L.C. Liseu 1984. Growth curve and nutritive value of forage Sorghum in the tropics. *Tropical Animal Production* 9: 175-184.
- Poehlman J.M & D.A. Sleper 1995. Breeding field crops. Forth edition, Library of congress cataloging-in-publication data. ISBN 0-8138-2427-3, Iowa State University Press, Ames, Iowa 50014, United States of America: 480 pp.
- Portères R. 1950. Vieilles agricultures de l'Afrique intertropicale. Centres d'origine et de diversification variétale primaire et berceaux de l'agriculture antérieure au XVI siècle. *Agron. Trop* 5:489-507.
- Portman P. & H. Ketata 1997. Field plot technique. Pages 9-18 in R.A Kempton. et P.N. Fox (éds). *Statistical methods for variety evaluation. Coordinating editor M. Cerezo, CIHEAM, Zaragoza, Spain, Chapman & Hall.*
- Puard M., L. Jacquinet & D. Pouzet 1983. Equilibre photosynthèse-respiration et énergie critique chez le mil (*Pennisetum americanum*) en zone sahéenne. *L'Agronomie tropicale* 38(3): 222-227.
- Pudelcko J.A., I.D. Teare & D.L. Wright 1993. Pearl millet head length in relation to induced stress. *Inst. Of Food and Agric. Sci., Univ. of FL, Gainesville. FL* 32611: 210-215.
- Pullins E.E., L. R. Myers & H.C. Minor 1997. *Alternative Crops in Double-Crop Systems for Missouri. Agricultural MU Guide, Published by University Extension, University of Missouri-Columbia: 6pp.*
- Rahn D. & J.B. Bauer 2001. Pearls of great promise. *Research Communications: Research Reporter Summer* 30 (2): 7pp.
- Rai K.N., S. Appa Rao & K.N. Reddy 1997. Pearl millet. Pages 243-258 in D. fuccillo, L. Stapleton (éds), *Biodiversity in trust. Cambridge University Press.*

- Rai K.N. & A.S. Rao 1998. Registration of pearl millet cytoplasmic-nuclear male-sterile line ICMA-5. Published in crop science 2(38): 556p.
- Rai K.N. & N.B. Singh 1987. Breeding pearl millet male-sterile lines. Pages 127-137 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Rai K.N., R.P. Thakur & A.S. Rao 1998a. Registration of pearl millet parental lines ICMA 92666 and ICMB 92666. Published in crop science. 2(38): 575p.
- Rai K.N., R.P. Thakur & A.S. Rao 1998b. Registration of smut-resistant pearl millet Parental Lines ICMA 88006 and ICMB 88006. Published in crop science. 2(38): 575-576.
- Rattunde H.F., P. Singh & J.R. Witcombe 1989. Feasibility of mass selection in pearl millet. published in crop science 5(29): 1423-1427.
- Ravel C. & G. Charmet 1996. A comprehensive multisite recurrent selection strategy in perennial ryegrass. Euphytica 88: 215-226.
- Reddy K.N., S. Appa Rao & M.H. Mengesha 1996. Diversity in pearl millet germplasm from Central African Republic. Genetic Resources and Crop Evaluation 43: 303-308.
- Reij C. & A. Waters-Bayer 2001. Entering research and development in land husbandry through farmer innovation. Pages 3-20 in Farmer innovation in Africa, A source of inspiration for agricultural development. EARTHSCAN Publications Ltd, London: 362 pp.
- Renno J-F. 1993. Structure génétique du complexe d'espèce *Pennisetum*. Pages 77-83 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Riley K.W. 1997. Decentralized Breeding and selection: Tool to link diversity and development. IDRC: Ressources, Books, Catalogue. Using diversity: 15pp.
- Robert T., F. Lamy & A. Sarr 1992. Evolutionary role of gametophytic selection in the domestication of *Pennisetum typhoides* (pearl millet): a two-locus asymmetrical model. Heredity 69: 372-381.
- Rooney L.W. & C.M. McDonough 1987. Food quality and consumer acceptance of pearl millet. Pages 43-64 in J.R. Witcombe & Seth R. Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Rowe D.E. & R.R. Hill 1999. Breeding theory and the development of Alfalfa. USDA-ARS, 810 Highway 12 East, Mississippi State, MS 39762 and USDA-ARS, Curtin Road, University Park, PA 16802, <http://www.naaic.org/TAG/TAGpapers/RoweAbs.html>.
- Rude B.J., B.S. Baldwin, K.C. Hanson & D.L. Trammel 2003. Performance and nutrient utilization of steers consuming Kenaf, Pearl millet, or Bermudagrass. Animal and Dairy Sciences, Mississippi State University, <http://archive.msstate.edu/dept/ads/research/kenaf.html>: 3pp.
- Sampoux J.P. 1989. L'index de sélection sur plusieurs caractères: une synthèse sur les pondérations économiques, le choix de contraintes et de caractères associés. Agronomie 9: 993-999.
- Sampoux J.P., A. Gallais & M. Lefort-Buson 1989. Intérêt d'une sélection associant valeur en fourrage et valeur en grain pour l'amélioration du maïs fourrage et du maïs grain. Agronomie 9: 667-675.
- Sandmeier M. 1993. Selfing rates of pearl millet (*Pennisetum typhoides* Stapf and Hubb) under natural conditions. Theoretical and applied genetics 86: 513-517.
- Savidan Y., D. Combes & J. Pernès 1984. *Panicum maximum*. Pages 7-42 in J Pernès (éds). Gestion des ressources génétiques des plantes ORSTOM fonds documentaire N°17444.
- Schroeder J.W. 1996. Quality Forage for Maximum Production and Return. NDSU Extension Service, <http://www.ext.nodak.edu/extpubs/ansci/range/as1117.pdf>: 12pp.

- Sedivec K.K. & Blaine G. Schatz 1991. Forage production in North Dakota. North Dakota State University. NDSU Extension Service, R-1016: 6pp.
- Seklani M. 1976. Economie et population du Sud tunisien. Centre National de la Recherche Scientifique; Centre de Recherches et d'Etudes sur les Sociétés Méditerranéennes: 455p.
- Sèkloka E., J. Lançon, M. Djaboutou, S. Lewicki, D. Takpara, L. Assogba & B.I. Orou Mousse 2001. Un partenariat agriculteur-chercheur dans un programme de creation de variété de coton au Bénin/ Bilan de trois années de sélection. Pages 56-63 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001, France.
- Serna-Saldivar S. & Lloyd W.R. 1995. Structure and chemistry of sorghum and millets. Pages 69-124 in David A V Dendy (éds). Sorghum and millets chemistry and technology. American association of cereal chemists, Inc. St Paul, Minnesota, USA.
- Serpantié G. & P. Milleville 1993. Les systèmes de culture paysans à base mil (*Pennisetum glaucum*) et leur adaptation aux conditions sahéliennes. Pages 255-266 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Shetty H.S. 1987. Biology and epidemiology of downy mildew of pearl millet. Pages 147-160 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Siband P., I. Dieye & B. C. Faye 1979. Evolution pondérale du système grain-plantule chez le mil (*Pennisetum typhoides*) au cours de l'épuisement du grain. Agronomie tropicale 34 (3): 250-257.
- Siband P., B.C. Faye & I. Dieye 1979. Evolution minérale du système grain-plantule chez le mil (*Pennisetum typhoides*) au cours de l'épuisement du grain. Agronomie tropicale 34 (3): 258-270.
- Simon U. 1982. The utilization of genetic resources in fodder crop breeding. Eucarpia Fodder crop section. Welsh plant breeding station:17pp.
- Singh S.D., S. Ball & D.P. Thakur 1987. Problems and strategies in the control of downy Mildew. Pages 161-172 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Singh P., A.G.B. Raj, M.N.V.R. Rao & J.R. Witcombe 1994. Registration of 'ICMV 155'pearl millet. Published in crop science 5 (34): 1409.
- Spencer D.S.C. & M.V.K. Sivakumar 1987. Pearl millet in African Agriculture. Pages 19-31 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Sperling L., J.A. Ashby, M.E. Smith, E. Weltzien & S. McGuire 2001. A framework for analyzing participatory plant breeding approaches and results. Pages 106-116 in sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001, France.
- Spitaleri R.F., J.C. Henning, D.C. Ditsch, G.D. Lacefield & W. Turner 2001. Summer Forage Annuals Report. Kentucky Agricultural Experiment Station, University of Kentucky. College of Agriculture Department of Agronomy. Lexington, Kentucky 40546, <http://www.ca.uky.edu/agc/PUBS/pr/pr478/pr478.htm>: 4pp.
- Squire G.R., C.K. Ong & J.L. Monteith 1987. Crop growth in semi-arid environments. Pages 219-231 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). Proceeding of the international pearl millet workshop. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Stegmeier W.D., B. Khaleeq, R.L. Vanderlip & D.J. Andrews 1990. Pearl millet: A potential early maturing dryland feed grain crop. Page 151 in J. Janick and J.E. Simon (éds), Advances in new crops. Timber press, Portland, OR.
- Stemler A.B.L. 1980. Origins of plant domestication in the Sahara and the NileValley. In M.Williams and H. Faure, eds., *The Sahara and the Nile*, 503–26. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Sthapit B.R. & K.D. Joshi 1996a. Methodological issues for seed systems of crop varieties developed through participatory plant breeding. Paper Presented in working seminar on Farmer

- Participatory Research and Gender Analysis for Technology Development at CIAT, Columbia from September 9-14 (1996), http://www.panasia.org.sg/nepalnet/libird/seminar_paper.htm: 10pp.
- Sthapit B.R. & K.D. Joshi 1996b. Participatory plant breeding: An option for on-farm conservation of agrobiodiversity. Paper Presented in working seminar on Managing Agricultural Biodiversity for Sustainable Mountain Agriculture: Issues and Experiences organized by LI-BIRD in partnership with ICIMOD and IPGRI, 15-16 March, 1996, Pokhara, Nepal, http://www.panasia.org.sg/nepalnet/libird/seminar_paper.htm: 10pp.
- Sumarno R.S. 1986. Response of soybean (*Glycine max* Merr) Genotypes to Continuous Saturated Culture. *Crop Sci* 2: 71-78.
- Szabo' T.A. 1999. Genetic erosion, human environment and ethnobiodiversity studies. Preprint in: *Bio Tár Electronic*. Germoplasma BTN 766: 1-16.
- Tchawa P. & P. Kamga 2001. Participatory Technology Development on soil fertility improvement in Cameroon. Pages 221-233 In *Farmer Innovation in Africa. A Source of Inspiration for Agricultural Development*. Earthscan Publications Ltd, London: 362pp.
- Teare I.D., D.L. Wright & J.A. Pudelko 1993. Physiological development of HGM-100 to planting date and available water. *Inst. Of Food and Agric. Sci., Univ. of FL, Gainesville. FL 323511*: 203-209.
- Tecator A.B. 1995. Fibre determination using the fibertec 1 & M Systems. Application note 1997, Copyright 1995 Perstorp Analytical AN. 304: 8pp.
- Tedonkeng Pamo E., S. Yonke & J. Onana 1997. Evaluation des principales espèces fourragères introduites dans l'adamaoua camerounais. *Cahiers 'agricultures'* 3 (6): 203-207.
- Temple L. & K. Tomekpé 2001. Validation participative d'hybrides de Plantain au Cameroun. Pages 30-36 in *Sélection participative*, Montpellier, 5-6 septembre 2001, France.
- Teutsch C. 2002. Warm-Season Annual Grasses for Summer Forage. Virginia Cooperative Extension, Knowledge for the Common Wealth. Virginia State University. Publication Number 418-004, August 2002, <http://www.ext.vt.edu/pubs/forage/418-004/418-004.html>: 11pp.
- Thakur R.P. 2003. Pathogenic variability in *Sclerospora graminicola*, the pearl millet downy mildew pathogen. ICRISAT-Patancheru, <http://www.icrisat.org/text/research/grep/homepage/grephomepage/archives/gpmdmp.htm>: 4pp.
- Thakur R.P. & S.S. Chahal 1987. Problems and strategies in the control of ergot and smut in pearl millet. Pages 173-182 in J.R. Witcombe & Seth R.Beckerman (éds). *Proceeding of the international pearl millet workshop*. ICRISAT Patancheru, Andra Pradesh 502 324, India.
- Thomas Jefferson Agricultural Institute (TJAI) 2003. Alternative Crop Overviews 'Pearl Millet'. <http://www.jeffersoninstitute.org/overviews/millet.shtml>
- Thomas Jefferson Agricultural Institute (TJAI) 2003. Pearl Millet A New Grain Crop Option for Moisture Limited Conditions, <http://www.jeffersoninstitute.org/overviews/millet.shtml>: 7pp.
- Tomassone R. 1995. Biométrie: méthodologie des d'expériences. Séminaire LVMH. Apport de la statistique dans la recherche et le contrôle. Département Mathématique et Informatique. 16, claude Bernard, 75231 PARIS. CEDEX 05, <http://biomserv.univ-lyon1.fr/txtdoc/Publications/Tomassone/LVMH> pdf: 7pp.
- Toomey G. 1998. Les fermiers comme chercheurs: l'avènement de la sélection végétale participative. *Projet de références du CRDI # 950019*: 5pp.
- Toomey G. 1999. Cerner les possibilités de participation des fermiers aux programmes de sélection des plantes.CRDI; Ressources; Livres; Explore: 8pp.
- Tostain S. & L. Marchais 1985. Prospection de mils spontanés au Burkina Faso. ORSTOM, fonds documentaire, N°010012738: 9pp.

- Tostain S. & L. Marchais 1993. Evaluation de la diversité génétique des mils (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) Au moyen de marqueurs enzymatiques et relations entre formes sauvages et cultivées. Pages 33-56 in Serge Hamon (éds). Le mil en Afrique 'diversité génétique et agro-physiologie: potentialités et contraintes pour l'amélioration génétique et l'agriculture' ORSTOM Editions, Paris, France.
- Tourte R., R. Nicou & A. Bonlieu 1963. Quelques techniques de culture des mils et sorghos au Sénégal: Possibilités de la culture mécanique. *Agronomie tropicale* 1: 65-72.
- Trigui N., M. Sandmeier, M. Salanoubat & J.Pernès 1986. Utilisation des données enzymatiques et morphologiques pour l'étude des populations et de la domestication des plantes: I séparation et identification génétique d'isozymes chez le mil (*Pennisetum typhoides* Bur. Stapf & Hubb). *Agronomie* 6(9): 779-788.
- Trouche G. 2001. L'amélioration variétale participative au CIRAD: Historique et justifications pour la création d'un groupe de réflexion sur ce thème. Pages 18-24 in sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001, France.
- Trouche G., S. DA, G. Pale, A. Sohero, O. Ouedraogo & G. Den Gosso 2001. Evaluation participative de nouvelles variétés de sorgho au Burkina. Pages 36-55 Pages 120-122 in Sélection participative, Montpellier, 5-6 septembre 2001.
- Upadhy M. K. & B.R. Murty 1971. Genetic diversity and combining ability of pearl millet. *Indian. J. Genet.* 31: 63-71.
- Utle P.R., R.N. Gates, W.W. Hanna & J.C. Johnson 1995. 'HGM-100' Pearl millet silage for growing Beef Heifers. http://www.ads.uga.edu/annrpt/1995/95_115.htm, 1995 Annual Report: 115-120pp.
- Van Damme P. 2003. Communication personnelle. Laboratoire 'tropical and subtropical Agriculture and Ethnobotany'. Fakulteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen Vakgroep Plantaardige Productie. Coupure links 653 B-9000 Gent België, E-mail: Patrick.VanDamme@ugent.be.
- Van Oosterom E.J., F.R. Bidinger & E.R. Weltzien 2003. A yield architecture framework to explain adaptation of pearl millet to environmental stress. *Field Crops Research* 1, 8 (80): 33-56.
- Van Oosterom E.J., G.J. O'Leary, P.S. Carberry & P.Q. Craufurd 2002. Simulating growth, development, and yield of tillering pearl millet. III. Biomass accumulation and partitioning. *Field Crops Research* 2(79): 85-106.
- Van Soest P.J. 1963. Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. 1/ Preparation of Fiber Residues of low Nitrogen Content. *Journal of the AOAC* 5(46): 825-829.
- Van Veldhuizen L., A. Waters-Bayer & H. de Zeeuw 1997. Developing Technology with Farmers. A Trainer's Guide for Participatory Learning. Zed Books Ltd, London: 230 pp.
- Vavilov N.I. 1950. Origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. *Chron. Botanica*, 13: 1-6.
- Verschave Ph. & C. Cilas 1994. Index de sélection et sélection précoce pour l'accroissement de la production chez le palmier à huile. Pages 343-352 in traitements statistiques des essais de sélection, stratégies d'amélioration des plantes pérennes. Actes du séminaire de biométrie et génétique quantitative 12-14 septembre 1994, Montpellier, France.
- Victoria-Feser M. 1998. Analyse Multivarie des Données en Psychologie. Cours destinés aux étudiants du deuxième cycle de licence en Psychologie, semestre d'hiver. http://www.hec.unige.ch/professeurs/VICTORIAFESER_Maria-Pia/pages_web/UV33/proq03.pdf. 120pp.
- Vietmeyer N.D. 1996. Lost crops of Africa. National academy press Washington, D.C. volume 1, Grains: 329pp.

- Vom Brocke K., E. Weltzien & A. Christinck 2001. How can participatory breeding contribute to the maintenance of biodiversity, experiences from Rajasthan, India. Pages 124-132 in Selection participative, Montpellier, 5-6 September 2001, France.
- Ward J.D., D.D. Redfearn, M.E. McCormick & G.J. Cuomo 2001. Chemical Composition, Ensiling Characteristics, and Apparent Digestibility of Summer Annual Forages in a Subtropical Double-Cropping System with Annual Ryegrass. 2001 J. Dairy Sci. 84: 177-182.
- Warndorff M. 1985. The relationship between canopy structure, digestibility and regrowth after defoliation in hybrid *Pennisetum* (*Pennisetum purpureum*X *Pennisetum americanum*). Thesis submitted to the faculty of agriculture of the Hebrew University of Jerusalem for the degree. Master of science: 109pp.
- Weltzien E. & C.T. Hash 1995. Cooperative breeding of open-pollinated varieties. ICRISAT Patancheru, 502-324, Andhra Pradesh, India: 72-76.
- Weltzien R.E., M.L. Whitaker & M. Dhamotharan 1997. Diagnostic Methods for breeding pearl millet with farmers in Rajasthan. IDRC: Ressources, Books, Catalogue. Using diversity: 11pp.
- Winkel T. & F. Do 1992. Caractères morphologiques et physiologiques de résistance du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) à la sécheresse. Agronomie tropicale 46 (4): 339-351.
- Witcombe J.R. 1988. Estimates of stability for comparing varieties. Euphytica 39: 11-18.
- Witcombe J.R. 1996. Participatory approaches to plant breeding and selection. Biotechnology and Development, 29: 2-6.
- Witcombe J.R. 1997. Methodology issues for decentralized breeding in relation to participatory plant breeding. In: New frontiers in participatory research and gender analysis. Proceedings of the International Seminar on Participatory Research and Gender Analysis for Technology Development, CIAT, Cali, Colombia, 9-14th September, 1996: 135-183.
- Witcombe J.R., M.N.V.R Rao, B.S.Talucdar, S.D. Singh, & A.M. Rao 1996. Registration of 'ICMR 312' pearl millet. Published in crop science 2(23): 1006-1007.
- Witcombe J.R., M.N.V.R. Rao, A.G.B. Raj & C.T. Hash 1997. Registration of 'ICMV 88904' pearl millet. Published in crop science 3(37): 1022-1023.
- Wunderlin R. P. & B. F. Hansen 2003. *Pennisetum glaucum*, Atlas of Florida Vascular plants (<http://www.plantatlas.usf.edu/>). [S. N. Campbell (application development), Florida Center for Community Design and Research.] Institute for Systematic Botany, University of South Florida, Tampa: 7pp.
- Yadav O.P. 1996. Plant breeding abstracts. Pearl millet breeding, achievements and challenges 2(66): 157-163.
- Yahyaoui H. 1998. Fluctuations piezométriques des principales nappes dans le gouvernorat de Médenine. Rapport de la direction générale des ressources en eau, CRDA Médenine Tunisie: 6pp.
- Zouaghi M., J. Zaouali, N. Ben Maiez & Z. Belkhir 1998. Etude de la diversité biologique de la Tunisie. Rapport de synthèse du Projet Biodiversité/GEF/PNUF. Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire, 36, de Tyr 2037 El Menzah VIII, Tunis-Tunisie: 46pp.

Annexes

La production et la surface du mil dans certains pays et dans le monde pour les années 2000, 2001 et 2002

Années Pays et contenants	2000		2001		2002	
	Surface (ha)	Rendement (t)	Surface (ha)	Rendement (t)	Surface (ha)	Rendement (t)
Burkina Faso	1138581	725613	1322953	1009044	1389618	994700
Mali	1078624	759114	1442388	792548	1245480	1034211
Mauritanie	22000	7255	10000	3141	2705	406
Niger	5151395	1679174	5231937	2414394	5200000	2000000
Nigeria	5814000	6105000	5855000	5530000	6162000	6100000
Sénégal	842124	600221	801070	470109	819498	414687
Soudan	2087000	496000	2586000	578000	2437000	618000
Ouganda	384000	534000	389000	584000	390000	590000
Tchad	791753	258828	848859	397608	820000	369000
Afrique	19588068	12694246	20713648	13316386	20625559	13632618
Chine	1250296	2125740	1148609	1966779	1100420	2070779
Inde	13012200	10077300	12527200	11433500	9000000	6150000
Asie	15584509	13131457	15004468	14365750	11358838	9122587
Australie	38961	56783	40000	60000	41000	63000
Europe	1719447	1561281	1020359	828628	1267425	419880
Russie	1341000	1122000	759500	550000	1100000	292000
EU	149739	199217	236749	528117	89034	74979
Monde	37112382	27690911	37033384	29129579	33395686	23338332

Source: FAO

(<http://apps.fao.org/page/form?collection=Production.Crops.Primary&Domain=Production&servlet=1&language=EN&hostname=apps.fao.org&version=default>)

Collection du mil cultivé et sauvage rassemblée par l'ICRISAT

Table 17.2. Geographical sources and number of pearl millet germplasm assembled ICRISAT Asia Center, Patancheru, India (as on 31 Dec 1995).

Country of origin	Cultivated	Wild relatives		Total
		<i>monodii</i>	Others	
Africa				
Algeria	5	–	–	5
Benin	46	–	–	46
Botswana	82	–	–	82
Burkina Faso	863	4	1	868
Cameroon	916	3	79	998
Cape Verde Islands	2	–	–	2
Central African Rep.	146	–	10	156
Chad	101	32	3	136
Congo	8	–	–	8
Ethiopia	2	–	–	2
Gambia	15	–	–	15
Ghana	283	–	–	283
Kenya	98	–	–	98
Lesotho	–	–	4	4
Malawi	300	–	12	312
Mali	1069	87	22	1178
Mauritania	6	24	7	37
Morocco	4	–	–	4
Mozambique	31	–	2	33
Namibia	1118	–	8	1126
Niger	1092	139	39	1270
Nigeria	1906	8	3	1917
Senegal	403	12	–	415
Sierra Leone	59	–	1	60
Somalia	4	–	–	4
South Africa	162	–	–	162
Sudan	587	16	11	614
Tanzania	483	–	20	503
Togo	515	–	–	515
Tunisia	6	–	–	6
Uganda	123	–	1	124
Zaire	11	–	–	11
Zambia	154	–	3	157
Zimbabwe	1382	2	2	1386
Asia				
India	7655	2	118	7775
Korea (South)	1	–	–	1
Lebanon	108	–	–	108
Myanmar	10	–	–	10
Pakistan	160	–	–	160
Former USSR	16	–	–	16
Sri Lanka	–	–	2	2
Turkey	2	–	–	2
Yemen	290	–	–	290
Europe				
Germany	3	–	–	3
UK	31	–	1	32
Americas				
Brazil	2	–	–	2
Mexico	10	–	–	10
USA	225	5	5	235
Oceania				
Australia	8	–	–	8
Total	20503	334	354	21191

Source: Rai *et al.*, 1997

Comparaison des moyennes des variables par le test Duncan A 5%

Hauteur de la plante

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\alpha = .05$											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	140,61	a											
2	149,10	b											
1	160,16	c											
6	167,51	d											
4	179,44	e											
14	186,50	f											
15	189,20	f g											
7	190,73	f g h											
18	192,92	f g h i											
16	192,96	f g h i											
5	195,80	g h l j											
13	196,85	h l j											
8	198,28	l j											
12	198,30	l j											
17	200,54	j											
11	212,52	k											
10	212,62	k											
9	232,31	l											

Diamètre de la tige

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\alpha = .05$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	5,02	a								
6	5,48	b								
3	5,58	b								
14	6,07	c								
7	6,14	c								
13	6,21	c d								
15	6,30	c d e								
4	6,52	d e f								
18	6,61	e f g								
8	6,70	f g h								
12	6,76	f g h								
5	6,91	g h								
16	6,93	g h								
1	6,95	g h								
10	7,03	h								
11	7,04	h								
17	7,71	i								
9	7,91	i								

Longueur de la feuille

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\alpha = .05$											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	39,80	a											
2	40,22	a											
6	42,21	b											
18	42,59	b c											
14	43,70	b c d											
1	44,35	c d e											
13	45,55	d e f											
15	45,85	e f											
4	47,40	f g											
16	49,23	g h											
5	50,69	h i											
12	51,18	h i											
8	52,16	l j											
10	52,79	l j											
7	53,36	j											
17	53,86	j											
11	56,47	k											
9	58,73	l											

Largeur de la feuille

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\alpha = .05$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	21,76	a									
14	23,92	b									
11	24,36	b c									
7	24,64	b c d									
12	25,05	b c d									
10	25,68	c d e									
18	25,89	d e f									
15	25,91	d e f									
3	26,64	e f g									
13	26,67	e f g									
8	27,27	f g h									
4	27,43	g h									
16	28,09	g h i									
17	28,39	h i									
2	29,12	i j									
9	29,81	j									
1	29,89	j									
5	29,99	j									

Longueur de la gaine

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\alpha = .05$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
2	104,15	a							
3	106,88	a b							
1	108,73	b c							
6	111,76	c d							
13	113,23	d e							
7	113,51	d e							
15	114,57	d e							
4	114,90	d e f							
8	115,64	d e f							
16	115,91	d e f							
14	115,94	d e f							
5	116,66	e f							
18	119,11	f g							
11	121,88	g							
10	122,36	g							
12	126,98	h							
17	128,50	h							
9	128,62	h							

Longueur de l'entre noeud de la tige

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\alpha = .05$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	18,90	a								
17	19,32	a b								
16	19,38	a b								
1	19,68	a b c								
12	19,96	b c d								
3	20,05	b c d e								
4	20,29	c d e f								
2	20,41	c d e f								
15	20,52	c d e f g								
6	20,62	d e f g								
13	20,68	d e f g								
8	20,76	d e f g h								
7	20,90	e f g h								
5	21,15	f g h								
11	21,31	g h								
14	21,54	h								
10	21,55	h								
9	22,62	i								

Nombre des feuilles

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	6,10	a											
2	6,68	b											
1	7,59	c											
6	7,98		d										
4	8,12		d										
5	8,60			e									
14	8,72			e	f								
7	8,95				f	g							
15	9,09					g	h						
18	9,33						h	i					
13	9,34						h	i					
8	9,42							i	j				
16	9,51							i	j				
17	9,58							i	j				
12	9,63								j				
10	9,63								j				
11	9,90									k			
9	10,18										l		

Nombre total de talles

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
7	0,04	a								
16	0,35	a	b							
10	0,47		b	c						
3	0,49		b	c	d					
9	0,49		b	c	d					
8	0,50		b	c	d					
1	0,60		b	c	d	e				
13	0,79			c	d	e	f			
11	0,83			c	d	e	f			
18	0,85				d	e	f			
4	0,88					e	f			
2	0,95						e	f		
17	0,97							f		
5	1,11							f	g	
12	1,12							f	g	
15	1,35								g	h
14	1,51									h
6	1,64									h

Nombre de talles productives

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$						
		1	2	3	4	5	6	7
7	0,01	a						
2	0,07	a	b					
1	0,14	a	b	c				
16	0,21	a	b	c	d			
3	0,23	a	b	c	d			
10	0,25	a	b	c	d			
9	0,31		b	c	d			
13	0,32		b	c	d			
8	0,33			c	d			
11	0,41			d	e			
18	0,43			d	e			
12	0,63				e	f		
17	0,67					f		
4	0,67					f		
15	0,68					f		
5	0,73					f		
14	0,86					f	g	
6	1,05						g	

Nombre de talles nodales

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$						
		1	2	3	4	5	6	7
7	0,02	a						
16	0,09	a	b					
8	0,15	a	b	c				
17	0,18	a	b	c				
9	0,26	a	b	c	d			
10	0,29		b	c	d			
1	0,30		b	c	d			
3	0,34		b	c	d	e		
2	0,37			c	d	e		
11	0,48				d	e	f	
18	0,49				d	e	f	
13	0,57					e	f	
12	0,59						e	f
5	0,68							f
4	0,69							f
15	1,08							g
6	1,11							g
14	1,14							g

Longueur de la Panicule

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	8,67	a									
1	9,31		b								
3	9,40		b								
6	9,43		b								
14	10,64			c							
15	10,82			c	d						
4	11,14			c	d						
18	11,32				d						
13	11,34				d						
5	11,46				d	e					
8	12,01					e	f				
7	12,11						f				
12	12,72							g			
10	12,77							g			
11	13,09							g			
9	14,58								h		
16	16,64									i	
17	20,16										j

Grosseur de la Panicule

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	19,89	a									
2	20,13	a									
3	21,83		b								
6	22,13		b								
13	25,61			c							
8	25,91			c	d						
14	26,34				c	d	e				
15	26,48					c	d	e	f		
7	26,53					c	d	e	f		
4	26,87						d	e	f	g	
16	27,25							e	f	g	h
11	27,48								f	g	h
12	27,76									g	h
5	28,16										h
17	28,20										h
10	28,31										h
18	29,67										i
9	30,62										i

Poids de la Panicule

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	7,05	a							
2	7,80	a							
6	10,17		b						
3	10,63		b						
7	14,61			c					
15	15,31			c					
14	15,46			c					
4	15,50			c					
8	15,68			c					
13	15,69			c					
5	18,05				d				
10	18,46				d e				
18	18,81				d e				
11	19,55				d e				
12	20,04					e f			
16	21,57					f			
9	25,16						g		
17	29,43							h	

Poids des graines

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	0,93	a								
1	0,97	a b								
16	0,98	a b								
8	1,03		b							
2	1,11			c						
17	1,13			c d						
10	1,14			c d e						
3	1,17			c d e f						
13	1,18				d e f g					
9	1,20				e f g					
12	1,23					f g				
5	1,23					f g				
6	1,23					f g				
15	1,23					f g				
11	1,25						g h			
4	1,30							h i		
14	1,30							h i		
18	1,32								i	

Nombre d'épillet fertiles

Cultivars	Moyennes	Groupes pour $\xi = .05$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,36	a							
6	1,43	a b							
2	1,46	a b c							
18	1,51	b c d							
7	1,53	b c d e							
8	1,55	b c d e							
4	1,58	c d e f							
14	1,60	d e f							
15	1,60	d e f							
13	1,61	d e f							
10	1,65	e f g							
5	1,69	f g							
9	1,69	f g							
12	1,69	f g							
11	1,70	f g							
3	1,75			g					
16	1,95				h				
17	1,99					h			

**Institut des Régions Arides
TUNISIE**

**Enquête sur la culture du mil dans les régions
arides tunisiennes**

Date.....

Numéro.....

Nom et prénom de l'agriculteur

Age.....

Région.....

Propriétaire: Oui Non

Main d'œuvre: * Familiale ** Recrutée

.....
.....
.....
.....
.....
** Combien	Période
.....
.....

Superficie totale.....

Superficie réservée pour la culture du mil.....

Superficie des autres cultures:

Espèces	Superficie
.....
.....
.....

La culture du mil est une activité: Ancienne.... Récente..... dans la région

Culture du mil en association: Oui... Espèces.....

Non... Pourquoi.....

Causes: Agronomiques Économiques

.....
.....
.....

Rendement de la culture du mil

Rotation et rendement correspondant:

L'année	Espèces	Rendement (kg/ha)
.....
.....
.....

Semences utilisées: Auto-sélection..... Achat..... Autres.....

Variétés utilisées:	Nom	Caractéristiques

Calendrier cultural:

1) Préparation du sol:	Activité	Période

2) Fumure et engrais utilisés:

Type	Quantité en kg/ha	Mode d'application	Période
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Préparation des planches de cultures:

Période..... Dimension.....

Installation de brise-vent:

Période..... Nature.....

Date de semis:..... * Semis direct..... ** À la pépinière.....

** Date de transplantation des plantules.....

Choix de dates de semis.....

Densité de semis:

Écartement entre les plants.....

Profondeur de semis.....

Durée des différents stades du cycle végétatif:

Semis..... Levée..... Épiaison..... Floraison..... Maturité.....

Eau d'irrigation: Source..... Qualité.....

Irrigation:

Techniques	Doses	Fréquences
.....
.....
.....

Prédateurs et parasites du mil dans la région:

.....

.....

.....

.....

.....

Dates de maturation en fonction de différentes dates de semis:

Dates de semis	Dates de maturation
.....
.....
.....

La récolte:

Technique	Matériels utilisés
.....
.....
.....

Commercialisation: Facile..... Difficile.....

Prix:.....

Rentabilité de cette culture: Elevée..... Moyen..... Faible.....

Utilisation de la récolte: Autoconsommation..... Vente.....

Autres utilisations:.....

Cultivars préférés

.....

.....

.....

Pourquoi

.....

.....

.....

Type de plante recherchée

.....

.....

.....

Morphologie

.....

.....

.....

.....

.....

Qualité de meilleure graine

Forme

Couleur

Autre caractéristique

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Autres remarques sur cette culture:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Choix des meilleures lignées qui répondent aux objectifs de sélection

Après avoir regroupé toutes les plantes d'une même lignée (de deux blocs) ensemble, on a trié l'ensemble sur le nombre total des plantes par lignée.

Pour l'évaluation générale des lignées, on a donné des signes '+' pour les meilleurs caractères, '0' pour les caractères moyens et les signes '-' pour les mauvais caractères comme suit:

1/ Hétérogénéité des plantes de la lignée:

- '-' très hétérogène 1
- '0' hétérogène 2
- '+' homogène 3
- '++' très homogène 4

2/ Biomasse des plantes à 1 m de longueur

- '-' faible A
- '0' intermédiaire B
- '+' bon C

3/ Biomasse des plantes à 1,5 m de longueur

- '-' faible A
- '0' intermédiaire B
- '+' bon C

4/ Nombre des jours du semis à l'initiation de la Panicule (précocité)

- '+' (de 38 à 45 jours)
- '0' (de 46 à 56 jours)
- '-' (de 57 à 59 jours)

5/ Sensibilité à la verse

- '+' lignée non versée
- '0' peu des plantes versées dans une lignée
- '-' La moitié des plantes sont versées
- '--' toutes les plantes sont versées

6/ Poids total des Panicules de la ligne médiane

- '-' < 500 grammes
- '+' >500<1000 grammes
- '++' > 1000 grammes

7/ Couleurs des graines

- '+' pour la couleur (5 gris foncé)
- '-' pour les couleurs (4 et 6 gris et gris brun)

Les lignées qui comptent 20 plantes et 'plus' sont regroupées ensemble pour former **le groupe de meilleures lignées**.

Les restes **des lignées ≤ 19 plantes** et **toutes les plantes sans voisins** sont regroupées ensemble pour former **le groupe des individuels** ou 'groupe des lignées moyennes et plante sans voisins'.

Chaque groupe est subdivisé en 3 sous-groupes selon le nombre total des signes plus '+':

- **Sous-groupe 1:** Toutes les lignées ≥ 5 '+'
- **Sous-groupe 2:** Toutes les lignées de 4 et 3 '+'
- **Sous-groupe 3:** Toutes les lignées ≤ 2 '+'

Les analyses chimiques effectuées sur les plantes des lignées retenues comme 'mil à fourrage'

Teneur en matières azotées totales (MAT)

La détermination de la teneur en matières azotées totales se fait en trois étapes:

- digestion de l'échantillon: elle a pour objectif la transformation de l'azote organique à la forme minérale (sulfate d'ammonium). Pour ce faire, 1g de l'échantillon associé à l'acide sulfurique (20ml de H₂SO₄ concentré) en présence d'un catalyseur à base de sélénium est porté à température de 420°C pendant 1h 30'.
- récupération de l'azote minéral: après refroidissement des échantillons, on y ajoute 150 ml d'eau distillée et 2ml de phénolphthaléine 2%, le tout est placé dans l'appareil *Kjeldahl* où l'azote va être récupéré par vapeur dans une solution constituée de 50ml d'acide borique à 4%.
- titration: la titration de la solution de réception (distillat) est faite en utilisant une solution d'acide chlorhydrique N/10 (AOAC, 1973).

$$N (\% MS) = (\text{volume de HCl} \times 1.4 \times 100) / PE \times MS$$

avec,

PE: poids de l'échantillon (g);

MS: teneur en matière sèche de l'aliment;

VHCl: volume du HCl qui a servi pour la titration; et

N: normalité du HCl pour titration.

La teneur en matières azotées totales est ensuite calculée de la façon suivante:

$$MAT (\%) = N (\%) \times 6.25$$

Teneur en paroi totale ou NDF

La paroi totale, ou *Neutral detergent fiber* (NDF), est déterminée selon la méthode décrite par Van Soest (1963). Son principe est de solubiliser tout le contenu cellulaire en appliquant un détergent (le lauryle sulfate de sodium) et les substances pectiques en utilisant un agent chélatant en milieu tamponné. Cette opération est réalisée par ébullition pendant 75 mn à l'aide d'un ANKOM 220. Le rinçage du résidu obtenu par acétone permet ensuite d'éliminer les matières grasses. Sa calcination à 550°C pendant 4h entraîne enfin l'élimination des cendres insolubles dans le détergent neutre utilisé dans l'extraction. Le résidu ainsi obtenu est supposé contenir trois fractions pariétales: l'hémicellulose, la cellulose et la lignine (Van Soest, 1982).

$$\% NDF = (P4 - (P1 \times C2)) \times 100 / P2 \times MS$$

Avec,

P1: tare du sac vide;

P2: prise d'essai;

P3: poids après extraction;

P4: poids de matière organique;

C2: facteur correction des sacs.

Teneur en ligno-cellulose ou ADF

Les constituants cytoplasmiques, les héli-celluloses et les protéines, contenus dans le résidu NDF précédemment obtenu, sont solubilisés dans un ANKOM 220 par ébullition en présence de 1800 ml d'une solution d'acide sulfurique et d'un détergent (cethyl triméthyle ammonium bromide) pendant 60 mn est suivie d'un lavage par de l'acétone pour éliminer les graisses. Le résidu sec, obtenu après élimination par calcination à 550°C des cendres insolubles dans le détergent acide utilisé, appelé « *Acid Detergent Fiber* ». Il comprend approximativement la cellulose vraie et la lignine.

Le contenu en héli-celluloses est calculé par différence entre les teneurs en NDF et en ADF (Van Soest, 1982).

$$\% \text{ ADF} = (P4 - (P1 \times C2)) \times 100 / P2 \times MS$$

Avec,

P1: tare du sac vide;

P2: prise d'essai;

P3: poids après extraction;

P4: poids de matière organique;

C2: facteur correction des sacs.

Cellulose brute

La teneur en cellulose brute est déterminée selon la méthode de Weende (1963). Pour cela, deux hydrolyses successives, séparées par un temps de refroidissement, sont appliqués à l'échantillon, d'une durée de 45 mn chacune, dans l'appareil ANKOM 220. La première hydrolyse est faite dans un milieu acide (1800 ml de H₂SO₄ 1,25%) alors que la deuxième est faite dans un milieu basique (1800 ml de soude 1,25% avec deux gouttes d'anti-mousse). Chaque hydrolyse est suivie d'une filtration et trois rinçages avec de l'eau distillée chaude. Un dernier rinçage à l'acétone est effectué avant de sécher le résidu jusqu'à poids constant (Weende, 1963)

La teneur en cellulose brute (CB) est calculée de la façon suivante:

$$\% \text{ CB} = (P4 - (P1 \times C2)) \times 100 / P2 \times MS$$

Avec,

P1: tare du sac vide;

P2: prise d'essai;

P3: poids après extraction;

P4: poids de matière organique;

C2: facteur correction des sacs.

Teneur en matière sèche (MS)

La détermination de la matière sèche se fait par dessiccation pendant 24 h dans une étuve à 105°C jusqu'au poids constant (AOAC, 1973).

$$MS (\%) = (P2 - P1) \times 100 / P0$$

avec

P0: prise d'essai (g);

P1: tare (g);

P2: poids de l'échantillon sec + tare (g)

Teneur en matière minérale (MM)

Les échantillons préalablement séchés subissent une calcination dans un four à moufle pendant 4 heures à une température de 550°C. La perte de poids représente le poids de la matière organique. Le résidu représente le poids des matières minérales de l'échantillon. La teneur en matière minérale est exprimée en pourcentage de la matière sèche (AOAC, 1973).

$$\text{MM (\% MS)} = (P2 - P1) \times 100 / P0 \times MS$$

avec

P0: prise d'essai (g);

P1: tare; (g)

P2: poids de l'échantillon sec + tare (g) après calcination.

Test Duncan (analyse morphologique et chimique)
Groupes homogènes, alpha =,05
EFFET PRINC:LIGNÉES

(BIO1M)		(PDSCHP)				DIAM					
	Moyennes		1	2	3		Moyennes	1	2	3	
3	2,0 a	10	30,2 a			10	9,3 a				
184	2,0 a	167	34,1 a b			64	9,5 a				
14	2,0 a	3	35,2 a b			3	9,8 a b				
93	2,0 a	46	36,0 a b c			19	10,0 a b				
167	2,0 a	184	37,1 a b c			184	10,0 a b				
18	2,5 a	49	37,2 a b c			75	10,4 a b				
173	2,5 a	125	38,5 a b c			93	10,5 a b				
49	3,0 a	64	39,2 a b c			18	10,5 a b				
64	3,0 a	19	39,4 a b c			25	10,8 a b				
75	3,0 a	93	39,9 a b c			14	10,8 a b				
25	3,0 a	14	40,7 a b c			167	11,1 a b c				
107	3,0 a	107	40,9 a b c			125	11,1 a b c				
122	3,0 a	18	43,3 a b c			122	11,2 a b c				
125	3,0 a	126	45,5 a b c			173	11,3 a b c				
126	3,0 a	122	46,3 a b c			126	11,5 b c				
133	3,0 a	25	46,7 a b c			49	11,6 b c				
159	3,0 a	75	46,8 a b c			107	11,7 b c				
19	3,0 a	173	48,0 a b c			46	11,8 b c				
46	3,0 a	159	50,0 b c			133	12,8 c				
10	3,0 a	133	54,1 c			159	13,0 c				
(BIO15M)		(POIDSKG)				(FLORAI)					
	Moyennes		1	2			Moyennes	1	2	3	
14	1,5 a	10	,578 a			25	49,0 a				
3	2,0 a b	64	,597 a			126	49,0 a				
18	2,0 a b	167	,614 a b			184	50,5 a b				
10	2,5 a b	184	,693 a b			10	50,5 a b				
19	2,5 a b	93	,698 a b			125	50,5 a b				
93	2,5 a b	46	,723 a b			46	52,0 a b c				
64	2,5 a b	14	,734 a b			19	53,5 a b c				
49	3,0 b	18	,770 a b			3	53,5 a b c				
46	3,0 b	126	,775 a b			64	53,5 a b c				
75	3,0 b	125	,785 a b			133	53,5 a b c				
25	3,0 b	107	,797 a b			107	53,5 a b c				
107	3,0 b	122	,802 a b			93	55,0 a b c				
122	3,0 b	75	,816 a b			122	55,0 a b c				
125	3,0 b	173	,825 a b			173	55,0 a b c				
126	3,0 b	3	,879 a b			167	55,5 a b c				
133	3,0 b	49	,887 a b			49	58,0 b c				
159	3,0 b	159	,917 a b			159	60,0 c				
167	3,0 b	19	,987 a b			18	60,0 c				
173	3,0 b	25	1,03 a b			75	60,0 c				
184	3,0 b	133	1,13 b			14	60,0 c				
(NBFEUIL)		(COUGNE)				(INITIA)					
	Moyennes		1	2	3	4		Moyennes	1	2	3
64	7,70 a	3	4,0 a				125	44,0 a			
3	7,83 a	122	4,0 a				10	44,0 a			
184	7,88 a b	14	4,0 a				25	44,0 a			
167	8,50 a b c	133	4,0 a				184	45,5 a			
25	8,52 a b c	173	4,0 a				19	46,0 a b			
122	8,66 a b c d	25	4,0 a				133	46,0 a b			
10	8,66 a b c d	46	4,0 a				46	46,0 a b			
126	8,73 a b c d	49	4,5 a				126	46,0 a b			
173	8,79 a b c d	64	4,5 a				173	49,0 a b c			
125	8,80 a b c d	19	4,5 a				64	50,5 a b c			
93	9,00 a b c d	18	4,5 a				49	50,5 a b c			
14	9,00 a b c d	107	4,5 a				107	50,5 a b c			
49	9,04 a b c d	10	4,5 a				3	50,5 a b c			
19	9,20 a b c d	125	4,5 a				167	50,5 a b c			
18	9,31 a b c d	126	4,5 a				93	52,0 a b c			
75	9,50 b c d	93	5,0 a				122	52,0 a b c			
46	9,58 c d	159	5,0 a				14	55,0 b c			
107	9,61 c d	167	5,0 a				18	55,0 b c			
159	9,80 c d	75	5,0 a				75	56,5 c			
133	10,21 d	184	5,0 a				159	56,5 c			

(NBFEUIL)

	Moyennes	1	2	3	4
64	7,70	a			
3	7,83	a			
184	7,88	a	b		
167	8,50	a	b	c	
25	8,52	a	b	c	
122	8,66	a	b	c	d
10	8,66	a	b	c	d
126	8,73	a	b	c	d
173	8,79	a	b	c	d
125	8,80	a	b	c	d
93	9,00	a	b	c	d
14	9,00	a	b	c	d
49	9,04	a	b	c	d
19	9,20	a	b	c	d
18	9,31	a	b	c	d
75	9,50	b	c	d	
46	9,58		c	d	
107	9,61		c	d	
159	9,80		c	d	
133	10,21		d		

(PDSCHP)

	Moyennes	1	2	3
10	30,2	a		
167	34,1	a	b	
3	35,2	a	b	
46	36,0	a	b	c
184	37,1	a	b	c
49	37,2	a	b	c
125	38,5	a	b	c
64	39,2	a	b	c
19	39,4	a	b	c
93	39,9	a	b	c
14	40,7	a	b	c
107	40,9	a	b	c
18	43,3	a	b	c
126	45,5	a	b	c
122	46,3	a	b	c
25	46,7	a	b	c
75	46,8	a	b	c
173	48,0	a	b	c
159	50,0	b	c	
133	54,1	c		

(POIDSKG)

	Moyennes	1	2
10	,578	a	
64	,597	a	
167	,614	a	b
184	,693	a	b
93	,698	a	b
46	,723	a	b
14	,734	a	b
18	,770	a	b
126	,775	a	b
125	,785	a	b
107	,797	a	b
122	,802	a	b
75	,816	a	b
173	,825	a	b
3	,879	a	b
49	,887	a	b
159	,917	a	b
19	,987	a	b
25	1,03	a	b
133	1,13	b	

(NBTALLES)

	Moyennes	1	2
122	,458	a	
184	,702	a	
133	1,08	a	b
126	1,15	a	b
173	1,16	a	b
159	1,20	a	b
107	1,41	a	b
75	1,41	a	b
167	1,43	a	b
49	1,44	a	b
25	1,44	a	b
93	1,50	a	b
64	1,50	a	b
125	1,50	a	b
46	1,60	a	b
18	1,75	a	b
14	2,16	b	
10	2,16	b	
19	2,18	b	
3	2,31	b	

(LONGCHA)

	Moyennes	1	2	3	4	5
10	14,66	a				
167	14,95	a				
3	14,95	a				
93	15,37	a	b			
125	15,60	a	b			
159	17,00	a	b	c		
49	17,02	a	b	c	d	
184	17,36	a	b	c	d	
18	18,12	a	b	c	d	
126	18,18	a	b	c	d	
14	18,33	a	b	c	d	
107	18,58	a	b	c	d	
19	18,63	a	b	c	d	
46	19,20		b	c	d	e
64	19,77		c	d	e	
173	20,16		c	d	e	
122	20,45		c	d	e	
75	21,00		d	e		
133	22,51		e			
25	22,86		e			

(LONG)

	Moyennes	1	2	3	4	5
3	177,5	a				
10	182,1	a	b			
184	183,9	a	b			
64	190,5	a	b	c		
75	203,7	a	b	c	d	
14	206,6	a	b	c	d	
167	208,5	a	b	c	d	
93	210,6	a	b	c	d	
25	211,8	a	b	c	d	
18	214,9	a	b	c	d	
173	216,0	a	b	c	d	
49	217,0	a	b	c	d	
126	218,4	a	b	c	d	
19	219,5	a	b	c	d	
125	222,1	a	b	c	d	
122	226,6		b	c	d	e
46	231,0		b	c	d	e
159	238,5		c	d	e	
107	239,8		d	e		
133	272,8		e			

(PDS1000)

	Moyennes	1	2	3	4	5	6	7	8
93	9,874	a							
19	10,30	a	b						
14	10,44	a	b						
64	10,56	a	b	c					
18	10,64	a	b	c					
159	10,74	a	b	c					
75	11,01	a	b	c	d				
122	11,11	a	b	c	d	e			
3	11,15	a	b	c	d	e			
49	11,75	b	c	d	e	f			
126	12,02		c	d	e	f			
184	12,07		c	d	e	f			
125	12,29		d	e	f				
173	12,45		d	e	f				
46	12,58		e	f					
10	12,73		f						
133	13,04		f	g					
25	14,17		g	h					
167	14,43		g	h					
107	14,99		h						

ADFF

	Moyennes	1	2	3
167	30,930	a		
25	31,160	a	b	
64	34,950	a	b	c
3	35,090	a	b	c
125	35,220	a	b	c
184	35,315	a	b	c
46	35,545	a	b	c
10	35,630	a	b	c
126	35,905	a	b	c
133	36,025	a	b	c
173	36,160	a	b	c
159	36,695	a	b	c
49	36,795	a	b	c
122	36,915		b	c
107	37,445		c	
75	37,945		c	
14	37,975		c	
93	38,160		c	
19	38,370		c	
18	38,640		c	

ADFT

	Moyennes	1	2
125	39,590	a	
3	41,875	a	b
14	42,115	a	b
10	42,665	a	b
19	42,875	a	b
18	43,045	a	b
184	43,980	a	b
126	44,920	a	b
64	45,240	a	b
46	45,685	a	b
159	45,805	a	b
107	46,130	a	b
25	46,145	a	b
173	46,205	a	b
93	46,615	a	b
133	46,750	a	b
75	47,030	a	b
167	47,340	a	b
49	49,125	b	
122	49,930	b	

CBF			NDFC			NDFT		
	Moyennes	1 2		Moyennes	1 2		Moyennes	1 2
167	25,065	a	46	51,572	a	125	60,923	a
107	25,270	a	107	55,261	a b	64	67,069	a b
10	25,500	a b	125	57,913	a b	173	67,687	a b
49	25,890	a b	167	58,555	a b	3	68,285	a b
125	26,115	a b	49	59,826	a b	14	68,410	a b
46	26,340	a b	133	60,237	a b	18	68,538	a b
25	26,450	a b	122	60,453	a b	49	69,743	a b
173	26,675	a b	184	61,212	a b	159	70,666	a b
3	26,940	a b	10	61,340	a b	46	71,236	b
19	26,985	a b	19	61,484	a b	107	71,546	b
133	27,165	a b	126	61,500	a b	122	71,829	b
184	27,270	a b	3	61,505	a b	75	72,071	b
122	27,355	a b	25	61,759	a b	10	72,274	b
64	27,445	a b	173	62,096	a b	184	72,999	b
93	27,470	a b	14	62,359	a b	19	73,186	b
18	27,665	a b	159	63,237	a b	126	73,975	b
126	27,820	a b	75	63,577	a b	167	74,451	b
159	28,145	a b	18	64,173	a b	93	74,605	b
14	28,790	a b	93	64,910	b	25	74,811	b
75	29,665	b	64	67,064	b	133	75,200	b

CBT			MSF			MATT		
	Moyennes	1 2		Moyennes	1		Moyennes	1 2
18	31,870	a	122	51,988	a	14	2,225	a
19	32,060	a	75	52,377	a	19	2,320	a
167	32,910	a	126	52,778	a	18	2,930	a b
3	34,400	a	64	53,877	a	107	3,260	a b
14	34,495	a	167	54,006	a	25	3,370	a b
10	35,535	a b	14	55,072	a	122	3,555	a b
122	36,210	a b	133	55,413	a	173	3,860	a b
184	36,305	a b	46	55,703	a	46	3,935	a b
46	37,520	a b	25	56,301	a	64	3,935	a b
75	37,920	a b	3	57,683	a	93	4,085	a b
126	38,070	a b	107	57,948	a	167	4,135	a b
25	38,290	a b	173	58,240	a	49	4,215	a b
159	38,545	a b	10	58,794	a	159	4,360	a b
133	38,825	a b	49	58,837	a	10	4,425	a b
173	39,360	a b	184	60,061	a	133	4,460	a b
64	40,620	a b	19	60,180	a	126	4,515	a b
125	40,650	a b	159	60,370	a	125	4,825	a b
107	41,155	a b	93	61,386	a	184	5,070	a b
93	41,265	a b	125	62,193	a	75	5,125	a b
49	44,115	b	18	62,778	a	3	5,940	b

MMT				MATF				MMF			
	Moyennes	1	2 3		Moyennes	1	2		Moyennes	1	2 3
14	13,146	a		75	6,010	a		93	17,282	a	
18	14,044	a		46	6,150	a b		14	17,305	a	
19	16,063	a b		122	6,300	a b		10	18,578	a	
133	16,238	a b		159	6,360	a b		18	18,717	a	
25	16,271	a b		64	6,375	a b		75	18,877	a b	
122	16,381	a b		133	6,420	a b		133	18,894	a b	
3	17,913	a b c		14	6,485	a b		64	19,121	a b	
126	18,870	a b c		10	6,565	a b		46	19,886	a b c	
49	19,015	a b c		107	6,625	a b		19	19,913	a b c	
167	19,178	a b c		19	6,755	a b		25	20,419	a b c	
159	19,507	a b c		25	6,950	a b		3	21,015	a b c	
75	19,747	a b c		173	6,965	a b		126	21,050	a b c	
173	20,626	a b c		125	7,055	a b		173	21,463	a b c	
64	20,743	a b c		126	7,065	a b		122	21,839	a b c	
10	21,222	a b c		3	7,160	a b		125	22,004	a b c	
93	21,408	a b c		49	7,345	a b		184	22,041	a b c	
46	21,990	a b c		18	7,450	a b		159	22,109	a b c	
184	22,932	a b c		93	7,565	a b		49	23,806	a b c	
125	24,603	b c		167	7,640	a b		107	25,355	b c	
107	26,846	c		184	9,145	b		167	26,089	c	

MST	Moyennes	1	2	3
46	30,242	a		
159	31,692	a	b	
184	31,957	a	b	
173	32,128	a	b	
75	32,634	a	b	
125	32,655	a	b	
122	32,719	a	b	
126	32,776	a	b	
49	32,967	a	b	
19	33,146	a	b	
64	33,170	a	b	
3	33,269	a	b	
25	34,763	a	b	c
18	35,305	a	b	c
14	35,611	a	b	c
107	36,161	a	b	c
10	36,289	a	b	c
133	38,178		b	c
167	38,563		b	c
93	42,360			c

Annexe 8: Corrélations		LONG	DIAM	NBFEUIL	NBTALLES	POIDSKG	LONGCHA	PDSCHPLN	PDSCHP	PDS1000	COUGNE	EPIAISON	FLORAI	BIO1M	BIO15M	PDST	MSF	MMF	MATF	CBF	ADFF	NDFF	MST	MMT	MATT	CBT	ADFT
DIAM	Corrél.	.750	1,000																								
NBFEUIL	Corrél.	.764	.594	1,000												En vedette:Corrélation significative au seuil de 5% ou 1%											
NBTALLES	Corrél.	-.206	-.179	.018	1,000										Abréviations des caractères, voir 9.3.1 et 9.3.2												
POIDSKG	Corrél.	.433	.478	.345	.310	1,000																					
LONGCHA	Corrél.	.483	.348	.341	-.178	.437	1,000																				
PDSCHPLN	Corrél.	.336	.364	.488	.652	.679	.356	1,000																			
PDSCHP	Corrél.	.639	.631	.556	-.151	.538	.690	.554	1,000																		
PDS1000	Corrél.	.205	.221	.093	-.170	-.011	.137	-.064	-.036	1,000																	
COUGNE	Corrél.	-.006	-.058	.063	-.192	-.277	-.327	-.110	-.076	-.099	1,000																
EPIAISON	Corrél.	-.033	.050	.207	-.121	-.182	-.108	-.076	.082	-.376	.362	1,000															
FLORAI	Corrél.	-.024	.080	.287	-.040	-.138	-.086	.000	.070	-.397	.212	.860	1,000														
BIO1M	Corrél.	.285	.228	.122	-.117	.186	.383	.130	.205	.149	-.047	-.306	-.275	1,000													
BIO15M	Corrél.	.391	.482	.158	-.259	.255	.297	.138	.311	.382	.087	-.372	-.389	.407	1,000												
PDST	Corrél.	.638	.640	.584	-.078	.489	.317	.330	.468	.184	.053	-.081	.044	.206	.438	1,000											
MSF	Corrél.	.124	.059	-.005	.106	.127	-.182	.056	-.112	-.103	.270	-.076	-.176	.127	-.059	-.140	1,000										
MMF	Corrél.	.118	.144	-.051	-.276	.049	-.193	-.216	-.120	.487	.023	-.097	-.076	-.110	.255	.299	-.177	1,000									
MATF	Corrél.	-.240	-.106	-.148	-.181	-.160	-.325	-.268	-.128	-.001	.258	-.004	-.093	-.494	-.144	-.134	.038	.094	1,000								
CBF	Corrél.	.217	.030	.165	-.086	.087	.329	.124	.353	-.432	.047	.218	.167	.043	-.046	-.038	.097	-.239	-.397	1,000							
ADFF	Corrél.	.208	.047	.373	-.108	-.017	.078	.089	.173	-.498	.024	.326	.443	.090	-.188	.008	-.034	-.161	-.218	.404	1,000						
NDFF	Corrél.	-.087	-.249	-.086	.169	.088	.178	.228	.214	-.455	.061	.068	.161	-.001	-.076	-.202	.018	-.287	-.274	.507	.292	1,000					
MST	Corrél.	-.004	-.191	-.004	-.017	-.211	-.117	-.074	-.075	.110	.118	-.020	-.023	-.142	-.212	-.162	-.052	-.150	.110	-.149	-.032	.190	1,000				
MMT	Corrél.	.024	-.087	-.003	-.281	-.396	-.280	-.324	-.269	.321	.445	-.053	-.169	-.093	.250	.090	.108	.319	.074	-.118	-.066	-.259	.048	1,000			
MATT	Corrél.	-.387	-.109	-.222	-.035	-.048	-.253	-.151	-.182	.058	-.004	-.088	-.090	-.026	-.043	-.178	-.045	.002	.197	-.168	-.272	-.032	-.001	.096	1,000		
CBT	Corrél.	.223	.273	.117	-.292	-.067	.059	-.073	.095	.110	.164	.014	.056	.083	.357	.323	-.011	.206	-.094	.013	.095	-.031	-.166	.508	-.100	1,000	
ADFT	Corrél.	.228	.212	.037	-.337	-.011	.209	-.132	.059	.149	.026	.095	.122	.076	.372	.291	-.248	.376	-.168	-.047	.039	.024	-.055	.027	-.161	.438	1,000
NDFT	Corrél.	-.054	.087	.109	-.113	.078	.134	.030	.063	.189	.023	-.012	.001	-.181	.040	.179	-.403	.059	.341	-.306	-.157	-.205	.230	-.199	.077	-.033	.351

Curriculum vitae

CURRICULUM VITAE

Etat civil:

Nom: LOUMEREM

Prénom: Mohamed

Date et lieu de naissance: Le 14 / 06 / 1961 à Médenine - Tunisie

Situation familiale: Marié

Nombre d'enfant: 2

Profession: Assistant à l'Institut des Régions Arides de Médenine (Tunisie)

Diplômes:

- **Baccalauréat:** Math-Science

- **Diplôme Ingénieur:** Horticulture

- **Master:** Etudes spécialisées en développement agricole (Université de Gent-BELGIQUE)

- **Certificat ICRA:** Programme International pour la Recherche Agricole Orientée Vers le Développement

- **Certificat IRA:** Méthodes Actives de Recherche Participative (MARF) et Développement Participatif de technologie (DPT)

- **Certificat Talen Centrum:** English for Scientific Purposes (Université de Gent- Belgique)

- **Certificat Postacademsche vorming:** Nederlanden-cyclus: 'Low countries studies' (Université de Gent- Belgique)

Travaux réalisés et publications:

- Mémoire de fin d'études: Fertilisation phosphatée de la pomme de terre de primeur (1987).

- Contribution à l'étude de la culture du figuier et de certaines de ces populations cultivées dans la délégation de Beni Khedache, (Gouvernorat de Médenine).

- Master: Breeding of *Vicia faba* L. (Breeding for low tannin content).

- Field studies of plant genetic resources in south Tunisia (Plant Genetic Resources Newsletter, 1994, n°98: 13-17).

- Etude pomologique de six variétés de figuier *Ficus carica* L. typiques de Beni Khedache (Plant Genetic Resources Newsletter, 1995, n°104: 16-20).

- Inventory of some cultivated landraces threatened by genetic erosion in southern Tunisia (Plant Genetic Resources Newsletter, 1998, n°113: 8-12).

- L'aménagement des périmètres publics irrigués en zones arides. Les atouts et les limites (Le cas de Bir amir Tataouine, Tunisie), série documents de travail n° 67, ICRA 1997.

- Etude du projet intégré de la délégation de Bir Lahmar, la délégation de Smar et L'île de Jerba (Partie agronomique).

- Les grands projets hydro-agricoles en zone aride: le périmètre de Bir Amir (Agriculture et développement, n°20, décembre 1998).

- Collecting landraces of Cucurbitaceae in Arid Regions of Tunisia and germplasm diversity of melon (*Cucumis melo*) accessions (Revue des Régions Arides-ISSN 0330-7956, Actes du 2^{ème} congrès arabe 'Role de la recherche dans la conservation de la biodiversité, 15-17/05/2000).

Encadrement des étudiants:

- ◆ La culture du mil dans la région de Boughrara, 1998.
- ◆ Etude préliminaire de la diversité génétique des espèces cultivées dans les jessours de Béni-Kheddache, 1999.
- ◆ Etude de la diversité génétique de quelques populations de fève (*Vicia faba*) cultivées dans les régions arides tunisiennes, 2000.
- ◆ Etude bibliographique de la résistance génétique des plantes aux maladies, 2001.
- ◆ Evaluation morphologique d'une lignée du mil (*P. glaucum*) sélectionnée à l'institut des Régions Arides de Médenine, 2002.

Langues:

Arabe: Bien
Français: Bien
Anglais: Bien

Connaissances Informatiques:

Microsoft Word; Excel; PowerPoint, SPSS pour windows et Statistica.