

## Remerciements

Après une année de travail à ce mémoire, j'aimerais remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de celui-ci.

Je cite en premier lieu mes promoteurs, Charles Bielders et Pierre Akponikpe, dont les conseils ont pu guider mon travail le plus judicieusement possible.

Un grand merci également à tous les techniciens qui, tant à l'ICRISAT, qu'à Louvain-la-Neuve, m'ont apporté des aides précieuses. Je remercie particulièrement Anne et Claudine du département SOLS.

Enfin, un tout grand merci à toute la famille, dont la patience à toute épreuve et les encouragements ont permis que ce travail arrive à son terme.

## Résumé

Le projet PAD (Projet d'Aide à la Décision), financé par la DGCD a pour objectif l'amélioration des conditions de vie des populations rurales sahéniennes. L'objectif spécifique est d'améliorer les revenus et de réduire la dépendance de ces populations, en tenant compte des fluctuations du climat et du marché en fournissant une information appropriée et intégrée pour la prise de décision au niveau des ménages.

Ce mémoire s'insère dans le cadre d'une partie du projet PAD, l'évaluation de l'impact de techniques d'intensification sur la production de mil à l'échelle du terroir.

Deux objectifs ont été fixés pour ce mémoire : la caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés chimiques à l'échelle du terroir du Fakara, et l'analyse de sensibilité du logiciel APSIM aux paramètres internes du cycle de l'azote dans le sol.

L'étude de la variabilité spatiale des propriétés chimiques, réalisée à l'aide d'échantillons prélevés sur toute la superficie du terroir et de l'analyse des propriétés chimiques de ces échantillons, a posé les premiers jalons de la réalisation d'une hypothétique carte de la fertilité chimique du Fakara. Cependant, le fait que la variabilité spatiale inter-parcellaire soit inférieure à la variabilité spatiale intra-parcellaire, de même que la prédominance de la matière organique comme facteur explicatif de la fertilité chimique ainsi que le peu de différences rencontrées entre types de sols différents sur base des propriétés chimiques rendent l'intérêt de la réalisation de cette carte discutable.

L'analyse de sensibilité du logiciel APSIM à ses paramètres internes du cycle de l'azote dans le sol est également un pré requis à l'utilisation de ce logiciel pour la réalisation de cartes. APSIM est un simulateur de systèmes de production agricole, modèle numérique à structure modulaire modélisant entre autres la croissance et le développement du mil. Ce travail constitue une première étape dans le calage des paramètres internes avec les conditions locales. L'analyse de l'effet de ces paramètres internes sur le rendement en grain et en biomasse nous a livré quelques observations importantes telles que le peu d'influence du pH et du rapport C/N, ainsi que la grande importance des paramètres liés à la matière organique et les teneurs en azote initiales.

|                           |
|---------------------------|
| <b>Table des matières</b> |
|---------------------------|

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| <b>I.</b>   | <b>Introduction.....</b>  | 13 |
| <b>II.</b>  | <b>Le Niger.....</b>  | 16 |
|             | 1. le milieu physique.....  | 16 |
|             | 1.1 Situation géographique.....   | 16 |
|             | 1.2 Topographie.....  | 17 |
|             | 1.3 Hydrographie.....   | 17 |
|             | 1.4 Le climat.....  | 17 |
|             | 1.4.1 Caractéristiques de la zone sahélienne.....   | 18 |
|             | 1.4.2 Les précipitations.....   | 19 |
|             | 1.4.3 Température et humidité.....  | 19 |
|             | 1.4.4 Les vents.....  | 20 |
|             | 1.4.5 Les régions bio-climatiques.....  | 20 |
|             | 1.5 Pédologie.....  | 23 |
|             | 1.5.1 Géomorphologie.....   | 23 |
|             | 1.5.2 Classification.....   | 24 |
|             | 1.5.3 Caractéristiques agronomiques.....  | 26 |
|             | 2. Contexte socio-économique.....   | 27 |
|             | 2.1 Population.....   | 27 |
|             | 2.2 Economie.....   | 28 |
|             | 2.2.1 Agriculture.....  | 29 |
|             | 2.2.2 Elevage.....  | 30 |
| <b>III.</b> | <b>Recherche bibliographique : Effet de la fertilité chimique sur<br/>la croissance du mil.....</b> | 33 |
|             | 1. Le mil en Afrique de l'Ouest.....  | 33 |
|             | 1.1 Espèce et variété.....  | 33 |
|             | 1.2 Structure morphologique.....  | 34 |
|             | 1.3 Croissance et développement.....  | 35 |
|             | 1.4 Agriculture traditionnelle.....   | 36 |
|             | 1.5 Besoins en eau.....   | 39 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2. Nutriments et acidité.....   | 40        |
| 2.1 Azote.....  | 40        |
| 2.2 Phosphore.....  | 46        |
| 2.3 Magnésium et potassium.....                                       | 49        |
| 2.4 Soufre.....   | 50        |
| 2.5 Calcium.....  | 50        |
| 2.6 pH et aluminium.....  | 50        |
| 2.7 Oligo-éléments et micro-éléments.....                             | 53        |
| 3. Gestion de la matière organique.....                               | 53        |
| 3.1 Effet de la jachère sur la fertilité chimique.....                | 57        |
| 3.2 Effet des résidus de culture sur la fertilité chimique.....       | 57        |
| 3.3 Effet de la fertilisation inorganique sur la fertilité chimique.. | 59        |
| 3.4 Effet du parcage sur la fertilité chimique.....                   | 60        |
| 3.5 Micro variabilité spatiale de la croissance du mil.....           | 61        |
| 3.6 Arbustes et termitières.....                                      | 63        |
| <br>  |           |
| <b>IV. Matériels et méthodes.....</b>                                 | <b>64</b> |
| 1. Zone d'étude : le Fakara.....                                      | 64        |
| 1.1 Situation.....  | 64        |
| 1.2 Le climat.....  | 65        |
| 1.3 Pédologie et topographie.....                                     | 66        |
| 2. Recherche de parcelles.....  | 68        |
| 2.1 Enquêtes de terrain.....  | 69        |
| 2.2 Parcelles sélectionnées.....                                      | 70        |
| 2.3 Prélèvement des échantillons.....                                 | 71        |
| 3. Analyse chimique des échantillons.....                             | 73        |
| 3.1 CEC.....  | 74        |
| 3.2 Bases échangeables.....   | 75        |
| 3.3 pH et conductivité.....   | 76        |
| 3.3.1 pH eau.....   | 76        |
| 3.3.2 pH KCl.....   | 76        |
| 3.3.3 Conductivité électrique.....                                    | 77        |
| 3.4 Acidité d'échange et aluminium.....                               | 77        |
| 3.5 Dosage du carbone et de la matière organique.....                 | 77        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.6 Dosage de l'azote total.....  | 78         |
| 3.7 Dosage du phosphore.....  | 78         |
| 3.8 Analyse granulométrique.....  | 79         |
| 4. Analyse de sensibilité du logiciel APSIM.....                          | 79         |
| 4.1 Le logiciel APSIM.....  | 80         |
| 4.1.1 Utilisation des données.....  | 82         |
| 4.1.2 Exécution du software.....  | 82         |
| 4.1.3 Module SoilN.....   | 83         |
| 4.1.4 Module fertiliz.....  | 86         |
| 4.1.5 Module SurfaceOM.....   | 86         |
| 4.1.6 Module Soilwat2.....  | 90         |
| 4.1.7 Module millet.....  | 93         |
| 4.2 Analyse de sensibilité d'APSIM aux paramètres internes.....           | 98         |
| <b>V. Analyse des résultats.....</b>                                      | <b>101</b> |
| 1. Analyse des résultats des propriétés chimiques.....                    | 101        |
| 1.1 Etude intra-parcellaire.....  | 104        |
| 1.2 Etude inter-parcellaire.....  | 110        |
| 1.3 Etude régionale.....  | 115        |
| 1.4 Conclusion.....   | 131        |
| 2. Résultats de l'analyse de sensibilité d'APSIM.....                     | 132        |
| 2.1 Pluviométrie et rendements.....                                       | 132        |
| 2.2 Analyse de sensibilité.....   | 148        |
| 2.2.1 Paramètres internes.....  | 148        |
| 2.2.2 Sensibilité aux paramètres internes.....                            | 149        |
| 2.2.2.1 Sensibilité à la matière organique.....                           | 150        |
| 2.2.2.2 Sensibilité au pH du sol.....                                     | 154        |
| 2.2.2.3. Sensibilité à la teneur initiale en<br>azote minéral du sol..... | 156        |
| 2.3 Conclusion.....   | 161        |
| <b>VI. Conclusions et perspectives.....</b>                               | <b>164</b> |

|                          |
|--------------------------|
| <b>Table des figures</b> |
|--------------------------|

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Le Niger.....  | 16 |
| 2.2 Carte des isohyètes.....   | 18 |
| 2.3 Durées estimées de saison agricole au Niger.....   | 22 |
| 2.4 Evolution de la population au Niger.....   | 28 |
| 2.5 systèmes culturaux selon la région administrative au Niger.....  | 30 |
| 2.6 Charge de bétail par région au Niger.....  | 32 |
| 3.1 effet de différentes sources, taux, temps et méthode d'application<br>d'azote sur le rendement en grain.....                                   | 43 |
| 3.2 effet de la méthode d'application sur le rendement en grain.....   | 44 |
| 3.3 effet du compostage du fertilisant azoté sur le rendement en grain.....  | 45 |
| 3.4 sources de sites d'échange cationique d'un sol acide hypothétique auquel<br>est ajouté de la chaux de pH 4 à pH 8.....                         | 51 |
| 3.5 relation entre rendement en grain (kg/ha) et le logarithme du taux<br>d'aluminium échangeable, pour des sols productifs et non productifs..... | 52 |
| 3.6 corrélation entre CEC effective et matière organique.....  | 54 |
| 3.7 corrélation entre N total et matière organique.....  | 54 |
| 4.1 Situation du Fakara au Niger.....  | 64 |
| 4.2 représentation des modules d'APSIM.....  | 81 |
| 4.3 diagramme des transformations des dynamiques de l'azote et du<br>carbone dans chaque couche de sol.....  | 83 |
| 4.4 ensemble des processus concernés par le module surfaceOM.....  | 87 |
| 4.5 facteur de température jouant sur le taux de décomposition de la<br>MO en fonction de la température et de la température optimale.....        | 89 |
| 4.6 facteur de contact en fonction de la masse totale de matière<br>organique de surface.....  | 90 |
| 4.7 diagramme représentant les connections entre le module SoilWat<br>et les autres modules APSIM.....   | 91 |
| 4.8 teneur en eau du sol présente en fonction de la profondeur.....  | 92 |
| 4.9 écoulement de surface en fonction de la pluie et de l'humidité du sol.....   | 93 |
| 4.10 processus modélisé dans le module MILLET.....   | 95 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.11 | effet du déficit hydrique sur la phénologie, la photosynthèse et l'expansion foliaire en fonction des rapports de disponibilité en eau du sol et du rapport apport/demande.....               | 96  |
| 4.12 | pluviométrie théorique moyenne de Niamey, distribuée hebdomadairement.....  | 99  |
| 5.1  | Distribution des fréquences d'observation du pH eau des échantillons de l'étude inter-parcellaire.....  | 102 |
| 5.2  | Distribution des fréquences de la teneur en aluminium échangeable de l'étude inter-parcellaire.....   | 102 |
| 5.3  | ECEC, concentration en matière organique, bases échangeables, Al, et acidité d'échange dans le sol de type arenic Lixisol de l'intra-parcellaire selon la qualité de croissance.....          | 106 |
| 5.4  | pH du sol selon la qualité de croissance du mil.....  | 107 |
| 5.5  | concentration moyenne en phosphore dans le sol selon la qualité de croissance.....  | 110 |
| 5.6  | corrélation pH KCl – bases échangeables observées sur des échantillons de sol arenic Lixisol (prof : 0-20 cm).....  | 114 |
| 5.7  | relation pH KCl – Al échangeable, sol de type arenic Lixisol (profondeur 0-20 cm).....  | 115 |
| 5.8  | concentration en Ca, Mg, somme de bases échangeables et ECEC selon le type de sol.....  | 124 |
| 5.9  | comparaison de la ECEC, et de la concentration en bases échangeables et en acidité d'échange par profondeur pour tous les types de sols et de fertilisation.....                              | 127 |
| 5.10 | corrélation entre pH KCl et bases échangeables pour les trois types de sol (arenic Cambisol, arenic Lixisol et ferralic Arenosol) et à deux profondeurs différentes (0-20cm et 20-50 cm)..... | 129 |
| 5.11 | corrélation entre aluminium et ECEC pour les trois types de sol (arenic Cambisol, arenic Lixisol et ferralic Arenosol) et à deux profondeurs différentes (0-20cm et 20-50 cm).....            | 130 |
| 5.12 | pluviométrie annuelle totale pour les différentes années concernées par l'analyse de sensibilité.....   | 132 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.13 | pluviométrie entre semis et récolte pour les différentes années concernées par l'analyse de sensibilité.....  | 133 |
| 5.14 | relation entre lessivage de l'azote tout au long de l'année et pluviométrie annuelle, pour les différentes années simulées.....   | 134 |
| 5.15 | pluviométrie cumulée à partir du semis de 1984, 1985, 1986, 1987 et théorique moyenne à Niamey.....   | 135 |
| 5.16 | pluviométrie journalière de l'année 1984.....   | 136 |
| 5.17 | pluviométrie journalière de 1992.....   | 137 |
| 5.18 | pluviométrie journalière de 1995.....   | 137 |
| 5.19 | rendements cumulés en grain et en biomasse des années de pluviométrie théorique.....  | 139 |
| 5.20 | flux de nitrates journalier à travers la dixième couche de sol (180-200 cm).....  | 140 |
| 5.21 | pluviométrie et lessivage du Nitrate au-delà de la dixième couche de sol (180-200 cm) durant la saison de culture 1985.....   | 141 |
| 5.22 | rendement cumulé en biomasse en fonction du temps.....  | 142 |
| 5.23 | rendement total en biomasse observé lors des différentes années simulées.....   | 143 |
| 5.24 | relation entre lessivage de l'azote cumulé entre semis et récolte, et rendement en biomasse pour les différentes années de l'analyse (théoriques et réelles).....                             | 144 |
| 5.25 | relation entre rendement total en biomasse et pluviométrie cumulé durant la période de croissance en biomasse.....  | 145 |
| 5.26 | relation entre rendement total en grain et pluviométrie cumulée durant la période de remplissage des grains.....  | 145 |
| 5.27 | relation entre rendement en grain et rendement en biomasse pour les différentes années de l'analyse (théoriques et réelles).....  | 147 |
| 5.28 | relation entre pluviométrie saisonnière cumulée entre semis et récolte et la différence entre rendements à 20% et 200% du rapport C/N par défaut, pour les différentes années de l'étude..... | 149 |
| 5.29 | rendement total en grain en fonction de la variation du taux de carbone organique initial.....  | 151 |
| 5.30 | rendement total en grain en fonction de la variation de la fraction microbienne du pool humique.....  | 151 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.31 | rendement en grain total en fin de saison en fonction<br>du pourcentage de variation du rapport C/N.....   | 152 |
| 5.32 | rendement total en grain en fonction de la variation<br>de la fraction inerte du pool humique.....   | 153 |
| 5.33 | facteur de pondération du taux de nitrification de<br>l'ammonium en fonction du pH du sol tel que paramétré dans APSIM.....  | 154 |
| 5.34 | rendement en grain total en fonction de la variation du pH-eau du sol...   | 155 |
| 5.35 | rendement total en grain en fonction de la variation<br>de la concentration originale en nitrate du sol.....   | 156 |
| 5.36 | variation de la teneur en nitrate du sol au cours de l'année,<br>pour plusieurs concentrations originales, pour la pluviométrie théorique.....   | 157 |
| 5.37 | lessivage des nitrates au-delà de la dixième couche de sol<br>(180-200cm) au cours du temps, pour différentes concentrations de nitrate.....   | 158 |
| 5.38 | rendement en grain total suite à la variation de la concentration<br>en ammonium originale.....  | 158 |
| 5.39 | variation de la concentration en ammonium du sol au cours<br>de l'année pour plusieurs concentrations initiales.....   | 159 |
| 5.40 | facteur d'humidité, affectant le taux de nitrification dans APSIM,<br>en fonction de l'humidité du sol.....  | 159 |
| 5.41 | relation entre différence de rendement entre 20% et 200%<br>de la teneur en nitrate par défaut, et la pluviométrie saisonnière<br>cumulée, pour les différentes années de l'étude..... | 160 |

|                           |
|---------------------------|
| <b>Liste des tableaux</b> |
|---------------------------|

|  |     |
|--|-----|
| 3.1 effet de l'application de différents types d'engrais organique<br>(10 T/ha) avec ou sans fertilisant chimique sur le rendement en grain du mil.....  | 46  |
| 3.2 Prise de N, P, K, Ca et Mg par le mil avec ou sans application de P.....   | 47  |
| 4.1 Moyennes mensuelles des températures maximales et minimales<br>Et évaporation potentielle mensuelle à Niamey-ville.....  | 65  |
| 4.2 types de sols principaux du Fakara et caractéristiques principales de texture<br>de propriétés chimiques et de topographie.....  | 66  |
| 4.3 paramètres hydriques des principaux types de sol du Fakara.....  | 67  |
| 4.4 informations concernant les parcelles, dont proviennent<br>les échantillons sujets à l'étude inter- et intra-parcellaire.....  | 70  |
| 4.5 pluviométrie moyenne et écart-type par mois à Niamey.....  | 98  |
| 4.6 valeurs par défaut des paramètres internes concernant le cycle de l'azote d'APSIM  | 100 |
| 5.1 Transformations et résultats des tests de normalité de Kolmogorov-Smirnov<br>des différents échantillons.....  | 103 |
| 5.2 résultats des tests de Student, entre zones à différente qualité<br>de croissance pour des sols de type arenic Lixisol.....  | 105 |
| 5.3 écarts-types des moyennes des paramètres des échantillons de la fig. 5.3.....  | 107 |
| 5.4 maxima, minima, moyennes et variances des paramètres chimiques<br>des échantillons provenant des analyses inter- et intra-parcellaire (prof : 0-20 cm)...  | 111 |
| 5.5 maxima, minima, moyennes et variances des paramètres chimiques<br>des échantillons provenant des analyses inter- et intra-parcellaire<br>(sol de type arenic Lixisol, prof : 0-20 cm).....   | 112 |
| 5.6 tests de corrélation (Pearson) entre les différents paramètres de l'analyse<br>inter- et intra-parcellaire (sol de type arenic Lixisol , profondeur 0-20 cm).....  | 113 |
| 5.7 moyennes des propriétés chimiques des valeurs provenant de parcelles<br>ayant connu le même type de fertilisation, pour un type de sol donné<br>(ferralic Arenosol, arenic Cambisol, arenic Lixisol), ainsi que la moyenne<br>générale des propriétés chimiques de chaque mode de fertilisation,<br>tous types de sol confondus, le tout pour une profondeur de 0-20 cm..... | 117 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.8 tests de Student entre propriétés chimiques d'échantillons ayant connu des fertilisations différentes, par type de sol (ferralic Arenosol, arenic Cambisol, arenic Lixisol, profondeur : 0-20 cm).....                     | 118 |
| 5.9 Tests de Student entre propriétés chimiques d'échantillons ayant connu des fertilisations différentes, tous types de sol confondus (ferralic Arenosol, arenic Cambisol, arenic Lixisol, profondeur : 0-20 cm).....         | 119 |
| 5.10 comparaison des paramètres chimiques observés dans les sols de type arenic Cambisol avec les données de la littérature.....   | 121 |
| 5.11 comparaison des paramètres chimiques observés dans les sols de type arenic Lixisol avec les données de la littérature.....  | 121 |
| 5.12 comparaison des paramètres chimiques observés dans les sols de type ferralic Arenosol avec les données de la littérature.....   | 122 |
| 5.13 tests de Student entre paramètres chimiques de sols de types différents (prof : 0-20 cm).....   | 123 |
| 5.14 Maxima, minima, moyenne et variances des propriétés chimiques des échantillons provenant des analyses inter- et intra-parcellaire (sol de type arenic Lixisol, prof : 0-20cm).....  | 125 |
| 5.15 Maxima, minima, moyennes et écart-types des paramètres chimiques de l'analyse régionale (prof 0-20 cm).....   | 125 |
| 5.16 tests de Student entre propriétés chimiques d'échantillons provenant de profondeurs différentes (0-20 cm et 20-50 cm) quel que soit le type de sol et de fertilisation, et moyennes de ces propriétés par profondeur..... | 126 |
| 5.17 tests de corrélation de Pearson entre les paramètres chimiques des sols de l'analyse régionale (prof : 0-20 cm ; arenic Cambisol, arenic Lixisol, ferralic Arenosol).....   | 128 |
| 5.18 tests de corrélation de Pearson entre les paramètres chimiques des sols de l'analyse régionale (prof : 20-50 cm ; arenic Lixisol, arenic Cambisol, ferralic Arenosol).....  | 128 |
| 5.19 paramètres physiques par défaut , par profondeur utilisés par APSIM dans le calcul des flux hydriques du sol.....   | 138 |
| 5.20 rendements en grain et en biomasse, et rapport rendement en grain / rendement en biomasse pour les différentes années de l'étude.....   | 146 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.21 | valeurs de base des paramètres internes d'APSIM concernant le cycle<br>de l'azote dans le sol.....  | 148 |
| 5.22 | pH des différentes couches de sol utilisés lors de l'analyse de sensibilité.....  | 155 |
| 5.23 | moyenne des PMVR sur l'ensemble des années réelles été de 1984,<br>1992 et 1995 pour différents paramètres de l'étude de sensibilité..... | 162 |

## I. Introduction

Le mil (*Pennisetum glaucum*) est la plante alimentaire la plus cultivée en zones semi-arides en Afrique et en Asie, car elle constitue l'unique céréale capable de produire constamment années après années (IRAT, 1974 ; in Christianson, 1990). La grande variabilité de la fertilité du sol constitue une contrainte pour la culture du mil au Niger. La connaissance des tenants et aboutissants de cette variabilité spatiale, tant au niveau régional qu'au niveau de la parcelle (micro-variabilité) est requise afin de pouvoir faire face à la demande croissante en nourriture suite à la pression démographique importante touchant cette région.

La zone d'étude, le Fakara, est une petite région naturelle de l'ouest du Niger couvrant 6000 km<sup>2</sup> entre deux vallées confluentes : celle du fleuve Niger à l'ouest et la vallée fossile du Dallol Bosso à l'est (Hiernaux, 2004). Il s'agit d'un périmètre assez représentatif de la région (Hoepffner & al, 1992 ; in Pereira 2002), s'agissant d'un système mixte agriculture – élevage de type extensif. Le climat y est semi-aride, avec une saison des pluies unique d'une durée annuelle de 90 à 120 jours. La pluviométrie est très variable selon les années et également très hétérogène spatialement. Les sols y sont de texture sableuse, de faible fertilité et de faible productivité. L'agriculture sur les terroirs étudiés utilise encore principalement des techniques traditionnelles : toutes les pratiques liées à la gestion des cultures se réalisent manuellement, parfois à l'aide de la traction animale.

Le projet PAD (Projet d'Aide à la Décision), financé par la DGCD a pour objectif l'amélioration des conditions de vie des populations rurales sahéniennes. L'objectif spécifique est d'améliorer les revenus et de réduire la dépendance de ces populations, en tenant compte des fluctuations du climat et du marché en fournissant une information appropriée et intégrée pour la prise de décision au niveau des ménages.

Ce mémoire s'insère dans le cadre d'une partie du projet PAD, l'évaluation de l'impact de techniques d'intensification sur la production de mil à l'échelle du terroir, et a comme objectif général la caractérisation des sols par rapport aux propriétés chimiques. Deux objectifs particuliers ont été fixés : l'étude de la variabilité spatiale des propriétés chimiques et l'étude de l'impact de ces propriétés chimiques sur le rendement grâce au logiciel APSIM. APSIM est un simulateur de systèmes de production agricole, modèle numérique à structure

modulaire modélisant entre autres la croissance et le développement du mil. Cependant, APSIM ne répond qu'à l'azote et au phosphore comme nutriments, et nous n'avons pas pu doser l'azote de nos échantillons. De plus, la version utilisée ne modélise pas encore correctement les variétés de mil nigériennes ainsi que les conditions locales. Nous avons donc fixé comme deuxième objectif particulier l'analyse de sensibilité d'APSIM aux paramètres internes du cycle de l'azote dans le sol.

Après cette introduction, nous allons décrire brièvement le Niger, ainsi que ses particularités tant sur le plan physique que socio-économique. Nous insisterons plus particulièrement sur les zones bio-climatiques et les types de sols d'une part, et l'agriculture traditionnelle d'autre part.

Le 3<sup>e</sup> chapitre consistera en une revue de la littérature portant sur les propriétés chimiques et les méthodes de gestion de la matière organique ayant une influence sur la variabilité spatiale de la fertilité chimique et de la croissance du mil.

Le 4<sup>e</sup> chapitre s'attellera à la description des outils utilisés lors de toute la durée de ce travail, à partir des moyens utilisés lors de la prise d'échantillons, jusqu'à la description du fonctionnement d'APSIM (simulateur de systèmes de production agricole) et de la méthode utilisée pour son étude de sensibilité, en passant par les analyses des propriétés chimiques.

Ensuite, le 5<sup>e</sup> chapitre présentera les résultats des deux analyses de ce mémoire. Ceux-ci seront évalués et discutés en liaison avec la recherche bibliographique. Nous allons dans un premier temps étudier la variabilité spatiale de la fertilité chimique des parcelles cultivées dans le terroir du Fakara. Dans cette première section, la variabilité au niveau de la parcelle (micro-variabilité ou variabilité intra-parcellaire) sera tout d'abord étudiée, en considérant des parcelles n'appartenant qu'à un seul type de sol (arenic Lixisol), et n'ayant connu aucune fertilisation depuis leur jachère. Ensuite, nous étudierons la variabilité spatiale inter-parcellaire entre ces mêmes parcelles. Nous pourrions ainsi comparer ces variabilités. Ensuite, une étude de la variabilité régionale sera effectuée. Celle-ci tiendra compte de trois types de sol (arenic Lixisol, arenic Cambisol et ferralic Arenosol), quatre types de fertilisation (parcage, fumure transportée, engrais, et aucune fertilisation) et deux profondeurs (0-20 cm et 20-50 cm). A l'issue de cette étude de la variabilité spatiale de la fertilité de ces sols, nous en saurons plus sur le protocole à utiliser pour dresser une carte de la fertilité dans ce terroir.

Enfin, dans une deuxième section totalement différente, nous allons réaliser une analyse de sensibilité du logiciel APSIM à ses paramètres internes concernant le cycle de l'azote du sol. Le logiciel APSIM (simulateur de systèmes de production agricole) est un modèle numérique à structure modulaire, qui a été développé pour simuler les processus biophysiques dans les systèmes agricoles. Les simulations utiliseront des données de pluviométrie et des données de paramètres du sol mesurées à Sadoré (centre ICRISAT, situé à une cinquantaine de kilomètres de Niamey).

Enfin, le 6<sup>e</sup> chapitre présentera une courte conclusion reprenant les points importants tirés de l'analyse des résultats, ainsi que les perspectives offertes par ces conclusions.

## II. Le Niger

### 1. Le milieu physique

#### 1.1 Situation géographique

Située en Afrique de l'Ouest, la république du Niger est un pays couvrant une superficie de 1 267 000 km<sup>2</sup> (Larousse). Bordé par l'Algérie et la Libye au nord, le Tchad à l'est, le Nigeria et le Bénin au sud et par le Burkina Faso et le Mali à l'ouest, le Niger possède des frontières rectilignes et artificielles héritées de la colonisation, excepté dans le sud (Fig 2.1).



Fig. 2.1 : Le Niger

Il se situe entre 11°37' et 23°33' de latitude Nord et 0° et 15° de longitude Est ([www.fao.org](http://www.fao.org)). Il faut aussi préciser que le pays compte plus de 500 000 km<sup>2</sup> de désert, incluant le désert du Ténéré ([www.fao.org](http://www.fao.org)).

## 1.2 Topographie

Outre le massif de l'Aïr, culminant à 2022 m, l'altitude moyenne du pays varie de 200 à 500 m. Il s'agit d'une immense pénéplaine au relief peu contrasté. Il existe également de très vieux massifs volcaniques (les montagnes Tamgak – 1800 m) également dans le massif de l'Aïr.

L'altitude augmente également brusquement au Nord-est à la frontière avec le Tchad et au nord de Zinder. Au sud-ouest, les plateaux de grès, entaillés par le fleuve, constituent un certain relief ([www.fao.org](http://www.fao.org)).

## 1.3 Hydrographie

Le fleuve Niger, seul cours d'eau permanent parcourant le pays sur environ 550 km, constitue avec le lac Tchad l'entièreté du réseau hydrographique

Le fleuve n'est navigable que pour les pirogues traditionnelles en raison de son ensablement, mais est néanmoins très important pour la pêche et la riziculture.

Une région de vallées fossiles, la région des Dallols, se situe à environ 150 km à l'est de Niamey et s'oriente nord-sud depuis les contreforts ouest des plateaux de l'Aïr jusqu'au fleuve Niger, là où il constitue la frontière naturelle avec le Bénin.

## 1.4 Le climat

Le pays est partagé entre trois zones climatiques : la zone Sahélo-saharienne, la zone Sahélienne et la zone Soudano-sahélienne : la première couvre environ 450 000 km<sup>2</sup> avec des précipitations annuelles comprises entre 100 et 350 mm (Fig 2.2).

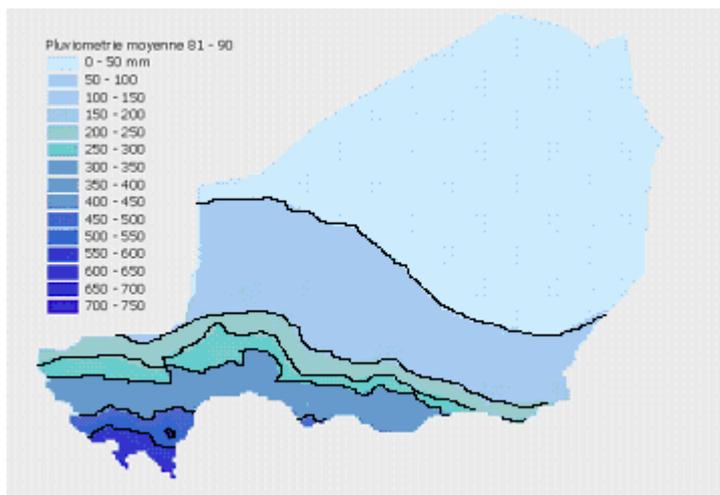


Fig 2.2 : Carte des isohyètes

La zone Sahélienne couvre 200 000 km<sup>2</sup> et les précipitations annuelles sont comprises entre 350 et 550 mm. La zone Soudano-sahélienne consiste en une petite bande dans le sud du pays enclavée entre les frontières du Bénin et du Nigeria. Ses précipitations annuelles sont comprises entre 550 et 850 mm (www.fao.org).

#### 1.4.1 Caractéristiques de la zone sahélienne

La région étant située en zone tropicale, son climat est caractérisé par l'influence de deux phénomènes : les passages de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et les moussons. La ZCIT est la zone où convergent les masses d'air circulant entre la ceinture des basses pressions équatoriales et les masses de hautes pressions (anticyclones subtropicaux), situées au-dessus du désert du Sahara en ce qui concerne l'hémisphère nord. Les vents secs engendrés par cette circulation nord-sud (les alizés) sont déviés par la force de Coriolis, ce qui leur confère une direction sud-ouest.

Suite à la configuration du continent et à la remontée estivale de la ZCIT, on assiste à la rencontre d'un air très chaud et très sec venant du Sahara, et d'un air plus frais et plus humide venant du Golfe de Guinée. A la convergence de ces masses d'air, un front se forme (le front intertropical, ou FIT). A cet endroit, l'air humide s'enfonce en coin sous l'air sec avec une surface de contact fortement inclinée vers le sud tandis que l'air sec s'élève au-dessus du FIT emportant sa charge potentielle en aérosols au-dessus de l'atlantique.

Quelques cumuli signalent le passage de la zone de convergence au sol. A mesure que l'on s'éloigne vers le Sud (ou que le FIT monte vers le nord), la couche d'air humide s'épaissit, les cumuli deviennent plus abondants et les précipitations augmentent, les vents d'est dirigeant les perturbations vers l'ouest. Les pluies suivent le passage du FIT de 200 à 300 km.

### **1.4.2 Les précipitations**

Les fluctuations de la ZCIT et du FIT au cours de l'année engendrent, en région sahélienne, une longue saison sèche d'octobre à mai et une courte saison des pluies de juin à septembre (75 à 90 jours). Les précipitations se présentent généralement sous forme d'orages convectifs. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

- Une grande variabilité spatiale (on observe régulièrement des « poches de sécheresses » même pour une année globalement pluvieuse)
- Une grande variation interannuelle
- Une forte intensité (jusqu'à 100 mm de pluie pouvant tomber en une seule averse) souvent de courte durée (en général moins d'une heure).

### **1.4.3 Température et humidité**

La température annuelle moyenne est de 29°C. Les maxima moyens mensuels sont observés durant les mois de mars, avril et mai (40 à 42°C). On observe deux périodes de baisse des températures : une durant la saison des pluies (32°C en moyenne au mois d'août) et une autre en décembre et janvier (hiver) avec 34°C. Ces deux derniers mois sont aussi la période des nuits les plus froides avec une moyenne de 14 à 15 °C.

Le régime thermique est identique sur l'ensemble du pays, caractérisé par des amplitudes thermiques assez faibles.

L'humidité relative est corrélée avec l'alternance du passage des masses d'air sur le pays, ce qui engendre une variation importante au cours de l'année : moyenne mensuelle en février, 17% et en septembre, 75% (pour la période 1951-1982).

#### 1.4.4 Les vents

Deux systèmes sont engendrés par l'action conjointe des anticyclones subtropicaux et du FIT, l'un correspond à la saison sèche, l'autre à la saison des pluies. Un vent sec du nord-est souffle régulièrement pendant la saison sèche (environ 6 mois). Il possède une vitesse moyenne annuelle à Niamey de 2 m/s. Fortement chargé en poussières issues du Sahara, il distille ces particules sur les terres de son passage. C'est l'Harmattan (nom local des alizés).

Durant la saison des pluies, les vents sud-est accompagnent les perturbations provoquées par la remontée du FIT (perturbations de moussons). Ils peuvent être très violents (à Banizoumbou, site expérimental, on a mesuré des valeurs supérieures à 17 m/s) et leur durée varie fortement (de 3 minutes à plusieurs heures).

Ces vents sont également responsables d'un important transport de matière. Ces sédiments se déposent partiellement lors des précipitations se déroulant au sein des masses d'air circulantes.

#### 1.4.5 Les régions bioclimatiques

A 700 km de la mer, ce pays enclavé qui constitue la charnière entre l'Afrique arabo-berbère et l'Afrique soudano-sahélienne, comprend les régions bioclimatiques Sahélo-soudanienne (très petite), Sahélienne, Sahélo-saharienne (climat aride) et Saharienne (climat hyper aride).

L'observation de la carte des régions climatiques du Niger montre que l'aridité est une donnée permanente sur plus des  $\frac{3}{4}$  du pays. La sévérité des conditions climatiques se traduit par :

- Un bilan pluviométrique annuel déficitaire par rapport à l'ETP ( $ETP > P$ ) pour l'ensemble du pays ;
- Une pluviométrie globalement faible et mal répartie aussi bien dans l'espace que dans le temps. Elle décroît du Sud au Nord.

Cette zonation latitudinale des conditions climatiques affecte de manière significative toute la vie socio-économique du pays et détermine les différents écosystèmes. Ainsi du sud au nord, on retrouve cinq zones bioclimatiques définies essentiellement par la sévérité des conditions climatiques.

1. *La zone nord soudanienne (Dendi)*

Le Dendi connaît des contraintes climatiques relativement faibles, caractérisées par des précipitations annuelles moyennes dépassant 700 mm et une saison pluvieuse comprise entre 4 et 5 mois. Le déficit pluviométrique annuel est de l'ordre de 1374 mm pour Gaya, et l'amplitude thermique annuelle de 8 degrés pour la même station. La végétation et la flore possèdent un caractère soudanien. Les formations correspondent à des savanes, développées sur sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétion, associés à des sols peu évolués gravillonnaires.

2. *La zone sahélienne occidentale et centrale*

Les contraintes climatiques y sont moyennes avec une pluviométrie annuelle de 450 à 750 mm et une saison pluvieuse de 3 à 4 mois. Le déficit pluviométrique annuel par rapport à l'ETP est de 2165 mm environ à la station de Niamey. L'amplitude thermique annuelle, relativement faible, avoisine 10 degrés en moyenne. Le Sahel occidental et central correspond à une zone de transition sahélo-soudanienne avec une végétation mixte, fortement modifiée par l'homme, soit à cause des défrichements culturels, soit pour la recherche de bois de feu et de service. On y trouve des sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés sur sables.

3. *Le Sahel septentrional et oriental*

Dans cette zone, les contraintes climatiques sont marquées à assez marquées. La pluviométrie annuelle se situe entre 250 et 450 mm. La période pluvieuse excède rarement 3 mois. La sous-zone nord connaît des contraintes climatiques encore plus marquées. La faible pluviométrie, combinée à un bilan pluviométrique déficitaire assez important (de l'ordre de 2472 mm à Tahoua) en font une zone à forts risques climatiques pour les activités agricoles pluviales dont la limite nord est fixée par les isohyètes de 300 à 350 mm. N'y subsiste qu'une végétation xérophile formant une steppe arbustive sahélienne typique sur sols subarides brun rouges sur sable éolien.

4. *La zone aride*

De par ses caractéristiques climatiques sévères à très sévères, la zone aride enregistre une pluviométrie moyenne annuelle située entre 50 et 250 mm. La sévérité des conditions climatiques se traduit également par un déficit hydrique très prononcé. L'aridité interdit toute activité agricole sous pluie et n'autorise que la pratique du pastoralisme nomade, le Sahel Nord étant réservé à un élevage transhumant. La végétation rencontrée correspond à une

formation steppique typiquement sahélienne mais à tendance sahélo-saharienne, dominée par les graminées utilisées comme pâturages. Les sols sont de type peu évolués.

#### 5. *La zone hyper aride*

Les conditions d'aridité y atteignent leur situation extrême : pluviométrie extrêmement rare, presque nulle (sauf dans les zones montagneuses où l'altitude favorise des pluies de mousson), bilan hydrique toujours déficitaire, amplitude thermique annuelle relativement élevée. La végétation est absente sauf dans les oasis avec une prédominance du palmier dattier.

La partie méridionale du pays est cultivable et estimée à 12,5 millions d'hectares (soit moins de 10 % de la superficie), dont 80 à 85 % de sols dunaires, le reste du pays étant désertique (FAO,site internet).

La Fig 2.3 représente la durée de la saison agricole dans les différentes régions du Niger, estimée à partir de données satellitaires et pluviométriques.

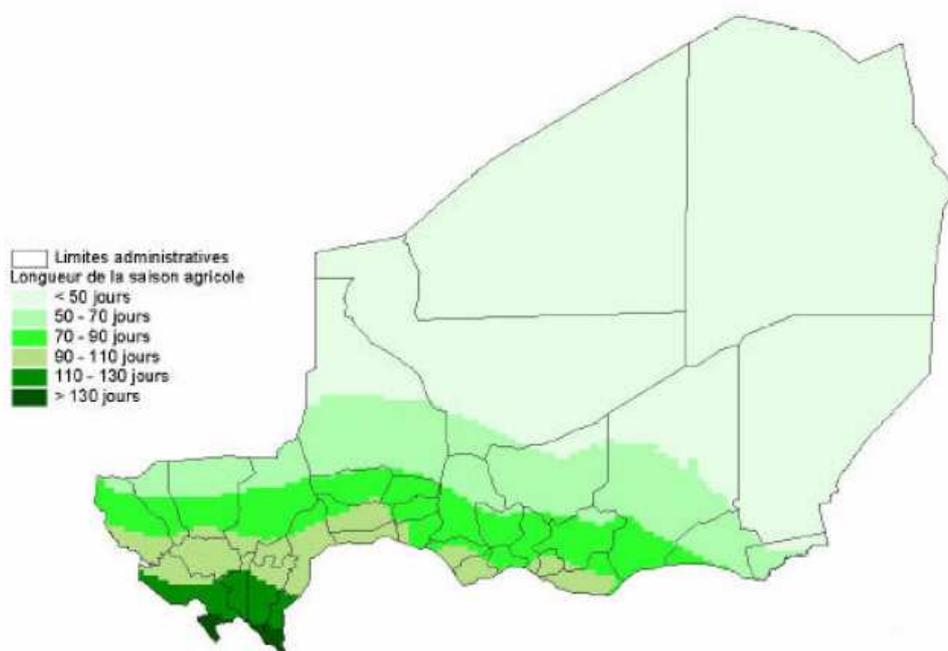


Fig 2.3 : Durées estimées de saison agricole au Niger ([www.unesco.org](http://www.unesco.org))

## 1.5 Pédologie

### 1.5.1 Géomorphologie

La zone d'étude se situe au Niger occidental, dans la région située à l'est de Niamey, et plus particulièrement sur les anciennes terrasses quaternaires de fleuves fossiles. Cinq niveaux de terrasses ont été reconnus, les deux plus hautes terrasses furent creusées dans les sédiments du Continental Terminal et sont en général indurées par le fer. Les trois autres terrasses sont dépourvues de ferrugination importante (Taupin & al, 1991).

La géomorphologie de Banizoumbou, village de la zone d'étude, est influencée par cette géologie et peut être divisée en cinq éléments paysagers principaux :

- Les plateaux dominants les pentes
- Les fortes pentes de bordure de plateaux (jupes)
- Les petits plateaux intermédiaires (niveaux intermédiaires)
- Les pentes de faible inclinaison en moyenne
- Les fonds dépressionnaires

*Les plateaux supérieurs* : Ils ont généralement une hauteur allant de 220 à 260 m et ont par endroit un manteau sableux éolien couvrant des latérites ou des roches cimentées formant un aquitard (couche pauvre en eau). La végétation s'y arrange en bandes parallèles ('brousse tigrée') (Hiernaux & Gérard, 1999). Entre ces bandes, le sol est glaiseux et graveleux, très mince, très pauvre en humus et contient beaucoup de sesquioxydes (Chappel & al., 1998). La fraction texturale y est principalement argileuse (kaolinite), le pH est inférieur à 5. Au sein des bandes de végétation elles-mêmes, les sols ont environ 20 cm d'épaisseur, le pH est de 5 à 6 et le contenu en humus est plus important. Les plateaux sont les sources principales du ruissellement de l'eau sur les pentes adjacentes et les jupes sableuses ravinées.

*Les jupes sableuses* : Celles-ci correspondent aux bordures des plateaux. Ce sont des pentes dont l'inclinaison est supérieure à 3 % et traditionnellement non cultivées. Dès lors, une végétation buissonnante s'y maintient, autorisant le développement d'un sol semblable en surface à celui que l'on trouve au sein de la brousse tigrée, et un horizon sableux sous-jacent dont l'épaisseur croît le long de la descente de la pente.

La mise en culture de ces sols les expose aux pluies et au vent. Ces derniers, compte tenu de la situation topographique, ont tôt fait d'ôter le faible horizon humifère pour laisser place au développement de surfaces pédimentaires à proximité du plateau et de glacis sur les pentes plus douces (Graef & Stahr, 1999 ; in Dufey., 2001).

*Les plateaux intermédiaires* : Ils constituent des paliers intermédiaires dans la descente des plateaux vers les fonds de vallée. En-dessous de chacun d'eux se dessinent des jupes sableuses comme ci-dessus. La présence et le nombre de ces plateaux intermédiaires sont fonction du niveau géologique sur lequel on se trouve et oscille entre un et cinq.

*Les pentes sableuses* : La topographie du sol y est caractérisée par une surface légèrement ondulée de petites buttes au sol acide ( $\text{pH} < 5$ ), de 30-40 cm de hauteur et 10-30 m de large, le tout coupé par des ravines et des koris (lits de rivières temporaires, lesquelles sont créés par le ruissellement des eaux de surface). Beaucoup de sols y sont peu profonds et leurs surfaces sont compactes. En certains endroits, des horizons B indurés et enrichis en argiles sont exposés (glacis). La profondeur de sable augmente dans le bas de la pente dans les zones de cultures plus importantes.

*Les fonds dépressionnaires* : Ce sont de larges vallées sableuses dont les fonds sont occupés tantôt par une marre résultant du ruissellement des eaux de surface tantôt par un kori. Avec le façonnement des versants, il faut signaler l'étalement du matériau sableux par ruissellement et colluvionnement en bas de pente. Les horizons supérieurs y possèdent une plus importante proportion de limons, probablement entraînés depuis les aires défrichées à des fins culturales par les coups de vents estivaux et les eaux de ruissellement (Chappel & al, 1998).

## 1.5.2 Classification

En se référant au zonage bio-climatique cité précédemment, on compte au Niger, pour une surface totale de 126.7 millions d'hectares (Mha) :

- 82,36 Mha (65%) en zone saharienne à sols minéraux bruts ;
- 15,46 Mha (12,2%) en zone sahélo-saharienne, à sols peu évolués d'apport éolien et sols brun rouge à dominance sableuse ;
- 27,74 Mha (21,9%) en zone sahélo-soudanienne à sols ferrugineux tropicaux ;

- 1,14 Mha (0,9%) en zone soudanienne, à sols ferrugineux et sols fersialitiques.

En détail, les **sols minéraux bruts** sont des sols de désert s'étendant sur près de la moitié du territoire. Les conditions climatiques, caractérisées par des pluies très faibles et irrégulières et de grands écarts de température, limitent considérablement leur évolution. Les vents violents emportent les éléments fins, sables et limons. Le matériel rocheux, couvert de débris, apparaît sur les reliefs. Ce sont les lithosols des massifs de l'Aïr. Tous ces sols minéraux bruts n'ont pas de valeur agronomique. Cependant, les *sols d'apport* sur des alluvions d'oued peuvent être cultivés localement grâce à l'irrigation.

Les **sols peu évolués d'apport éolien** sont des sols à profil A/C, dont l'horizon A est peu épais ou pauvre en matière organique. Les minéraux sont encore peu altérés. Dans certaines régions plus arrosées, des sols ont été partiellement érodés par le ruissellement (sols rajeunis) ; leur matériau comprend beaucoup de graviers et gravillons. On trouve ces sols peu évolués, *d'origine non climatique* notamment sur le socle birrimien, à l'ouest du Niger.

Les **sols brun-rouge**, aussi appelés subarides, forment une large bande s'étirant à travers tout le pays depuis la frontière du Mali jusqu'au Tchad. Ils appartiennent à la classe des sols isohumiques steppiques et se caractérisent par l'accumulation dans le profil d'une matière organique très évoluée, qui diminue avec la profondeur.

Les *sols bruns* sont peu fréquents. Ils se sont formés surtout sur les terrains argilo-sableux du socle. Peu épais, leur couleur brune provient de la coloration par la matière organique.

Les *sols brun-rouge* sont beaucoup plus étendus. Ils se sont développés principalement sur des sables éoliens, bien perméables. Ces sols, d'une épaisseur de 1 à 1,50 m, présentent deux horizons : l'un brun, l'autre rouge, les grains de sable étant colorés par des oxydes de fer. Ils sont associés avec des sols hydromorphes et halomorphes dans le Tchadi Ngourbayé s'allongeant à l'ouest du lac Tchad et dans la partie amont du Dallol Bosso. La fertilité minérale de ces sols est assez faible et ils sont sensibles à l'érosion superficielle éolienne.

Les **sols ferrugineux tropicaux**, dont font partie les sols étudiés par ce mémoire, sont plus évolués et se situent dans la partie méridionale du pays où les pluies sont plus abondantes et plus régulières. Les oxydes de fer s'individualisent et la matière organique subit une décomposition plus rapide. La plupart appartient au groupe des sols *non* ou *peu lessivés* et se sont formés sur sable ou grès. Les horizons supérieurs, faiblement humifères, sont très

décolorés alors que les horizons de profondeur sont fortement colorés par le fer. Ces sols sont assez pauvres, mais cependant très faciles à travailler grâce à leur texture sableuse et conviennent aux cultures peu exigeantes comme le mil et l'arachide. Mais ils sont fragiles et leurs horizons supérieurs sont parfois érodés par le ruissellement ou le vent. Dans certaines régions, comme l'Ader, ces sols ferrugineux sont *lessivés à concrétions*. La Kaolinite et les oxydes de fer se sont alors accumulés en profondeur dans l'horizon B. Ces sols sont associés à des sols peu évolués gravillonnaires. Des sols hydromorphes et parfois halomorphes apparaissent sur les alluvions récentes soumises à l'inondation ou aux fluctuations de la nappe phréatique.

Enfin, les deux types de sols suivants sont présents en très faible superficie et uniquement à proximité d'eau. Les **sols hydromorphes** sont marqués par un excès d'eau dans le profil. Au Niger central, la vallée de Tarka, le Goulbin Kaba et le Goulbin Maradi présentent des sols à *gley de profondeur* : la partie inférieure de leur profil est constamment imbibée par la nappe phréatique ; c'est pourquoi le fer y est réduit à l'état ferreux, formant des taches vert-bleuté. Ces sols assez argileux sont lourds, donc durs à travailler, mais ils conservent leur humidité pendant la saison sèche et sont souvent cultivés.

Les **Vertisols** sont peu étendus au Niger. On trouve des *vertisols topomorphes* près du lac Tchad. Ils sont constitués surtout d'argiles gonflantes. Leur richesse minérale est élevée, mais des facteurs physiques limitants (compacité de surface, terrain bosselé) rendent le travail du sol difficile (Laclavère, 1981).

### 1.5.3 Caractéristiques agronomiques

Les sols cultivés du Niger sont soit des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, soit des sols bruns sub-arides. Ils sont fortement marqués par des remaniements éoliens plus ou moins récents et leurs caractéristiques majeures sont une faible différenciation structurale des profils et une grande pauvreté en éléments fins.

Les sables rassemblent le plus grand nombre de propriétés défavorables à l'agriculture. Ils ont une chaleur spécifique très basse et leur température dépasse souvent les niveaux critiques pour la levée des semis et la croissance des racines. Ils sont très perméables, ne retiennent l'eau que faiblement et se dessèchent très rapidement. Lorsque leur fraction argileuse est dominée par des minéraux à faible activité (kaolinite), leur aptitude à fournir des éléments

nutritifs est minime et même les plantes qui ont un système racinaire profond ont des difficultés à s'alimenter. Les teneurs en matière organique sont inférieures à 1 %. Tous ces sols découlent de l'évolution des ferralites marquant souvent des carences en phosphore.

## **2 Contexte socio-économique**

### **2.1 Population**

La population nigérienne était estimée en 1999 à 9 800 000 habitants dont 82 % de ruraux. La densité de la population est faible (6,5 habitants/km<sup>2</sup>), mais celle-ci masque d'importantes disparités car l'essentiel de la population (environ 75 %) est concentrée sur 12 % du territoire au sud du pays.

L'évolution de la population, représentée à la Fig 2.4, est souvent considérée comme une des principales « forces directrices » du secteur socio-économique.

Pour le Niger, le taux de croissance démographique moyen entre 1990 et 1999 est de 3,45 % par an (FAO, site internet). La principale cause de ce taux de croissance élevé est la baisse massive du taux de mortalité depuis 50 ans. En effet, les améliorations hygiéniques et sanitaires, la mise sur pied de programmes pour les soins de base, un meilleur approvisionnement en vaccins et médicaments ainsi que l'application de programmes d'aide alimentaire ont rapidement fait diminuer le taux de mortalité. Parallèlement, le taux de natalité, élevé et fortement dépendant des facteurs socioculturels, se modifie beaucoup plus lentement que le taux de mortalité. Vu la structure assez jeune de sa population (49,5 % a moins de 15 ans), le pourcentage plus élevé de femmes (environ 52 % de la population) et d'autres aspects socioculturels, cette croissance de la population devrait se maintenir encore quelques temps (Leisinger & al., 1995).

Dans ce contexte, notons également les constatations suivantes auxquelles le pays est confronté :

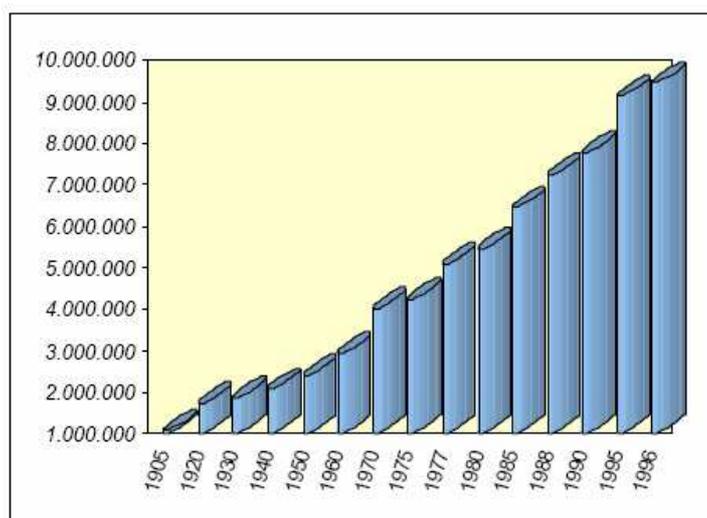


Fig 2.4 : Evolution de la population au Niger ([www.unesco.org](http://www.unesco.org))

- Un niveau de mortalité qui reste relativement élevé : l'espérance de vie était estimée à 46 ans en 1993, le taux de mortalité infantile à 123 pour mille et le taux de mortalité maternelle à 6,5 %.
- Une urbanisation rapide de la population : 25 % de la population vivait en milieu urbain en 1993 contre 13 % en 1977.
- Un taux de scolarisation très faible : le taux d'analphabètes est évalué à 72 % en 1993.

## 2.2 Economie

Le Niger est l'un des pays les plus pauvres de la planète selon l'indice de développement humain (Etude sur l'indice de développement, PNUD, 1996). Il a connu un taux de croissance du PIB réel de 1,7% en moyenne pour la période de 1975 à 1994. Cette faiblesse du taux de croissance du PIB par rapport à celui de la population persiste et s'amplifie depuis plus de 15 ans.

Le sous-sol du Niger renferme de nombreuses ressources minières et en raison du boom de l'uranium, la croissance économique a été relativement forte au cours des années 1970, avec une augmentation moyenne du PIB de 9% par an entre 1971 et 1981. Toutefois, sous l'effet conjugué de la sécheresse et de l'effondrement des cours de l'uranium et de l'arachide, la situation économique du pays est devenue très difficile au début des années 90 ([www.unesco.org](http://www.unesco.org)).

L'économie du Niger reste actuellement dominée par le secteur rural en difficulté et la gestion de l'environnement, que l'on associe à la sauvegarde du capital-ressources, devient économiquement une priorité majeure. En effet, le secteur agricole participe au PIB pour 40 % en 1998 et emploie 90 % de la population active. Les importations de céréales portent essentiellement sur le blé, le maïs, le mil et le sorgho. Ces importations varient fortement en fonction de la production annuelle des cultures vivrières du pays. Elles ont doublé ces dernières années, passant d'environ 190 000 T/an au début des années nonante à environ 375 000 T/an entre 1995 et 1999. Les exportations de céréales ont été plus constantes avec une moyenne d'environ 27 000 T/an de 1991 à 1998 (FAO, site internet officiel).

En résumé, l'économie du Niger repose sur un capital-ressources de plus en plus restreint. La base des ressources naturelles du pays est non seulement limitée, mais elle se dégrade de plus en plus, au fur et à mesure que les besoins des populations en majorité pauvre s'accroissent. Ce déséquilibre handicape le développement du pays qui a peu d'alternatives vers lesquelles se tourner. Le Niger ne peut par ailleurs compter sur la présence d'autres secteurs technologique, industriel ou commercial forts et capables de prendre la relève. La crise du développement dans laquelle il est plongé menace non seulement le patrimoine culturel national, mais aussi et surtout la survie des populations qui en dépendent ([www.unesco.org](http://www.unesco.org)).

### **2.2.1 L'agriculture**

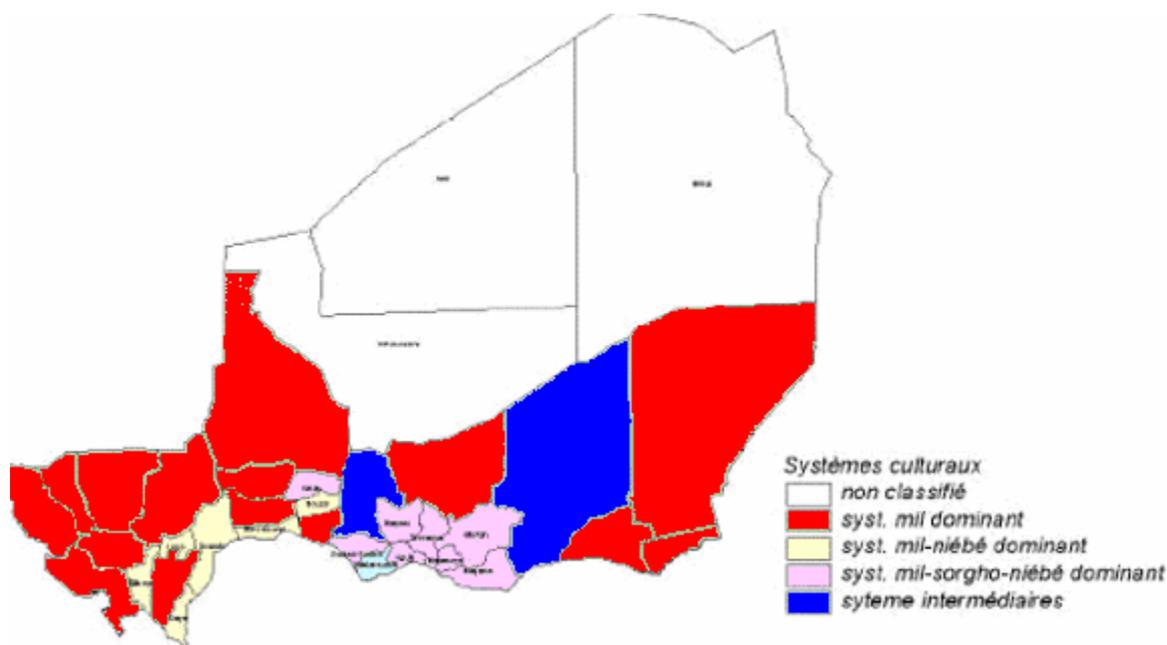
L'agriculture au Niger est caractérisée par trois systèmes productifs principaux : le système vivrier, caractéristique des zones occidentales et sahélienne, le système mixte, présent dans la partie centro-méridionale du pays, et le système pastoral qui caractérise toute la zone désertique et semi-désertique au nord de l'isohyète de 300 mm.

Les systèmes vivrier et mixte, à leur tour, sont divisés en purs et pastoraux. Tous ces systèmes de production agricole sont fondamentalement basés sur la culture du mil et du sorgho, en association avec certaines légumineuses (niébé, arachide), et ont une caractéristique commune, à savoir l'insuffisance de leur productivité. Cette faible performance est due en grande partie à la baisse de la fertilité des sols, l'utilisation de matériel agricole rudimentaire,

la faible adoption de semences améliorées, la pression parasitaire, l'insuffisance de l'encadrement technique du secteur rural notamment (Pereira, 2002).

Nous notons une forte extension des terres affectées aux cultures vivrières du fait de la faible intensification des systèmes de production. En outre, en raison de la pression démographique et de la faiblesse de l'intensification de l'agriculture, pour les six cultures principales (mil, sorgho, niébé, riz, arachide, maïs), les superficies cultivées sont passées de 3,1 millions d'hectares (21% des terres cultivables) en 1965 à 13,9 millions d'hectares (93% des terres cultivables) en 1999, soit un accroissement de 72% pour la période considérée. Il importe toutefois de pondérer ces chiffres en tenant compte du système de culture pluvial dominant qu'est l'association mil-niébé (CNEDDN, 2000 ; in Pereira, 2002).

La figure 2.5 représente les systèmes culturels du Niger par région ([www.unesco.org](http://www.unesco.org)).



*Fig 2.5 : systèmes culturels selon la région administrative au Niger (www.unesco.org)*

### 2.2.2. L'élevage

L'élevage constitue une des plus importantes richesses du Niger. Une grande partie du pays, impropre à l'agriculture 'sous pluies', possède une vocation essentiellement pastorale.

L'élevage représente d'ailleurs à lui seul de 12 à 16% du PIB, et constitue la 2<sup>e</sup> source d'exportation après l'uranium (Piraux & al, 1997 ; in Pereira, 2002).

Les deux principales races bovines sont représentées par le *zébu bororodji* de grande taille, à la robe unie, acajou foncé, aux cornes immenses en forme de lyre, et le *zébu azawak*, plus petit, à la robe infiniment variée, aux cornes courtes. A l'ouest, on peut signaler, le long du fleuve, le *zébu djeli* et, à l'est aux alentours du lac Tchad, le *taurin kouri*, facilement reconnaissable à ses cornes démesurément élargies à la base. Les ovins sont de grands animaux à poils ras alors que les caprins appartiennent à deux variétés: la *sahélienne*, de grande taille, à poils ras également et la *chèvre rousse de Maradi*, particulièrement appréciée pour la qualité de sa peau ([www.unesco.org](http://www.unesco.org)).

L'élevage se pratique à travers des systèmes de production dont on distingue quatre grands types principaux :

- Le système de production typiquement pastoral (pu ou nomade), dans les zones enregistrant moins de 300 mm de pluie annuelle. Il présente de fortes potentialités fourragères mais est affecté par les sécheresses. Ce système est dominé principalement par la présence de dromadaires et de caprins avec une mobilité accrue sans rapport avec l'agriculture. Les populations qui pratiquent ce type d'élevage ont leur alimentation basée sur les dattes et les produits laitiers ; elles sont fortement dépendantes de la disponibilité de céréales sur les marchés.
- Le système d'élevage transhumant, localisé dans les zones semi-arides, est associé à l'agriculture pluviale. Il se caractérise essentiellement par des déplacements saisonniers sur longue distance ayant un même point de départ et d'arrivée avec ou sans la famille.
- Le système de production agro-sylvo-pastoral, qui comprend également le système d'élevage sédentaire des zones agricoles et l'élevage pratiqué dans les zones fluviales et irriguées. Il se caractérise par des déplacements saisonniers de faible amplitude liés aux pratiques agricoles et il tend à devenir sédentaire dans les zones sub-humides.
- Le système de production urbain et péri-urbain, qui s'est développé ces dernières années dans la pratique de l'élevage intensif ou semi-intensif. La contrainte majeure de ce type d'élevage est l'insuffisance notoire des zones de pâturages appropriées et la divagation des animaux.

Les productions et les fonctions de l'élevage sahélien sont multiples. En plus des productions alimentaires (viande, lait, œufs, abats), l'élevage joue un grand rôle dans l'exploitation familiale par l'apport de force de travail (transport et culture attelée) et l'apport d'énergie (feux, enduits, biogaz). L'apport de fumier et la force de travail apportés par l'élevage contribuent fortement à la réussite des activités agricoles (Piroux & al, 1997 ; in Pereira, 2002). Deux autres fonctions essentielles sont le rôle économique (apport d'argent liquide par les ventes, existence d'un capital-sécurité) et le rôle social.

L'élevage contribue donc à la sécurité alimentaire des populations à travers les produits alimentaires qu'il génère et son rôle dans l'apport de revenu monétaire dans l'économie familiale et nationale. Malgré cette contribution significative, l'élevage sahélien reste marqué par son caractère extensif et son absence de techniques de production améliorées (Pereira, 2002).

La figure 2.6 représente la variation spatiale de la charge de bétail.

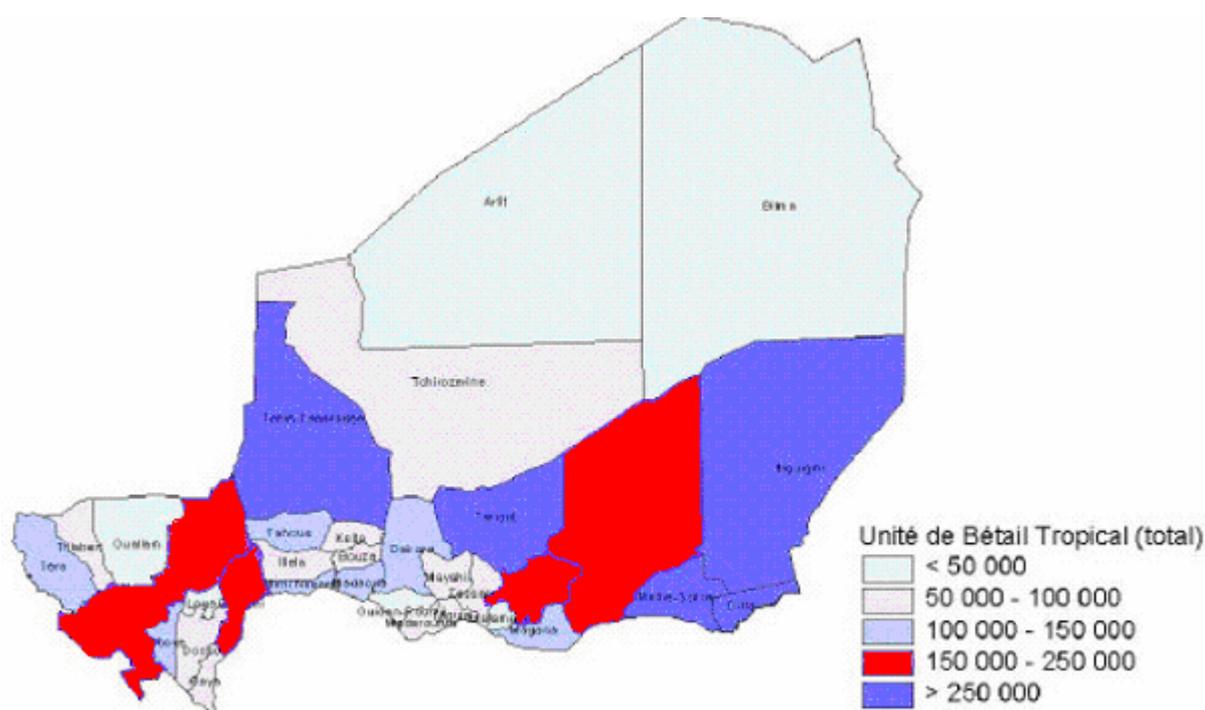


Fig 2.6. Charge de bétail par région au Niger (source : [www.unesco.org](http://www.unesco.org))

### III. Recherche bibliographique : Effet de la fertilité chimique sur la croissance du mil

#### 1. Le mil en Afrique de l'Ouest.

Originaire du sud du Sahara, le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) est la plante alimentaire la plus cultivée en zones semi-arides en Afrique et en Asie, car elle constitue l'unique céréale capable de produire constamment années après années. Le mil compte ainsi pour 80 % à 90 % des demandes nutritives du Niger (IRAT, 1974 ; in Christianson, 1990). Le Niger en est le deuxième plus grand producteur, après le Nigeria. Le mil est cultivé surtout pour ses grains, généralement décortiqués, pilés et transformés en farine, puis consommés de différentes manières (bouillies, pâtes, boissons,...) (FAO, site Internet).

Les pailles de mils sont utilisées à plusieurs fins par les paysans et leur famille :

(Bationo & Mokwunye, 1991)

- Constructions de barrières, toits, greniers, paillasse, matelas (...)
- Nourriture pour le bétail (particulièrement les feuilles de mil)
- Paillage localisé pour la récupération de zones dégradées.

##### 1.1 Espèce et variété

Le mil à chandelle, *pennisetum glaucum*, fait partie de la famille des Graminées, sous-famille des Panicoidées et de la tribu des Panicées. Il existe de nombreuses variétés de mil, distinctes surtout par leur longueur du cycle végétatif : celle-ci varie entre 65 et 90 jours pour les variétés précoces et entre 110 et 150 jours pour les variétés tardives (Organisation Météorologique Mondiale, site internet). Plusieurs des parents sauvages ont évolué dans des conditions extrêmes : sécheresse, inondations, chaleur et froid extrêmes. Les plantes se sont adaptées et ont développé une certaine résistance aux parasites et aux maladies décimant les autres plantes, et causant néanmoins de lourdes pertes aux récoltes ([www.icrisat.org](http://www.icrisat.org)).

Pour ce qui est du photopériodisme, la sensibilité du mil à la lumière a été observée par Burton (1965 ; in FAO 1980). Les variétés de mil de l'Afrique de l'Ouest sont des variétés de jour court et la floraison n'est pas induite si la durée du jour dépasse 12 heures.

La sensibilité au jour court est un caractère génétique utile pour la culture du mil où une maturité tardive est nécessaire. En effet, en Afrique, les dates de semis varient considérablement d'année en année et dépendent des pluies d'été. Les variétés sensibles au jour court peuvent être semées n'importe quand, mais ne mûriront pas avant août-septembre ; ce qui assure une récolte de grain relativement indépendante de la date de semis (mi-septembre – mi-octobre).

La sensibilité au jour court peut également être utilisée pour améliorer la quantité et la qualité du fourrage. Burton (1965 ; in FAO 1980) et Burton & Powell (1968 ; in FAO, 1980) ont rapporté que les variétés sensibles au jour court plantées en avril restent plus longtemps au stade végétatif et ont plus de feuilles que les variétés de jour neutre.

## **1.2. Structure morphologique**

Le mil est une plante à port érigé et sa hauteur varie de 0,5 à 4 mètres selon les variétés. L'appareil racinaire est de type fasciculé avec une seule racine séminale principale suivie par de nombreuses racines adventives. Une des causes de la bonne adaptation du mil aux conditions pédoclimatiques de la zone semi-aride est son développement racinaire important, pouvant atteindre plus de 180 cm de profondeur à la récolte. Comme d'autres graminées tropicales (espèces en C<sub>4</sub>), le mil forme des associations dans la rhizosphère avec les bactéries fixatrices d'azote (Wani & al., 1988 ; in Hafner 1993), ce qui peut améliorer la croissance de la plante non seulement par apport d'azote (Chalk, 1991 ; in Hafner, 1993) mais aussi par la production de phytohormones excitant la croissance racinaire et particulièrement la formation de racicules (Joshi & Rao, 1989 ; Martin & al., 1989 ; in Hafner, 1993).

La tige est rigide avec des entre-nœuds pleins. Les entre-nœuds de la base s'allongent en dernier sont plus courts. Les nœuds de la base sont capables de donner des talles secondaires et tertiaires. Cependant, de 1 à 7 talles sont productives, donc toutes les talles ne sont pas fertiles.

Les feuilles alternes et à nervures parallèles s'insèrent au niveau des nœuds. Elles sont formées d'une gaine entourant complètement la tige et d'un limbe lancéolé et poilu. Les nervures sont bien développées et empêchent ainsi le limbe de se plier. Les stomates sont présents sur les deux faces de ce dernier.

L'inflorescence est une panicule apicale très dense, de forme cylindrique. Sa longueur et son diamètre varient fortement en fonction de la variété : respectivement de 15 à 140 cm et de 0,5 à 4 cm. La panicule est constituée d'un rachis rigide portant des épillets pédonculés et groupés par bouquets. Chaque épillet comprend deux fleurs : la fleur supérieure est hermaphrodite ou femelle, généralement fertile, tandis que la fleur inférieure est stérile ou mâle. Normalement, deux ou trois jours de décalage entre les floraisons mâles et femelles assurent la fécondation croisée.

Le fruit est un caryopse long d'environ 4 mm et de couleur variable (blanche, jaune, gris ou bleu). La valeur nutritive des grains est comparable à celle du riz et du blé.

### **1.3. Croissance et développement**

On peut subdiviser le cycle de croissance du mil en trois phases : végétative, reproductive et de remplissage des grains.

#### *La phase végétative*

Cette phase débute avec l'émergence de la plante et continue jusqu'à l'initiation de la panicule. La germination est hypogée et dans de bonnes conditions, elle se produit environ 24 heures après semis. La levée a lieu avec l'apparition de la première feuille 4 ou 5 jours après semis (JAS). A la fin de la levée, les bourgeons de toutes les feuilles sont apparus et, chez les variétés précoces, au moins 6 ou 7 feuilles sont déjà développées. La plantule développe son système racinaire primaire et forme de nombreuses racines adventives. Le tallage débute 15 jours après la levée environ et se poursuit pendant 10 à 20 jours. Les talles produites tardivement n'émettent pas d'épis ou ceux-ci n'arrivent pas à maturité. La taille de la plante reste réduite car il n'y a pas encore eu d'allongement des entre-nœuds. Durant cette phase, l'accumulation de biomasse concerne essentiellement les feuilles et les racines. L'initiation de la panicule est marquée par l'élongation du dôme apical. C'est le début de la phase suivante.

### *La phase reproductive*

Cette phase débute avec l'initiation de la panicule de la tige principale. Celle-ci a lieu entre 22 et 30 jours après l'émergence. Cette deuxième phase a une durée de 18 à 25 jours suivant les variétés.

Toutes les feuilles s'étendent tandis que les premières feuilles, à la base de la plante, se dessèchent. En partant de la base, les entre-nœuds se rallongent. C'est la montaison. Les talles suivent les mêmes phases que la tige principale, mais en retard. L'accumulation de la biomasse concerne la tige en plus des racines et des feuilles. Durant la montaison, la panicule subit une série de changements : le développement des épillets, des fleurs, des glumes, des stigmates, des anthères et finalement de la panicule elle-même, suivie après 2 ou 3 jours par la floraison. Les fleurs femelles s'épanouissent les premières, en commençant par le sommet de la panicule et en descendant au fur et à mesure, suivies par les fleurs mâles. Cinq à six jours plus tard, la floraison et la fécondation de la panicule sont terminées.

### *La phase de remplissage des grains*

Cette phase débute avec la fécondation des fleurs de l'inflorescence principale (40 à 53 jours après émergence suivant les variétés) et se poursuit jusqu'à la maturité de toute la plante (tige principale et talles). Sa durée est de 22 à 25 jours suivant la variété. L'accumulation de biomasse se produit surtout dans les caryopses mais peut continuer dans d'autres parties car les talles sont en retard de développement. La sénescence des feuilles se poursuit jusqu'à ce qu'il ne reste que les quelques feuilles vertes restantes (Maiti, 1981). En passant par 3 phases (laiteuse, cireuse et vitreuse), les grains arrivent à la maturité physiologique 20 à 50 jours après la floraison, selon les variétés (Dufey, 2002).

## **1.4. Agriculture traditionnelle**

Avant le semis, le labour ou le pseudo-labour a un effet favorable sur les rendements pour autant qu'il ne soit pas trop intense car les sols sont déjà naturellement peu structurés car trop sableux, mais il n'est pas pratiqué en milieu paysan. Un travail du sol trop intense implique un retard dans le semis et est donc généralement accompagné d'une durée de cycle plus faible et d'un lessivage d'azote.

A la station de recherche de l'ICRISAT, certains champs sont labourés juste avant le semis lorsque le sol est humide, semé et amendé au moyen d'un tracteur. Il en résulte de meilleurs rendements et des champs plus uniformes facilitant les travaux de sarclage.

Après une pluie propice (au moins 20 à 30 mm d'eau), en général entre mi-mai et mi-juin, le mil est semé dans des trous (poquets) situés à 1-1.5 m l'un de l'autre. Une pincée de graine est placée dans chaque poquet. Le poquet est ensuite rebouché de terre tassée au moyen du pied juste après le semis.

Des grandes surfaces d'une faible densité (en moyenne 7000 poquets/ha) sont ainsi semées au cours des trois premiers jours qui suivent une grosse pluie ( Seybou, 1993 ; in de Rouw, 1997).

Il a déjà été montré que les rendements de la culture du mil au Niger sont d'autant plus grands que le semis est précoce. Ceci s'explique par la courte durée de la saison des pluies qui doit coïncider le plus possible avec la période de culture, et par la sensibilité du mil au jour court. De plus, si le semis a lieu trop longtemps après les premières pluies, celles-ci auront entraîné en profondeur avec elles le peu de réserves nutritives que le sol peut contenir. Par contre, si le paysan sème dès la première pluie et que les suivantes se font attendre, la levée de son champ ou la croissance des jeunes plants fragiles peuvent être compromises par manque d'eau.

Le sarclage constitue le seul travail du sol effectué. Il est réalisé à l'aide d'une lame courbe (iler) travaillant à faible profondeur. Il entraîne non seulement la coupe des mauvaises herbes, mais aussi la destruction des croûtes superficielles. Ce travail occupe les paysans continuellement de 15 à 80 jours après semis.

Aux alentours du stade « 5 feuilles » (20 jours après semis), le démariage est effectué à raison de 3 plants par poquet. Le démariage permet de meilleurs rendements en diminuant la compétition entre plants. Cependant, certains paysans hésitent à démarier pour assurer un nombre minimum de plants survivants en cas de sécheresse.

La récolte a lieu 90 jours après le semis pour la variété HKP, les autres cultivars peuvent varier de 70 à 120 jours de durée du cycle de culture. Les champs de mil jaunissent, les feuilles et les tiges sèchent, le grain est mûr. La récolte est manuelle et on coupe les épis au moyen d'une faucille ou du moins avec un outil tranchant. Les épis sont ensuite emportés dans des paniers et séchés au soleil sur un terrain propre. Quand ils sont secs, les épis sont alors stockés dans des greniers à grains. Les grains seront ensuite pilés dans des mortiers, d'abord pour séparer les grains des déchets, et ensuite pour les rendre à l'état de farine.

Les grains stockés servent à l'alimentation de toute une année et sont utilisés l'année suivante pour semer.

En région tropicale semi-aride de l'Afrique de l'Ouest, le mil est traditionnellement cultivé en association avec une autre espèce. Au Niger, jusqu'à 87 % de la surface des champs de mil est cultivée de cette manière (Swinton, 1988). Les principales associations sont mil/niébé, mil/sorgho, mil/maïs, mil/arachide, mil/sorgho/niébé (Fussel, 1987). Dans les régions où la pluviosité annuelle est inférieure à 600 mm, le mil est plus souvent cultivé en association avec le niébé ou l'arachide (Klajj, 1994). Au Niger, d'après Reddy & al (1993), 55% des cultures sont en association mil/niébé ou ml/sorgho/niébé.

L'interculture est utilisée par les paysans pour répartir les risques de production sur deux cultures différentes, étaler les pics de travaux et diversifier les productions (alimentation humaine et animale). De plus, durant les bonnes années, les longues saisons de pluies peuvent être exploitées au maximum (Sivakumar, 1992). Grâce à la vente des fanes, le niébé est aussi une source de revenu non négligeable pour les paysans.

La production de grains de niébé nécessite absolument l'application d'insecticide. Celle-ci ne se faisant que très rarement, cette production reste très faible voire nulle les mauvaises années (Subbarao, 1999).

Cette agriculture étant essentiellement une agriculture de subsistance, le capital investi est très faible : il n'y a pas ou très peu d'apport d'engrais (l'utilisation moyenne d'engrais en Afrique de l'Ouest est de l'ordre de 1 kg/ha ! Baidu-Forson, 1994), le seul investissement supplémentaire concerne la location de main d'œuvre. La traction animale est utilisée pour le transport mais quasiment pas pour les pratiques culturales. Les paysans utilisent le travail manuel à l'aide d'outils très simples pour toutes les opérations de culture.

En conclusion, le mil est une céréale de base adaptée aux sols pauvres et à la faible pluviosité des zones tropicales semi-arides. Son faible taux de croissance annuel en Afrique de l'Ouest est attribué à trois éléments : la mauvaise fertilité inhérente du sol, des opérations culturales restreintes et non synchronisées ainsi que des sécheresses fréquentes (Fussell & al, 1987). La plus grande contrainte n'est pas le manque d'eau comme on pourrait le croire, mais bien la faible fertilité du sol (particulièrement les faibles taux de phosphore ; Penning de Vries, 1982).

## 1.5 Besoins en eau

L'eau et la fertilité des sols sont les facteurs limitant majeurs pour la croissance des plantes des régions tropicales semi-arides de l'Afrique. Plus on va vers le nord, plus la diminution des précipitations est accusée et plus la conservation de l'eau revêt de l'importance. La proportion d'eau perdue par le ruissellement dépend de l'intensité de la pluie et du taux d'infiltration dans le sol. Les intensités pluviométriques dans les régions tropicales de l'Afrique dépassent fréquemment 100 mm/heure (Hoogmoed, 1981, 1986 ; in Alzouma, 1990) et l'eau perdue par ruissellement est importante, particulièrement en raison de l'encroustement de surface.

L'eau disponible pour la plante est exprimée comme la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Elle est généralement de l'ordre de 15-25 % par volume, mais varie avec la texture et la structure du sol. Dans les régions subhumides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, Kowal (1986 ; in Alzouma, 1990) et Charreau (1971 ; in Alzouma, 1990) donnent pour des sols sableux une gamme d'eau disponible de 6 à 20 % du volume. Charreau (1972 ; in Alzouma 1990), pour des sols sableux provenant de dépôts éoliens, donne une valeur minimum de 3 à 4 % du volume.

Au Niger, le mil est la culture de base la plus importante partout où la pluviosité dépasse 400 mm pendant la saison des pluies. La date de début des pluies est très importante pour les planifications agricoles, particulièrement les semis. Suite au photopériodisme, le semis aux pluies précoces occasionnent une période de végétation plus longue. Cependant, semer avec les premières pluies est risqué jusqu'au 1<sup>er</sup> juin, car le risque de sécheresse durant la saison des pluies est assez élevé jusqu'à juin (Sivakumar, 1993).

Les besoins en eau des différentes variétés de mil ont été évalués par le calcul de la demande évaporative, en particulier au Sénégal. Il varie en moyenne de 345 mm pour un mil nain de 75 jours à 418 mm pour un Souna III de 90 jours et 598 mm pour un mil Sanio de 120 jours (Dancette, 1983 ; in Moreau, 1997).

Les simulations de bilan hydrique montrent que la phase de pleine végétation-reproduction est fortement affectée par la sécheresse, le cycle cultural est tel que la sécheresse du mois d'août constatée depuis 1968 se produit durant cette phase, c'est-à-dire quand le besoin hydrique de la culture est maximal (Juncker & al., 1992 ; in Moreau, 1997).

Selon Doorenbos (1986), le coefficient cultural  $k_c$  du mil est de 1.15 à la phase de mi-saison, et de 0.25 à la récolte, pour une humidité relative inférieure à 20% et un vent supérieur à 5 m/s.

## **2. Nutriments et acidité**

### **2.1 Azote**

L'azote constitue, avec le phosphore, l'un des éléments les plus limitants dans la croissance du mil au Niger. D'ailleurs, ces deux éléments semblent avoir des effets conjugués sur le mil, et ces effets conjugués sont l'objet d'études actuellement.

La concentration critique en azote dépend fortement du stade de croissance de la plante. En début de croissance, la demande de N est faible, mais celle-ci augmente très rapidement à l'élongation de la tige (Christianson, 1991). Dey et al (1980 ; in Scott-Wendt, 1987) ont déterminé que cette concentration critique était de 32 g/kg dans la plante entière lorsqu'elle atteint la hauteur du genou, mais cette concentration passe à 25 g/kg dans les troisième et quatrième feuilles à l'émergence de l'épi.

La teneur moyenne en azote total dans 295 horizons de surface (0-15 cm) des sols de la savane de l'Afrique de l'Ouest est de 0.051% (Jones, 1973 ; in Alzouma, 1990), et est en corrélation avec les précipitations et le pourcentage d'argile dans le sol.

Charreau et Nicou (1971 ; in Alzouma, 1990) donnent pour le sol dior (Alfisol) au Sénégal, un pourcentage de N total dans les couches supérieures (0-10 cm, C/N=12) de 0.023, diminuant jusqu'à 0.011% à 70-80 cm de profondeur (C/N=10). L'azote total du sol est généralement faible et est étroitement associé avec la teneur en matière organique du sol. Cependant, même sous couverture herbacée, les quantités minéralisées sont faibles (Penning de Vries, 1982 ; in Alzouma, 1990) même s'il a été démontré que la minéralisation commence à un taux élevé au début de la saison de pluie quand l'activité microbienne augmente rapidement (Birch 1959, 1960 ; Sanchez, 1976 ; in Fussell, 1987), ce qui conduit à un flux d'N organique dans le sol, d'où l'importance de semer le mil avec les premières pluies afin d'optimiser la prise d'N minéralisé et les rendements (Greenland 1958, Jones & Wild 1975, Egharevba 1979 ; in Fussell, 1987).

Il est généralement accepté que de hauts rendements ne peuvent être obtenus dans ces régions sans une application d'azote, et d'ailleurs de bonnes réponses à l'application d'azote ont été observées dans ces sols (Christianson, 1991), lorsque les besoins en P sont rencontrés (Wendt, 1986).

L'azote est l'un des éléments les plus difficiles à gérer car les engrais azotés sont très solubles et peuvent être facilement transportés par les eaux. Les quantités d'azote dans la solution du sol changent continuellement à cause de l'adsorption du sol d'ammonium, de l'immobilisation microbienne et de la minéralisation.

Au Niger, dans la production du mil, les pertes d'azote peuvent aller jusqu'à plus de 50 %. Cette faible efficacité des engrais azotés peut être due à différents mécanismes tels que le lessivage, la volatilisation de l'ammoniac et l'immobilisation par les microorganismes du sol. L'importance relative de chaque mécanisme de perte dépend grandement du type d'engrais, de sa gestion de l'engrais et de la culture ainsi que du type de sol et des conditions climatiques (Bationo, 1995). Des études utilisant le lysimètre conduites au Sénégal ont montré que 34% des 150 kg N/ha de l'urée appliquée étaient absorbés par la plante mais uniquement 13,7 % d'azote était retrouvé dans les grains (Ganry & Guiraud, 1979 ; in Christianson, 1990). Seize pourcents de l'azote épandu fut retrouvé dans le sol, surtout dans les 10 premiers centimètres. En absence de précipitation, peu de lessivage est observé, et moins d'1 % de l'azote appliqué fut récolté dans les percolats des lysimètres. Les pertes gazeuses furent estimées à 47 % de l'azote appliqué (Christianson, 1990).

Les deux mécanismes de perte d'azote les plus importants dans les conditions locales sont la volatilisation et le lessivage :

- Pertes par volatilisation : ces pertes sont considérées comme étant les plus importantes, et peuvent atteindre 47%. Elles dépendent de la forme sous laquelle l'azote est apporté et de la technique d'application de celui-ci. Ainsi, l'incorporation de l'engrais augmente son efficacité en diminuant les pertes par volatilisation. Cette incorporation demande cependant un travail supplémentaire (Hafner, 1992).
- Pertes par lessivage : bien que ces sols sableux soient bien drainés, ces pertes semblent moins importantes que la volatilisation. Des expériences basées sur l'utilisation de  $^{15}N$  ont montré que celui-ci restait confiné essentiellement dans les 15 premiers cm

du sol (Christianson, 1990). Des pertes par lessivage sont toutefois possibles, elles dépendent de la pluviosité annuelle (intensité et distribution) et du type de culture. L'apport simultané de phosphore a ici toute son importance : en effet, si celui-ci limite la croissance de la culture, l'eau et l'engrais azoté sont sous-utilisés et un drainage important en sera la conséquence (Hafner, 1992).

Bien que l'importance des phénomènes liés aux pertes dépende du type d'engrais et plus particulièrement de leur teneur en nitrate, ammonium et urée, on peut néanmoins résumer que les pertes par volatilisation sont très élevées dans les sols sableux considérés (Christianson, 1990), car la CEC y est faible, et la pluie n'est pas nécessairement présente peu de temps après l'application (Christianson, 1991). L'assèchement du sol, fréquent au Niger tend à également favoriser les pertes de  $\text{NH}_3$  par haussement de la concentration effective de  $\text{NH}_3$  (aqueux) dans le sol, alors que parallèlement la nitrification agit assez lentement (Terry & al., 1978 ; in Christianson, 1990). A cause de ces énormes pertes par volatilisation, les nitrates sont les formes azotées dominantes de ces sols (Piéri, C.1985).

Cependant, ces pertes peuvent être réduites quelque peu par l'incorporation du fertilisant, pratique qui n'est que partiellement efficace dans les sols sableux (Terman & al., 1968 ; in Christianson 1990), spécialement lorsque le fertilisant est concentré dans une bande ou en un seul point (Overrein & Moe, 1967 ; in Christianson 1990). Lorsque l'application est effectuée de cette manière, la nitrification est lente et de grandes quantités d'ammonium sont laissées dans les zones à pH plus élevé. (Pang & al., 1975 ; in Christianson, 1990). Ce sont les conditions menant à la volatilisation de l'ammonium.

Comme le montre la figure 3.1, avec des précipitations adéquates et en culture continue, la réponse à l'application de N est prononcée et dépend de la source de N, de la méthode d'application ainsi que l'époque (Christianson, 1991)

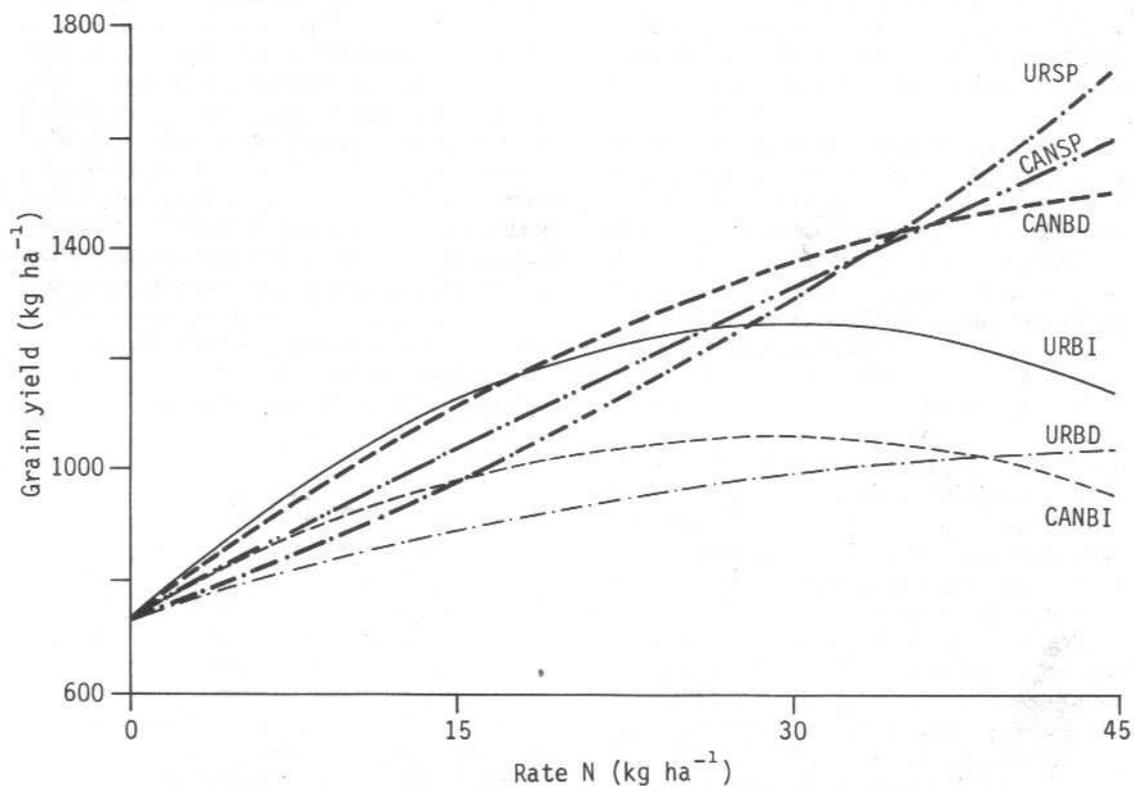


Fig 3.1 : effet de différentes sources, taux, temps et méthode d'application d'azote sur le rendement en grain (Fussell 1987). URSP = urea split application; CANSP = calcium ammonium nitrate, split application; CANBD = CAN banding 30 DAE ; URBI = urea broadcasting with incorporation 30 DAE; URBD = urea banding 30 DAE; CANBI = CAN broadcasting with incorporation 15 DAE.

La réponse au N dépend aussi de l'humidité présente et de la densité de semis : la réponse est plus forte quand la disponibilité de l'humidité est plus forte et lorsque la densité de semis est plus élevée (Bationo, 1992). La figure 3.2 illustre l'effet de la méthode d'application de l'engrais sur le rendement en grain.

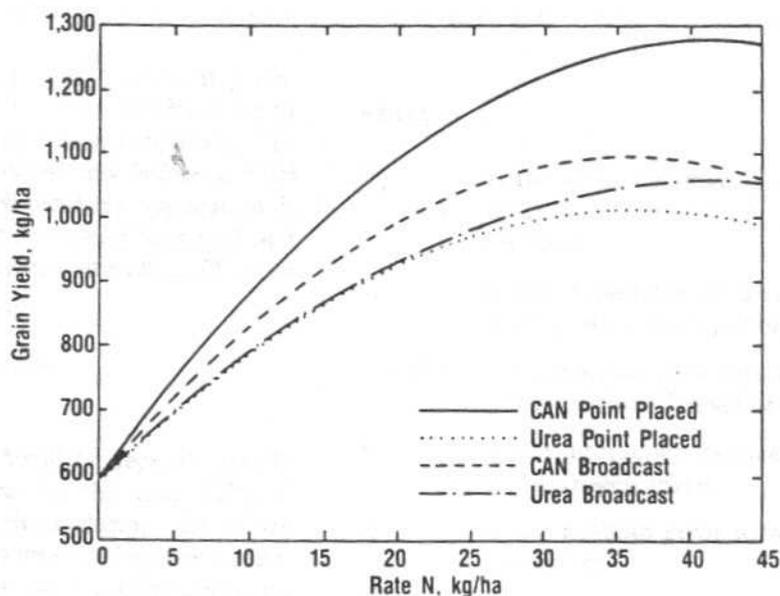


Fig 3.2 : effet de la méthode d'application sur le rendement en grain (Christianson, 1991).

#### Sources d'N inorganique

L'urée est l'engrais azoté le plus utilisé. Une fois appliqué au sol, l'urée est transformé en  $\text{NH}_4$  par l'enzyme urease, et si cette conversion se fait à la surface du sol par exemple, de grandes pertes d'azote sous forme de  $\text{NH}_3$  sont à prévoir (Bationo, 1995). Pour limiter les pertes par volatilisation, les fabricants ajoutent des inhibiteurs d'uréase (p.ex. le (n-butyl) thiophosphoric triamide) qui vont ralentir la conversion d'urée en ammonium (Christianson, 1991). Cependant, l'utilisation de l'urée se traduit souvent par un résultat faible, en raison des brûlures subies par le feuillage des plantes, et par les pertes par volatilisation, estimées à 25-53 % à Sadoré (ICRISAT, 1985 ; in Alzouma, 1990).

Au Niger, un fertilisant azoté également fortement utilisé est le CAN (calcium ammonium nitrate), attractif pour son faible potentiel de perte par volatilisation (Christianson, 1991). Pour cette raison, les expériences ont montré que le CAN est plus efficace que l'urée au Niger, du moins lorsque l'application a lieu en un point, pour laquelle la prise d'azote est trois fois plus importante pour le CAN que pour l'urée (Christianson, 1991).

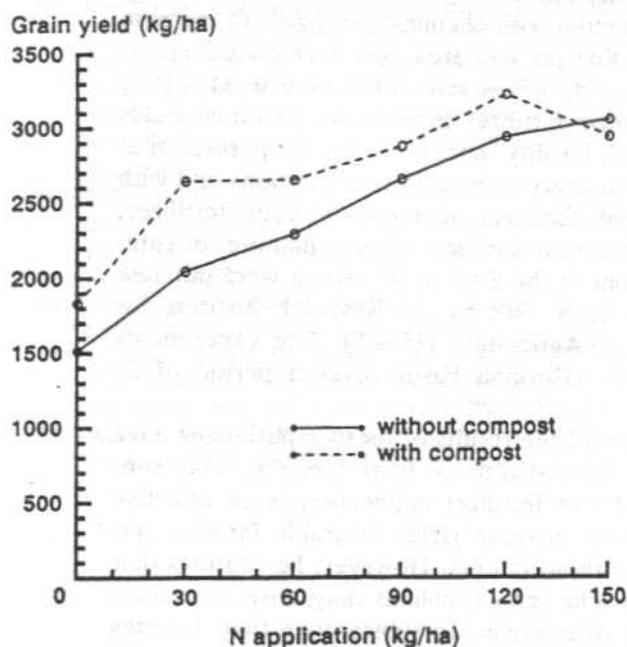
Beaucoup de chercheurs ont démontré l'augmentation des rendements du mil avec l'usage des fertilisants azotés (Ganry & al., 1974 ; Traoré 1974 ; Egharevba 1979 ; FAO 1982 ; ICRISAT

1984, 1985, 1986 ; Mughogho & al. 1985, Pieri 1985a ; in Fussell 1987). Cependant, cet usage doit être effectué en même temps qu'une certaine application de résidus de culture, car l'utilisation d'engrais inorganiques uniquement amène à des carences en micro-éléments ainsi qu'à l'acidification du sol (Bationo, 1993).

### *Sources d'N organique*

L'application de matériaux organiques tels que les engrais verts, les résidus de culture, le fumier animal ou le compost peuvent contourner les aspects négatifs des fertilisants chimiques (Pieri, 1985).

A taux élevé, les résidus de culture devraient être compostés ou recyclés par digestion animale, car l'application directe d'une grande quantité de matériel avec un haut rapport C/N peut avoir des effets négatifs due à l'immobilisation de l'azote durant sa décomposition.



*Fig 3.3 : effet du compostage du fertilisant azoté sur le rendement en grain (de Ridder, 1990)*

L'application de fumier animal ou de compost par contre agit positivement, et également combinés avec des fertilisants chimiques (voir Tableau 3.1).

*Tableau 3.1 : effet de l'application de différents types d'engrais organique (10 T/ha) avec ou sans fertilisant chimique sur le rendement en grain du mil (Sedogo, 1981 ; in de Ridder, 1990)*

| Type de fertilisation   | Rendement en grain sans fertilisant chimique (kg/ha) | Rendement en grain, avec l'application de 60 kg/ha de fertilisant chimique (kg/ha) |
|-------------------------|--|--|
| Pas de fumier organique | 1831   | 2796   |
| Paille de sorgho        | 1652   | 3427   |
| Fumier animal           | 2409   | 3591   |
| Compost                 | 2505   | 3688   |

## 2.2 Phosphore

Dans de nombreuses études, le phosphore a été désigné comme l'élément nutritif le plus limitant pour la croissance du mil dans les sols sableux d'Afrique de l'Ouest. Bien que le mil soit bien adapté aux conditions locales (pH faible, peu d'éléments nutritifs), la faible disponibilité du phosphore ainsi que sa variation spatiale peut expliquer à elle seule une grande partie de la micro variabilité spatiale de croissance du mil.

La concentration optimale en P varie selon le stade de développement du mil. Ainsi, Ajakaiye (1979 ; in Bationo, 1989) trouva que la croissance maximale du mil 24 jours après la plantation dans une solution de Hoagland était atteinte avec des concentrations de P situées entre 4.9 et 5.7 g/kg. Cependant, cette concentration passe de 4.0 g/kg à 1.0 g/kg entre le stade « 20 jours après plantation » et le stade « floraison » (47 jours après plantation ; Scott-Wendt, 1987).

Dans une autre étude, une concentration de P de 8 mg/kg a été déterminée comme critique pour obtenir 90% de la production maximale, dans les sols sableux nigériens cette fois (Bationo & al, 1989).

Une expérience de Mokuwunye (1991), illustrée au Tableau 3.2, montre l'effet bénéfique du phosphore sur la prise d'azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium par le mil.

Tableau 3.2 : Prise de N, P, K, Ca et Mg par le mil avec ou sans application de P (Mokwunye, 1991)

|                                   | P appliqué (kg/ha) |       |
|-----------------------------------|--------------------|-------|
|                                   | 0                  | 13    |
| Rendement en grain (kg/ha)        | 471                | 1264  |
| Rendement en biomasse tot (kg/ha) | 2248               | 4938  |
| N contenu dans le grain (%)       | 1.72               | 1.73  |
| N contenu dans la paille (%)      | 0.71               | 0.8   |
| Prise de N par grain (kg N/ha)    | 8.12               | 22.3  |
| Prise de N par paille (kgN/ha)    | 15.35              | 37.22 |
| P contenu dans le grain (%)       | 0.18               | 0.25  |
| P contenu dans la paille (%)      | 0.03               | 0.03  |
| Prise de P par grain (kg P/ha)    | 0.82               | 3.08  |
| Prise de P par paille (kg P/ha)   | 0.62               | 1.64  |
| K contenu dans le grain (%)       | 0.48               | 0.44  |
| K contenu dans la paille (%)      | 1.77               | 1.40  |
| Prise de K par grain (kg K/ha)    | 2.1                | 5.56  |
| Prise de K par paille (kg K/ha)   | 41.44              | 73.48 |
| Ca contenu dans le grain (%)      | 0.14               | 0.03  |
| Ca contenu dans la paille (%)     | 0.09               | 0.39  |
| Prise de Ca par grain (kg Ca/ha)  | 0.5                | 0.45  |
| Prise de Ca par paille (kg Ca/ha) | 4.33               | 22.58 |
| Mg contenu dans le grain (%)      | 0.15               | 0.13  |
| Mg contenu dans la paille (%)     | 0.25               | 0.21  |
| Prise de Mg par grain (kg Mg/ha)  | 0.65               | 1.7   |
| Prise de Mg par paille (kg Mg/ha) | 5.54               | 10.42 |

On remarque nettement l'effet de l'application de P (sous forme de superphosphate) sur la prise de tous ces éléments chimiques et sur le rendement de la culture. L'effet de l'application de phosphore est semblable sur la prise de sodium, manganèse, fer, cuivre et zinc (Mokwunye, 1991). Bationo & al (1987) montrèrent qu'une aussi faible quantité que 8,8 kg P/ha (20 kg  $P_2O_5$ /ha) peut faire plus que doubler les rendements de mil (Davis, 1994).

Le problème est que les sols nigériens sont naturellement pauvres en cet élément. De plus, le phosphore assimilable s'adsorbe sur les oxy-hydroxydes d'aluminium et de fer fortement présents en proportion de la quantité totale de minéraux, dans ces sols sableux acides.

Le faible contenu en phosphore dans ces sols s'explique par la nature du matériau parental, composé en majeure partie de sables éoliens pauvres en réserves minérales, et la faible proportion d'argiles et de matière organique (Manu & al., 1991).

Bationo & al. (1987) ont rapporté que dans les sols sableux nigériens, le P disponible (extrait par méthode P-Bray) ne dépasse que très rarement 3 mg/kg de sol. Outre la faible quantité de phosphore total dans le sol, c'est surtout le phosphore assimilable qui fait défaut. L'absorption du P par la culture en croissance est affectée par l'interaction du P du sol avec les constituants de la matrice du sol. Cette sorption est contrôlée par les oxydes de Fe et d'Al, par la matière organique et par la fraction argileuse du sol (Manu & al, 1991).

Suivant le type de phosphate, la réaction avec les oxydes d'aluminium et de fer varie. Ainsi,  $[Al(H_2O)_6]^{3+}$  réagit avec  $PO_4^{3-}$ ,  $[Al(H_2O)_5(OH)]^{2+}$  avec  $HPO_4^{2-}$ , et  $[Al(H_2O)_4(OH)_2]^+$  avec  $H_2PO_4^-$ , et finalement



La même réaction a lieu avec les oxydes de fer (Stelly, 1981).

La matière organique a un effet favorable sur la dynamique de P dans les sols. Ainsi la compétition des ligands organiques pour les oxydes de Fe et Al peut conduire à une diminution de fixation de P de la part de ces oxydes (Bhat & Bouyer, 1968). Cependant, les faibles taux de matière organique et le retrait des résidus de culture annulent ces effets bénéfiques.

Aussi, dans un sol sec, le transport de P vers la racine par diffusion peut être réduit drastiquement (Bhadoria & al., 1991). Dans ces régions, dans les jours suivant une pluie, la mobilité en P diminue rapidement à cause de la faible capacité de rétention d'eau de ces sols sableux et la forte évapotranspiration, se traduisant par un assèchement rapide de la partie la plus superficielle du sol, où se trouve le P (Hafner, 1993).

### 2.3 Magnésium et Potassium

Les concentrations critiques en K et Mg apparaissent comme étant liées l'une à l'autre.

Cummins & Perkins (1974 ; in Scott-Wendt, 1987) ont trouvé que la concentration critique en Mg pour la croissance du mil dans un sol sableux et fertilisé par solution de Hoagland est de 1.3 g/kg, cette valeur étant une moyenne des concentrations en Mg dans les plantes entre 54 et 81 jours après plantation. A ce taux de Mg critique correspond une moyenne de concentration de K de 49 g/kg. Cependant, lorsqu'une étude similaire fut réalisée en serre avec un sol de type magnolia sandy loam soil dans la description américaine (Rhodic Paleudult, clayey, kaolinitic thermic), la concentration critique en Mg passa à 4.5 g/kg avec une concentration en K correspondante de 22.5 g/kg. Les auteurs en ont conclu que le taux de Mg critique varie avec les conditions environnementales ainsi qu'avec la disponibilité en K pour les plantes (Scott-Wendt, 1987).

En général, les faibles taux de K sont connus pour avoir un effet défavorable sur les rendements cultureux, mais les réponses au K sont souvent faibles en Afrique sahéenne (Piéri, 1986). En effet, le Sahel est sujet à un afflux annuel de poussière relativement riche en potassium (Hermann, 1995).

Il a également été souvent mentionné que la culture intensive sur les sols sableux sahéens devrait causer une rapide diminution de potassium, car les taux natifs disponibles sont très faibles (De Ridder, 1990).

Dans ce contexte, il est important de noter que les paysans de cette région appliquent des résidus de culture dans les microsites de faible productivité (Lamers, 1995). Les résidus de culture, en terme de macronutriments, sont relativement riches en K (Bationo, 1991b), et l'effet d'augmentation des rendements de cette pratique dans les sols sableux sahéens peut donc également être indicatif d'une déficience en K. En effet, Scott-Wendt (1988a) établirent empiriquement que, dans un transect allant d'une zone de bonne croissance de mil à une zone de mauvaise croissance du mil, le poids de la pousse de mil était le mieux corrélé avec la concentration en K de la plante.

Similairement, Hafner & al. (1993) observèrent des symptômes de déficience en K chez le mil et Wendt (1993) établit une réponse au K, mais seulement lorsque les besoins en P sont rencontrés.

Plus récemment, Rebafka & al. (1994) observèrent une grande réponse à la fertilisation en K lorsque l'application de résidus de culture avait été omise, confirmant donc une déficience potentielle en K dans ces sols.

## **2.4 Le soufre**

Les carences en soufre sont fréquentes et, malgré l'importance du soufre, celles-ci ont été souvent ignorées (Kanwar & Mudahar, 1986 ; in Alzouma, 1990). Nous pouvons uniquement signaler que, dans la couche superficielle, la plus grande partie du soufre se trouve dans des combinaisons organiques et étant donné la faible teneur en matière organique de nos sols, la teneur en soufre est donc faible.

## **2.5 Calcium**

A cause de la faible capacité d'échanges de ces sols, les quantités de calcium sont faibles et varient de 0.3 à 1.3 méq/100g (Kowal & Kassam, 1978 ; in Alzouma, 1990). Sous une culture intensive, le niveau de calcium tombe à cause des prélèvements répétés ; en conséquence, le pH de ces sols tombe rapidement. A cause de leur faible capacité en général, une perte même modérée de Ca des sols des régions tropicales semi-arides de l'Afrique de l'Ouest a un profond impact sur le pH du sol.

Le manque de calcium cause rapidement une diminution de la croissance racinaire du mil (Clarkson & Hanson 1980 ; in Dufey, 2001).

## **2.6 pH et Aluminium**

Les sols de la région du centre ICRISAT de Sadoré sont extrêmement acides à fortement acides (Alzouma, 1990). Les sols du Fakara sont sensiblement équivalents à ceux de Sadoré. Il a été observé que les sols moins productifs possédaient un pH plus faible que les sols plus productifs, ainsi qu'un degré de saturation en protons et aluminium plus élevé (Wendt, 1993).

Les moyennes des pH dans les sols non-productifs varient entre 5,4 et 6,0 alors que celles des sols productifs varient entre 5,8 et 6,3 (Charreau & Fauck, 1970 ; Arnon 1972 ; in Alzouma, 1990). Premièrement, le pH joue sur la CEC du sol.

La CEC reflète la charge totale d'un sol, provenant de charges permanentes et de charges variables. Ces dernières se développent par déprotonation des groupements hydroxyles sur les, la matière organique et dans notre cas les oxy-hydroxydes d'aluminium et de fer. Ces charges varient en fonction du pH. Il a également été prouvé, pour les sols acides (Van Wambeke, 1992), que la CEC calculée à pH 7 surestime fortement la CEC existant dans les conditions du champ.

La Fig.3.4 montre bien le résultat sur un sol acide hypothétique de la hausse de son pH. L'élimination de l'acidité échangeable et non échangeable crée des sites d'échange cationique qui pourront être occupés par des bases.

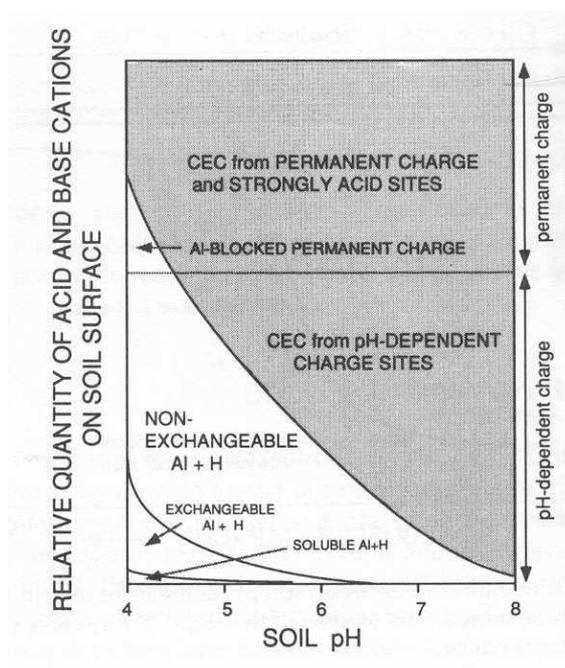


Fig 3.4 : sources de sites d'échange cationique d'un sol acide hypothétique auquel est ajouté de la chaux de pH 4 à pH 8. La région ombragée dépeint la magnitude de la CEC pour chaque pH (McBride, 1994).

Deuxièmement, l'effet du pH sur la capacité d'échange est positivement corrélé pour les cations et négativement pour les anions (Charreau & Fauck, 1970 ; Arnon 1972 ; in Alzouma, 1990). Suite à l'acidité plus élevée, les sols associés avec une productivité faible possèdent donc une grande quantité d'aluminium échangeable, qui constitue de 60 à 80 % de la capacité

d'échange cationique (Manu, 1996) et qui occupe des sites pouvant être occupés par des bases échangeables.

Wendt & al (1993), ont d'ailleurs prouvé la relation illustrée à la Fig 3.5 entre rendement en grain et le logarithme du taux d'aluminium échangeable dans le sol.

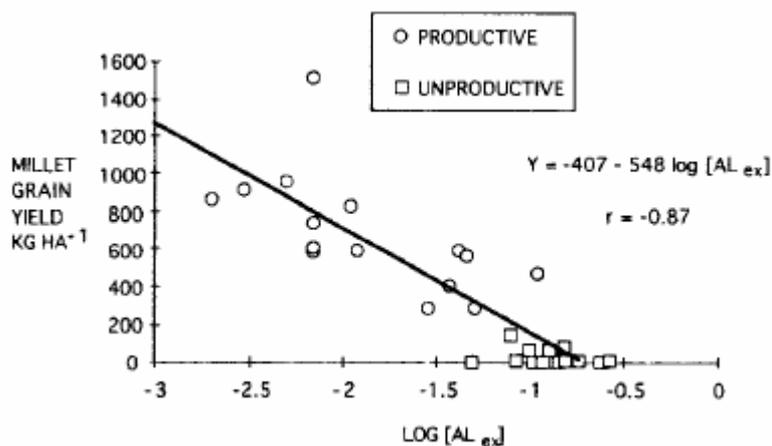


Fig 3.5 : relation entre rendement en grain (kg/ha) et le logarithme du taux d'aluminium échangeable, pour des sols productifs et non productifs (Wendt, 1993).

Sous les conditions d'acidité de ces sols, l'ion aluminique devient en effet soluble et forme des complexes avec les molécules organiques, freinant la minéralisation.

L'aluminium devient significativement soluble vers pH 5 - 5.5 (Van Wambeke, 1992).

C'est la gibbsite  $Al(OH)_3$  qui est stable en milieu modérément acide (pH>4,2), peu organique et pauvre en silice soluble (milieu bien drainé). L'ion ferreux forme également ce type de complexe, dont l'hématite  $Fe_2O_3$ , de couleur rouge est la forme dominante sous climat sahélien (Dufey,1999).

Reste un élément à préciser : ce n'est pas l'aluminium en tant que tel qui explique les variations de rendement du mil, mais l'action des oxydes d'aluminium (et de fer) sur le phosphore assimilable.

Comme nous l'avons vu auparavant, les oxydes d'Al (ainsi que les oxydes de fer) adsorbent fortement P, le rendant indisponible pour les plantes. C'est ce phénomène qui explique pour beaucoup la forte variation de croissance dans la culture du mil au Sahel (Kretzschmar & al., 1991 ; in Hafner, 1993).

## 2.7 Oligo-éléments et Micro-éléments

Les carences en oligo-éléments sont plus fréquentes sous les tropiques que partout ailleurs ; Charreau (1973 ; in Alzouma, 1990) a souligné leur importance pour une culture intensive mais estimait que la marge de concentration entre une carence et une toxicité est étroite.

## 3. Gestion de la matière organique

La plupart des sols des tropiques semi-arides africains dérivent de matériaux parentaux acides ou éoliens qui sont pauvres en argile et en éléments nutritifs.

Une grande part de la fertilité native est donc associée à la fraction de matière organique, une fraction qui est aussi très faible. Le taux d'accumulation de la matière organique dépend grandement des précipitations (Bationo, 1991).

Les effets bénéfiques de la matière organique sur les sols sahéliens sont nombreux et ont été résumés comme suit (Bationo, 1991) :

1. Amélioration de la macro structure du sol
2. Amélioration de l'infiltration et du contrôle de l'érosion
3. Prévention de la prise en masse du sol et de la battance
4. Augmentation de la capacité d'échange cationique. Cet effet est particulièrement intéressant pour les sols à culture de mil où la capacité d'échange cationique effective est plus fortement corrélée avec le contenu en matière organique du sol (Fig 3.6) qu'avec le contenu en argile. Bationo & al (1991d) ont rapporté que la ECEC (CEC effective) était plus liée à la matière organique qu'à l'argile au Sahel. De Ridder & Van Keulen (1990 ; in Bationo, 1991d) trouvèrent ainsi qu'une différence de 1g/kg de carbone organique provoquait une différence de 430 cmol/kg M.O. de la CEC.
5. Un stock accru d'éléments inorganiques lentement libérés. Etant donné que l'azote total dans le sol est dépendant de la matière organique du sol (Fig 3.7), la décomposition de la matière organique assure une libération constante d'azote en une durée pendant laquelle la culture peut l'utiliser. Ceci minimise les pertes d'azote et de nitrate facilement disponibles par lessivage.

6. Développement d'un environnement favorable pour l'activité microbienne dans le sol.
7. Prévention de la fixation des phosphates par les oxydes de fer et d'aluminium.
8. Certaines substances comme les quinones et les benzoquinones qui apparaissent lors de la dégradation de la matière organique peuvent jouer un rôle physiologique spécifique et peuvent augmenter la capacité d'absorption et la longueur des racines. (Poulain, 1980)
9. Augmentation de la résistance des racines à certaines maladies.

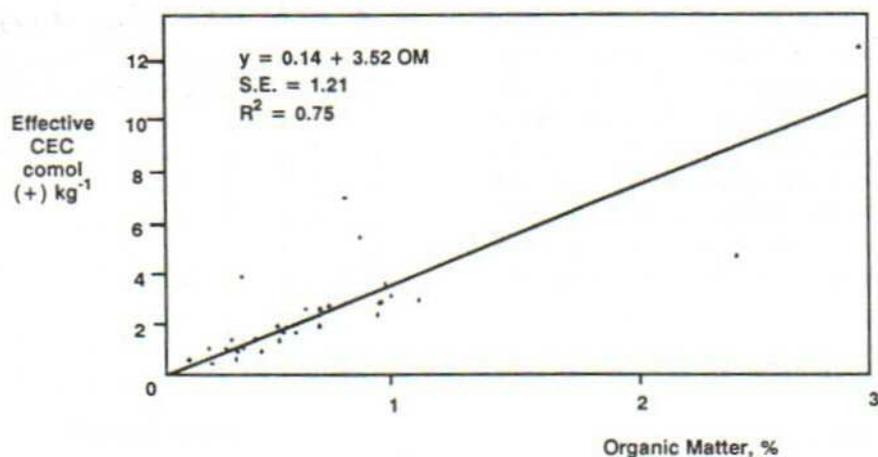


Fig 3.6 : corrélation entre CEC effective et matière organique (Bationo, 1991).

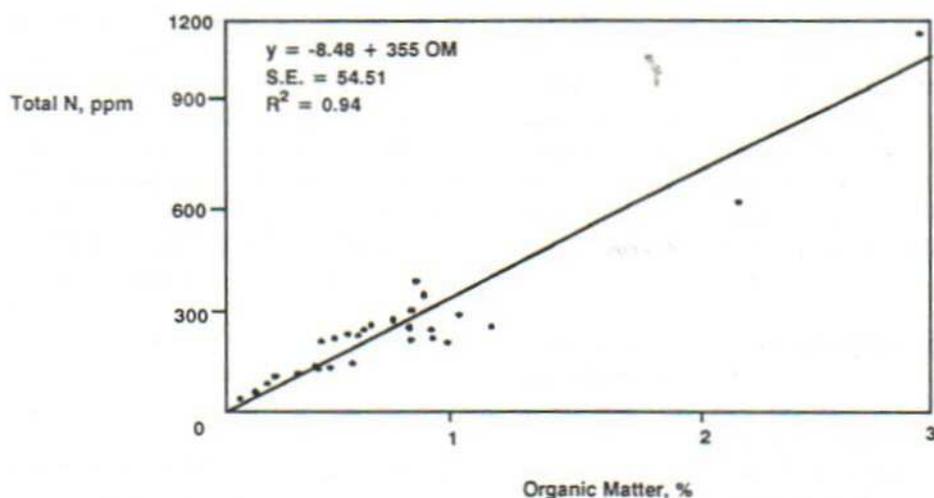


Fig 3.7 : corrélation entre N total et matière organique (Bationo, 1991).

Le taux de matière organique est aussi en corrélation avec le pourcentage d'argile dans le sol et est considérablement plus élevé dans des sols sur sites faiblement drainés que dans des sols

bien drainés ; il est considérablement plus faible sous culture que sous végétation naturelle non perturbée.

Dans les conditions considérées, de grandes quantités d'engrais organique sont nécessaires pour augmenter le pourcentage de matière organique du sol, car les taux de décomposition sont très élevés. Augmenter ce pourcentage est donc fastidieux, comme l'illustre cette expérience à Saria (Burkina Faso). Après 18 ans d'application annuelle de 60 t/ha de fumier animal, en combinaison avec 60 kg N, 45 kg P et 25 kg K par hectare, le contenu en carbone organique est passé de 2.5 g/kg à 6.6 g/kg (Pichot 1981 ; in de Ridder, 1990). Les taux de décomposition de la matière organique ont été estimés dans les conditions locales à 0.5 kg/kg.an pour la paille, 0.7 kg/kg.an pour le fumier animal et 0.8 kg/kg.an pour le compost (de Ridder, 1990).

Dans les tropiques semi-arides, le maintien de matière organique est une tâche très difficile car une très grande part des résidus est utilisée pour l'industrie villageoise traditionnelle ou comme aliment pour les animaux. Bien qu'une partie des éléments nutritifs va retourner au champ sous forme de fumier une fois la végétation digérée (Quilfen & Milleville, 1983 ; in Bationo, 1993), les animaux tendent à être gardés près des villages. Il en résulte un appauvrissement des terres qui s'accroît avec l'éloignement du village (Balasubramanian & Nnadi, 1980 ; in Bationo, 1993).

De même, la paille utilisée comme carburant est brûlée au village et les sols profitant de ces cendres sont les terres les plus proches du village (Bationo, 1993). De plus, l'activité des termites amène à une décomposition rapide des résidus restants alors que les hautes températures durant la saison sèche prolongée ainsi que les conditions humides lors de la saison de culture amènent à un taux de minéralisation de la matière organique extrêmement rapide (Birch, 1958 ; in Bationo, 1993). Ceci mène à un taux de matière organique très faible à l'équilibre (0.75%) dans ces sols sableux qui se traduit par une concentration faible en P organique.

Voici quelques usages locaux ayant un impact sur le turn-over de la matière organique. Certains de ces usages feront l'objet d'une étude plus approfondie par après.

### *Combustible domestique et brûlis*

Dans la savane sahélienne et soudanaise, la paille sèche est brûlée comme combustible domestique pour la cuisine. Si les cendres retournent à la terre, le sol est enrichi en cations. Le brûlis de champs est une pratique commune pour le nettoyer. Cependant, il en résulte une perte considérable de carbone et d'éléments nutritifs tels qu'azote et soufre. Notons également que la plupart des micro-organismes du sol, particulièrement les Rhizobia, sont détruits par la chaleur intense.

Charreau et Poulain (Charreau, 1964) estimèrent ces pertes à 20-40 kg N/ha et 5-10 kg S/ha. Les paysans voient le brûlis de champs comme un moyen de détruire insectes et maladies mais le brûlis fréquent amène également à la dégradation physique et chimique de ces sols (Charreau, 1971).

### *Alimentation du bétail*

Les fanes de légumineuses et les résidus de céréales sont utilisés comme alimentation du bétail mais certains éléments nutritifs se retrouvent dans les excréments. La rétention d'éléments nutritifs est différente selon le type d'animal. Balasubramanian et Nnadi (1980) estimèrent que la rétention de N provenant de l'alimentation est seulement de 4%-10% dans les troupeaux de bœuf et de 13%-28% dans les troupeaux de vaches laitières.

### *Compostage et production de fumier*

Le compostage et la production de fumier peut provoquer une diminution du rapport C/N dans les résidus de culture et par là réduire le processus d'immobilisation de l'azote qui s'observe généralement lorsque la paille est appliquée au sol.

Cependant, le manque d'eau durant la saison sèche, la forte demande de travail pour la préparation et pour le transport, la compétition pour les résidus de culture entre différents usages, le manque d'intégration de l'agriculture avec l'élevage et l'ignorance des bénéfices du compostage limite l'usage de ce système pour améliorer la fertilité du sol (Bationo, 1991).

### 3.1 Effet de la jachère sur la fertilité chimique

Traditionnellement, la fertilité des sols en Afrique de l'Ouest était maintenue grâce à l'abandon des cultures sur un sol dont la fertilité diminuait. Typiquement, une période d'au moins 7 années était nécessaire pour qu'un sol revienne à son niveau de fertilité initial (Charreau, 1972 ; in Esse, 2001), mais la pression due à la croissance démographique a provoqué une diminution des durées de jachères dans beaucoup d'endroits.

Pour idée, les jachères de durées comprises entre 10 et 30 ans permettent :

- L'enrichissement de la partie superficielle du sol en éléments minéraux et en carbone organique provenant de la couche herbacée et de feuilles, branches ou production de fruits des arbustes. Cet enrichissement est de l'ordre de 5-10 kg N/ha par année (Hiernaux, 1983 ; Krul & al., 1982, in Esse 2001).
- Le transfert de minéraux provenant de couches de sol plus profondes et leur recyclage avec la chute des feuilles.
- La capture de fientes d'oiseaux estimés à plus de 40 kg MS/ha par année contenant 2.2 kg N, 0.4 kg P et 0.7 kg K (Soumaré, 1995 ; in Esse 2001).
- Le dépôt de substantielles quantités de poussières d'Harmattan provenant du Sahara dont on a estimé la contribution à plus de 3 kg N/ha, 1 kg P/ha et 15 kg K/ha d'apport par an (Hermann & al., 1994 ; in Esse 2001).

### 3.2 Effet des résidus de culture sur la fertilité chimique

Malgré les faibles niveaux d'éléments nutritifs dans les sols sahéliens, les racines du mil explorent un grand volume de sol et sont donc capables de rassembler des quantités significatives d'éléments nutritifs dans les tissus de la plante. La quantité totale d'azote et de phosphore dans la plante de mil est réparti approximativement également dans les fractions de grain et de feuillage. Néanmoins, la majorité du K (92%), Ca (97%), Mg (90%) et S (75%) se trouve toujours dans la plante après la moisson (Balasubramanian & Nnadi, 1980 ; in Bationo, 1993) et représente une réserve nutritive significative pour la culture suivante si les résidus de culture sont laissés sur le champ.

Le recyclage organique de ces résidus est important pour trois raisons principales :

- Les quantités d'éléments nutritifs contenues dans ces résidus de cultures sont sept à huit fois supérieures que celles de ces éléments utilisés comme fertilisants inorganiques dans ces pays.
- Les résidus sont une source d'éléments chimiques sous forme de traces, absents des fertilisants traditionnels de type NPK.
- Les matériaux organiques et inorganiques ont un rôle complémentaire et leur usage simultané apporte de meilleurs rendements.

(Poulain, 1980)

L'application annuelle de résidus de culture augmente également le pH du sol et le contenu en cations échangeables (Kretzschmar & al., 1991 ; in Rebařka, 1994). Ces effets ont été attribués au recyclage des éléments minéraux et au piégeage des matériaux éoliens fertiles (Geiger & al., 1992 ; in Rebařka, 1994).

De par cette augmentation de pH du sol et du contenu en bases échangeables, l'application de résidus végétaux limite la saturation du complexe d'échange par l'aluminium (Bationo & al., 1987 ; Jones, 1976 ; Pichot & al., 1981 ; in Hafner, 1993). La toxicité aluminique n'altère pas la croissance du mil au Sahel (Kretzschmar & al., 1991 ; in Hafner, 1993), cependant nous savons que les oxydes d'aluminium adsorbant fortement P, la diminution de saturation en Al par les résidus de culture augmente la mobilité de P dans ces sols (Kretzschmar & al., 1991 ; in Hafner, 1993). Rappelons que le phosphore est l'élément nutritif le plus limitant pour le mil dans cette région (Bationo & al., 1990 ; in Hafner, 1993).

Réciproquement, le retrait de cette matière sèche peut mener à la dégradation physique et chimique rapide du sol et avoir des impacts sur les rendements (Pichot & al., 1981 ; in Bationo, 1993).

Un bémol cependant : les résidus de culture ont un effet résiduel très faible. Rebařka (1994) a ainsi montré que lorsque l'application de résidus de culture était omise après des années d'application, le rendement en matière sèche totale diminue énormément la première année et atteint la deuxième année un niveau équivalent aux rendements de champs n'ayant jamais connu l'application de résidus de culture.

### 3.3 Effet de la fertilisation inorganique sur la fertilité chimique

Des augmentations de rendements peuvent être atteintes grâce à l'application de fertilisation minérale uniquement (Bationo & Mokwunye, 1991 ; in Hafner, 1993). Avec l'utilisation d'engrais, des densités de semis plus importantes que celles observées en agriculture traditionnelle doivent être réalisées afin d'accroître l'efficacité de l'engrais (Bationo, 1991). A titre indicatif, une densité de semis d'environ 10000 poquets/ha et un apport d'engrais de l'ordre de 30 kg d'N/ha, 15 kg de P/ha et 25 kg de K/ha sont recommandés pour réaliser de bons rendements en année de pluviosité « normale » ou « bonne » (Hafner, 1992), les 25 kg/ha de K étant cependant fort discutés.

Cependant, sous les conditions environnementales sahéliennes (pluie incertaine, disponibilité faible en éléments nutritifs, sols sableux acides), avec l'application de fertilisant minéral uniquement le contenu en matière organique du sol décline, le pH du sol diminue et l'aluminium sature peu à peu le complexe d'échange.

En effet, le prélèvement d'éléments nutritifs par la culture et le peu de retour de ces éléments au sol peut causer une diminution de bases échangeables et l'acidification du sol, ainsi que l'augmentation d'Al échangeable, et finalement une diminution des rendements (Bationo & al., 1981 ; De Ridder and Van Keulen, 1990, in Hafner, 1993).

Un autre gros problème de l'application d'amendements inorganiques en culture de mil est la forte perte azotée, qui peut aller jusque 50%, comme nous l'avons vu dans la section concernant l'azote.

Avec l'application de résidus de culture (paille de mil) en combinaison avec des fertilisants minéraux, un niveau de production relativement haut peut être maintenu (Pichot & al., 1974 ; Vlek, 1990 ; in Hafner, 1993).

Il a été prouvé que les résidus végétaux provoquaient une bien plus grande croissance racinaire que l'engrais minéral. Ceci est dû à une stimulation de l'activité bactérienne dans la rhizosphère du mil, et donc la multiplication de bactéries fixatrices d'azote. Comme on l'a vu plus haut, ces bactéries provoquent une augmentation de croissance racinaire par synthèse de phytohormones (Hafner, 1993).

L'élément limitant à l'activité microbienne de la rhizosphère étant l'apport d'énergie par les exudats racinaires (Neyra & Döbereiner, 1977 ; in Hafner, 1993), l'ajout de composants riches en énergie avec un grand rapport C/N (par exemple pour la paille de mil, C/N>100/1) ne peut qu'exciter l'activité des bactéries fixatrices d'azote (Martin & al., 1989 ; in Hafner, 1993), et finalement la croissance racinaire et la prise d'éléments nutritifs grâce à la synthèse de phytohormones par ces bactéries (Hafner, 1993).

### **3.4 Effet du parcage sur la fertilité chimique**

Le recyclage du fumier (bouses de bovins) contribue également au renouvellement en matières organiques.

On distingue les trois pratiques d'application suivantes :

- Les animaux sont enfermés dans des concessions. Les bouses sont ramassées et transportées jusqu'aux champs. Le nombre d'animaux concernés est faible et le travail requis est élevé (transport par charrette ou sur la tête).
- Les animaux sont attachés sur les champs durant la nuit. Cette pratique, peu courante, exige de couper, poser et déplacer les piquets régulièrement.
- Les troupeaux passent la nuit dans les champs, soit en liberté, soit près d'un enclos où sont rassemblés les veaux et autour desquels se regroupent la plupart du bétail. En déplaçant les veaux, on assure la rotation du parc. Cette pratique de parcage extensif des animaux est la forme de fumure la plus pratiquée.

Même si il est évident que l'application de fumier n'ajoute pas de matière nutritive en considérant le système agro-pastoral comme un tout, mais est plutôt un moyen de transfert de carbone organique et d'éléments minéraux à différentes échelles (Hiernaux & al., 1997 ; Buerkert & Hiernaux, 1998 ; in Esse, 2001), la forte demande de fumier par les paysans se reflète tout de même dans l'élaboration d'arrangements avec les éleveurs itinérants qui échangent le fumier contre des grains ou des droits de pâture sur les champs de mil déjà moissonnés (Murwira & al., 1995 ; Brouwer & Powell, 1998 ; in Esse, 2001).

Suite au parcage, plusieurs effets positifs, similaires au paillage, ont été observés : apport en éléments minéraux et matière organique mais également une augmentation de la résistance à l'érosion éolienne et une diminution des croûtes d'érosion (De Rouw, 1997 ; Mc Intire, 1993).

Comme cité plus haut, l'apport de fumier par le bétail diminue avec l'éloignement du village. Ainsi, des taux de fumier de l'ordre de 10 Mg/ha par an ont été rapportés pour les aires confinées typiques de 10-20 m de diamètre (corrals) à proximité des espaces bâtis alors que des taux de 1.5 Mg/ha en moyenne sont relevés dans les espaces non confinés (Powell & William, 1993, in Esse, 2001).

Connaissant le faible pouvoir tampon des sols sableux acides dominants, cette distribution hétérogène de fumier contribue à une variabilité spatiale de la croissance de culture sur des distances relativement faibles (micro variabilité) souvent décrites comme étant typiques du Sahel (Brouwer & al., 1993 ; Buerkert & al., 1996 ; in Esse, 2001).

Cette application de grands taux de fumier peut mener à de grandes pertes par lessivage d'éléments nutritifs sur ces sols sableux ont conclu Brouwer et Powell (1995 ; in Esse, 2001) suite à un essai sous conditions contrôlées.

Sous des conditions de faibles pluies et de grande activité des termites, la plupart du fumier est dégradée très rapidement. Notons tout de même que sous conditions paysannes, l'accroissement de rendement en grains de mil par tonne de matière sèche de fumier appliqué varie de 15 à 86 kg (McIntire & al., 1992 ; in Esse, 2001). Comme dans le cas de résidus de récolte, des effets additifs sont observés lorsque le parcage est combiné avec un apport d'engrais minéraux (Mc Intire, 1993). Les contraintes majeures à l'application de cette technique sont la faible disponibilité en fumier ainsi que leur pauvre teneur en éléments minéraux (Bationo, 1998).

### **3.5 Micro variabilité spatiale de la croissance du mil**

La micro variabilité, définie par des ports de plantes irréguliers, ainsi que par des variations de matière sèche du système aérien sur de courtes distances, a été montré comme étant corrélé avec des faibles différences de disponibilité en éléments nutritifs, la micro topographie et la formation de croûtes locales (Geiger & al., 1992 ; Geiger & Manu, 1993 ; in Buerkert, 1995). Elle peut être également associée à la présence dans le passé d'arbres spécifiques ayant enrichi le sol en éléments nutritifs provenant de couches plus profondes du sol (Dancette &

Poulain, 1969 ; in Buerkert, 1995), et avec l'activité des termites (Brouwer & al., 1992 ; in Buerkert, 1995).

Cependant, le manque de compréhension claire de la micro variabilité, induite par le sol, dans la croissance du mil dans les sols sableux acides du Sahel se reflète dans les explications contradictoires du phénomène.

En se basant sur les simples corrélations entre la hauteur du mil et les résultats des analyses de sol, Scott-Wendt & al. (1988 ; in Buerkert, 1995) affirmât que la toxicité aluminique était la cause probable de la faible croissance du mil dans des petites zones limitées dans les champs (spots in the field).

Cependant, comme cité plus haut, Ahlrichs & al. (1991 ; in Buerkert, 1995) et Kretzschmar & al. (1991 ; in Buerkert, 1995) démontrèrent de façon concluante avec des cultures en sol et en solution, sous conditions contrôlées, que le mil est très tolérant à de hautes doses d'aluminium. Pris ensemble, les résultats de ces auteurs indiquent que la variabilité de disponibilité en P associée avec différents niveaux d'Al échangeable dans l'horizon de surface du sol devait expliquer une grande proportion des différences de croissance du mil.

Ceci a été soutenu par Wendt & al. (1993 ; in Buerkert, 1995), qui conclurent de leurs analyses dans des échantillons de l'horizon de surface de 19 sites productifs et improductifs au Niger que la variabilité spatiale de la croissance du mil était due à la sorption du phosphore par l'aluminium échangeable et par les oxydes de fer.

Hermann et al. (1994 ; in Buerkert, 1995) ont affirmé que la variabilité de croissance précoce du mil pouvait être liée à des différences dans le sol d'activité microbienne et de concentration en nitrates au début de la saison pluvieuse.

L'érosion éolienne peut ensuite contribuer à la micro variabilité en dénudant des surfaces de sol de sa partie constituée de matériau plus fertile et en le déposant autre part. (Chase & Boudouresque, 1987 ; Wendt & al., 1993 ; in Buerkert, 1995).

Geiger & al. (1992 ; in Buerkert, 1995) apportèrent des preuves supplémentaires de l'accroissement de fertilité dans des zones délimitées quand la poussière est prise au piège par des barrières mécaniques comme des résidus de culture. Dans les sols sableux acides du

Sahel, de petites différences localisées dans un seul élément nutritif, comme P, ou en matière organique, d'humidité ou température peuvent, en combinaison avec d'autres facteurs avoir un large impact sur la croissance du mil (Buekert, 1995).

Si nous ajoutons encore l'explication citée précédemment selon laquelle l'hétérogénéité d'application du fumier associée au faible pouvoir tampon de ces sols sableux acides, nous voyons que la micro-variabilité spatiale de croissance du mil est un phénomène complexe qui n'est pas explicable par un seul phénomène. Nous pensons que celle-ci est plutôt le résultat des effets additionnels des phénomènes pré-cités.

### 3.6 Arbustes et termitières

Les arbustes et les termitières ont un impact assez important sur la variabilité spatiale de la qualité de croissance du mil.

Dans la situation de pauvreté en éléments chimiques dans laquelle se trouvent les sols considérés, le moindre petit enrichissement peut avoir un impact sur la micro variabilité spatiale. Ainsi, les arbustes tels que le *Guiera Senegalensis* agissent sur cette micro variabilité spatiale en enrichissant localement le sol en matière organique et éléments nutritifs.

L'influence d'autres espèces arborescentes, comme *Faidherbia albida* a été mise en évidence par plusieurs auteurs (Jung, 1969 ; Charreau & Vida, 1965 ; in Alzouma, 1990) et comme *Acacia seyal* par Bernhard Reversat (1987 ; in Alzouma, 1990). Leur contribution est principalement attribuée à la chute des feuilles, des gousses et des petites branches.

Les termites peuvent avoir une influence positive sur la fertilité du sol en augmentant la matière organique du sol et le contenu en argile. L'activité des termites permet également une décomposition très rapide des résidus de culture, rendant les éléments chimiques rapidement disponibles pour la culture si elle est semée au bon moment (Bationo, 1991d). Cependant, le labour a été pointé du doigt comme cause de diminution de l'activité des termites (Pieri 1989, Kooyman & Onck 1987 ; in Brouwer, 1992).

## IV. Matériels et Méthodes

### 1. Zone d'étude : le Fakara

#### 1.1 Situation

Les terroirs concernés par ce mémoire sont situés dans une petite région naturelle de l'Est du Niger, le Fakara, qui couvre à peu près 6000 km<sup>2</sup> entre les vallées confluentes du Fleuve Niger à l'Ouest et la vallée fossile du Dallol Bosso à l'Est (Fig 4.1). Le site de l'étude couvre 500 km<sup>2</sup> (inclus entre 13°20' – 13°35' Latitude Nord ; 2°35' – 2°52' longitude Est) du canton de Fakara dont la capitale administrative est la petite ville de Dantiandou (lat N 13°24'45'', long E 2°45'23'') située à 75 km à l'Est de la capitale, Niamey. La zone d'étude comprend 10 villages mais s'étend aussi sur les terres d'autres villages. En 1998, environ 6000 individus vivaient dans la zone d'étude.

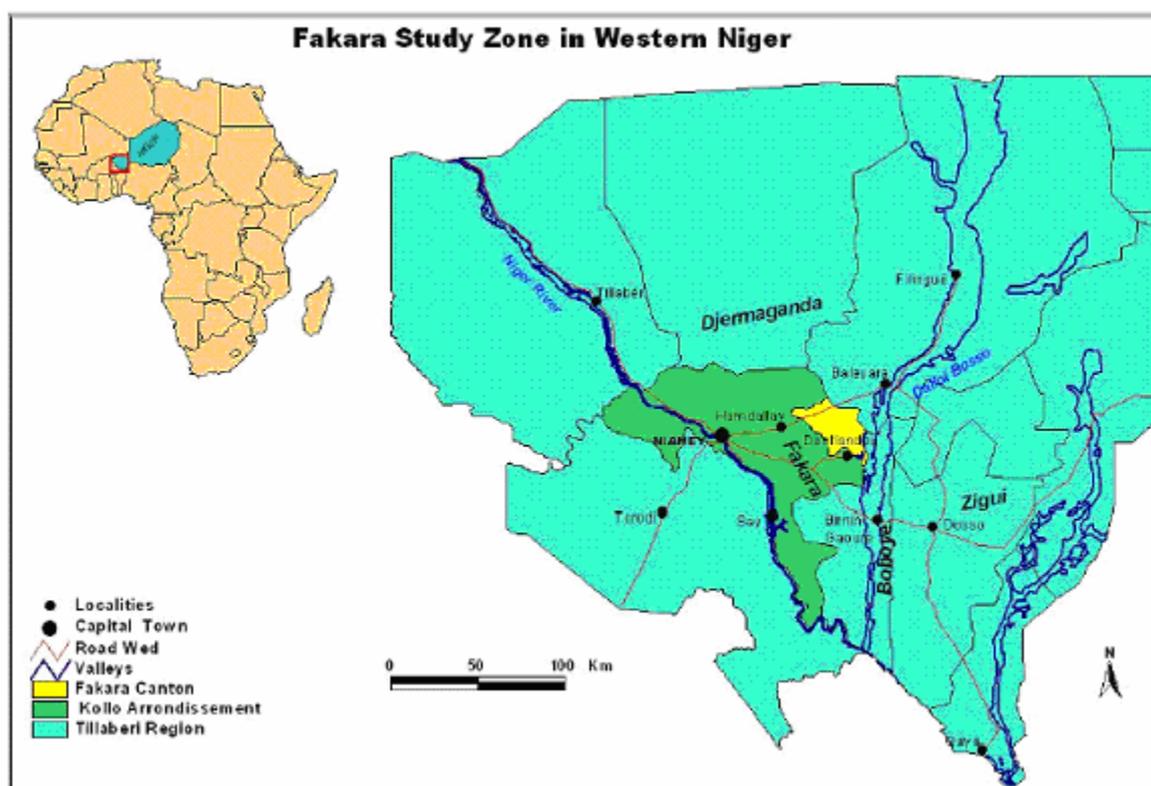


Fig 4.1 Situation du Fakara au Niger

## 1.2 Climat

Le **climat** du Fakara est typiquement tropical semi-aride avec une pluviosité annuelle moyenne de 560 mm (1905-1989) et de 495 mm seulement pour la période allant de 1968 à 1989. Le Fakara fait partie de la zone bio-climatique centrale du Sahel. Les pluies tombent en été quand les jours sont longs, les températures ambiantes sont élevées et l'évapotranspiration potentielle haute, comme les présente le Tableau 4.1 (d'après Sivakumar, 1993).

*Tableau 4.1 : Moyennes mensuelles des températures maximales et minimales (les chiffres de la rangée du haut sont relatifs à la température maximale et ceux de la rangée du bas sont relatifs à la température minimale) et évaporation potentielle mensuelle à Niamey-ville.*

|           | Moyenne mensuelle des températures maximales de l'air (°C) | Moyenne mensuelle des températures minimales de l'air (°C) | Evaporation potentielle (mm) |
|-----------|--|--|------------------------------|
| Janvier   | 33.4   | 15.9   | 173.3                        |
| Février   | 35.9   | 18.7   | 186.5                        |
| Mars      | 39   | 22.8   | 216.3                        |
| Avril     | 40.9   | 26.3   | 224.2                        |
| Mai       | 39.9   | 27.4   | 238.4                        |
| Juin      | 36.9   | 25.4   | 200.5                        |
| Juillet   | 33.7   | 23.6   | 186.5                        |
| Août      | 32.1   | 22.9   | 173.8                        |
| Septembre | 33.9   | 23.3   | 176.2                        |
| Octobre   | 37.3   | 23.8   | 187.2                        |
| Novembre  | 36.4   | 19.3   | 167.2                        |
| Décembre  | 32.9   | 16.4   | 163.5                        |

La distribution des pluies est strictement monomodale, centrée sur le mois d'août, avec une saisons des pluies de 4 à 5 mois. La distribution des pluies au Sahel est souvent décrite comme 'erratique'. En effet, le schéma saisonnier de ce système de mousson est très régulier, mais la distribution spatiale et temporelle des pluies durant la saison des pluies est hautement irrégulière et imprévisible.

### 1.3 Pédologie et topographie

Les propriétés chimiques des sols, leur texture, leur acidité, leur teneur en matières organique et en nutriments dépendent de l'âge du dépôt et du nombre, de la durée et de l'étendue des périodes humides et sèches qui se sont produites depuis qu'ils ont été mis en place. Les sols diffèrent dans le paysage mais ils tendent tous à avoir une faible teneur en matière organique et une structure faible. La capacité d'échange cationique, variant en relation avec la teneur en argiles, souvent très basse, est habituellement non saturée. Les couches de surface sont acides et pauvres en azote et phosphore solubles (Tableau 4.2). La recherche extensive a confirmé que la déficience des sols en nutriments limite la productivité des prairies et des cultures au Sahel.

*Tableau 4.2 : types de sols principaux du Fakara et caractéristiques principales de topographie, texture et propriétés chimiques (Hiernaux 2004)*

|                                 | Arenic<br>Gleysol | Gleyic<br>Arenosol  | Leptic<br>lixisol  | Arenic<br>Cambisol | Arenic<br>lixisol | Ferralic<br>arenosol | Skeletal<br>leptosol |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| Topography                      | Valley            | valley              | down-<br>slope     | flats              | mid-slope         | up-slope             | plateau              |
| Land form                       | river<br>bed      | alluvial<br>deposit | erosion<br>surface | colluvial<br>fan   | sand<br>deposit   | eroded<br>deposit    | plateau<br>cliff     |
| Depth (cm)                      | > 300             | > 300               | 20 to 80           | > 300              | > 300             | 10 to 50             | 0 to 10              |
| Color (0-20)                    | 10YR5/6           | 5YR 5/8             | 7.5YR3/4           | 10YR6/4            | 7.5YR4/6          | 5YR5/6               | 7.5YR 5/6            |
| <i>Texture at 0-30 cm depth</i> |                   |                     |                    |                    |                   |                      |                      |
| gravels (% total)               | 0                 | 0                   | 0                  | 0 to 5             | 0                 | 0 to 20              | 20 to 90             |
| Sand coarse%                    | 2-5               | 45-48               | 40-50              | 45-50              | 40-50             | 34-36                | 32-35                |
| Sand fine%                      | 35-40             | 40-45               | 35-40              | 38-42              | 40-50             | 50-53                | 32-38                |
| silt %                          | 30-35             | 2-3                 | 5-8                | 3-5                | 2-3               | 4-7                  | 5-8                  |
| clay %                          | 15-25             | 6-12                | 7-12               | 5-10               | 2-5               | 4-8                  | 12-17                |
| pH (water)                      | 5.5-6.3           | 5.0-5.3             | 5.0-5.5            | 4.5- 5.5           | 5.2-6.2           | 5.0-5.9              | 5.0-6.0              |
| CEC (meq/100g)                  | 5.0-7.0           | 1.5-2.0             | 2.0-2.5            | 1.0-2.0            | 0.8-1.2           | 1-1.6                | 2.0-2.5              |
| Total N (ppm)                   | 250-350           | 60-120              | 150-200            | 200-250            | 100-250           | 150-250              | 200-300              |
| Total P (ppm)                   | 2.5-5.0           | 1.5-2.0             | 1.2-2.5            | 1.5-2.0            | 1.5-3.5           | 0.7-1.5              | 2.5-5.5              |
| K (meq/100g)                    | 0.20-0.40         | 0.02-0.03           | 0.02-0.03          | 0.03-0.05          | 0.03-0.06         | 0.04-0.09            | 0.20-0.30            |
| OM (%)                          | 0.40-0.80         | 0.08-0.25           | 0.25-0.35          | 0.20-0.70          | 0.12-0.17         | 0.15-0.30            | 0.1-0.5              |

Les sols que nous allons étudier par la suite appartiennent à 3 types de la classification de la FAO : arenic Lixisol, arenic Cambisol et ferralic Arenosol.

Les sols de type arenic Lixisol sont des sols ferrugineux lessivés et faiblement différenciés. Ils correspondent aux Psammentic Haplustalfs sableux dans la classification américaine.

Il s'agit de sols de mi-pente d'une profondeur de plus de 300 cm.

Les sols de type arenic Cambisol sont des sols d'apport peu évolués, ayant un faciès ferrugineux sur colluvions. Leurs correspondants dans la classification américaine sont également les Psammentic Haplustalfs. Ce sont des sols présents au bas des pentes et ayant une profondeur de plus de 300 cm également.

Les sols de type ferralic Arenosol sont des sols ferrugineux peu lessivés, évolués et se trouvant surtout sur plateaux. On les appelle Loamy sands Psammentic Paleustalfs dans la classification américaine. Leur situation est sur le haut des pentes, et leur profondeur est très faible : de 10 à 50 cm.

Comme le montre le Tableau 4.3, en plus de la faible pluviométrie présente sur le site, les principaux types de sol concernés par l'étude sont victime d'une infiltration très importante et d'un pouvoir de rétention assez restreint.

Tableau 4.3 : paramètres hydriques des principaux types de sol du Fakara (Hiernaux ; 2004)

| Soil Types         | Run-off ratio % | Water retention |         | Infiltration rate mm h <sup>-1</sup> |
|--------------------|-----------------|-----------------|---------|--------------------------------------|
|                    |                 | pF 2.5          | pF 4.2  |                                      |
| Skeletal leptosols | 52              | -               | -       | 8-70                                 |
| Ferralic arenosols | 85              | 3-4             | 1.6-2.0 | 5-120                                |
| Arenic lixisols    | 30              | 2-3             | 1.3-1.6 | 300-600                              |
| Arenic cambisol    | 25              | 3.5-4.5         | 2.5-3.0 | 300-600                              |
| Leptic lixisol     | 60              | 4-6             | 2-3     | 5-120                                |
| Gleyic arenosol    | 20              | 2-3             | 1.2-1.5 | 300-600                              |
| Arenic gleysols    | 0               | -               | -       | 8-30                                 |

## 2. Recherche des parcelles

Deux types de parcelles seront recherchés par enquêtes de terrain. Le premier type de parcelles concernera l'étude de la variabilité de fertilité chimique inter-parcellaire et intra-parcellaire.

Ces parcelles devront répondre à certaines conditions :

- Les sols correspondront au type *arenicLlixisol* (sols ferrugineux lessivés faiblement différencié)
- Ces parcelles auront connu une jachère d'une durée de 10 ans ou plus
- Depuis la fin de la jachère, aucune fertilisation n'aura été utilisée

De plus, les parcelles seront recherchées autour de trois villages du terroir du Fakara, et l'échantillon ne sera prélevé que pour l'horizon de surface (0-20 cm de profondeur). Dans la mesure du possible, 6 parcelles devront être trouvées par village, et la durée de la mise en culture ne devra être identique que pour 2 parcelles au maximum, soit 18 parcelles différentes. Les échantillons concernant les études inter- et intra-parcellaires seront prélevés sur les mêmes parcelles.

Le deuxième type de parcelles concernera l'étude de la variabilité chimique au niveau régional.

Elles devront répondre à d'autres conditions que celles de la première recherche :

- Les sols correspondront aux types *arenic Lixisol*, *arenic Cambisol* et *ferralic Arenosol*.
- Pour chaque type de sol, trouver des parcelles avec des pratiques de fertilisation différentes (pas de fertilisation, fertilisation par parcage, fertilisation par fumure transportée, fertilisation par engrais).

Contrairement aux parcelles de la première recherche, celles-ci seront recherchées sur l'ensemble du territoire du Fakara et les échantillons seront prélevés dans deux horizons différents (entre 0 et 20 cm, et entre 20 et 50 cm de profondeur). 5 parcelles devront être

trouvées par type de sol et par type de pratique de fertilisation, soit un total de 60 parcelles dans lesquelles seront prélevés des échantillons à deux profondeurs différentes.

## **2.1. Enquêtes de terrain**

Deux campagnes d'enquêtes ont été réalisées. La première, centrée sur les villages de Banizoumbou, Tigo-Tegui et Kodey avait pour objectif la recherche de parcelles de mil ayant subi une jachère de longue durée et n'ayant pas connu de fertilisation depuis. C'est de ces parcelles que proviendront les échantillons sur lesquels nous étudierons la variabilité intra parcellaire et inter parcellaire.

Ensuite, une enquête d'envergure a été effectuée dans une majorité des villages du Fakara afin de déterminer les parcelles de mil répondant aux différents types de fertilisation recherchés, à savoir la fertilisation par parcage, par fumure transportée, par engrais ainsi que les parcelles non fertilisées.

Ces enquêtes permirent en détail :

- de connaître l'historique de la parcelle, à savoir les fertilisations employées lors des trois dernières saisons,
- de connaître la durée et l'année de la dernière jachère,
- d'estimer la distance au village, ce qui est utile pour estimer à son tour le niveau de fumure éventuellement utilisé
- d'estimer la couleur du sol, et donc de restreindre le nombre de parcelles potentiellement intéressantes

Cette deuxième série de parcelles constituera la base d'étude pour l'analyse régionale du Fakara.

Une bonne centaine d'agriculteurs fut interrogée durant la période couvrant les deux campagnes. Durant celles-ci, les mêmes questionnaires furent employés (voir Annexe 1).

Si une parcelle semblait intéressante, la vérification du type de sol était effectuée sur place avec un Munsell puis l'échantillon était éventuellement prélevé.

Le Munsell est un atlas reprenant l'ensemble des couleurs des sols. Le système de classement est en fait un système d'indices de couleurs désignant trois variables : la teinte, la luminosité et la saturation. Cela aide à l'identification d'un sol, par comparaison de sa couleur, identifiée au moyen de l'atlas, avec les couleurs de profils types décrits dans la littérature.

## 2.2. Parcelles sélectionnées

Le Tableau 4.4 reprend l'ensemble des parcelles sélectionnées pour l'étude inter- et intra-parcellaire.

*Tableau 4.4 : informations concernant les parcelles, dont proviennent les échantillons sujets à l'étude inter- et intra-parcellaire*

| échantillon | Village     | Nom du paysan       | Durée de la jachère | année de mise en culture |
|-------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| inter 1     | Kodey       | Amani Gibo          | 10 ans              | 2000                     |
| inter 2     | Kodey       | Abdou Mamou         | >10 ans             | 2001                     |
| inter 3     | Kodey       | Abab Kali Amadou    | >10 ans             | 2003                     |
| inter 4     | Kodey       | Ibrahim             | 8 ans               | 2003                     |
| inter 5     | Kodey       | Bachirou Hanberi    | 8 ans               | 2003                     |
| inter 6     | Kodey       | Imma Gimo           | 7 ans               | 2004                     |
| inter 7     | Banizoumbou | Moussa 2            | 4 ans               | 2001                     |
| inter 8     | Banizoumbou | Issaka Diaro        | 11 ans              | 2002                     |
| inter 9     | Banizoumbou | Moussa 1            | 10 ans              | 2003                     |
| inter 10    | Banizoumbou | Hamma Garba         | 7 ans               | 2004                     |
| inter 11    | Banizoumbou | Hassam Gibo         | 6 ans               | 2002                     |
| inter 12    | Banizoumbou | Abdou<br>Youssambou | >10 ans             | 2004                     |
| inter 13    | Tigo Tegui  | Mayaki Aruna        | 7 ans               | 2003                     |
| inter 14    | Tigo Tegui  | Moussa Moumouni     | 12 ans              | 2002                     |
| inter 15    | Tigo Tegui  | Adamou Hiarou       | 6 ans               | 2002                     |
| inter 16    | Bagoua      | Moumouni Amani      | 5 ans               | 2004                     |
| inter 17    | Bagoua      | Abdoulai Amani      | 4 ans               | 2002                     |
| inter 18    | Tigo Tegui  | Moussa Amadou       | 5 ans               | 2003                     |

La même notation des parcelles sera utilisée dans l'analyse des résultats, et nous utiliserons une notation correspondante pour les échantillons de l'analyse intra-parcellaire (intra1A = l'échantillon de sol de bonne croissance provenant de la même parcelle que l'échantillon

inter1). Les lettres A, B et C y seront ajoutés pour décrire la qualité de croissance concernée par l'échantillon de l'étude intra-parcellaire (A= bonne croissance, B= croissance moyenne, C= faible croissance).

Nous pouvons conclure du tableau 4.4 que les durées de jachère n'atteignaient que rarement 10 années. Il a donc été décidé de sélectionner les parcelles ayant connu une jachère la plus longue possible (autour de 7 ans finalement) mais les durées de mise en culture n'ont pas exactement répondu aux durées théoriques de 1, 3 et 5 ans ou plus. En conséquence de la grande hétérogénéité des durées de croissance et de la faible gamme d'années de mise en culture, aucune étude concernant l'effet de la durée de jachère ou de mise en culture sur le rendement ne sera effectuée dans ce mémoire. Lors de la prise d'échantillons correspondants à l'étude intra-parcellaire, nous avons observé que les zones de bonne croissance étaient souvent situées à proximité d'arbustes (*Guiera Senegalensis*) ou de termitières.

Concernant l'étude régionale, la recherche s'est finalement concentrée autour de Tigo-tegui et des villages alentours (Bagoua, Deytégui, Bokossay, Falanga, Katanga, Yérimadey, Korto, Tondikiboro, etc) car le territoire du Fakara apparaissait comme trop vaste par rapport au nombre d'échantillons à prélever. Les informations concernant les parcelles sélectionnées pour cette étude régionale se trouvent en Annexe 2 (nom du paysan, village, mode de fertilisation, type de sol). Les données ne renseignent pas sur une éventuelle jachère et l'année de mise en culture, informations qui ne concernaient pas cette étude régionale. Voir également la localisation de tous les lieux d'échantillonnages, sur la carte des sols du Fakara page suivante (Hiernaux, 2004). Nous pouvons y remarquer que le type de sol associé à un échantillon ne correspond pas toujours au type de sol du lieu tel que présenté par la carte de Hiernaux. Nous reviendrons à ce problème ultérieurement.

### **2.3. Prélèvement des échantillons**

Pour chaque parcelle sélectionnée, et pour chaque profondeur, un échantillon composite y fut prélevé. En bref, cela signifie que dans un premier temps, 5 échantillons ont été prélevés à des points de la parcelles choisis aléatoirement et éloignés les uns des autres d'au moins 30 mètres puis soigneusement mélangés pour ne finalement conserver qu'un échantillon d'une



centaine de grammes. Nous avons effectué l'échantillonnage de la sorte afin de limiter au maximum les éventuels effets de la micro variabilité spatiale très courante dans le Fakara.

Concernant plus spécifiquement l'étude intra-parcellaire, un échantillon composite fut prélevé par strate de croissance du mil de la parcelle. Trois strates de croissance ont été retenues :

1. croissance bonne à très bonne = densité élevée de plants et plants de grande taille (env. 2m de haut), nombreux épis en fleur;
2. croissance moyenne = moindre densité de plants et taille moindre des plants de mil (env. 1-1.5 m de haut); épis moins beaux mais tout de même potentiellement productifs;
3. croissance mauvaise à très mauvaises = très faible densité de plants ou zones nues, taille très faible des plants (< 0.5 m), épis absents ou non fertiles.

Afin de discriminer au mieux possible ces différences de croissance, nous avons attendu le mois d'août pour prélever les échantillons, période à laquelle le mil atteint 2m et plus de hauteur pour les meilleurs spécimens.

Les échantillons ont été séchés à l'air assez rapidement après leur prise, afin d'éviter de trop grosses pertes d'azote par volatilisation.

Enfin, toutes les parcelles dans lesquelles sont prélevés des échantillons sont localisées à l'aide d'un GPS.

### **3. Analyse chimique des échantillons**

Les analyses suivantes ont été effectuées sur les échantillons : Bases échangeables, pH eau et pH KCL, conductivité électrique, acidité d'échange, aluminium échangeable, phosphore assimilable par P-Bray 1, carbone et azote total. De plus, l'analyse de la granulométrie a été faite pour quelques échantillons.

### 3.1. CEC

On appelle capacité d'échange (ou capacité d'échange cationique = CEC) d'un horizon ou d'un échantillon, la quantité totale de cations, par unité de masse, que celui-ci peut retenir sur son complexe adsorbant, à un pH donné (Blaize 1988).

Les minéraux phylliteux et les matières organiques humifiées présentent des propriétés colloïdales et des charges négatives, c'est pourquoi le « complexe argilo-humique » a la propriété de retenir des cations provenant de la solution du sol. Mais ces derniers ne sont retenus que par des forces électrostatiques, relativement faibles, et demeurent donc échangeables.

On peut distinguer deux origines différentes à la capacité d'échange de la phase solide minérale:

- des déficits de charge permanents provoqués par des substitutions isomorphiques dans les réseaux cristallins, un cation étant remplacé par un autre de valence inférieure. Ces substitutions peuvent être en position tétraédrique ( $Si^{4+}$  remplacé par  $Al^{3+}$  ou  $Fe^{3+}$ ) ou octaédrique ( $Al^{3+}$  ou  $Fe^{3+}$  remplacés par  $Mg^{++}$  ou  $Fe^{++}$  ou  $Li^+$ ). Ce type de substitution est la cause essentielle des fortes CEC caractéristiques des minéraux 2/1 et notamment des smectites.
- Des charges négatives se développent sur toutes les surfaces des particules, consécutives à l'hydratation ou à l'ionisation de groupements fonctionnels. Ces charges sont variables selon le pH du milieu. Ce type de charge est fortement influencé par la présence d'oxydes, oxyhydroxydes, ou substitutions amorphes de Fe et Al.

En ce qui concerne la CEC des matières organiques, celle-ci est due à des groupements  $-COOH$  et autres groupements fonctionnels périphériques des macromolécules organiques. D'une façon générale, tous les auteurs reconnaissent que la CEC par unité de masse des matières organiques est plus élevée que celle des minéraux argileux. Les chiffres proposés varient de 100 à 500 cmolc/kg selon les auteurs. Cette grande dispersion des résultats s'explique en partie par les éléments suivants (Blaize, 1988):

- La CEC augmente (dans certaines limites) avec le degré d'humification
- La CEC dépend du degré d'oxydation de la matière organique : plus il est fort, plus il y a de groupes carboxyles acides. Ce degré d'oxydation dépendrait lui-même des conditions de pH qui ont régi la formation de l'humus.
- Les méthodes d'isolement et les procédés de destruction de la matière organique, les techniques de détermination de la CEC peuvent avoir introduit de nombreuses erreurs au cours de la détermination de la CEC.

Les valeurs de CEC de la matière organique obtenues par divers auteurs, de façon indirecte, et sans séparer matière minérale et matière organique, sont plus faibles, de l'ordre de 150 à 300 cmolc/kg (Blaize, 1988).

La détermination de la CEC est complexe et, nous venons de le voir, la valeur de la CEC varie selon les conditions opératoires. C'est pourquoi nous allons plutôt utiliser une méthode consistant à déterminer l'acidité d'échange et les bases échangeables, et d'en déduire la capacité d'échange effective (ECEC).

$$ECEC = Ca^{++} + Mg^{++} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} + H^+$$

Cette méthode est plus satisfaisante en sols acides (Blaize 1988).

### 3.2. Bases échangeables

$Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  ont été dosés dans les solutions d'extraction par l'acétate d'ammonium. Au vu du nombre d'échantillons à analyser, le calcul de la ECEC a été préféré à celui de la CEC, puisque l'acidité d'échange (et l'aluminium) devait de toute façon être calculé.

Nous avons utilisé la méthode de la percolation de l'acétate d'ammonium ( $CH_3COOH$  1N à pH 7) sur colonnes de percolation (méthode Schollenberger). Concernant les détails expérimentaux, nous avons utilisé 5 g de sol, une percolation en 6 fois de 25 ml d'acétate d'ammonium toutes les 20 minutes, et des colonnes de 30 cm de longueur (Soil Science, 1945).

Ensuite, le dosage des éléments a été effectué par spectrophotométrie d'émission atomique (AES) avec un plasma à couplage inductif (ICP). L'appareil est un Iris thermo Jarrel Ash.

### **3.3. pH et conductivité**

#### **3.3.1. pH eau**

La mesure du pH d'une suspension de sol dans l'eau rend compte de la concentration en ions  $H_3O^+$  à l'état dissocié dans le liquide surnageant. Ces ions sont en équilibre avec ceux présents à l'état non dissocié, fixés sur certains composants solides du sol tels que les minéraux argileux, la matière organique et certains composés dans lesquels l'aluminium est associé à des molécules d'eau et à des  $OH^-$ . Ces composés solides, par leur aptitude à fixer des ions  $H^+$  ou  $OH^-$ , tempèrent les variations de pH du sol. La résistance que celui-ci offre au changement est son pouvoir tampon. Celui-ci sera d'autant plus fort que le sol possède une CEC importante, donc qu'il contiendra d'avantage d'argile et de matière organique.

Le pH eau est un mode d'expression de la concentration en ions  $H^+$  dans l'eau surnageant dans un bécher, après agitation de 5g de sol dans 25 ml d'eau distillée (Mc Lean, E.O. 1982). Cependant, suite à la pauvreté en composés solides précités dans nos sols, et à l'instabilité de la mesure conséquente, la mesure du pH eau a été effectuée 10 secondes après que le pH-mètre ait été plongé dans la solution surnageante.

#### **3.3.2. pH KCl**

Celui-ci a été calculé avec le même rapport sol/solution que pour le pH eau, soit 1/5, avec 5 g de sol et 25 ml de solution (Mc Lean, E.O. 1982). La lecture du pH KCL fut effectuée dès la stabilité du pH, c'est-à-dire assez rapidement, moins de 5 secondes après que le pH-mètre ait été plongé dans la solution surnageante.

L'équilibre dans l'eau (pH eau) ne rend pas compte de la totalité des ions acides (protons et ions alumineux) fixés sur la capacité d'échange du complexe argilo-humique. Par contre ces ions acides fixés, constituant l'acidité potentielle effective, ou plus simplement l'acidité

d'échange au pH du sol, peuvent être déplacés, par échange avec un ion tel que  $K^+$  d'une solution, non tamponnée, de KCl normal. On comprend que, par suite de cet échange ou déplacement des ions acides fixés, on observe très généralement un  $pH_{KCl} < pH_{eau}$  soit un  $\Delta pH = pH_{eau} - pH_{KCl}$  positif qui peut varier de 0.5 à 1.5 unité pH (Blaize ; 1988).

### **3.3.3. Conductivité électrique**

La conductivité a été calculée avec un rapport sol/solution de 1/5.

La méthode consiste à peser 5 g de sol, y ajouter 25 ml d'eau déminéralisée et mesurer à l'électrode une heure après, en ayant mélangé la suspension toutes les 20 minutes (Mc Lean, E.O. 1982).

### **3.4. Acidité d'échange et aluminium**

Comme pour les bases échangeables, nous avons utilisé les colonnes de percolation, mais cette fois avec 10 g de sol. Nous avons effectué le dosage de l'acidité et de l'aluminium par titrimétrie après percolation de 4 fois 25ml de KCl 1N. L'acidité est titrée par NaOH et l'aluminium en retour par HCl (Weaver; 1994).

### **3.5. Dosage du carbone et de la matière organique**

Il s'agit du carbone organique (carbone des carbonates exclu) exprimé en élément, en pour cent ou pour mille (g/100g ou g/kg de terre fine séchée à l'air).

Pour passer du taux de carbone organique au taux de matière organique totale, les laboratoires utilisent le coefficient multiplicateur 1.72. Celui-ci n'est pas parfaitement adapté à toutes les matières organiques (notamment forestières) mais on ne sait guère quel autre coefficient utiliser.

Par conséquent, il vaudra mieux raisonner sur le carbone (que l'on dose vraiment) plutôt que sur la matière organique que l'on estime de façon assez approximative.

Le carbone a été dosé grâce à un analyseur par combustion de la firme Thermofinnigan qui a également été utilisé pour le dosage de l'azote total.

Après le dosage du carbone sur les échantillons de l'étude intra-parcellaire, l'analyseur est tombé en panne. Nous avons continué le dosage du carbone sur une vingtaine d'échantillons grâce à la méthode de Walkley et Black (Soil sci., 1934). Cette méthode comporte une oxydation par voie humide réalisée par le bichromate de potassium en présence d'acide sulfurique concentré. Le bichromate en excès est titré par le sulfate ferreux en présence de diphénylamine utilisée comme indicateur d'oxydo-réduction (Soil Science).

C'est donc le carbone oxydable qui est dosé. La formule suivante peut ensuite être appliquée :

Carbone organique = carbone oxydable\*1.33

Cependant, suite au faible taux de carbone présent dans nos sols, le titrage s'est révélé très difficile et les erreurs de titrages trop importantes que pour continuer cette méthode. Voici pourquoi nous n'avons des données sur la matière organique que pour les échantillons de l'étude intra-parcellaire.

### **3.6. Dosage de l'azote total**

Le dosage de l'azote total a été effectué par le même appareil que le dosage du carbone organique, mais il a été rapidement interrompu car les taux d'azote total dans les échantillons en question étaient inférieurs à la limite inférieure de dosage de l'appareil.

### **3.7. Dosage du phosphore**

La méthode de dosage du phosphore utilisée fut la méthode P-1 Bray (Olsen, 1982).

Nous avons utilisé un rapport sol/solution d'extraction de 1/7 et au lieu de doser le phosphore extrait par colorimétrie, nous avons utilisé la même méthode de spectrophotométrie et le même appareil que pour le dosage des bases échangeables.

### **3.8. Analyse granulométrique**

Cette analyse a été effectuée pour les échantillons de 3 parcelles par type de sol, et ce pour les 2 profondeurs, soit 18 échantillons. Il s'agit des échantillons : cambiE1, cambi03, cambiE2, lixi P2, lixi F2, lixi F1, ferP4, fer01 et ferF2 (voir Annexe 3).

L'analyse granulométrique est une opération de laboratoire qui implique la dissociation complète du matériau pédologique jusqu'à l'état de particules élémentaires et donc la destruction totale des agrégats et fragments d'agrégats. Elle nécessite ainsi de supprimer l'action des ciments.

La matière organique doit tout d'abord être détruite au bain-marie, mais dans notre cas, suite au faible taux de matière organique, cette longue étape n'a pas été effectuée.

La fraction de sable est alors séparée des autres fractions texturales à l'aide d'un tamis de 50 microns. Un traitement aux ultrasons permet d'obtenir une bonne dispersion des particules qui préexistent dans l'échantillon étudié. Il sert donc à désagréger complètement les agrégats ce qui implique de détruire les « ponts » qui constituent le « complexe argilo-humique ».

Ensuite, en l'absence de ciments particuliers, une longue agitation dans l'eau suffit, en présence d'un sel dispersant, l'hexamétaphosphate de sodium.

Il faut ensuite vérifier qu'aucune floculation ne se produit (Blaize 1988).

## **4. Analyse de sensibilité du logiciel APSIM.**

Cette partie a pour but d'analyser la sensibilité du modèle de simulation de culture à ses paramètres internes. L'étude consiste en l'analyse de la variabilité de la modélisation, suite à des changements effectués sur des variables.

Dans notre cas, nous nous limiterons aux variables concernant le cycle de l'azote dans le sol. Ces variables sont : le pourcentage de carbone organique, le pH-eau du sol entre 0 et 2 m de profondeur (par tranches de 15 cm), la fraction microbienne du sol, la fraction inerte du sol et la quantité de nitrate et d'ammonium entre 0 et 2 m de profondeur également.

## 4.1. Le logiciel APSIM

Le simulateur de systèmes de production agricole (APSIM) est un modèle numérique à structure modulaire qui a été développé par le Agricultural Production Systems Research Unit (APSRU) en Australie. APSIM a été développé pour simuler les processus biophysiques dans les systèmes agricoles, en particulier lorsqu'il y a un intérêt dans les résultats économique ou écologique de pratiques culturales face à un risque climatique. Les modules de sol, plante et gestion de la culture du simulateur incluent un grand nombre de cultures, arbres et pâturages, processus du sol incluant le bilan hydrique, transformations de N et de P, pH du sol, érosion ainsi qu'une large gamme de contrôles de gestion de la culture.

APSIM a été employé dans une large gamme d'applications, y compris dans l'appui pour la prise de décision à la ferme, l'évaluation des prévisions saisonnières climatiques, l'analyse des enjeux de chaîne d'approvisionnements dans des activités d'agrobusiness, le développement de directives de gestion des déchets, l'évaluation des risques pour la prise de décision politique et comme guide d'activité de recherches et d'éducation.

APSIM est composé de :

- Un ensemble de modules biophysiques qui simulent des processus physiques et biologiques dans les systèmes agricoles ;
- un ensemble de modules de gestion qui permettent à l'utilisateur d'indiquer les règles prévues de gestion qui caractérisent le scénario en train d'être simulé et qui contrôlent la conduite de la simulation ;
- divers modules destinés à faciliter l'entrée des données dans le simulateur et la sortie des résultats de la simulation ;
- un moteur de simulation qui conduit le procédé de simulation et commande tous les messages passant entre les modules indépendants.

La « structure » d'APSIM est représentée à la Fig 4.2.

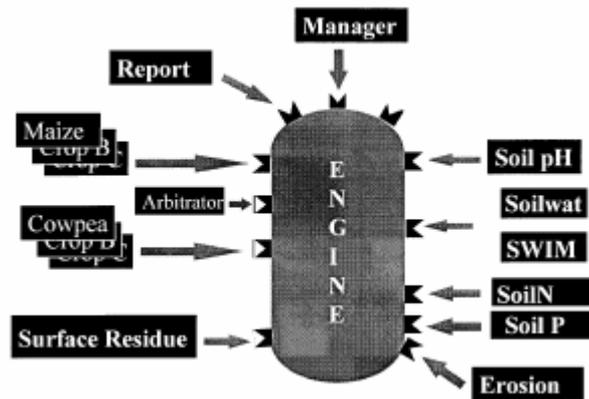


Fig 4.2 : représentation des modules d'APSIM (Keating 2003)

En plus de ces éléments scientifiques et d'infrastructure, APSIM inclut également :

- diverses interfaces d'utilisateur pour la construction, l'essai et l'application (par exemple APSFRONT, l'APSIM-Explorateur modèle, APSWIZ),
- diverses interfaces et outils associés à des bases de données pour la visualisation et pour l'analyse du rendement de simulation (par exemple APSGRAPH, APSIMOutlook),
- divers outils de modèles de développement, d'essai et de documentation (par exemple APSEUDO, APSTOOL) et
- un service de documentation relié à internet.

Comme APSIM inclut une structure générique de simulation, il ne peut seulement être appliqué que dans les situations où les modules biophysiques appropriés sont disponibles. À cet égard, les possibilités d'APSIM sont plutôt développées pour des systèmes de culture, avec des modules de rendement disponibles pour la majorité des graminées et des cultures à fibre poussant dans les secteurs tempérés et tropicaux.

La conception fortement modulaire d'APSIM a permis d'établir facilement des liens aux composantes de modèles développées par d'autres groupes (Jones & al., 2001 ; in Keating 2003).

#### **4.1.1. Utilisation des données**

Une simulation APSIM est configurée en spécifiant les modules à utiliser dans ladite simulation et les données nécessaires à ces modules. Typiquement, les modules nécessitent les données d'initialisation et les données au fil du temps de la période simulée. Les données d'initialisation sont habituellement classées dans des données génériques (qui définissent le module pour toutes les simulations). Les paramètres typiques au site sont les caractéristiques du sol pour le module sol, les mesures du climat pour les modules météo, les caractéristiques de surface du sol et la définition des résidus de surface. La gestion de culture est indiquée en utilisant un langage simple définissant un ensemble de règles, de calculs et de messages aux modules qui sont utilisés pendant la simulation.

Un fichier de configuration stipule les modules à utiliser pendant la modélisation et un fichier de contrôle spécifie chaque simulation avec les fichiers de données associés et les noms de sections pour que chaque module localise ses données.

#### **4.1.2. Exécution du software.**

Les modules d'APSIM mettent en application un procédé spécifique de simulation et communiquent avec d'autres modules par l'intermédiaire d'un moteur central de simulation.

Les modules sont complètement séparés les uns des autres, et chacun est responsable de sa propre lecture de paramètres et de sa configuration interne, et peut être écrit dans n'importe quel langage de programmation.

L'utilisateur a la possibilité de brancher différentes combinaisons de modules ensemble afin de configurer APSIM pour différentes simulations.

Le moteur de simulation est un simple système dont la fonction unique est de passer des messages d'un module de source donné à sa destination. La communication directe de module à module n'est pas permise. Les utilisateurs ont la capacité de configurer avec précision une simulation donnée, leur permettant de choisir le niveau du détail approprié.

Voici une description du fonctionnement des modules concernés par cette étude de la sensibilité du logiciel aux paramètres internes du cycle de l'azote du sol.

### 4.1.3. Module SoilN

Ce module décrit les dynamiques de l'azote et du carbone dans le sol. Les transformations considérées dans chaque couche de sol sont illustrées à la Fig.4.3.

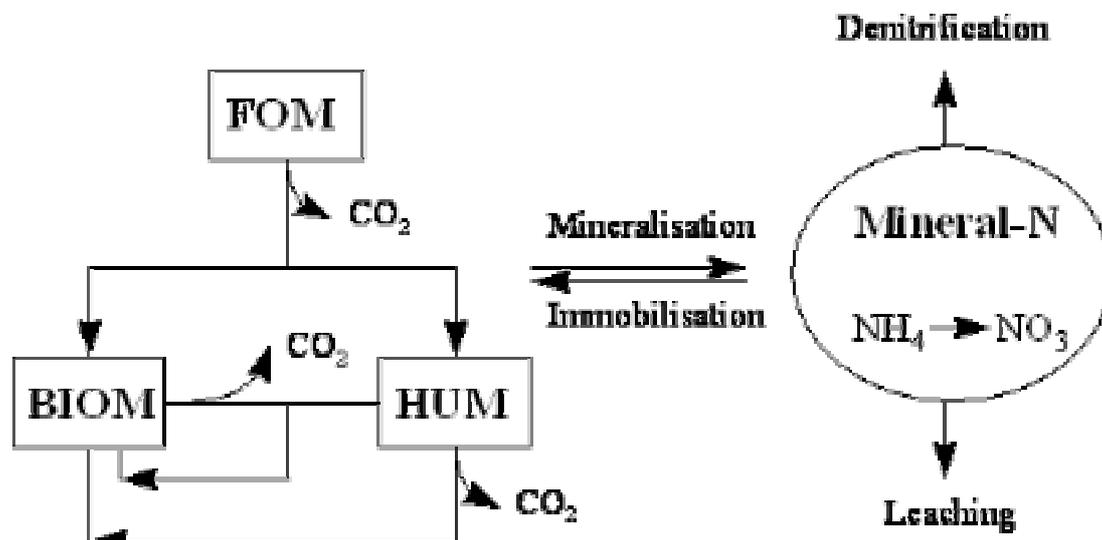


Fig 4.3 diagramme des transformations des dynamiques de l'azote et du carbone dans chaque couche de sol

La matière organique du sol est divisée en 2 parties : la biomasse microbienne et ses produits (*biom* dans la Fig.4.3) et le reste de la matière organique (*hum* dans la Fig. 4.3.). Les flux entre les différents réservoirs sont calculés en terme de carbone, l'azote étant déterminé à partir du rapport C/N du réservoir en question. Les rapports C/N sont supposés constants au cours du temps. La décomposition des réservoirs *biom* et *hum* sont calculés comme des processus de premier ordre dont les taux constants peuvent être modifiés par divers facteurs incluant la température du sol et l'humidité de la couche. Le rapport C/N du réservoir *biom* est de 8 alors que celui de *hum* est un input. Le taux de décomposition du réservoir de matière organique (*fom* dans la Fig.4.3.) dépend également d'un rapport C/N.

La minéralisation de l'azote est déterminée comme une balance entre le relâchement d'azote durant la décomposition et l'immobilisation durant la synthèse microbienne et l'humification. Si l'approvisionnement d'azote minéral vers la demande est insuffisant, il y a un ralentissement de la décomposition. Les deux formes azotées nitrate et ammonium sont disponibles pour l'immobilisation, mais l'ammonium est utilisé préférentiellement.

De la décomposition de tout réservoir de matière organique résulte un relâchement de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et le transfert de carbone vers les réservoirs *biom* et *hum*.

Les flux sont déterminés à partir de coefficients d'efficacité, représentant la proportion de carbone retenu dans le système, et la fraction du carbone retenu qui est synthétisé dans le réservoir *biom*. Quand *biom* se décompose, il y a un cycle interne de carbone (les microorganismes se nourrissent de produits microbiens).

A l'initialisation du programme, les quantités de *hum* et *biom* dans chaque couche sont calculés à partir des inputs (carbone organique, fraction inerte du pool humique, fraction microbienne du pool humique). Pour que les taux de décomposition de la matière organique diminuent avec la profondeur de la couche de sol, une partie du réservoir *hum* est considérée comme étant non susceptible à la décomposition : il s'agit de la fraction *finert* dont la valeur augmente avec la profondeur. *Fbiom* est la fraction du carbone sujette à la décomposition.

La décomposition du réservoir *fom* dépend de 4 paramètres :

- la fraction de lignine, de cellulose et de carbohydrates de la matière organique fraîche
- un facteur d'humidité du sol
- un facteur de température du sol
- le rapport C/N

La décomposition des réservoirs *hum* et *biom* dépendent de leur importance, du facteur d'humidité et du facteur de température du sol.

La nitrification suit la loi de cinétique de Michaelis-Menten (formule 4.1) :

$$\boxed{\text{potential rate} = \text{nitrification\_pot} \times \text{NH4 ppm} / (\text{NH4 ppm} + \text{NH4\_at\_half\_pot})} \quad (\text{formule 4.1})$$

Avec potential rate, le taux potentiel de nitrification dans chaque couche de sol (mg N/kg sol/jour), NH4 ppm le taux d'ammonium présent dans le sol (mg/kg)

Les paramètres nitrification\_pot (mg N/kg soil/ day) et NH4\_at\_half\_pot (ppm) sont spécifiés dans le fichier SOILN ini file.

Ce taux potentiel est réduit suite aux actions de l'eau, du pH et de la température. En fait, c'est le facteur dont l'effet est le plus limitant qui est retenu. Il n'y a donc qu'un seul facteur qui joue (voir formule 4.2)

$$\boxed{\text{nitrification rate} = \text{potential rate} \times \min(\text{water factor}, \text{temperature factor}, \text{pH factor})} \quad (\text{formule 4.2})$$

Avec nitrification rate, le taux de nitrification de chaque couche de sol utilisé dans les calculs de flux (mg N/kg sol/jour).

Le taux de dénitrification a été paramétré comme étant une constante subissant les effets du taux de nitrate, de carbone actif, de l'eau et de la température (voir formule 4.3).

$$\boxed{\text{denitrification rate} = 0.0006 \times \text{NO}_3 \times \text{active carbon ppm} \times \text{water factor} \times \text{temperature factor}} \quad (\text{formule 4.3})$$

Avec denitrification rate, le taux de dénitrification dans chaque couche de sol (mg N/kg sol/jour) et où le taux de carbone actif (ppm) est calculé comme suit (formule 4.4)

$$\boxed{\text{active carbon ppm} = 0.0031 \times (\text{hum\_C ppm} + \text{FOM\_C ppm}) + 24.5} \quad (\text{formule 4.4})$$

avec hum\_C ppm le taux de carbone humique (mg/kg) et FOM\_C ppm le taux de carbone dans le réservoir FOM (mg/kg), de chaque couche de sol

L'hydrolyse de l'urée est, quant à elle, calculée grâce aux formules 4.5 et 4.6 :

$$\boxed{\text{potential hydrolysis fraction} = -1.12 + 1.31 \times \text{OC} + 0.203 \times \text{pH} - 0.155 \times \text{OC} \times \text{pH}} \quad (\text{formule 4.5})$$

$$\boxed{\text{hydrolysis rate} = \text{Urea} \times \text{potential hydrolysis fraction} \times \min(\text{temperature factor}, \text{water factor})} \quad (\text{formule 4.6})$$

avec hydrolysis rate, le taux d'hydrolyse de l'urée pour chaque couche de sol (mg/ kg sol/jour).

#### 4.1.4. Module fertiliz

Ce module permet à l'utilisateur de spécifier l'application de fertilisant solide à un « système » APSIM en utilisant un agenda. Il y a une flexibilité totale dans la spécification des composants du fertilisant.

N'importe quel module APSIM peut demander l'action du module fertiliz grâce aux messages de base APSIM. Les seules données requises pour spécifier l'opération sont la quantité de fertilisant à appliquer, le type de fertilisant, et la profondeur à laquelle l'appliquer. L'utilisateur peut spécifier ce qu'un fertilisant contient. Pour ce faire, il spécifie les composants du fertilisant (en fractions massiques), et ce pour chaque substance connue par le modèle.

#### 4.1.5. Module SurfaceOM

L'ensemble des processus modélisés dans ce module est présenté à la Fig.4.4. Ce module peut soit se référer à une substance entière de surface soit à des composants spécifiques. Lorsqu'une nouvelle substance est ajoutée (à la moisson), la substance entrera soit en tant que composant de matière organique de surface existant (ex : paille de blé sur résidus de blé) ou peut démarrer un nouveau composant si ce résidu est une nouvelle addition de ce qui était déjà présent dans le système (par exemple, paille de blé ajoutée à des résidus de luzerne). Chaque composant est pris séparément pour les calculs du rapport C/N, de la décomposition, et d'aire spécifique. Une valeur de couverture effective d'ensemble (0-1) est calculée en utilisant tous les composants de matière organique de surface présents, afin d'estimer l'effet de la substance de surface sur l'évaporation du sol et l'écoulement de surface. Si un type de matière organique a des composants azotés inorganiques solubles (nitrate et ammonium), ceux-ci peuvent être transférés aux réservoirs de sol respectifs par relâchement dû à la pluie ou l'irrigation.

La quantité de pluie et d'irrigation cumulée nécessaire pour transférer tous les composants solubles est spécifiée dans un input ; la quantité relâchée est proportionnelle à la pluie cumulée.

Enfin, il est possible de spécifier qu'une certaine proportion de toute matière organique particulière est inerte pour le processus de décomposition.

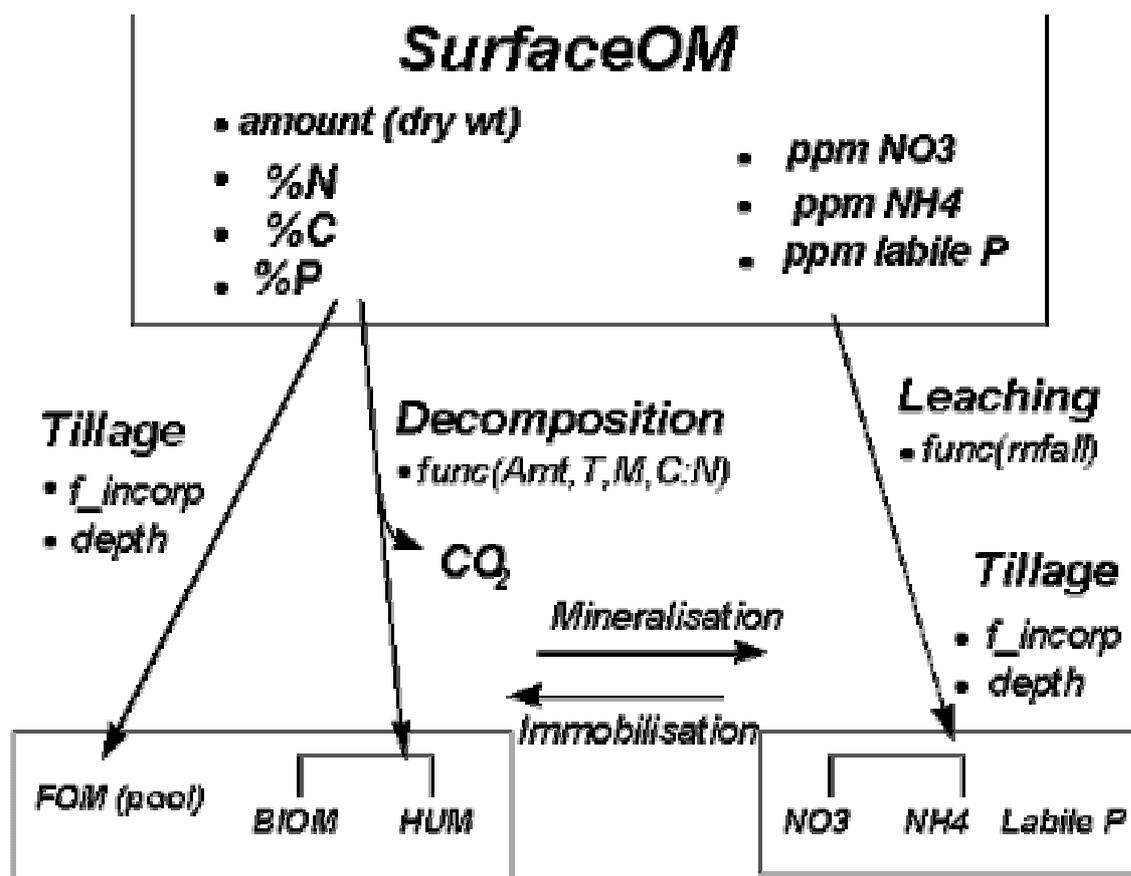


Fig 4.4 : ensemble des processus concernés par le module surfaceOM

« Tillage » résulte en un transfert d'une certaine quantité de matière organique de surface dans le réservoir *FOM*. Avec « tillage », N et C de la matière organique de surface est incorporée dans les couches de sol à la profondeur spécifiée par cette activité, et ajoutée au N minéral respectif du sol et aux réservoirs de matière organique fraîche (*FOM*). Le C et N de la matière organique de surface incorporé sont partagés entre les réservoirs de décomposition rapide, moyenne et lente. Ce fractionnement est dépendant du type de matière organique et des différences entre les résidus de culture et les fumiers animaux, par exemple, peuvent être spécifiés.

La décomposition résulte en la perte de carbone sous forme de dioxyde de carbone, et le transfert de carbone et d'azote vers le sol. La décomposition de résidus avec un grand rapport C/N provoque une immobilisation de la demande, qui est satisfaite par le N minéral dans les couches sus-jacentes ; dans les conditions extrêmes, le N minéral dans le sol réduit la décomposition de résidus.

Cette décomposition de la matière organique de surface est calculée en utilisant un simple algorithme exponentiel dans lequel la fraction de chaque composant se décomposant chaque jour ( $F_{decomp}$ , en  $j^{-1}$ ) est calculé comme suit (formule 4.7) :

$$F_{decomp} = \text{Potential Decomposition Rate} * \text{Moisture Factor} * \text{Temperature Factor} * \text{C:N ratio Factor} * \text{Contact Factor}$$

(formule 4.7)

De cette fraction, les quantités potentielles de carbone et d'azote qui bougent dans le sol sont calculées pour chaque composant. Tout module responsable des réservoirs de matière organique du sol (comme *soilN* déjà vu) peut utiliser cette quantité potentielle de carbone et d'azote pour ses calculs. La valeur réelle de décomposition pour chaque composant est envoyée au module *surfaceOM* et les réservoirs de composants précédents dans la chaîne sont recalculés en utilisant cette valeur de décomposition. On remarque dans la formule 4.7 que  $F_{decomp}$  dépend de 4 facteurs externes.

1. Le facteur d'humidité affectant la décomposition utilise l'évaporation cumulative potentielle du sol ( $E_{os}$ ) pour rendre l'effet que les résidus secs se décomposent plus lentement que les résidus humides. Il a été montré que les résidus sèchent à un taux proportionnel à  $E_{os}$  et qu'à l'évaporation cumulative critique (*cum\_eos\_max*), la décomposition des résidus cesse.

$$\text{Moisture Factor} = 1.0 - SE_{os}/cum\_eos\_max$$

(formule 4.8)

3. L'effet de la température est décrit par la formule 4.9:

$$\text{Temperature Factor} = (\text{average air temperature}/opt\_temp)^2$$

(formule 4.9)

$$\text{average air temperature} = (maxt + mint)/2$$

(formule 4.10)

Le facteur dépend donc de la température, et de la température optimale, c'est ce qui est illustré à la Fig.4.5 pour trois températures optimales.

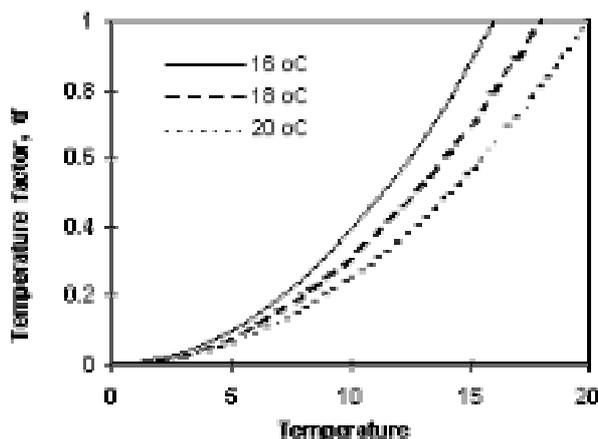


Fig 4.5 : facteur de température jouant sur le taux de décomposition de la MO en fonction de la température et de la température optimale.

3. Le rapport C/N est calculé comme suit (formule 4.11)

$$C/N \text{ factor} = \exp \frac{-k.(CN - CN_{opt})}{CN_{opt}} \quad (\text{formule 4.11})$$

où CN= rapport C/N des résidus de surface

$CN_{opt}$  = rapport C/N optimal pour la décomposition

k = coefficient déterminant la pente de la courbe

3. Où de grandes quantités de résidus de surface sont présentes, les taux de décomposition sont plus faibles. La substance en contact direct avec le sol décompose plus rapidement que celle se trouvant au sommet du tas de résidus. Ceci est pris en compte par le facteur de contact (formule 4.12) :

$$\begin{aligned} &\text{If surfaceom\_wt} < \text{critical mass then cf} = 1.0, \text{ or} \\ &\text{If surfaceom\_wt} > \text{critical mass then cf} = \text{critical mass/surfaceom\_wt} \end{aligned} \quad (\text{formule 4.12})$$

Avec surfaceom\_wt la masse de matière organique de surface et cf le facteur de contact.

L'effet de ce facteur se fait ressentir à partir d'une masse de résidus plus importante que 2000 kg/ha (voir Fig 4.6).

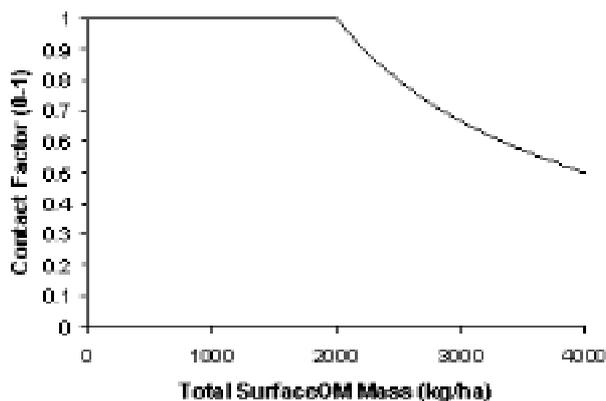


Fig 4.6 : facteur de contact en fonction de la masse totale de matière organique de surface

#### 4.1.6. Module Soilwat2

Ce module calcule la balance hydrique des différents réservoirs. Les algorithmes de redistribution de l'eau à travers le profil du sol ont été hérités des modèles de type CERES.

Les caractéristiques de l'eau concernant le sol sont spécifiées en terme de point de flétrissement (ll15), capacité au champ (dul) et teneur en eau du sol à saturation (sat). Le mouvement hydrique est décrit en utilisant des algorithmes séparés les flux saturés et insaturés. La redistribution de solutés, tels que l'azote sous forme de nitrate et d'urée, est prise en compte par le module. Les effets suivants ont été pris en compte :

- Les effets des résidus de surface et de la couverture de la culture sur la modification des écoulements de surface et la réduction de l'évaporation potentielle
- Les évènements pluvieux faibles sont perdus par évaporation
- Un coefficient d'évaporation de deuxième ordre (*cona*) a été spécifié afin de décrire les différences à long terme de l'assèchement du sol dû à la texture du sol et aux effets environnementaux

Ce module est placé entre les modules RESIDUE et CROP pour que la balance hydrique réponde aux changements de résidus et de couverture de culture (via le labour, la décomposition et la croissance des cultures).

Les améliorations suivantes ont été apportées par rapport aux modèles CERES et PERFECT :

- La spécification, pour chaque couche de sol, de la proportion d'eau du sol au-dessus *dul* qui est drainée en un jour. Ce paramètre a été appelé *swcon*.
- Le choix de coefficients de diffusivité plus appropriés au type de sol ont été trouvés pour améliorer la performance du modèle.
- Les flux insaturés sont permis de faire bouger de l'eau entre couches de sol adjacentes jusqu'à ce qu'un gradient spécifié dans le contenu en eau du sol soit atteint afin d'illustrer l'effet de la gravité sur les profils.

La Fig 4.7 illustre l'ensemble des modules affectés par le module SoilWat :

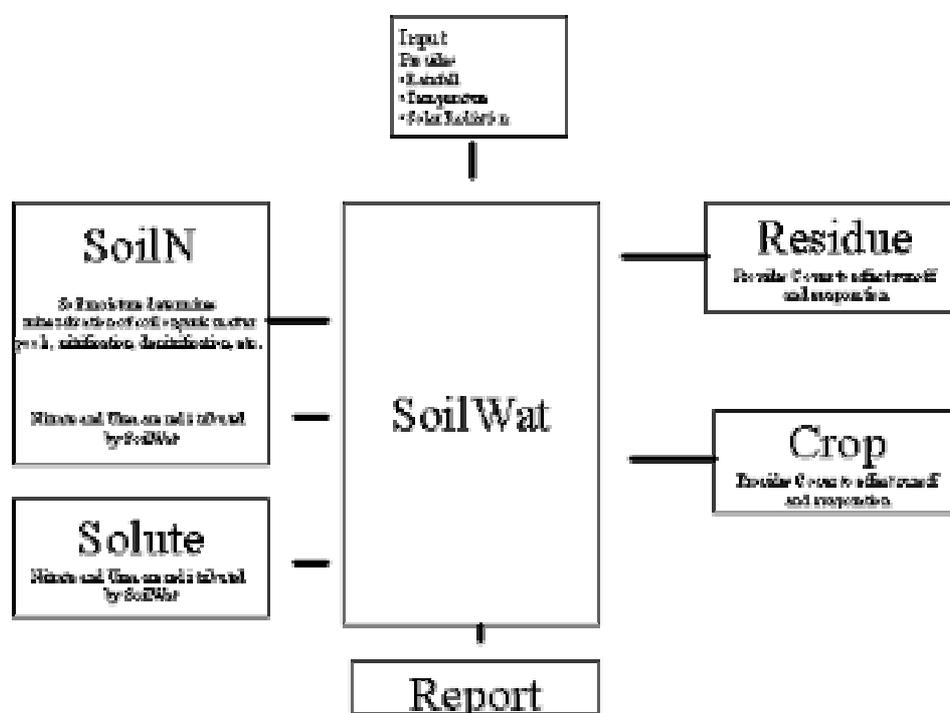


Fig 4.7 : diagramme représentant les connexions entre le module SoilWat et les autres modules APSIM

Les propriétés d'humidité du sol sont, quant à elles, représentées à la Fig 4.8

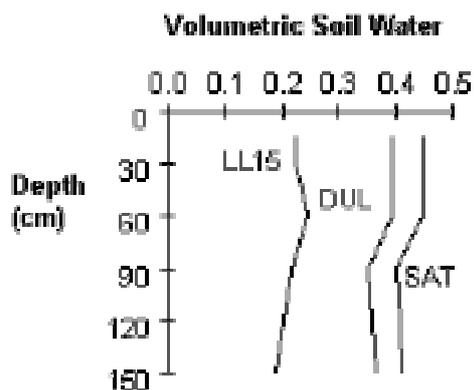


Fig : 4.8 : teneur en eau du sol présente en fonction de la profondeur

LL15 est le point de flétrissement. Il s'agit approximativement du contenu en eau minimal accessible par l'extraction de la plante.

DUL est la capacité au champ. Il s'agit du contenu en eau retenu après les flux gravitationnels.

SAT est la teneur en eau du sol à saturation.

Les écoulements de surface provenant de la pluie sont calculés par une procédure excluant la durée de la pluie en tant que variable explicite, l'intensité de la pluie est donc ignorée. Lorsque l'irrigation est appliquée, aucun écoulement de surface n'est calculé.

La courbe de réponse de l'écoulement de surface dépend de l'état d'humidité du sol. Pour le module, l'utilisateur doit préciser la courbe des conditions moyennes de la pluie antécédente. Les courbes de réponse aux conditions humides et sèches sont calculées. Le module va ensuite utiliser la famille de courbes entre ces deux extrêmes pour calculer l'écoulement de surface dépendant du statut de l'humidité journalière du sol (voir Fig 4.9 pour l'effet de l'humidité sur l'écoulement de surface).

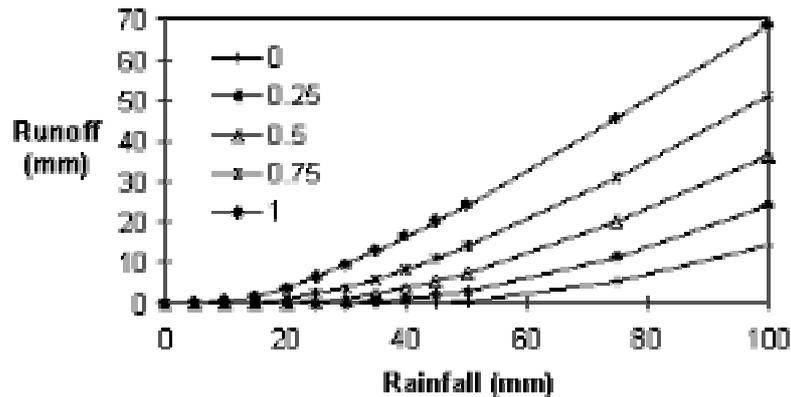


Fig 4.9 : écoulement de surface en fonction de la pluie et de l'humidité du sol

Les résidus de surface freinent le transport de l'eau à travers la surface du sol durant l'écoulement de surface et il y a donc différents types de réponse suivant la couverture de culture et de résidus. Cet effet a également été pris en compte dans le modèle.

L'évaporation est supposée avoir lieu en deux stades : le stade constant et le stade de chute.

Durant le premier stade, le sol est suffisamment sec pour que l'eau soit transportée à la surface à un taux au moins égal au taux d'évaporation potentielle. L'évapotranspiration potentielle est calculée en utilisant un concept d'évaporation d'équilibre de Priestley & Taylor (1972). Une fois que le contenu en eau du sol est passé sous une certaine valeur, le taux d'approvisionnement sera inférieur à l'évaporation potentielle (second stade d'évaporation). Ces effets sont décrits par l'utilisation de deux paramètres :  $U$  et  $cona$ .

$U$  représente la quantité d'évaporation cumulée depuis l'état sec du sol jusque la diminution d'apport d'eau du sol (deuxième stade). L'évaporation du sol est une fraction de la racine carrée du temps depuis la fin du premier stade d'évaporation, ceci est calculé en utilisant le coefficient  $cona$ .

#### 4.1.7. Module Millet

Ce module simule la croissance et le développement du mil au jour le jour. La croissance répond au climat (température, pluviométrie, radiation), apport d'eau au sol (à partir du module *soilwat2*), apport d'azote (à partir du module *soiln2*) et renvoie des informations sur l'eau du sol et l'azote du sol à ces deux derniers modules dans un rapport journalier pour tenir

à jour l'évolution des réservoirs. De l'information sur la couverture de la culture est aussi fournie au module *soilwat2* afin de calculer les taux d'évaporation et d'écoulement de surface. Le module simule la croissance en biomasse, le rendement en grain, le développement de la surface foliaire, les contenus en azote dans les parties individuelles de la plante, le tout au jour le jour. Les différents processus concernés par le module sont illustrés à la Fig 4.10.

Nous n'allons expliquer ici brièvement que ce qui concerne la prise de l'eau et de l'azote.

La demande en eau est calculée dans la section « accumulation de biomasse » (Fig 4.10) où la production potentielle de biomasse est une fonction de l'interception de lumière et d'un coefficient d'efficacité d'utilisation du rayonnement. Cette production potentielle de biomasse est convertie en demande en eau en utilisant l'efficacité de la transpiration. La prise d'eau est le minimum de l'apport et de la demande.

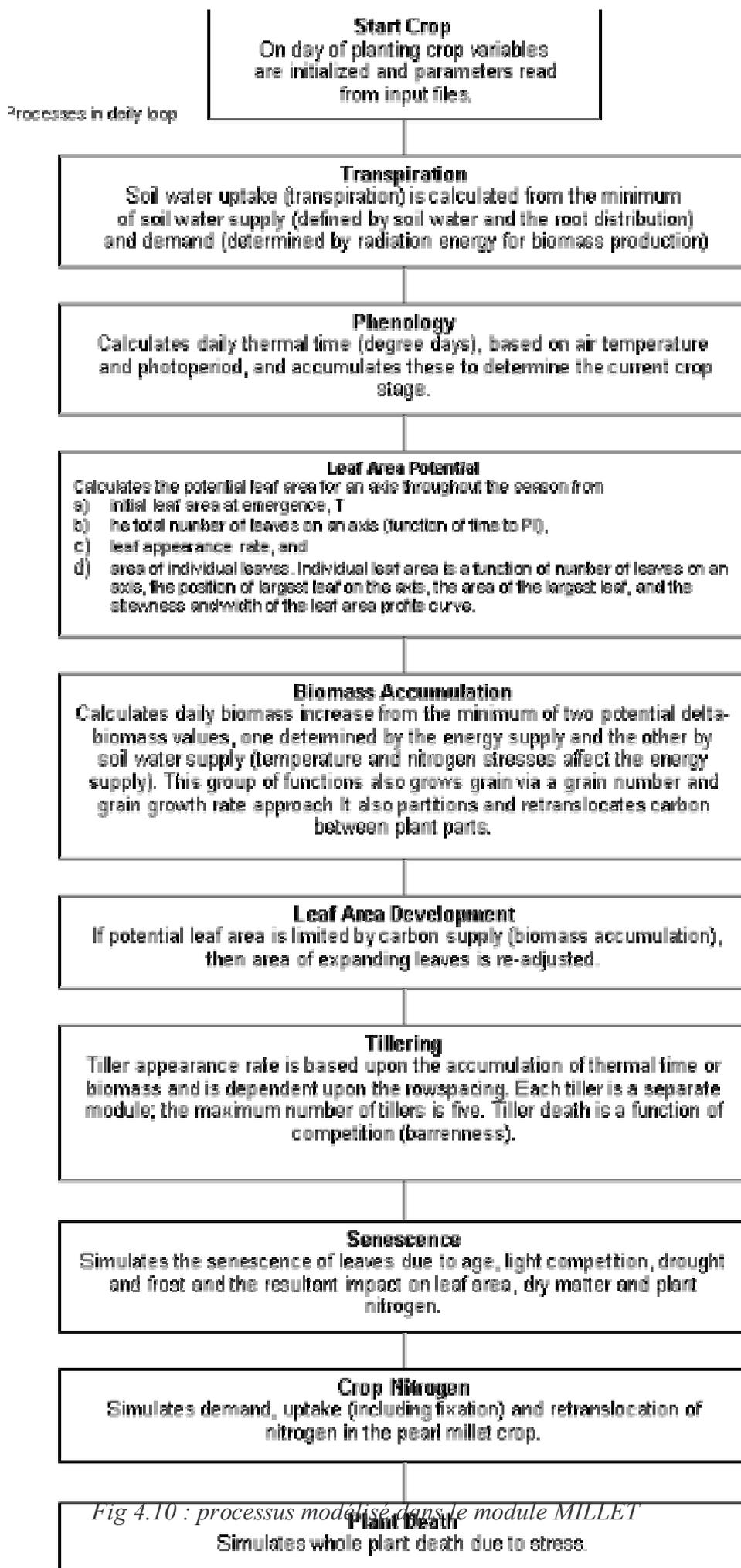


Fig 4.10 : processus modélisé dans le module MILLET

Les facteurs de déficit en eau dans le sol sont calculés pour simuler les effets du déficit hydrique sur différents processus de croissance de la plante. 3 facteurs de déficit hydrique sont calculés, correspondant à 3 processus ayant une sensibilité différente au stress hydrique : la photosynthèse (*photo*), la phénologie (*pheno*) et l'expansion foliaire (*expansion*).

L'effet des déficits hydriques sur la phénologie est une fonction du rapport d'eau disponible (eau du sol disponible/eau du sol potentiellement disponible).

Pour la photosynthèse et l'expansion foliaire, l'effet du déficit hydrique est une fonction du rapport de la demande en eau du sol (apport en eau du sol/demande).

La Fig 4.11 montre la plus grande sensibilité de l'expansion foliaire (par rapport à la photosynthèse) au déficit hydrique.

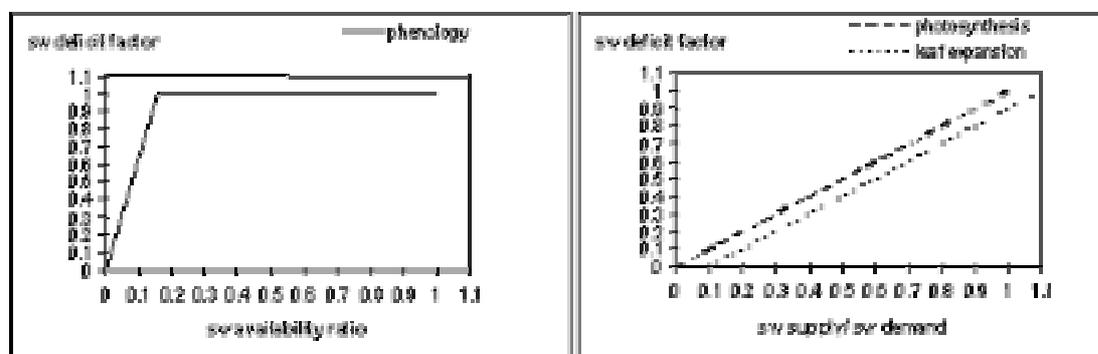


Fig 4.11 : effet du déficit hydrique sur la phénologie, la photosynthèse et l'expansion foliaire en fonction des rapports de disponibilité en eau du sol et du rapport apport/demande.

Concernant la prise d'azote et sa distribution dans la plante, la demande est calculée comme suit : tout d'abord, la production potentielle de biomasse est recalculée non limitée par l'eau, l'azote ou la température. Cette matière sèche est alors partagée dans les parties de la plante en relation avec leurs poids relatifs du moment. Le module millet a des concentrations en azote minimale, critique et maximale pour chaque partie de plante. La demande en azote dans chaque partie de plante tente de maintenir l'azote au niveau critique (non stressé). La demande en azote chaque jour est la somme des demandes provenant des biomasses préexistantes de chaque partie requise pour atteindre le contenu en azote critique, plus l'azote requis pour maintenir les concentrations critiques en azote dans la biomasse potentiellement synthétisée le jour même.

La prise d'azote maximale est définie comme étant la prise d'azote requise pour atteindre les contenus en azote maximaux dans toutes les parties de la plante. L'apport en azote est la somme d'azote disponible via le flux de masse et par diffusion.

Si la demande en azote ne peut pas être satisfaite par le flux de masse, l'azote est alors apporté par diffusion. La prise d'azote au-dessus de la concentration critique peut uniquement avoir lieu grâce au flux de masse. L'azote en excès peut être stocké dans les parties de plante au-dessus de la concentration critique, mais sous la concentration maximale. L'azote disponible est distribué entre les différentes parties de la plante en proportion de leurs demandes individuelles.

Aucune fixation d'azote n'est modélisée (Taux de fixation en N = 0)

Le déficit en azote affecte la croissance de la plante.

Les facteurs de disponibilité en azote (0-1) sont calculés pour les processus suivants : potentiel en N du grain, la photosynthèse, la sénescence des feuilles, la concentration en N dans les grains, l'expansion cellulaire, la nombre de grains.

## 4.2. Analyse de sensibilité d'APSIM aux paramètres internes du cycle de l'azote et à la fertilisation azotée

L'étude de la sensibilité d'APSIM a été effectuée sur 12 années (de 1984 à 1995) dont nous avons les données pluviométriques pour la station de l'ICRISAT à Sadoré. La pluviométrie moyenne annuelle y est sensiblement la même que dans le Fakara (~500mm/an).

De plus, nous avons construit trois années de pluviométrie théorique, sur base de données moyennes mensuelles de pluviométrie à Niamey (voir Tableau 4.5).

Tableau 4.5 : pluviométrie moyenne et écart-type par mois à Niamey (Sivakumar 1993)

| Mois  | Pluviométrie moyenne (mm) | Ecart-type (mm) |
|-------|---------------------------|-----------------|
| 1     | 0.0                       | 0.1             |
| 2     | 0.2                       | 1.2             |
| 3     | 2.4                       | 5.8             |
| 4     | 6.9                       | 14.8            |
| 5     | 29.4                      | 30.0            |
| 6     | 75.9                      | 39.8            |
| 7     | 156.9                     | 49.3            |
| 8     | 172.7                     | 67.1            |
| 9     | 88.2                      | 46.4            |
| 10    | 11.7                      | 21.7            |
| 11    | 0.4                       | 2.0             |
| 12    | 0.0                       | 0.0             |
| Total | 544.8                     | 120.9           |

Durant la première année théorique, les pluviométries moyennes mensuelles ont été divisées en pluies hebdomadaires égales (voir Fig 4.12). Les deux autres années théoriques consistaient en années maximale et minimale, avec l'année théorique maximale = année théorique moyenne + l'écart-type mensuel, et l'année théorique minimale = année théorique moyenne – l'écart-type mensuel.

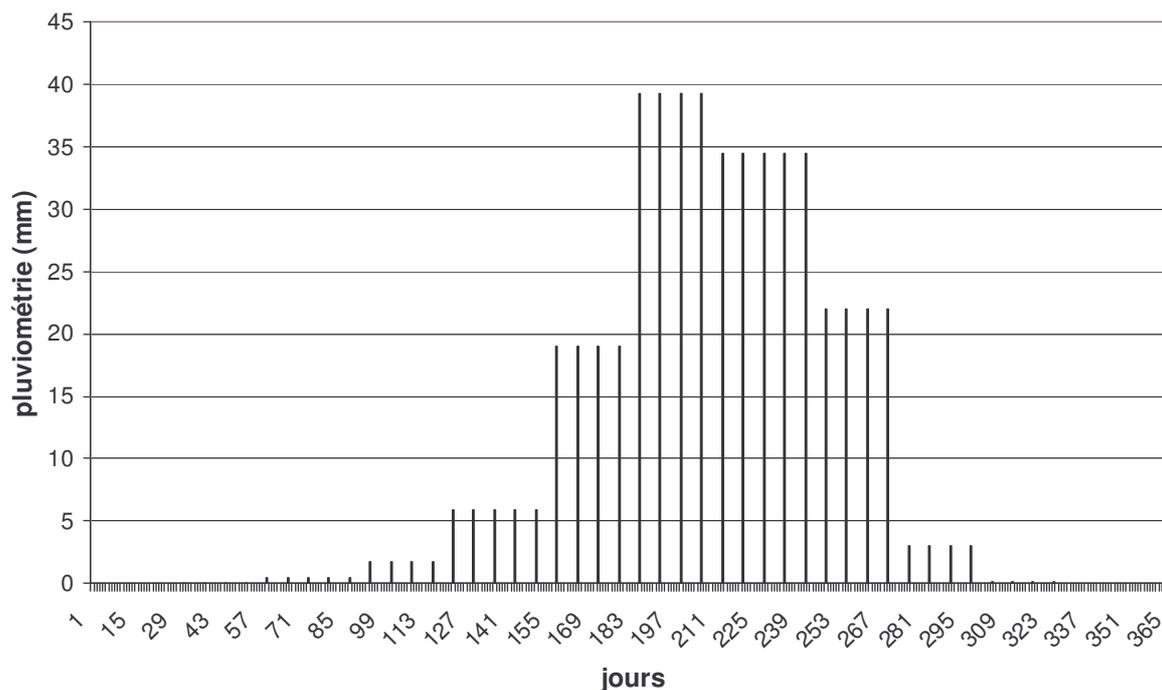


Fig 4.12 : pluviométrie théorique moyenne de Niamey, distribuée hebdomadairement, (d'après Sivakumar, 1993)

Nous avons programmé le logiciel de telle façon à ce que le semis ait lieu au mois de juin le jour de la première pluie supérieure à 10 mm/j. Dans le cas de l'année théorique moyenne, le semis a eu lieu au 158<sup>e</sup> jour, soit le premier jour ayant connu 19 mm de pluie.

Pour notre analyse de sensibilité, nous allons faire varier les paramètres du sol liés directement au cycle de l'azote. Les paramètres en question sont le rapport C/N, le pourcentage de carbone organique, la fraction inerte du pool humique du sol, la fraction microbienne du pool humique du sol, le pH eau du sol, la concentration en ammonium et la concentration en nitrate dans les différentes couches du sol (voir Tableau 4.6). Les valeurs de référence des paramètres étaient des valeurs réellement mesurées en moyenne à la station d'essai de l'ICRISAT à Sadoré, ou reportées de valeurs connues (les fractions du pool humiques ont été mesurées au Kenya, et le pourcentage de carbone organique en Inde).

*Tableau 4.6 : valeurs par défaut des paramètres internes concernant le cycle de l'azote d'APSIM (avec c.o. le carbone organique, fraction micr. La fraction microbienne du pool humique, et fr. inerte la fraction inerte du pool humique).*

| paramètres              | Profondeur (cm) |       |       |       |       |       |        |         |         |         |
|-------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
|                         | 0-15            | 13-30 | 30-45 | 45-60 | 60-75 | 75-90 | 90-105 | 105-120 | 120-135 | 135-150 |
| c.o.(%)                 | 0.6             | 0.36  | 0.26  | 0.22  | 0.22  | 0.2   | 0.18   | 0.14    | 0.14    | 0.14    |
| pH                      | 4.9             | 4.9   | 4.9   | 5     | 5     | 5.1   | 5.5    | 5.5     | 5.6     | 5.8     |
| Fraction micr. (%)      | 0.03            | 0.02  | 0.02  | 0.015 | 0.01  | 0.01  | 0.01   | 0.01    | 0.01    | 0.01    |
| Fr. inerte (%)          | 0.44            | 0.52  | 0.62  | 0.75  | 0.8   | 0.85  | 0.9    | 0.99    | 0.99    | 0.99    |
| NO <sub>3</sub> (mg/kg) | 2               | 1     | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5    | 0.5     | 0.5     | 0.5     |
| NH <sub>4</sub> (mg/kg) | 0.6             | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.1     |
| C/N                     | 14.5            |       |       |       |       |       |        |         |         |         |

Afin de mesurer la sensibilité d'APSIM, nous avons fait tourner le logiciel en faisant varier individuellement chacun des paramètres concernant le cycle de l'azote. Ils ont ainsi été multipliés successivement par 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 et 2.

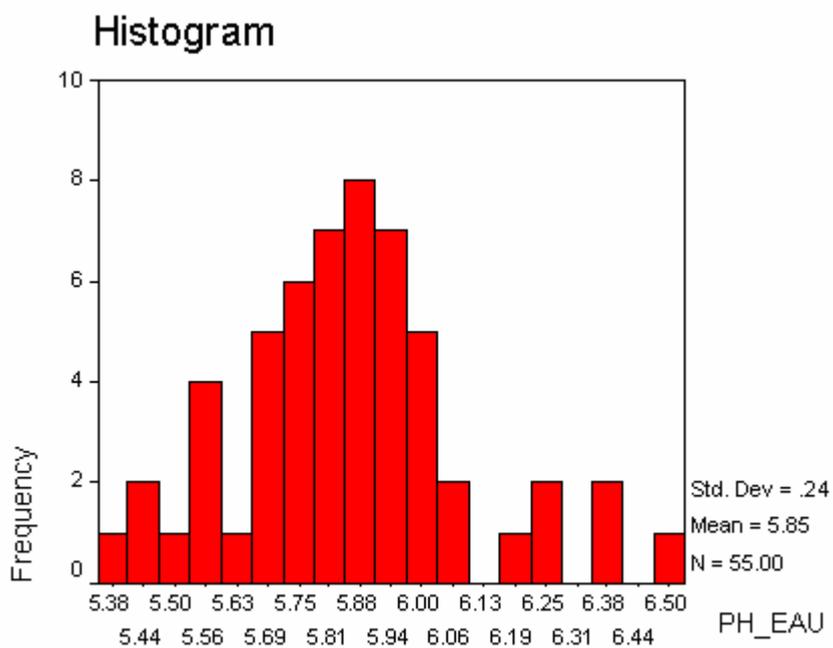
L'impact de la variation a été mesuré sur le rendement de mil en grain et sur le rendement en matière sèche totale en fin de saison.

## V. Analyse des résultats

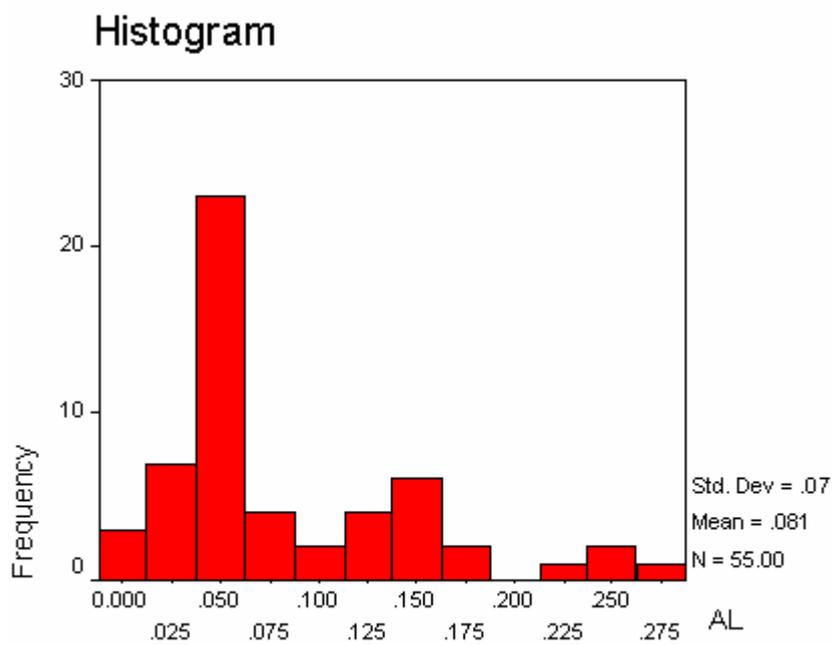
### 1. Analyse des résultats des propriétés chimiques

L'analyse de ces résultats a été effectuée de manière différente pour les parties inter-parcellaire, intra-parcellaire et régionale. Ainsi, l'étude des échantillons de la partie intra-parcellaire s'oriente sur d'éventuelles différences significatives de paramètres chimiques entre échantillons provenant de zones de croissance de qualités différentes. Les résultats de l'étude inter-parcellaire et de l'étude intra-parcellaire ont permis de rechercher d'éventuelles corrélations entre les différents paramètres chimiques mesurés. L'étude régionale, pour sa part, tente de déceler d'éventuelles différences selon le type de sol, le type de fertilisation ou la profondeur.

Avant d'effectuer les tests de Student entre différentes séries d'échantillons, afin de caractériser la significativité de la différence pour un paramètre entre ces séries d'échantillons, nous avons préalablement vérifié la normalité de ces échantillons par test de Kolmogorov-Smirnov. Si certains échantillons de valeurs se révélaient normaux, comme le pH-eau de l'analyse inter-parcellaire (voir Fig.5.1), d'autres ne l'étaient pas (voir Fig.5.2) et nous avons dû effectuer des transformations de type logarithmique sur ces échantillons afin de pouvoir interpréter les tests de Student le plus objectivement possible (voir Tableau 5.1). Dans d'autres cas encore, aucune transformation ne permit de rendre l'échantillon normal et nous avons interprété les résultats en gardant ce fait à l'esprit.



*Fig 5.1. Distribution des fréquences d'observation du pH eau des échantillons de l'étude inter-parcellaire*



*Fig 5.2 : Distribution des fréquences de la teneur en aluminium échangeable de l'étude inter-parcellaire*

Tableau 5.1 : Transformations et résultats des tests de normalité de Kolmogorov-Smirnov des différents échantillons (une \* signifie qu'aucune transformation n'a été trouvée, l'absence de valeur indique l'absence de transformation).

| <b>Inter-parcellaire prof. 0-20 cm</b>          | <b>tranformation</b>  | <b>statistic</b>  | <b>P value.</b> |
|---|-----------------------|-------------------|-----------------|
| pH eau  |                       | 0.106             | >0.2            |
| pH Kcl  |                       | 0.169             | >0.2            |
| Ca (cmoc/kg)                                    | ln                    | 0.158             | >0.2            |
| K (cmolc/kg)                                    | *                     | 0.24              | 0.003           |
| Mg (cmolc/kg)                                   |                       | 0.195             | 0.086           |
| somme bases éch (cmolc/kg)                      |                       | 0.123             | >0.2            |
| P (mg/kg)                                       | ln                    | 0.194             | 0.087           |
| acidité d'éch (cmolc/kg)                        |                       | 0.115             | >0.2            |
| aluminium éch (cmolc/kg)                        |                       | 0.164             | >0.2            |
| <b>Intra-parcellaire prof. 0-20 cm</b>          | <b>tranformation</b>  | <b>statistic</b>  | <b>P value</b>  |
| pH eau  | ln                    | 0.136             | 0.127           |
| pH Kcl  | ln                    | 0.15              | 0.058           |
| Ca (cmoc/kg)                                    |                       | 0.139             | 0.062           |
| K (cmolc/kg)                                    |                       | 0.121             | 0.174           |
| Mg (cmolc/kg)                                   |                       | 0.114             | >0.2            |
| somme bases éch (cmolc/kg)                      | ln                    | 0.086             | >0.2            |
| P (mg/kg)                                       | ln                    | 0.099             | >0.2            |
| acidité d'éch (cmolc/kg)                        | *                     | 0.252             | <0.001          |
| aluminium éch (cmolc/kg)                        | *                     | 0.284             | <0.001          |
| ECEC (cmolc/kg)                                 |                       | 0.104             | >0.2            |
| <b>Inter et intra-parcellaire prof. 0-20 cm</b> | <b>transformation</b> | <b>stastistic</b> | <b>P value</b>  |
| pH eau  |                       | 0.115             | 0.081           |
| pH KCl  |                       | 0.096             | >0.2            |
| Ca (cmolc/kg)                                   |                       | 0.112             | 0.102           |
| K (cmolc/kg)                                    | *                     | 0.143             | 0.007           |
| Mg (cmolc/kg)                                   |                       | 0.113             | 0.092           |
| Somme bases éch (cmolc/kg)                      | ln                    | 0.1               | >0.2            |
| P (mg/kg)                                       | ln                    | 0.102             | >0.2            |
| acidité d'éch (cmolc/kg)                        | *                     | 0.175             | <0.001          |
| aluminium éch (cmolc/kg)                        | *                     | 0.223             | <0.001          |
| ECEC (cmolc/kg)                                 |                       | 0.106             | >0.2            |

| <b>Regional prof. 0-20cm</b>  | <b>tranformation</b> | <b>statistic</b> | <b>P value.</b> |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-----------------|
| pH eau                        |                      | 0.091            | >0.2            |
| pH kcl                        | *                    | 0.152            | 0.001           |
| Ca (cmoc/kg)                  | ln                   | 0.109            | 0.152           |
| K (cmolc/kg)                  | ln                   | 0.078            | >0.2            |
| Mg (cmolc/kg)                 | ln                   | 0.114            | 0.072           |
| somme bases éch<br>(cmolc/kg) | ln                   | 0.066            | >0.2            |
| P (mg/kg)                     | ln                   | 0.079            | >0.2            |
| acidité d'éch (cmolc/kg)      | ln                   | 0.104            | >0.2            |
| aluminium (cmolc/kg)          | ln                   | 0.08             | >0.2            |
| ECEC (cmolc/kg)               | ln                   | 0.076            | >0.2            |
| <b>Regional prof. 20-50cm</b> | <b>tranformation</b> | <b>statistic</b> | <b>P value</b>  |
| pH eau                        |                      | 0.065            | >0.2            |
| pH kcl                        | *                    | 0.185            | <0.001          |
| Ca (cmoc/kg)                  | ln                   | 0.078            | >0.2            |
| K (cmolc/kg)                  | ln                   | 0.074            | >0.2            |
| Mg (cmolc/kg)                 | ln                   | 0.07             | >0.2            |
| somme bases éch<br>(cmolc/kg) | ln                   | 0.083            | >0.2            |
| acidité d'éch (cmolc/kg)      |                      | 0.109            | 0.72            |
| aluminium (cmolc/kg)          | ln                   | 0.076            | >0.2            |
| ECEC (cmolc/kg)               | ln                   | 0.1              | >0.2            |

## 1.1. Etude intra-parcellaire

L'analyse des échantillons provenant de zones de croissance de qualités différentes a été effectué sur un seul type de sol : l'arenic Lixisol. Les parcelles concernées par l'étude ont connu une longue jachère, et n'ont connu aucune fertilisation depuis leur mise en culture.

Dans chacune des 13 parcelles concernées par l'étude ont été prélevés des échantillons dans des zones connaissant des croissances différentes : bonne, moyenne et faible. Pour chaque qualité de croissance, 5 échantillons ont été prélevés dans des zones relativement éloignées les unes des autres (plus de 30 m), puis soigneusement mélangés.

Les résultats bruts des analyses chimiques de cette étude se trouvent en Annexe 4.

Après avoir testé la normalité des échantillons séparés cette fois en qualités de croissance différentes, nous avons calculé les tests de Student entre les zones de chaque type de croissance et ceci pour chaque paramètre. Les résultats des tests de normalité se trouvent en Annexe 5 mais voici succinctement ce que nous observons : tous les échantillons de pH et de bases échangeables sont normaux mis à part la somme des bases échangeables pour les zones de bonne croissance et de croissance moyenne. De plus, ne sont pas normaux les échantillons de phosphore et d'aluminium pour les zones de croissance moyenne et les échantillons de carbone organique et d'aluminium pour les zone de bonne croissance.

Nous avons donc calculé les tests de Student en gardant ces tests de normalité à l'esprit (Tableau 5.2).

*Tableau 5.2 : résultats des tests de Student, entre zones à différente qualité de croissance pour des sols de type arenic Lixisol (A=bonne croissance, B=croissance moyenne, C=croissance faible)*

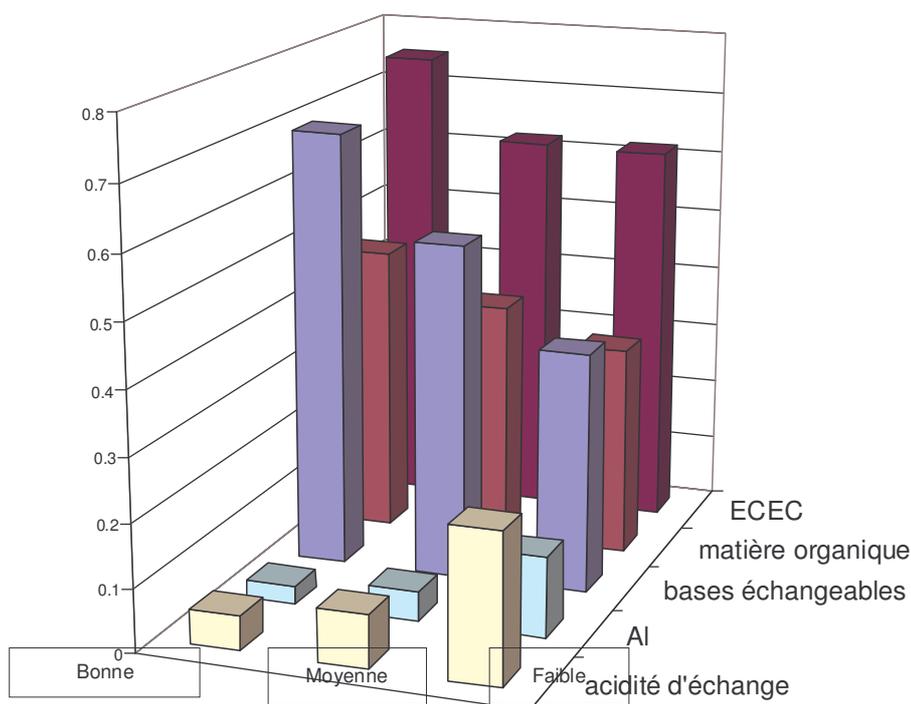
|     | pH eau           | pH KCl                 | $Ca^{++}$<br>(cmolc/kg)            | $K^+$<br>(cmolc/kg)     | $Mg^{++}$<br>(cmolc/kg) | Bases échangeables<br>(cmolc/kg) |
|-----|------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| B-C | 0,066            | <b>0,002</b>           | <b>0,002</b>                       | 0,182                   | <b>0,0002</b>           | <b>0,002</b>                     |
| A-C | <b>0,034</b>     | <b>0,001</b>           | <b>0,0003</b>                      | <b>0,022</b>            | <b>0,0006</b>           | <b>0,0003</b>                    |
| A-B | 0,887            | 0,194                  | <b>0,046</b>                       | 0,162                   | 0,051                   | <b>0,035</b>                     |
|     | P<br>(mg/k<br>g) | ECEC<br>(cmolc/k<br>g) | Acidité<br>d'échange<br>(cmolc/kg) | $Al^{3+}$<br>(cmolc/kg) | C total (%)             |                                  |
| B-C | 0,72             | 0,94                   | <b>0,0006</b>                      | <b>0,003</b>            | <b>0,0001</b>           |                                  |
| A-C | <b>0,04</b>      | <b>0,045</b>           | <b>0,0009</b>                      | <b>0,003</b>            | <b>0,004</b>            |                                  |
| A-B | 0,30             | 0,08                   | 0,06                               | 0,051                   | <b>0,019</b>            |                                  |

On remarque que la différence entre zones de bonne croissance et zones de faible croissance est significative pour tous les paramètres chimiques. Par contre, la différence n'est que très rarement significative entre zones de bonne croissance et zones à croissance moyenne. Elle

l'est pour Ca, la somme des bases échangeables et la teneur en C alors que les deux derniers paramètres concernent des échantillons dont la normalité n'est pas confirmée.

Le faible nombre de tests significatifs entre ces deux dernières zones peut faire l'objet d'une tentative d'explication : premièrement, les différences de croissance, observées lors de la prise d'échantillons, sont plus faible entre bonne croissance et croissance moyenne, qu'entre croissance moyenne et faible croissance. De plus, cette différence de croissance peut être due plutôt à un retard de croissance ou à un deuxième semis plutôt qu'à une fertilité plus faible. Par contre, les échantillons des sols de faible croissance ont tous été prélevés dans des lieux où la taille des plants de mil n'excédait pas 50 cm. A la date où ces prélèvements ont été effectués (après la mi-août), la faible croissance ne pouvait pas s'expliquer par un retard dans le semis.

On observe aux Fig 5.3 et 5.4 que la qualité de croissance augmente avec la concentration moyenne en bases échangeables (K, Ca, Mg), en carbone organique et la ECEC, mais diminue avec l'augmentation moyenne du pH ( pH eau et pH KCl), et l'acidité d'échange moyenne et la concentration moyenne en aluminium.



*Fig 5.3 : ECEC, concentration en matière organique, bases échangeables, Al, et acidité d'échange dans le sol de type arenic Lixisol de l'intra-parcellaire selon la qualité de croissance.*

Le Tableau 5.3 représente les écarts-types des moyennes des différents paramètres de la fig. 5.3.

Tableau 5.3 : écarts-types des moyennes des paramètres des échantillons de la fig. 5.3

| paramètres | unités   | Qualité de croissance |         |        |
|------------|----------|-----------------------|---------|--------|
|            |          | bonne                 | moyenne | faible |
| ECEC       | cmolc/kg | 0.23                  | 0.135   | 0.143  |
| mat.org    | cmolc/kg | 0.11                  | 0.032   | 0.035  |
| bases éch. | cmolc/kg | 0.22                  | 0.146   | 0.139  |
| Al         | cmolc/kg | 0.019                 | 0.026   | 0.082  |
| acidité    | cmolc/kg | 0.023                 | 0.052   | 0.120  |

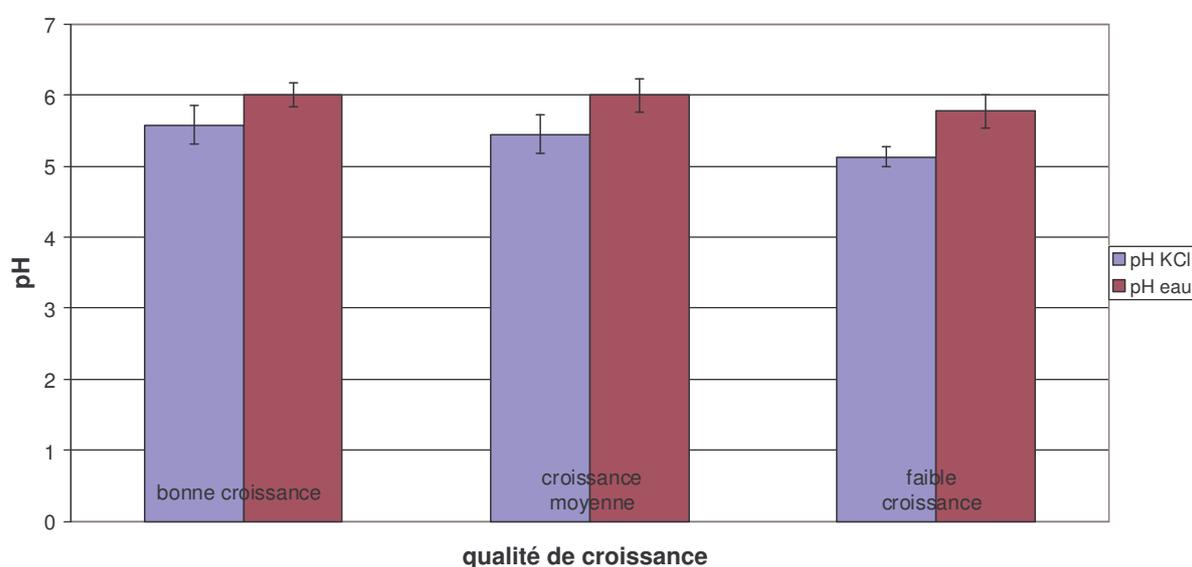


Fig 5.4 : pH du sol selon la qualité de croissance du mil

Ces observations confirment les conclusions de la recherche bibliographique. En effet, Wendt (1993) avait mis en évidence le fait que les sols moins productifs possédaient un pH plus faible et un degré de saturation en protons et en aluminium plus élevé que les sols à meilleure productivité. De plus, Kretschmar (1991, in Hafner 1993), avait également montré que la différence de concentration en aluminium dans le sol entre zones de croissance différente (concentration aluminique plus élevée dans les sols à moindre croissance) expliquait en partie la différence de croissance. Les hydroxydes d'aluminium adsorbent P, le rendant indisponible pour les plantes, alors qu'il s'agit d'un élément nutritif limitant pour la culture du mil dans ces sols.

La deuxième cause importante expliquant la micro variabilité spatiale de croissance du mil est la quantité de matière organique qui se révèle plus grande dans les zones de bonne croissance (ces zones étant souvent observées à proximité d'arbustes lors de la prise d'échantillons). Comme nous l'avons vu dans la recherche bibliographique, la matière organique est responsable d'une grande partie de la CEC, et est une grande source d'azote minéralisable. Rappelons ici que l'échantillon de données concernant la teneur en carbone organique pour les zones de bonne croissance ne s'est pas révélé normal dans le test de normalité. Mais nous pouvons utiliser comme indicateur le test de Student entre échantillons de croissance moyenne et faible concernant le carbone organique. Ce test est très significatif, notant une quantité de matière organique plus élevée dans les zones de croissance moyenne.

Bationo et al (1991d) ont rapporté que la ECEC (CEC effective) était plus liée à la matière organique qu'à l'argile au Sahel. Dans nos échantillons, nous remarquons également que la quantité de carbone oxydable (et donc de MO) est plus importante dans les zones où la ECEC est également plus grande (Fig.5.3).

Nous allons vérifier ci-après la thèse de Bationo, la CEC d'un sol pouvant être estimée avec la formule :

$$CEC_{tot}(\text{sol}) = CEC_{mat.org.} \% \text{ mat.org.} + CEC_{arg.} \% \text{ arg} \text{ (Dufey, 1999)}$$

avec la CEC de la matière organique raisonnablement estimée à 2 molc/kg entre pH 5.5 et pH 6.5 (pH de nos échantillons), la  $CEC_{arg}$  estimée à 5 cmolc/kg et le pourcentage d'argile dans les arenic Lixisols est de 4% (voir Tableau 5.4 ci-après). Le % de MO est calculé comme suit :  $\% \text{ MO} = \% \text{ C organique} * 1.72$

Ce qui donne, pour les arenic Lixisol du Fakara, en prenant un pourcentage de matière organique de 0.15 % comme valeur approximative (voir partie Matériels et Méthodes) :

$$CEC = 2 * 0.0015 + 0.05 * 0.04 = 0.003 + 0.002 = \underline{0.005 \text{ molc/kg}}$$

soit 0.5 cmolc/kg.

La contribution de la matière organique est donc légèrement plus importante que celle de l'argile à la CEC, dans les arenic Lixisols du Fakara.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé la ECEC, plutôt que la CEC car plus représentatif de la réalité. En effet, la CEC est une valeur estimée à pH 7. Nos sols sont acides, et l'augmentation du pH lors de la détermination de la CEC a tendance à augmenter les valeurs de la CEC. En effet, la CEC reflète la charge totale d'un sol, provenant de charges permanentes et de charges variables. Ces dernières se développent par déprotonation des groupements hydroxydes sur les argiles et la matière organique. Ces charges varient en fonction du pH. Pratt & Alvahydo (1966 ; in Van Wambeke, 1992) observèrent que le rapport entre charges variables et permanentes dans les horizons de surface de quelques Oxisols au Brésil varient de 1.6 à 5.3. Il a également été prouvé, pour les sols acides (Van Wambeke), que la CEC calculée à pH 7 surestime fortement la CEC existant dans les conditions du champ. Les sols étudiés se caractérisent par une dominance de la kaolinite dans la fraction argileuse, une forte contribution de la matière organique à la CEC, ainsi que la présence d'oxydes de Fe et d'Al. De ce fait on peut s'attendre à ce que les charges variables constituent une part non négligeable des charges totales.

Nous utilisons plutôt la ECEC, résultat de la somme des bases échangeables et de l'acidité d'échange. La détermination des bases échangeables a été déterminée à pH 7, mais le problème de la CEC ne se pose pas, car la détermination consiste à recueillir le total des bases échangeables, qui est invariant. La ECEC est donc une valeur plus proche de la CEC locale du sol, que la CEC calculée à partir des échantillons.

Deux dernières observations ont été effectuées à partir des résultats de l'analyse intra-parcellaire. Premièrement, nous remarquons que la variation de ECEC n'est pas énorme, alors que la variation de la concentration en bases échangeables est bien plus importante (voir Fig.5.3). Ceci s'explique par l'acidité d'échange bien plus présente dans les sols à plus faible croissance, remplaçant les bases échangeables sur le complexe d'échange.

Enfin, nous observons que la qualité de croissance est inversement proportionnelle à la concentration en phosphore (Fig.5.5). Ceci est assez étonnant puisque le P est considéré comme l'élément le plus limitant pour la culture du mil. Ici, nous devons garder à l'esprit que les teneurs moyennes en P sont très faibles, de même que les différences entre concentrations moyennes. En réalité, pour pouvoir juger de l'impact réel du P sur la croissance, il faudrait avoir des données sur la quantité d'azote présente dans le sol. Ces deux éléments chimiques conjuguent leurs effets de manière complexe. On ne peut donc pas conclure d'un effet

inversement proportionnel du phosphore sur la qualité de croissance à d'aussi faibles taux et sans données concernant la concentration d'azote.

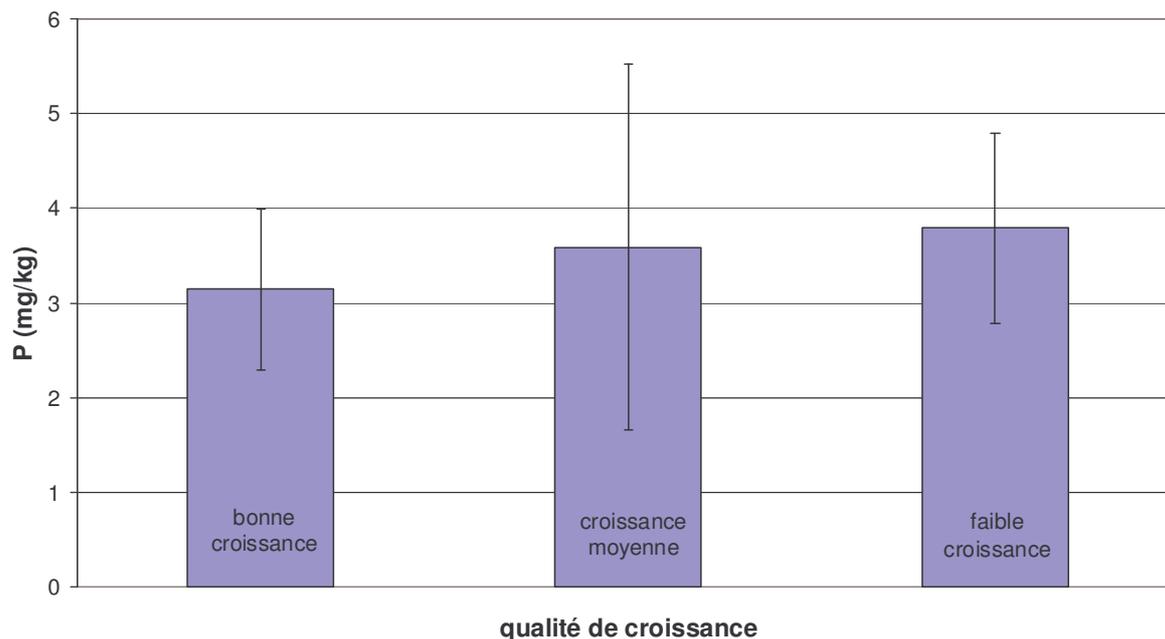


Fig 5.5 : concentration moyenne en phosphore dans le sol selon la qualité de croissance

Néanmoins, on peut conclure cette analyse intra-parcellaire en disant qu'il existe de réelles tendances dans les variations d'éléments chimiques entre sols connaissant des croissances différentes.

Nous pouvons souligner l'effet de la matière organique, responsable d'une grande partie de la CEC, sur la qualité de la croissance du mil.

Une deuxième grande cause à la variabilité intra-parcellaire est la variation de pH sur de faibles distances et en conséquence une saturation du complexe d'échange par l'aluminium.

Par contre, nous ne pouvons pas conclure d'un effet de la concentration en phosphore en tant que telle sur la qualité de croissance.

## 1.2. Analyse inter parcellaire

Les échantillons concernés par cette analyse inter-parcellaire proviennent des mêmes parcelles que ceux de l'étude intra-parcellaire. La même méthode d'échantillonnage que pour l'étude précédente a été utilisée sur les 13 parcelles en question, et sur 5 autres parcelles répondant aux mêmes conditions, à savoir qu'il s'agit de sols de type arenic Lixisol, n'ayant

connu aucune fertilisation depuis leur mise en culture. Les résultats bruts des analyses chimiques de cette étude se trouvent en Annexe 6.

Nous allons tout d'abord comparer les résultats des paramètres chimiques de l'analyse intra-parcellaire avec ceux de cette analyse inter-parcellaire. Nous pourrions ensuite observer, pour ce type de sol, d'éventuelles corrélations existantes entre les différents paramètres chimiques analysés. Pour ce faire, nous tiendront également compte des échantillons de l'analyse intra-parcellaire.

Le Tableau 5.4 permet la comparaison des minima et maxima des paramètres chimiques des échantillons de l'étude inter- et intra-parcellaire. On observe que les différences entre minima et maxima de l'étude intra-parcellaire sont à chaque fois plus importantes que celles de l'étude inter-parcellaire. En somme, cela signifie que la différence entre valeurs moyennes des paramètres de parcelles différentes est plus faible que la différence entre valeurs moyennes des paramètres de zones de croissance différentes d'une même parcelle.

La variabilité spatiale de croissance est donc plus importante au sein d'une parcelle, qu'entre moyennes de parcelles différentes.

L'observation du Tableau 5.4 nous informe aussi de maxima de teneur en P très élevés pour des parcelles n'ayant jamais connu de fertilisation. Ces valeurs, comme le prouvent les valeurs présentes en annexes ou le Tableau 5.14, sont en réalité des exceptions, sans doute un coup de chance lors de la prise d'échantillon, ou peut-être s'agissait-il d'un champ ayant connu une fertilisation...

*Tableau 5.4 : maxima, minima, moyennes et variances des paramètres chimiques des échantillons provenant des analyses inter- et intra-parcellaire (prof : 0-20 cm).*

| paramètre | Unités   | Max inter | Min inter | Max intra | Min intra |
|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| pH eau    |          | 5.9       | 5.41      | 6.5       | 5.35      |
| pH KCl    |          | 5.17      | 4.64      | 6.18      | 4.98      |
| $Ca^{++}$ | cmolc/kg | 0.41      | 0.14      | 0.80      | 0.10      |
| $K^+$     | cmolc/kg | 0.09      | 0.04      | 0.12      | 0.02      |
| $Mg^{2+}$ | cmolc/kg | 0.14      | 0.06      | 0.26      | 0.03      |
| Bases éch | cmolc/kg | 0.61      | 0.27      | 1.15      | 0.15      |
| P         | mg/kg    | 6.48      | 2.55      | 7.79      | 2.05      |
| Acidité   | cmolc/kg | 0.46      | 0.16      | 0.44      | 0.03      |
| $Al^{3+}$ | cmolc/kg | 0.24      | 0.04      | 0.28      | 0         |

Pour l'étude d'éventuelles corrélations, nous allons ajouter les valeurs des paramètres chimiques de l'étude intra-parcellaire, provenant du même type de sol, afin de comporter un échantillon de valeurs plus important.

Voici un tableau récapitulatif des maxima, minima, moyennes et variances mesurées des paramètres de l'étude inter et intra-parcellaire (Tableau 5.5).

*Tableau 5.5 : maxima, minima, moyennes et variances des paramètres chimiques des échantillons provenant des analyses inter- et intra-parcellaire (sol de type arenic Lixisol, prof : 0-20 cm).*

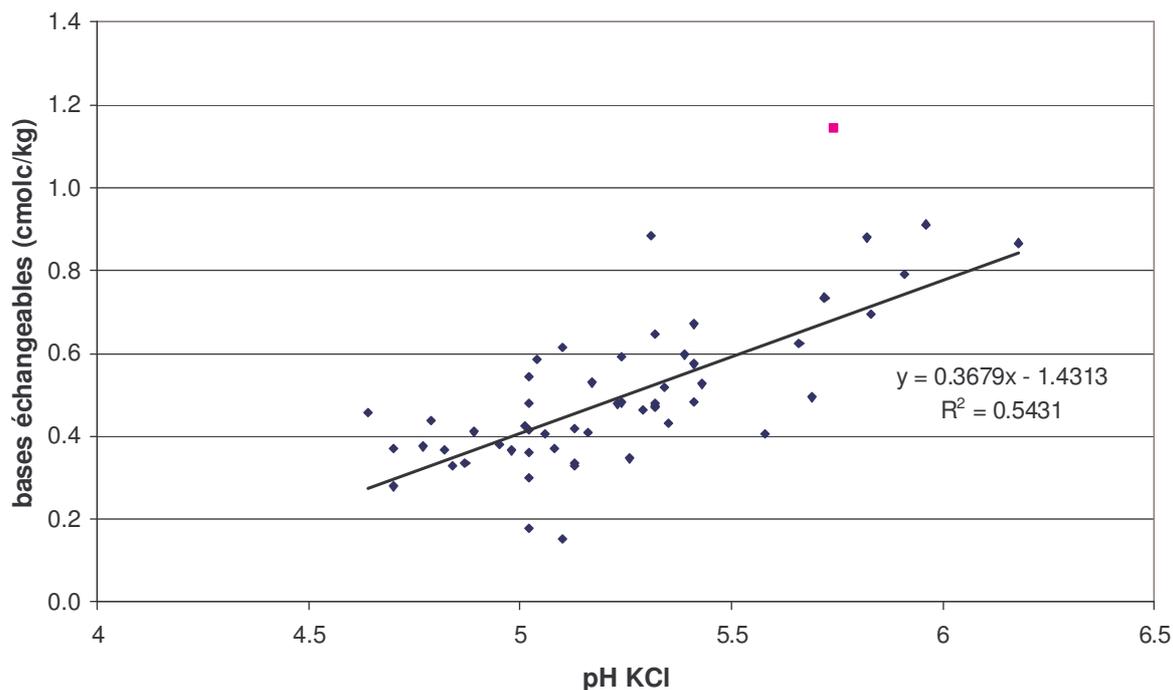
| Analyse inter et intra parc. | Unités   | max  | min  | moyenne | variance |
|------------------------------|----------|------|------|---------|----------|
| pH eau                       |          | 6.5  | 5.3  | 5.8     | 0.05     |
| pH KCl                       |          | 6.1  | 4.6  | 5.2     | 0.11     |
| Ca                           | cmolc/kg | 0.80 | 0.10 | 0.32    | 0.01     |
| K                            | cmolc/kg | 0.11 | 0.01 | 0.05    | 0.0002   |
| Mg                           | cmolc/kg | 0.25 | 0.03 | 0.11    | 0.002    |
| Somme bases                  | cmolc/kg | 1.14 | 0.15 | 0.50    | 0.03     |
| ECEC                         | cmolc/kg | 1.24 | 0.38 | 0.67    | 0.024    |
| P                            | mg/kg    | 7.78 | 2.05 | 3.68    | 1.85     |
| acidité d'échange            | cmolc/kg | 0.46 | 0.03 | 0.17    | 0.015    |
| AL                           | cmolc/kg | 0.28 | 0    | 0.08    | 0.004    |
| C orga                       | %        | 0.32 | 0.12 | 0.17    | 0.001    |

Le Tableau 5.6 reprend l'ensemble des tests de corrélations de Pearson effectués entre les différents paramètres des analyses inter- et intra-parcellaire.



Les corrélations entre différentes bases échangeables s'expliquent de la manière suivante : dans les conditions locales où la majeure partie du complexe d'échange provient de la matière organique, les échantillons riches en une base le sont également en une autre. Voici pourquoi non seulement les bases sont corrélées positivement entre elles, mais également avec leur somme et la ECEC.

Un deuxième type de corrélations concerne les relations entre les deux types de pH et les bases échangeables (voir Fig 5.6).



*Fig 5.6 : corrélation pH KCl – bases échangeables observées sur des échantillons de sol arenic Lixisol (profondeur 0-20cm). Le point extrême (de forme carrée) n'a pas été inclus dans la corrélation.*

Ce deuxième type de corrélation s'explique par deux phénomènes : premièrement, lorsque le pH passe de 4.5 à 5.5, la saturation des bases par l'aluminium diminue et l'aluminium est remplacé par des bases échangeables sur le complexe d'échange. En effet, l'aluminium n'est significativement soluble qu'en dessous de pH 5 – pH 5.5 (Van Wambeke, 1992). Ensuite, à pH plus élevé, la concentration en bases échangeables augmente alors que le taux d'aluminium échangeable ne peut augmenter. Ici, l'explication provient du remplacement des protons par les bases et des charges variables dépendantes du pH. Lorsque le pH augmente, les charges négatives provenant de la déprotonation des hydroxydes augmentent. Ce phénomène n'est pas très prononcé mais pourrait être suffisant, additionné à l'effet de

remplacement des protons par les bases, pour être notable dans les conditions locales où la concentration en bases échangeables est très faible également.

La relation entre pH et aluminium échangeable cité ci-dessus est illustrée à la Fig 5.7. Cette relation ne transparait pas au Tableau 5.3 car il ne s'agit pas d'une relation linéaire. On note l'augmentation rapide de la teneur en Al échangeable à des pH inférieurs à 5,5.

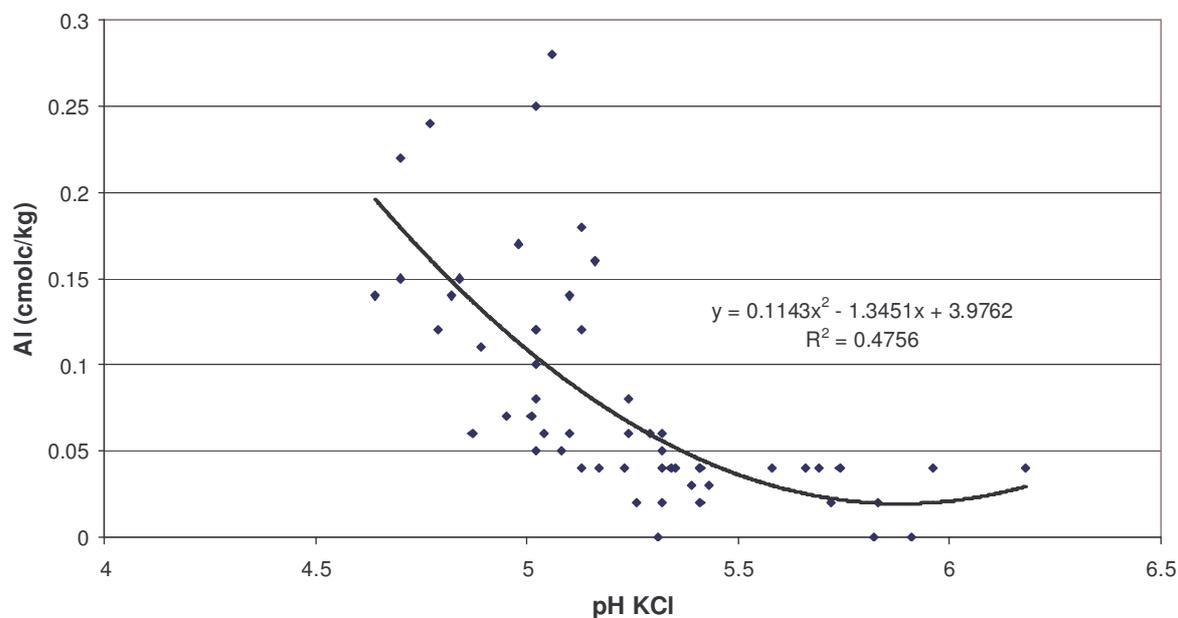


Fig 5.7 : relation pH KCl – Al échangeable, sol de type arenic Lixisol (profondeur 0-20 cm)

Une autre illustration du phénomène de la Fig 5.6 est la relation liant bases échangeables et Al échangeable, montrant la diminution des premières avec l'augmentation de la teneur en Al échangeable.

### 1.3. Analyse régionale

L'analyse régionale concerne trois types de sols : arenic Cambisol, arenic Lixisol, et ferralic Arenosol. Les parcelles concernées par l'étude sont distribuées sur tout le territoire du Fakara et ont connu lors de leur dernière saison un des 4 types de fertilisation suivants : engrais minéral, parcage animal, fumure transportée ou aucune fertilisation.

Des échantillons ont été prélevés avec la même méthode que lors des deux études précédentes (échantillon composite) à deux profondeurs différentes (0-20 cm et 20-50 cm) et dans 5

parcelles par type de fertilisation et de sol. Les résultats bruts de l'analyse chimique de cette étude se trouvent en Annexe 7.

Dans un premier temps, nous allons tester la significativité des différences entre paramètres chimiques de parcelles ayant connu des fertilisations différentes, pour chaque type de sol. Ensuite, pour les trois types de sol, nous allons comparer les valeurs de certains paramètres mesurés avec des mesures effectuées également au Fakara et provenant de la littérature (Hiernaux ; 2004). Enfin, la variation des paramètres chimiques en fonction de la profondeur sera observée et d'éventuelles corrélations entre paramètres chimiques seront recherchées.

Nous allons donc tout d'abord effectuer de tests de Student entre paramètres chimiques provenant de parcelles ayant connu des fertilisations différentes. Concernant ces échantillons, aucun test de normalité n'a été effectué car ils s'agissaient d'échantillons de 5 ou 6 valeurs.

Le Tableau 5.7 reprend les valeurs moyennes des propriétés chimiques, de chaque type de fertilisation, et ce pour chaque type de sol, ainsi que les moyennes générales des modes de fertilisation, tous types de sol confondu (prof : 0-20 cm). Le Tableau 5.8 reprend quant à lui l'ensemble des tests de Student effectués pour les 3 types de sol à une profondeur de 0-20 cm.

Tableau 5.7 : moyennes des propriétés chimiques des valeurs provenant de parcelles ayant connu le même type de fertilisation, pour un type de sol donné (ferralic Arenosol, arenic Cambisol, arenic Lixisol), ainsi que la moyenne générale des propriétés chimiques de chaque mode de fertilisation, tous types de sol confondus, le tout pour une profondeur de 0-20 cm.

| Sol                            | Fertilisation | pH eau | pH KCl | Ca cmolc/kg | K cmolc/kg | Mg cmolc/kg | Somme bases éch cmolc/kg | Acidité d'éch cmolc/kg | Al éch cmolc/kg | ECEC cmolc/kg | P mg/kg |
|--------------------------------|---------------|--------|--------|-------------|------------|-------------|--------------------------|------------------------|-----------------|---------------|---------|
| ferralic Arenosol              | Aucune        | 5.44   | 4.27   | 0.23        | 0.08       | 0.09        | 0.42                     | 0.42                   | 0.24            | 0.83          | 6.74    |
|                                | Parcage       | 5.54   | 4.65   | 0.3         | 0.10       | 0.15        | 0.57                     | 0.22                   | 0.09            | 0.78          | 3.84    |
|                                | Engrais       | 5.72   | 4.42   | 0.23        | 0.05       | 0.09        | 0.38                     | 0.34                   | 0.16            | 0.73          | 4.27    |
|                                | Fumure tr.    | 5.69   | 4.59   | 0.2         | 0.12       | 0.08        | 0.42                     | 0.29                   | 0.14            | 0.71          | 6.47    |
| arenic Cambisol                | Aucune        | 5.45   | 4.47   | 0.15        | 0.03       | 0.06        | 0.27                     | 0.33                   | 0.16            | 0.6           | 5.27    |
|                                | Parcage       | 5.57   | 4.58   | 0.21        | 0.09       | 0.10        | 0.41                     | 0.28                   | 0.15            | 0.69          | 5.77    |
|                                | Engrais       | 5.65   | 4.60   | 0.16        | 0.05       | 0.07        | 0.30                     | 0.23                   | 0.10            | 0.53          | 4.24    |
|                                | Fumure tr.    | 5.53   | 4.49   | 0.16        | 0.06       | 0.06        | 0.31                     | 0.27                   | 0.13            | 0.58          | 6.24    |
| arenic Lixisol                 | Aucune        | 5.65   | 4.26   | 0.13        | 0.04       | 0.05        | 0.24                     | 0.40                   | 0.23            | 0.65          | 6.29    |
|                                | Parcage       | 5.56   | 4.56   | 0.17        | 0.08       | 0.07        | 0.34                     | 0.26                   | 0.11            | 0.60          | 7.95    |
|                                | Engrais       | 5.25   | 4.47   | 0.14        | 0.05       | 0.07        | 0.28                     | 0.38                   | 0.22            | 0.67          | 4.93    |
|                                | Fumure tr.    | 5.60   | 4.77   | 0.29        | 0.08       | 0.12        | 0.52                     | 0.18                   | 0.08            | 0.7           | 8.93    |
| Moyenne des trois types de sol | Aucune        | 5.51   | 4.33   | 0.17        | 0.05       | 0.07        | 0.31                     | 0.38                   | 0.21            | 0.69          | 6.1     |
|                                | Parcage       | 5.55   | 4.59   | 0.23        | 0.09       | 0.1         | 0.44                     | 0.25                   | 0.12            | 0.69          | 5.85    |
|                                | Engrais       | 5.54   | 4.49   | 0.17        | 0.05       | 0.07        | 0.32                     | 0.31                   | 0.16            | 0.64          | 4.48    |
|                                | Fumure tr.    | 5.6    | 4.61   | 0.21        | 0.08       | 0.09        | 1.25                     | 0.24                   | 0.11            | 0.66          | 7.21    |

Tableau 5.8 : tests de Student entre propriétés chimiques d'échantillons ayant connu des fertilisations différentes, par type de sol (ferralic Arenosol, arenic Cambisol, arenic Lixisol, profondeur : 0-20 cm). 0=pas de fertilisation, P=parcage, E=engrais, F=fumure transportée

| Ferralic Arenosol | pH eau | pH KCl       | Ca cmolc/kg | K cmolc/kg   | Mg cmolc/kg | somme bases éch (cmolc/kg) | acidité d'éch (cmolc/kg) | Al+++ (cmolc/kg) | ECEC (cmolc/kg) | P mg/kg     |
|-------------------|--------|--------------|-------------|--------------|-------------|----------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|-------------|
| 0-P               | 0.5    | <b>0.048</b> | 0.4         | 0.5          | 0.2         | 0.4                        | <b>0.004</b>             | <b>0.004</b>     | 0.7             | 0.08        |
| 0-F               | 0.2    | 0.07         | 0.8         | 0.3          | 0.6         | 0.9                        | 0.1                      | 0.052            | 0.4             | 0.8         |
| 0-E               | 0.1    | 0.3          | 0.9         | 0.1          | 0.8         | 0.8                        | 0.3                      | 0.1              | 0.4             | 0.1         |
| P-F               | 0.6    | 0.8          | 0.1         | 0.7          | 0.1         | 0.2                        | 0.3                      | 0.4              | 0.4             | <b>0.03</b> |
| P-E               | 0.5    | 0.3          | 0.2         | 0.1          | 0.1         | 0.1                        | 0.1                      | 0.2              | 0.6             | 0.6         |
| F-E               | 0.9    | 0.4          | 0.6         | 0.07         | 0.5         | 0.5                        | 0.5                      | 0.7              | 0.8             | 0.1         |
|                   |        |              |             |              |             |                            |                          |                  |                 |             |
| Arenic cambisol   | pH eau | pH KCl       | Ca cmolc/kg | K cmolc/kg   | Mg cmolc/kg | somme bases éch (cmolc/kg) | acidité d'éch (cmolc/kg) | Al+++ (cmolc/kg) | ECEC (cmolc/kg) | P mg/kg     |
| 0-P               | 0.5    | 0.6          | 0.2         | <b>0.006</b> | 0.09        | 0.052                      | 0.6                      | 1                | 0.1             | 0.4         |
| 0-F               | 0.6    | 0.9          | 0.7         | <b>0.04</b>  | 0.6         | 0.4                        | 0.4                      | 0.6              | 0.8             | 0.4         |
| 0-E               | 0.1    | 0.4          | 0.6         | 0.13         | 0.5         | 0.4                        | 0.1                      | 0.2              | 0.2             | 0.1         |
| P-F               | 0.8    | 0.7          | 0.3         | 0.2          | 0.1         | 0.2                        | 0.8                      | 0.7              | 0.1             | 0.7         |
| P-E               | 0.5    | 0.9          | 0.3         | 0.09         | 0.1         | 0.1                        | 0.5                      | 0.4              | <b>0.04</b>     | <b>0.04</b> |
| F-E               | 0.4    | 0.5          | 0.9         | 0.4          | 0.9         | 0.8                        | 0.4                      | 0.5              | 0.3             | 0.1         |
|                   |        |              |             |              |             |                            |                          |                  |                 |             |
| arenic Lixisol    | pH eau | pH KCl       | Ca cmolc/kg | K cmolc/kg   | Mg cmolc/kg | somme bases éch (cmolc/kg) | acidité d'éch (cmolc/kg) | Al+++ (cmolc/kg) | ECEC (cmolc/kg) | P mg/kg     |
| 0-P               | 0.7    | 0.09         | 0.3         | 0.2          | 0.2         | 0.2                        | <b>0.03</b>              | <b>0.02</b>      | 0.5             | 0.6         |
| 0-F               | 0.8    | <b>0.009</b> | <b>0.02</b> | <b>0.007</b> | <b>0.02</b> | <b>0.01</b>                | <b>0.00009</b>           | <b>0.00005</b>   | 0.4             | 0.4         |
| 0-E               | 0.2    | 0.1          | 0.7         | 0.5          | 0.4         | 0.6                        | 0.7                      | 0.9              | 0.7             | 0.4         |
| P-F               | 0.8    | 0.2          | <b>0.02</b> | 0.7          | 0.05        | <b>0.04</b>                | 0.1                      | 0.3              | 0.1             | 0.8         |
| P-E               | 0.1    | 0.6          | 0.5         | 0.3          | 0.7         | 0.5                        | 0.1                      | 0.1              | 0.3             | 0.4         |
| F-E               | 0.1    | 0.1          | <b>0.03</b> | <b>0.03</b>  | 0.06        | <b>0.02</b>                | <b>0.01</b>              | <b>0.02</b>      | 0.6             | 0.2         |

Le nombre de tests significatifs est très faible. De plus, les tests significatifs pour un paramètre entre deux types de fertilisation précis ne se répètent qu'à de rares exceptions près pour les mêmes paramètres et les mêmes types de fertilisation dans les autres types de sols.

On peut ainsi citer le cas du phosphore entre parcentage et engrais pour les sols de type arenic Cambisol et ferralic Arenosol et le cas de l'acidité d'échange entre sols à parcentage et sols sans fertilisation pour les sols de type arenic Lixisol et ferralic Arenosol.

Une autre observation concerne le fait que le parcentage est souvent impliqué dans les tests significatifs.

Il faut aussi signaler que le parcentage est la méthode de fertilisation impliquant les plus grosses quantités de fertilisant observées sur le terrain.

Mise à part ces observations, aucune tendance ne peut être retirée de ce tableau. Mais il faut préciser que le faible nombre d'échantillons (5 échantillons par type de sol, de fertilisation et de profondeur) ne permet pas une étude aussi concluante que nous l'espérons.

Nous allons donc effectuer ces tests de Student entre les différents modes de fertilisation, mais cette fois tous types de sols confondus, afin d'effectuer des tests sur des jeux de données plus importants. Les résultats sont présentés au Tableau 5.9.

*Tableau 5.9 : Tests de Student entre propriétés chimiques d'échantillons ayant connu des fertilisations différentes, tous types de sol confondus (ferralic Arenosol, arenic Cambisol, arenic Lixisol, profondeur : 0-20 cm). 0=pas de fertilisation, P=parcentage, E=engrais, F=fumure transportée.*

|     | pH eau | pH KCL       | Ca<br>cmolc/kg | K<br>cmolc/kg | Mg<br>cmolc/kg | somme<br>bases<br>éch.<br>cmolc/kg | acidité<br>d'éch<br>cmolc/kg | Al éch<br>cmolc/kg | ECEC<br>cmolc/kg | P<br>mg/kg  |
|-----|--------|--------------|----------------|---------------|----------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------|------------------|-------------|
| 0-P | 0.61   | <b>0.01</b>  | 0.22           | <b>0.05</b>   | 0.07           | 0.12                               | <b>0.004</b>                 | <b>0.012</b>       | 0.85             | 0.85        |
| 0-F | 0.37   | <b>0.005</b> | 0.27           | <b>0.04</b>   | 0.27           | 0.13                               | <b>0.02</b>                  | <b>0.023</b>       | 0.44             | 0.78        |
| 0-E | 0.58   | 0.06         | 0.81           | 0.82          | 0.68           | 0.88                               | 0.11                         | 0.12               | 0.39             | <b>0.03</b> |
| P-F | 0.65   | 0.85         | 0.84           | 0.98          | 0.32           | 0.73                               | 0.59                         | 0.77               | 0.45             | 0.73        |
| P-E | 0.91   | 0.39         | 0.2            | <b>0.01</b>   | 0.08           | 0.07                               | 0.19                         | 0.31               | 0.42             | 0.23        |
| F-E | 0.76   | 0.28         | 0.26           | <b>0.01</b>   | 0.34           | <b>0.04</b>                        | 0.49                         | 0.49               | 0.98             | <b>0.03</b> |

Même en confondant tous les types de sol, il n'y a pas énormément de résultats qui se dégagent de ces tests de Student. On observe néanmoins que les résultats significatifs concernent essentiellement les tests entre aucune fertilisation ou engrais d'une part, et parcentage ou fumure transportée d'autre part. Il faut ici signaler que le mode de fertilisation par engrais

consiste à mélanger les semences dans de l'engrais inorganique, et la probabilité de retrouver une trace de cet engrais dans le sol, plusieurs semaines après le semis est très faible. On peut donc considérer les échantillons ayant connu l'engrais inorganique comme mode de fertilisation presque équivalents aux échantillons n'ayant connu aucune fertilisation, au point de vue de la fertilité chimique des sols. Les résultats significatifs ne parviennent donc qu'à discriminer échantillons ayant connu une fertilisation organique aux échantillons n'en ayant pas connu. Aucun résultat significatif n'est observé dans les tests entre échantillons ayant connu le parcage et échantillons ayant connu la fumure transportée. Aucune discrimination sur base du mode de fertilisation organique n'est donc tirée de ces tests.

De plus, le résultat significatif concernant le taux de phosphore assimilable entre échantillons sans fertilisation et échantillons à engrais paraît discutable, si ces deux modes sont équivalents.

Puisque aucune réelle tendance ne se dégage de l'étude précédente, nous allons utiliser tous ces échantillons pour tester une éventuelle différence entre types de sols. En mélangeant les différents types de fertilisation, nous obtenons un nombre de valeurs plus élevées par échantillons, ce qui permet une étude plus crédible. Les Tableaux 5.10, 5.11 et 5.12 représentent une comparaison entre certains paramètres chimiques mesurés également au Fakara et nos mesures.

Tableau 5.10 : comparaison des paramètres chimiques observés dans les sols de type arenic Cambisol avec les données de la littérature (Hiernaux 2004)

| <i>Texture à 0-20 cm prof.</i> | arenic Cambisol (littérature) | arenic Cambisol (échantillons) |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| % sable                        | 83-92                         | 90-94                          |
| % limon                        | 3-5                           | 3-6                            |
| % argile                       | 5-10                          | 2-6                            |
| <i>Paramètres chimiques</i>    | arenic Cambisol (littérature) | arenic Cambisol (échantillons) |
| pH (eau)                       | 4,5-5,5                       | 5,1-5,9                        |
| CEC (meq/100g)                 | 1,0-2,0                       | 0,41-0,84 (ECEC)               |
| P Total (ppm)                  | 1,5-2,0                       | 2,7-7                          |
| K (meq/100g)                   | 0,03-0,05                     | 0,01-0,11                      |

Tableau 5.11 : comparaison des paramètres chimiques observés dans les sols de type arenic Lixisol avec les données de la littérature (Hiernaux 2004)

| <i>Texture à 0-20 cm prof.</i> | arenic Lixisol (littérature) | arenic Lixisol                |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| % sable                        | 80-95                        | 92-94                         |
| % limon                        | 2-3                          | 3-5                           |
| % argile                       | 2-5                          | 1-4                           |
| <i>Paramètres chimiques</i>    | arenic Lixisol (littérature) | arenic Lixisol (échantillons) |
| pH (eau)                       | 5,2-6,2                      | 5,35-6,5                      |
| CEC (cmolc/kg)                 | 0,8-1,2                      | 0,44-0,9 (ECEC)               |
| P Total (mg/kg)                | 1,5-3,5                      | 0,9-3,9                       |
| K (cmolc/kg)                   | 0,03-0,06                    | 0,01-0,11                     |

Tableau 5.12 : comparaison des paramètres chimiques observés dans les sols de type ferralic Arenosol avec les données de la littérature (Hiernaux 2004)

| <i>Texture à 0-20 cm prof.</i> | ferralic Arenosol (littérature) | ferralic Arenosol (échantillons) |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| % sable                        | 84-89                           | 89-94                            |
| % limon                        | 4-7                             | 3-6                              |
| % argile                       | 4-8                             | 3-5                              |
| <i>Paramètres chimiques</i>    | ferralic Arenosol (littérature) | ferralic Arenosol (échantillons) |
| pH (eau)                       | 5,0-5,9                         | 4,8-6,2                          |
| CEC (cmolc/kg)                 | 1-1,6                           | 0,49-1,44 (ECEC)                 |
| P Total (mg/kg)                | 0,7-1,5                         | 2,7-6,2                          |
| K (cmolc/kg)                   | 0,04-0,09                       | 0,03-0,2                         |

Nous notons que les valeurs des paramètres chimiques de nos échantillons ne suivent pas parfaitement les données de la littérature. Les valeurs des paramètres calculés appartiennent à une gamme plus importante que les paramètres de la littérature.

Cependant, ces valeurs calculées proviennent de sols ayant connu tous les types de fertilisation alors qu'il n'y a aucune précision là-dessus dans les valeurs de la littérature. On remarque en outre que les différences entre les 3 types de sol ne sont pas très importantes. Il n'y a notamment aucune différence en terme de texture pour nos échantillons. Ce résultat justifie en outre la possibilité de réaliser des tests de Student entre différents modes de fertilisation, en mélangeant ces types de sol (Tableau 5.9).

Afin de confirmer ces remarques, nous avons effectué des tests de Student entre les différents paramètres chimiques des différents types de sol. Nous avons tout d'abord vérifié la normalité des échantillons, paramètre chimique par paramètre chimique, et ce pour les trois types de sol. Ces tests de normalité se trouvent en Annexe 8. Nous pouvons cependant les résumer brièvement : tous les échantillons de bases échangeables et de pH sont normaux sauf le pH KCl de l'arenic Lixisol et du ferralic Arenosol, l'échantillon de K pour le ferralic Arenosol et l'échantillon de Mg pour l'arenic Cambisol.

Concernant les mesures de l'acidité, de l'aluminium, de la ECEC et du phosphore, tous les échantillons sont normaux sauf les échantillons de mesure du phosphore des arenic Lixisol et

ferralic Arenosol. Le Tableau 5.13 reprend les tests de Student calculés dans cette analyse comparative des types de sols sur base des paramètres chimiques.

Tableau 5.13 : tests de Student entre paramètres chimiques de sols de types différents (prof : 0-20 cm ; fer = ferralic Arenosol, cambi = arenic Cambisol, lixi = arenic Lixisol)

|            | pH eau                     | pH KCl                 | Ca cmolc/kg    | K cmolc/kg      | Mg cmolc/kg |
|------------|----------------------------|------------------------|----------------|-----------------|-------------|
| fer-cambi  | 0.68                       | 0.47                   | <b>0.03</b>    | 0.13            | 0.06        |
| fer-lixi   | 0.58                       | 0.52                   | 0.17           | 0.25            | 0.22        |
| cambi-lixi | 0.79                       | 0.96                   | 0.46           | 0.69            | 0.46        |
|            | somme bases éch (cmolc/kg) | acidité d'éch cmolc/kg | Al+++ cmolc/kg | ECEC (cmolc/kg) | P mg/kg     |
| fer-cambi  | <b>0.03</b>                | 0.30                   | 0.39           | <b>0.01</b>     | 0.96        |
| fer-lixi   | 0.16                       | 0.58                   | 0.88           | 0.06            | 0.15        |
| cambi-lixi | 0.43                       | 0.65                   | 0.52           | 0.15            | 0.14        |

La seule petite tendance observée est une petite différence dans la quantité totale de bases échangeables entre ferralic Arenosol et arenic Cambisol. En effet les différences sont significatives entre ces deux types de sols pour le Ca, et presque pour le Mg, ce qui se reflète dans la somme des bases échangeables et dans la ECEC. Ceci est illustré par la Fig. 5.8.

Le peu de différences significatives observées lors de cette analyse comparative des sols peut potentiellement s'expliquer partiellement sur base de la prise d'échantillons. En effet, le choix des parcelles a été effectué sur base d'une carte des sols peu précise, et d'un Munsell dont l'efficacité est relative, surtout pour un daltonien. Les différences visuelles entre les trois types de sol étudiés ne sont pas extrêmement marquées et il se peut que dans les échantillons de chaque type de sol se trouvent quelques échantillons appartenant à un autre type de sol. Nous pouvons d'ailleurs observer sur la carte de localisation de la prise d'échantillons (voir carte p. 72), que le type de sol d'un échantillon ne correspond pas toujours au type de sol du lieu d'échantillonnage selon la carte des sols.

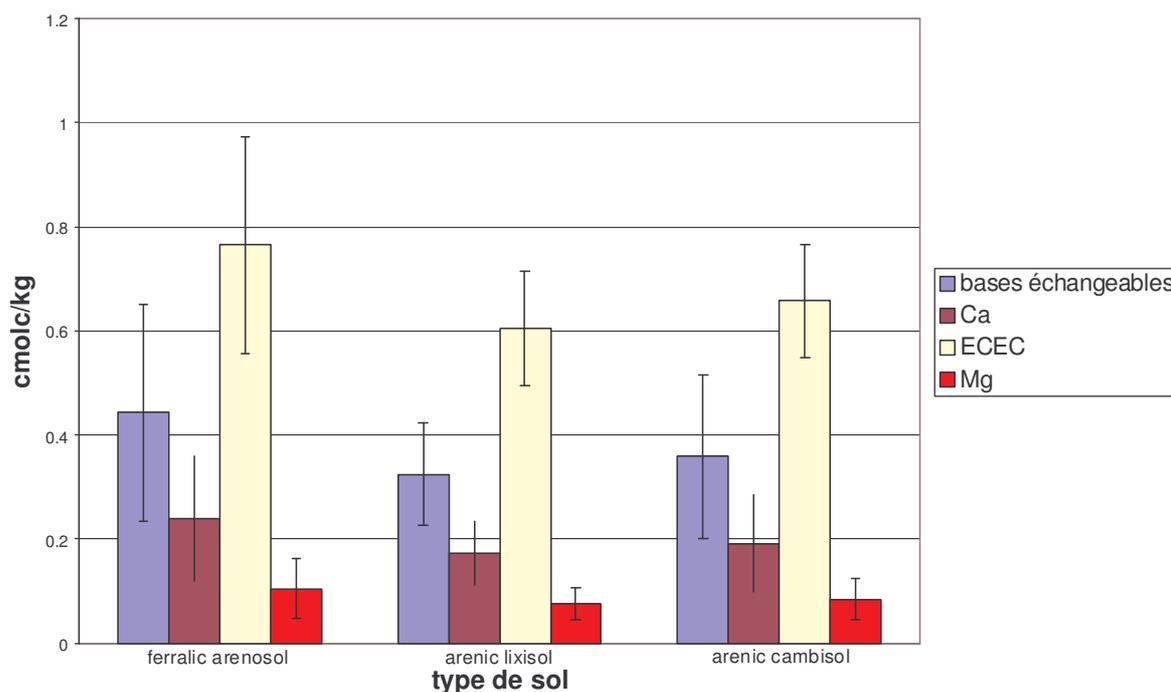


Fig 5.8 : concentration en Ca, Mg, somme de bases échangeables et ECEC selon le type de sol.

En plus de ces faibles différences entre types de sol, la comparaison entre variabilité régionale et variabilité inter- et intra-parcellaire peut également nous étonner.

Ainsi, si l'on compare les Tableaux 5.14 et 5.15, on observe que l'écart entre maximum et minimum est comparable voire plus élevé pour les paramètres de l'étude inter- et intra-parcellaire que pour les paramètres de l'étude régionale. On peut cependant noter que les échantillons de l'analyse régionale connaissent une concentration en phosphore moyenne plus élevée que ceux de l'analyse inter- et intra-parcellaire. Ceci est sans doute dû au fait que les parcelles de l'analyse inter- et intra-parcellaire, n'ayant connu aucune fertilisation depuis la fin de leur jachère, subissent un appauvrissement en cet élément. La recherche de parcelles pour l'étude régionale ne s'intéressait qu'à la fertilisation actuelle, sans faire attention aux fertilisations utilisées précédemment sur la même parcelle.

Rappelons que les parcelles concernées par les deux premières études ne sont que d'un seul type de sol, arenic Lixisol, et n'ont connu aucune fertilisation alors que les parcelles de l'étude régionale concernent trois types de sols et quatre types de fertilisation.

Nous pouvons donc conclure que variabilité spatiale tant au niveau de la parcelle qu'au niveau de la région entière du Fakara sont comparables.

Tableau 5.14 : maxima, minima, moyennes et variances des propriétés chimiques des échantillons provenant des analyses inter- et intra-parcellaire (sol de type arenic Lixisol, prof : 0-20 cm).

| Analyse inter et intra parc. | Unités   | max  | min  | moyenne | variance |
|------------------------------|----------|------|------|---------|----------|
| pH eau                       |          | 6.5  | 5.3  | 5.8     | 0.05     |
| pH KCl                       |          | 6.1  | 4.6  | 5.2     | 0.11     |
| Ca <sup>++</sup>             | cmolc/kg | 0.80 | 0.10 | 0.32    | 0.01     |
| K <sup>+</sup>               | cmolc/kg | 0.11 | 0.01 | 0.05    | 0.0002   |
| Mg <sup>++</sup>             | cmolc/kg | 0.25 | 0.03 | 0.11    | 0.002    |
| Somme bases                  | cmolc/kg | 1.14 | 0.15 | 0.50    | 0.03     |
| ECEC                         | cmolc/kg | 1.24 | 0.38 | 0.67    | 0.024    |
| P                            | mg/kg    | 7.78 | 2.05 | 3.68    | 1.85     |
| acidité d'échange            | cmolc/kg | 0.46 | 0.03 | 0.17    | 0.015    |
| Al <sup>+++</sup>            | cmolc/kg | 0.28 | 0    | 0.08    | 0.004    |
| C orga                       | %        | 0.32 | 0.12 | 0.17    | 0.001    |

Tableau 5.15 : Maxima, minima, moyennes et écart-types des paramètres chimiques de l'analyse régionale (prof 0-20 cm)

| Analyse Régionale<br>(prof : 0-20cm) | Unités   | Max  | Min  | moyenne | écart-<br>type |
|--------------------------------------|----------|------|------|---------|----------------|
| pH eau                               |          | 6.5  | 4.8  | 5.5     | 0.3            |
| pH KCL                               |          | 5.2  | 4.0  | 4.5     | 0.3            |
| Ca <sup>++</sup>                     | cmolc/kg | 0.54 | 0.04 | 0.20    | 0.09           |
| K <sup>+</sup>                       | cmolc/kg | 0.21 | 0.01 | 0.07    | 0.04           |
| Mg <sup>++</sup>                     | cmolc/kg | 0.24 | 0.01 | 0.08    | 0.04           |
| somme bases                          | molc/kg  | 0.94 | 0.09 | 0.37    | 0.16           |
| Acidité                              | cmolc/kg | 0.6  | 0.1  | 0.3     | 0.12           |
| Al <sup>+++</sup>                    | cmolc/kg | 0.4  | 0    | 0.15    | 0.09           |
| ECEC                                 | cmolc/kg | 1.44 | 0.41 | 0.67    | 0.16           |
| P                                    | mg/kg    | 8.6  | 2.02 | 5.87    | 3.14           |

Outre la comparaison des sols et la comparaison des pratiques de fertilisation, une dernière analyse de résultat est possible avec nos échantillons régionaux : il s'agit de la comparaison des paramètres chimiques entre les deux profondeurs étudiées, à savoir 0-20 cm et 20-50 cm. Des tests de Student ont également été calculés afin de savoir si les différences entre paramètres chimiques des deux profondeurs étaient significatives (Tableau 5.16). Ces tests ont

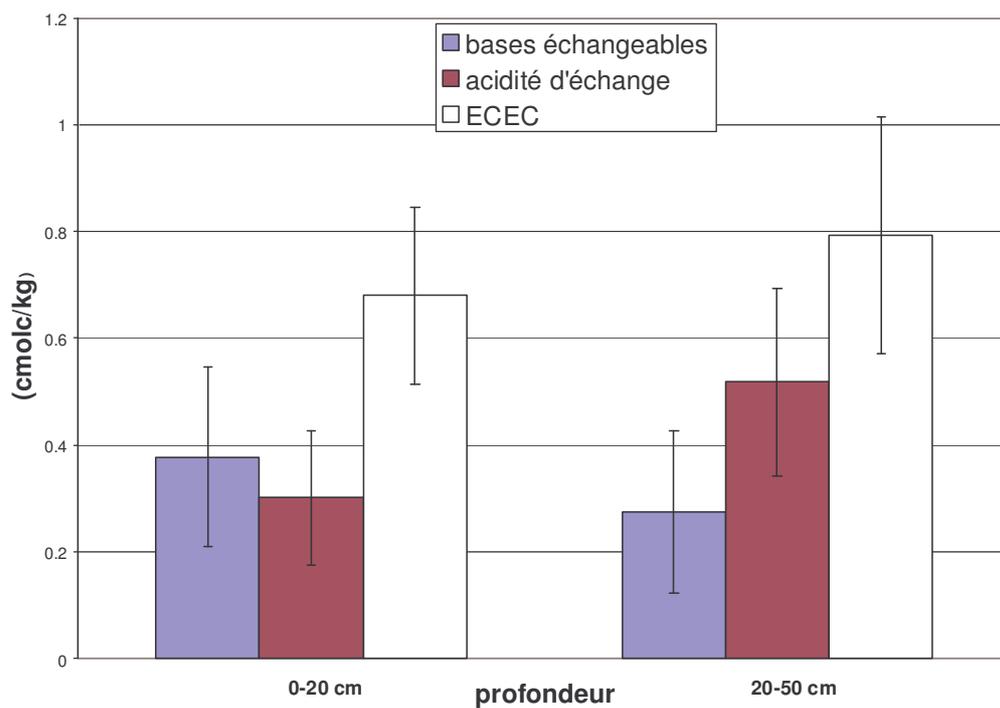
été calculés après avoir mélangé les données provenant de types de sols et de fertilisations différents.

*Tableau 5.16 : tests de Student entre propriétés chimiques d'échantillons provenant de profondeurs différentes (0-20 cm et 20-50 cm) quel que soit le type de sol et de fertilisation, et moyennes de ces propriétés par profondeur.*

|                            | Propriétés chimiques |        |             |            |             |                          |                        |                |               |
|----------------------------|----------------------|--------|-------------|------------|-------------|--------------------------|------------------------|----------------|---------------|
|                            | pH eau               | pH KCL | Ca cmolc/kg | K cmolc/kg | Mg cmolc/kg | somme bases éch cmolc/kg | Acidité d'éch cmolc/kg | Al+++ cmolc/kg | ECEC cmolc/kg |
| P value du Test de Student | <0.001               | <0.001 | <0.001      | 0.4        | 0.002       | <0.001                   | <0.001                 | <0.001         | 0.001         |
| Moyenne 0-20 cm            | 5.5                  | 4.5    | 0.20        | 0.07       | 0.08        | 0.37                     | 0.30                   | 0.15           | 0.67          |
| Moyenne 20-50 cm           | 5.2                  | 4.3    | 0.13        | 0.06       | 0.06        | 0.27                     | 0.51                   | 0.31           | 0.79          |

Les différences sont significatives pour tous les éléments chimiques sauf pour le K. En réalité, cela signifie que nous observons une légère diminution de concentration de toutes les bases échangeables avec la profondeur. Parallèlement, nous notons une diminution du pH plus marquée, et en conséquence, une augmentation de l'acidité d'échange, et surtout de la concentration en Al avec la profondeur (voir Fig 5.9).

La ECEC est également un petit peu plus élevée en profondeur, mais ici la cause est certainement un pourcentage d'argile plus élevé en profondeur, et ce, quel que soit le type de sol, ce qui peut être observé sur les résultats de l'analyse de granulométrie présentés en Annexe 3.



*Fig 5.9 : comparaison de la ECEC, et de la concentration en bases échangeables et en acidité d'échange par profondeur pour tous les types de sols et de fertilisation*

Enfin, comme dans le cas des études intra- et inter-parcellaire, les corrélations ont été calculées entre les différents paramètres chimiques des sols de la partie régionale, et ce pour les deux profondeurs (Tableau 5.17 et 5.18).

Tableau 5.17 : tests de corrélation de Pearson entre les paramètres chimiques des sols de l'analyse régionale (prof : 0-20 cm ; arenic Cambisol, arenic Lixisol, ferralic Arenosol)

|                         | pH<br>KCl    | Ca<br>(méq/100g) | K<br>(méq/100g) | Mg<br>(méq/100g) | Bases éch<br>(méq/100g) | Acidité<br>(méq/100g) | Al<br>(méq/100g) | ECEC<br>(cmolc/kg) | P<br>(mg/kg) |
|-------------------------|--------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|--------------------|--------------|
| pH eau                  | <b>0.024</b> | 0.764            | 0.163           | 0.557            | 0.467                   | <b>0.016</b>          | <b>0.012</b>     | 0.295              | 0.362        |
| pH KCl                  |              | 0.07             | 0.051           | <b>0.04</b>      | <b>0.03</b>             | <b>&lt;0.001</b>      | <b>&lt;0.001</b> | 0.218              | 0.142        |
| Ca<br>(méq/100g)        |              |                  | <b>0.001</b>    | <b>&lt;0.001</b> | <b>&lt;0.001</b>        | <b>0.001</b>          | <b>0.001</b>     | <b>&lt;0.001</b>   | 0.286        |
| K<br>(méq/100g)         |              |                  |                 | <b>&lt;0.001</b> | <b>&lt;0.001</b>        | 0.361                 | 0.656            | <b>&lt;0.001</b>   | 0.376        |
| Mg<br>(méq/100g)        |              |                  |                 |                  | <b>&lt;0.001</b>        | <b>0.001</b>          | <b>0.004</b>     | <b>&lt;0.001</b>   | 0.582        |
| Bases éch<br>(méq/100g) |              |                  |                 |                  |                         | <b>0.002</b>          | <b>0.004</b>     | <b>&lt;0.001</b>   | 0.321        |
| Acidité<br>(méq/100g)   |              |                  |                 |                  |                         |                       | <b>&lt;0.001</b> | <b>0.005</b>       | 0.648        |
| Al<br>(méq/100g)        |              |                  |                 |                  |                         |                       |                  | <b>0.004</b>       | 0.464        |
| ECEC<br>(cmolc/kg)      |              |                  |                 |                  |                         |                       |                  |                    | 0.183        |

Tableau 5.18 : tests de corrélation de Pearson entre les paramètres chimiques des sols de l'analyse régionale (prof : 20-50 cm ; arenic Lixisol, arenic Cambisol, ferralic Arenosol)

|                         | pH<br>KCl   | Ca<br>(méq/100g) | K<br>(méq/100g) | Mg<br>(méq/100g) | Bases éch<br>(méq/100g) | Acidité<br>(méq/100g) | Al<br>(méq/100g) | ECEC<br>(cmolc/kg) |
|-------------------------|-------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|--------------------|
| pH eau                  | <b>0.02</b> | 0.066            | 0.112           | 0.111            | <b>0.037</b>            | <b>&lt;0.001</b>      | <b>&lt;0.001</b> | 0.056              |
| pH KCl                  |             | 0.563            | 0.523           | 0.648            | 0.591                   | <b>&lt;0.001</b>      | <b>&lt;0.001</b> | <b>&lt;0.001</b>   |
| Ca<br>(méq/100g)        |             |                  | <b>0.034</b>    | <b>&lt;0.001</b> | <b>&lt;0.001</b>        | 0.298                 | 0.284            | <b>&lt;0.001</b>   |
| K<br>(méq/100g)         |             |                  |                 | <b>0.003</b>     | <b>&lt;0.001</b>        | 0.837                 | 0.945            | <b>0.001</b>       |
| Mg<br>(méq/100g)        |             |                  |                 |                  | <b>&lt;0.001</b>        | 0.848                 | 0.918            | <b>&lt;0.001</b>   |
| Bases éch<br>(méq/100g) |             |                  |                 |                  |                         | 0.488                 | 0.524            | <b>&lt;0.001</b>   |
| Acidité<br>(méq/100g)   |             |                  |                 |                  |                         |                       | <b>&lt;0.001</b> | <b>&lt;0.001</b>   |
| Al<br>(méq/100g)        |             |                  |                 |                  |                         |                       |                  | <b>&lt;0.001</b>   |

Les résultats de ces tests de corrélation sont fortement similaires pour les deux profondeurs. Ainsi, nous retrouvons pour les deux profondeurs les corrélations attendues entre toutes les bases échangeables (Ca, K, Mg, somme des bases échangeables) et la ECEC. Toutes aussi attendues sont les corrélations entre les différents pH, l'acidité, et l'aluminium.

Par contre, nous observons quelques résultats qui diffèrent entre les deux profondeurs. Premièrement, pour la profondeur 0-20 cm, il y a des corrélations entre pH KCl et Mg, ainsi qu'entre pH KCl et la somme des bases échangeables (voir Fig 5.10). Le Mg et l'ensemble des bases échangeables augmentent proportionnellement au pH KCl du sol.

Ceci est assez logique, tout comme les corrélations entre acidité d'une part, et Mg, bases échangeables d'autre part. Ce sont les mêmes phénomènes déjà observés dans les études inter- et intra-parcellaire, cependant le même fait n'est pas observé pour la profondeur 20-50 cm.

Ceci est sans doute dû au fait que l'acidité est plus forte en profondeur, et la concentration en bases échangeables ainsi que sa variation spatiale plus faibles.

Il y a également corrélations entre aluminium et acidité d'une part, et ECEC d'autre part (voir Fig 5.11).

Les figures suivantes concernent les valeurs des deux profondeurs, afin d'observer si l'ajout de valeurs confirme l'observation ou non.

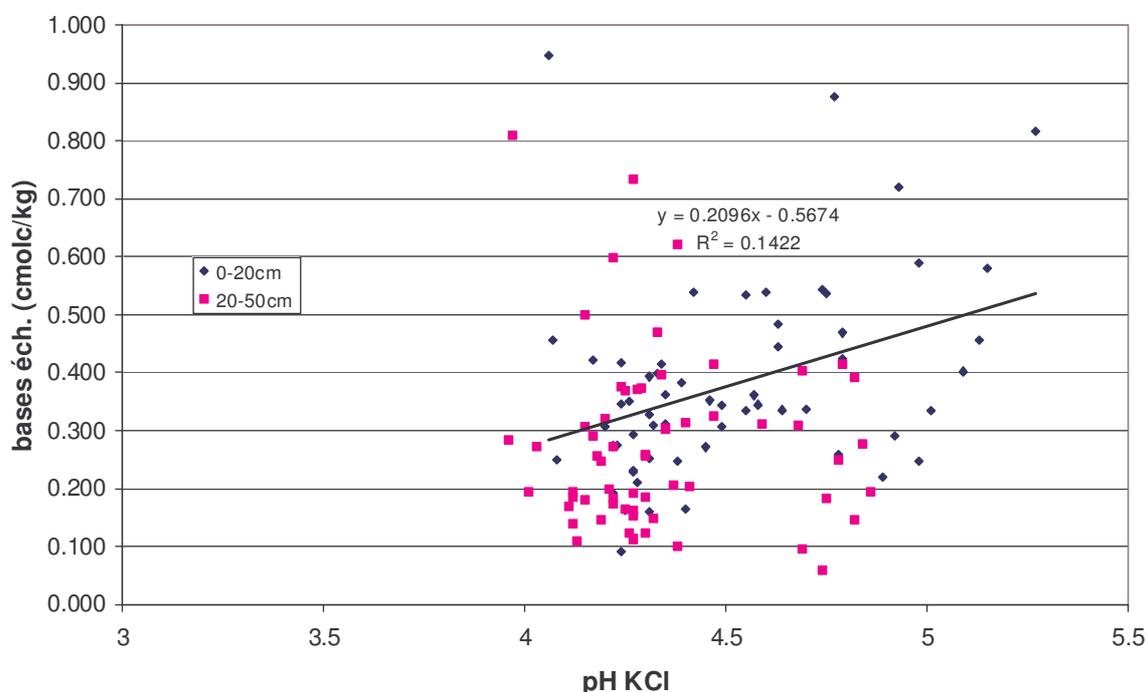


Fig 5.10 : corrélation entre pH KCl et bases échangeables pour les trois types de sol (arenic Cambisol, arenic Lixisol et ferralic Arenosol) et à deux profondeurs différentes (0-20cm et 20-50 cm)

La corrélation entre pH KCl et bases échangeables, initialement trouvée pour la profondeur 0-20 cm est ici confirmée par l'ajout des points provenant de la profondeur 20-50 cm, alors que ces points seuls ne montraient aucune tendance.

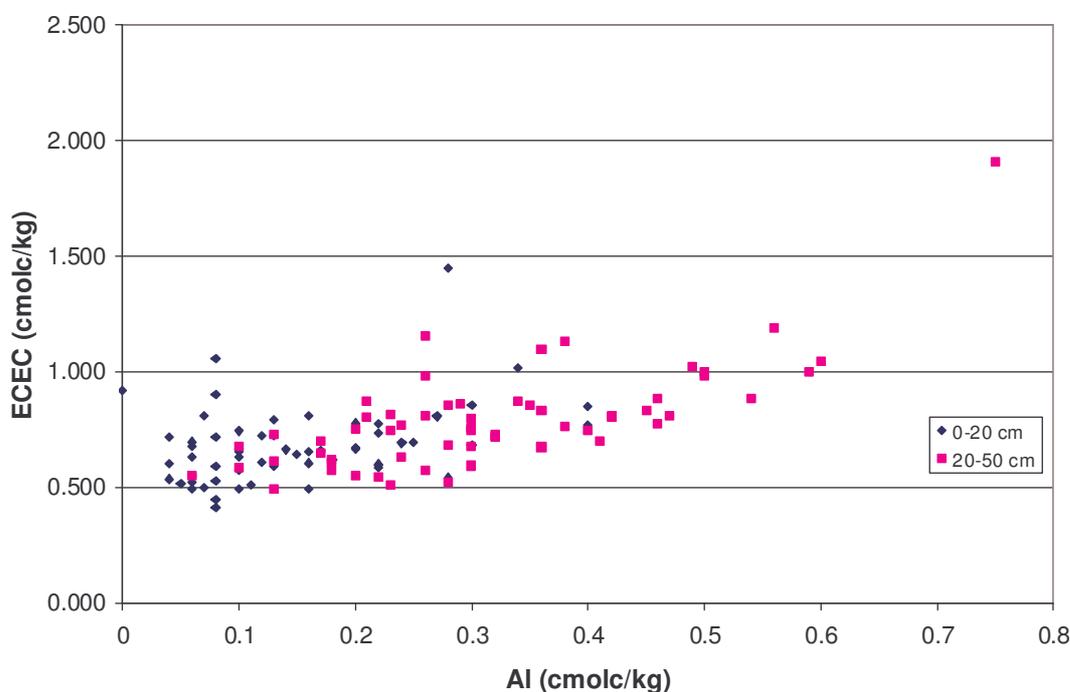


Fig 5.11 : corrélation entre aluminium et ECEC pour les trois types de sol (arenic Cambisol, arenic Lixisol et ferralic Arenosol) et à deux profondeurs différentes (0-20cm et 20-50 cm)

La même tendance est également observée pour les deux profondeurs entre la ECEC et la concentration en aluminium, à savoir une légère augmentation de la ECEC suite à l'augmentation de l'aluminium. Premièrement, on observe que l'aluminium augmente avec la profondeur suite à l'augmentation du pH avec la profondeur, et la ECEC augmente également avec la profondeur, suite à l'augmentation du taux d'argile déjà cité précédemment. Cependant, l'augmentation de la ECEC suite à l'augmentation de l'aluminium elle-même provient certainement d'erreurs expérimentales. En effet, la surévaluation de la concentration en aluminium, chose fréquente en titrage se répercute certainement sur la ECEC dans le calcul de laquelle l'aluminium joue un rôle très important.

## 1.4 Conclusion

Cette analyse de la variabilité spatiale de la fertilité chimique peut être conclue par un double constat : premièrement la variabilité spatiale de la fertilité chimique est aussi élevée voire plus importante au niveau de la parcelle qu'au niveau du territoire du Fakara. Deuxièmement, à la lumière de la recherche bibliographique, cette variabilité spatiale pourrait être en grande partie due à la variabilité spatiale de la matière organique.

En effet, nous avons mis en exergue le peu de différences entre nos trois types de sols (en partie due à la prise d'échantillons). Nous avons également insisté sur le fait que la variabilité spatiale était plus importante dans l'étude intra-parcellaire que dans l'étude inter-parcellaire. Dans une moindre mesure, nous n'avons pas remarqué de réelles tendances dans l'étude comparative des méthodes de fertilisation.

Le taux de matière organique semble jouer un rôle primordial sur la fertilité chimique. Outre son apport en azote que nous n'avons pu étudier, la matière organique participe grandement à la CEC du sol et est un réservoir d'éléments chimiques qui sont relâchés petit à petit dans le sol, limitant les pertes.

Enfin, les études de corrélations nous ont permis d'insister sur la grande complexité des phénomènes chimiques dans les sols de la région, sans doute en partie due au mode de fertilisation, très faible en quantités apportées et très hétérogène même à l'échelle de la parcelle. Les faibles taux de fertilisation apportés ne sont pas suffisant pour échapper à la dynamique complexe des phénomènes chimiques présents.

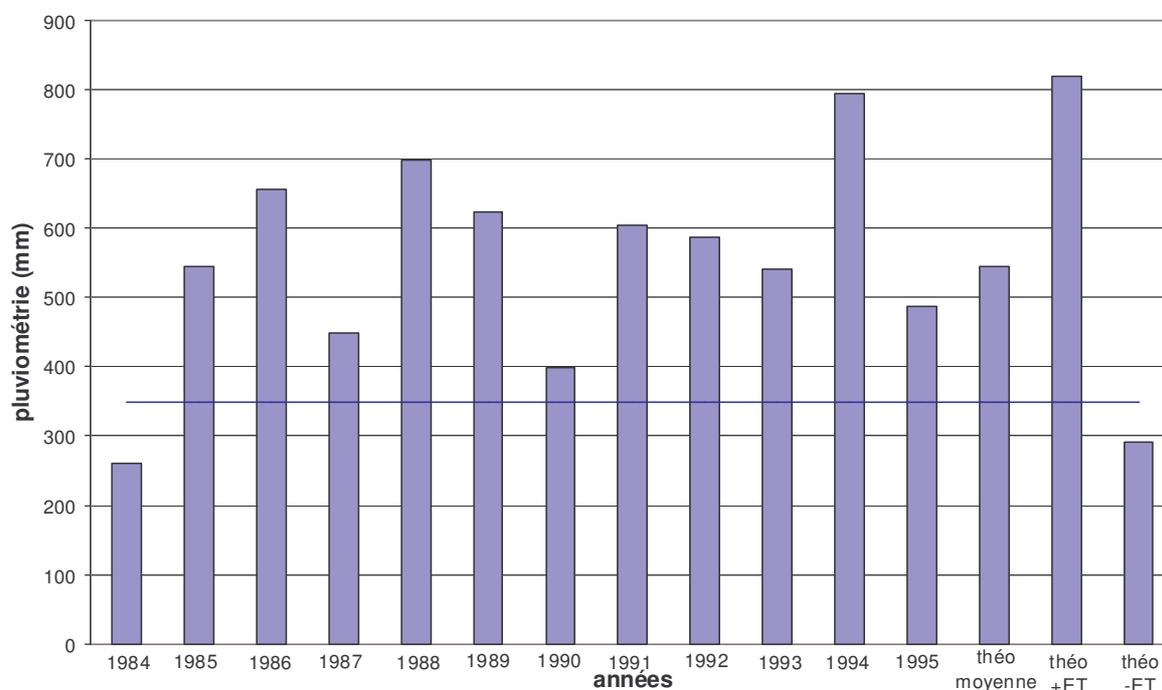
A titre d'exemple, les pH faibles du lieu provoquent une apparition de l'aluminium, auquel le mil est résistant. Cependant, les oxy-hydroxydes d'aluminium et de fer participent à l'adsorption du phosphore le rendant indisponible pour la plante. La réponse du mil à l'application de phosphore dans ces conditions dépendra à son tour de la quantité d'azote disponible.

## 2. Résultats de l'analyse de sensibilité d'APSIM

### 2.1. Pluviométrie et rendements

La variabilité inter-annuelle de la pluviométrie est très grande (voir Fig 5.12, 5.13, 5.14). Ces différences de pluviométrie sont importantes à noter car il s'agit dans les faits du principal paramètre différenciant les années.

Le mil consomme de 350 à 400 mm d'eau par an. La Fig. 5.12 représente la pluviométrie totale pour les différentes années de l'étude de sensibilité.



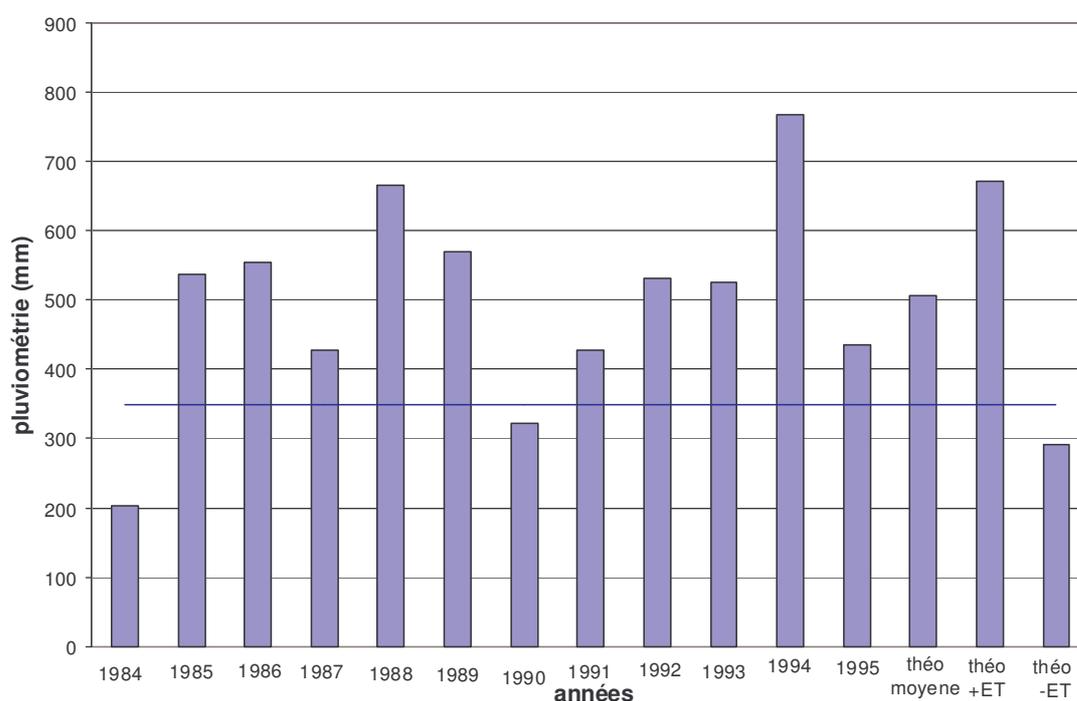
*Fig 5.12 : pluviométrie annuelle totale pour les différentes années concernées par l'analyse de sensibilité*

La marque située à 350 mm, représentant les besoins théoriques du mil, nous apprend plusieurs choses : les années 1984, théorique à faible pluviométrie et 1990 dans une moindre mesure, ont connu de faibles pluviométries ne parvenant pas ou à peine à rencontrer les besoins théoriques du mil. En sachant que le stockage d'eau dans le profil est négligeable, la Fig. 5.12 nous apprend aussi quelles années ont connu des pluies bien plus importantes que les besoins, et donc un lessivage important. Les années 1986, 1988, 1989, 1991, 1994 et théorique à forte pluviométrie ont toutes connu une pluviométrie supérieure à 600 mm par an

et seront certainement les années les plus touchées par le lessivage. Enfin, les années restantes ont eu un comportement comparable à l'année moyenne théorique, concernant la pluviométrie annuelle. Il s'agit de 1985, 1987, 1992, 1993, 1995 et l'année moyenne théorique.

Cependant, la Fig. 5.12 ne renseigne pas réellement de la rencontre des besoins en eau du mil, car cette figure représente la pluviométrie totale, et non celle entre semis et récolte agissant sur la croissance et le développement du mil.

La figure 5.13 représente cette pluviométrie entre semis et récolte. Rappelons que le semis a été effectué chaque année à la première pluie dépassant 10 mm et ayant lieu au mois de juin.



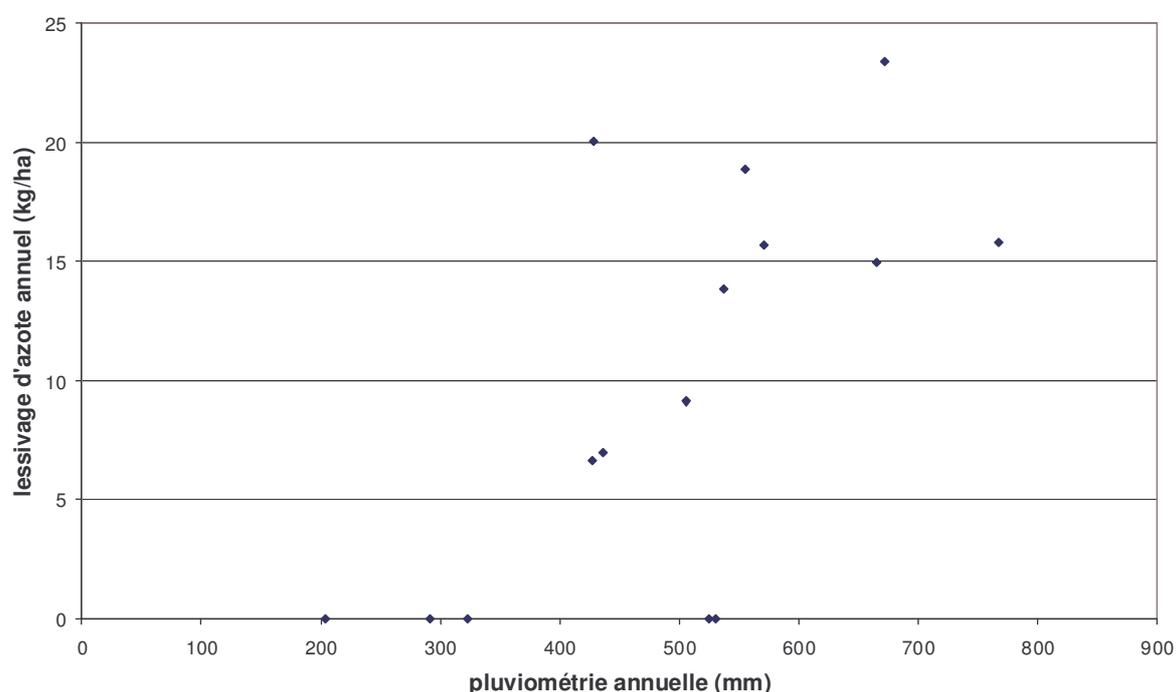
*Fig. 5.13 : pluviométrie entre semis et récolte pour les différentes années concernées par l'analyse de sensibilité*

La figure 5.13 nous apprend que 1984, 1990 et l'année théorique à faible pluviométrie n'ont pas connu de pluviométries aptes à rencontrer les besoins en eau du mil. Les années 1987, 1991 et 1995 ont connu des pluviométries à peine supérieures à 400 mm. Les années 1988, 1994 et théorique à forte pluviométrie ont toutes trois connu des pluviométries abondantes.

Si la pluviométrie totale est très importante pour la croissance du mil, la distribution peut l'être aussi à plus d'un titre. Premièrement, un manque de pluie à un moment précis dans le développement du mil peut se révéler catastrophique sur le rendement. Ainsi, la pluviométrie

autour de la mi-août (220<sup>e</sup> jour approximativement) est extrêmement importante pour son impact sur la floraison, période critique en ce qui concerne le rendement en grains.

Deuxièmement, de fortes pluies concentrées peuvent provoquer un lessivage important et une perte nette de nitrates pour la plante. La figure 5.14 représente la relation entre lessivage total et pluviométrie totale, pour les différentes années simulées. Nous remarquons qu'il n'y a pas de corrélation nette entre les deux paramètres, ceci étant dû à la distribution de la pluie. Une pluie très concentrée provoque plus de lessivage que quelques pluies peu importantes très espacées dans le temps, même si la quantité totale d'eau de pluie est égale.



*Fig. 5.14 : relation entre lessivage de l'azote tout au long de l'année et pluviométrie annuelle, pour les différentes années simulées*

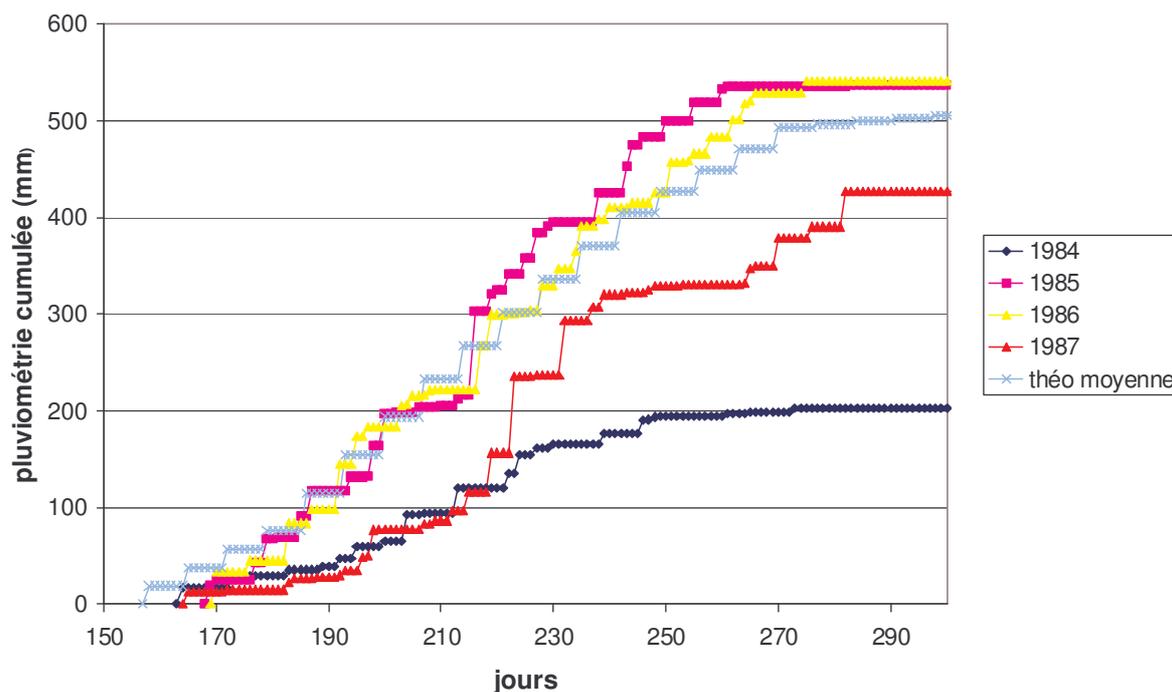
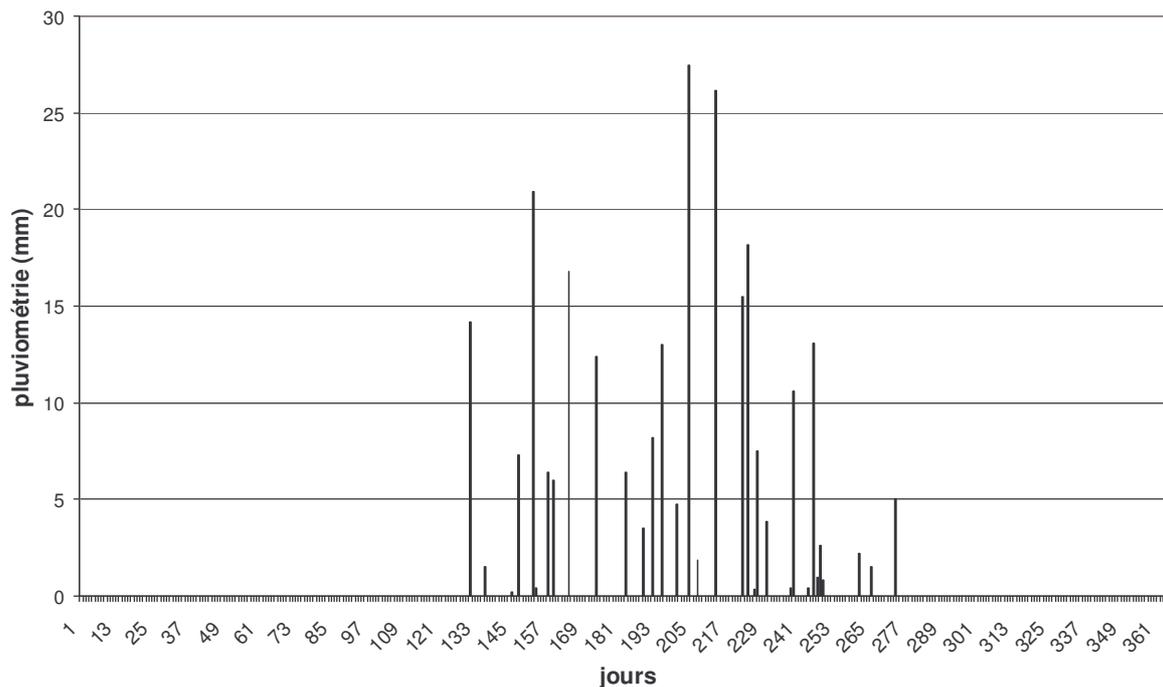


Fig 5.15 : pluviométrie cumulée à partir du semis de 1984, 1985, 1986, 1987 et théorique moyenne à Niamey

La figure 5.15 représente les courbes de pluviométrie cumulée de quelques années concernées par l'étude de sensibilité. Les courbes de pluviométrie cumulée des autres années se trouvent en Annexe 9. Ces courbes permettent de juger de la distribution de la pluviométrie entre le semis et la récolte.

Nous remarquons ainsi pour ces premières années, que 1984 (203 mm) et 1987 (426 mm) ont été inférieure à l'année théorique moyenne (505 mm). Par contre, les années 1985 et 1986 ont connu une pluviométrie comparable à l'année moyenne. En particulier, la distribution est bonne lors de la période sensible de la floraison (alentours du 220<sup>e</sup> jour).

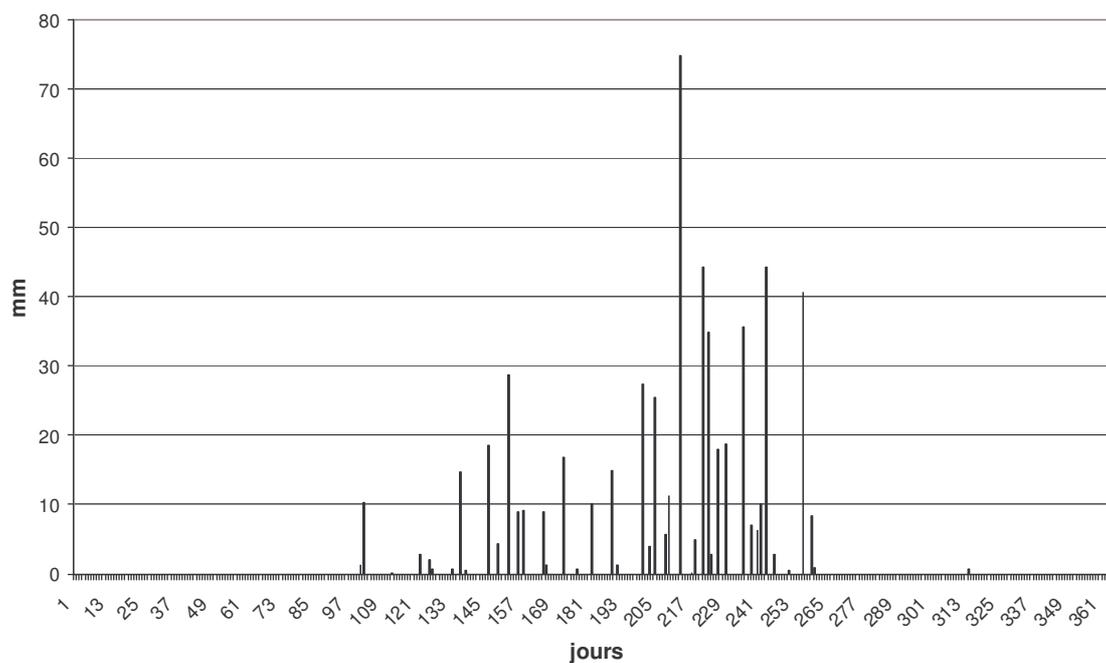
En ce qui concerne l'année 1984, nous remarquons qu'en plus de connaître une pluviométrie totale assez faible, elle souffre également de manque de pluies supérieures à 20 mm/j entre le 150<sup>e</sup> et le 200<sup>e</sup> jour, et après le 213<sup>e</sup> jour, soit lors de la phase de remplissage des grains (voir Fig 5.16).



*Fig 5.16 : pluviométrie journalière de l'année 1984*

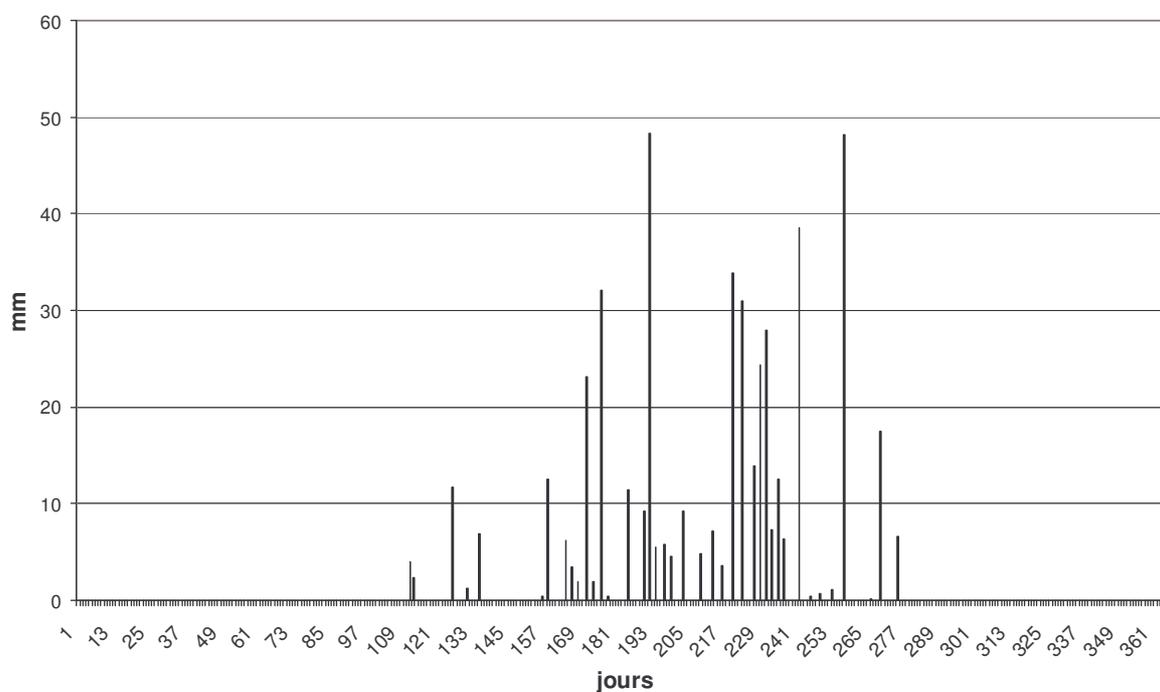
En bref, les courbes de pluviométrie cumulée présentes en annexes nous apprennent que l'année 1991 a connu une pluviométrie totale sur la saison de culture un peu plus faible que la moyenne mais une sécheresse lors de la floraison. 1990 par contre fut une saison très sèche mais la distribution fut relativement bonne lors de la floraison.

Les quatre dernières années (1992 à 1995) ont toutes été bien arrosées, avec une bonne distribution de pluies lors de la floraison, sauf 1995. L'année 1994, avec une pluviométrie totale sur la saison de 767mm, fut certainement marquée par le lessivage.



*Fig 5.17 : pluviométrie journalière de 1992*

La figure 5.17 nous montre le détail de la pluviométrie de 1992, qui présente un manque d'eau entre le 160<sup>e</sup> et le 200<sup>e</sup> jour.



*Fig 5.18 : pluviométrie journalière de 1995*

La figure 5.18 nous montre quant à elle un manque d'eau en 1995 lors de la phase critique de la floraison.

Le Tableau 5.19 représente les paramètres utilisés par défaut dans APSIM pour le calcul des phénomènes hydriques du sol.

*Tableau 5.19 : paramètres physiques par défaut , par profondeur utilisés par APSIM dans le calcul des flux hydriques du sol. Valeurs provenant des mesures effectuées à Sadoré. Les quatre premiers paramètres sont des teneurs en eau volumique.*

|   | Profondeur (cm) |       |       |       |       |       |        |         |         |         |
|---|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
|   | 0-15            | 15-30 | 30-45 | 45-60 | 60-75 | 75-90 | 90-120 | 120-150 | 150-180 | 180-200 |
| Sol séché à l'air (mm/mm)                 | 0.018           | 0.022 | 0.03  | 0.035 | 0.035 | 0.04  | 0.045  | 0.044   | 0.048   | 0.05    |
| Point de flétrissement (mm/mm)            | 0.018           | 0.022 | 0.031 | 0.048 | 0.048 | 0.051 | 0.048  | 0.044   | 0.048   | 0.05    |
| Capacité au champ (mm/mm)                 | 0.090           | 0.095 | 0.095 | 0.085 | 0.085 | 0.085 | 0.085  | 0.085   | 0.085   | 0.085   |
| Teneur en eau du sol à saturation (mm/mm) | 0.379           | 0.413 | 0.421 | 0.411 | 0.407 | 0.401 | 0.396  | 0.384   | 0.376   | 0.376   |
| Coefficient de drainage                   | 0.7             | 0.7   | 0.7   | 0.7   | 0.7   | 0.7   | 0.7    | 0.7     | 0.7     | 0.7     |
| Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )    | 1.590           | 1.5   | 1.48  | 1.5   | 1.52  | 1.53  | 1.55   | 1.58    | 1.6     | 1.6     |

La teneur en eau du sol séché à l'air est également la quantité d'eau présente dans le sol à la fin de la saison sèche. Si ses valeurs sont inférieures à la teneur en eau au point de flétrissement, ce sont ces dernières valeurs qui sont utilisées. La capacité au champ a été estimée à partir du drainage interne de 60 tubes de sol après 30 jours. La teneur en eau du sol à saturation est égale à la porosité totale du sol moins 5% de porosité représentant l'air piégé dans les pores.

Le coefficient de drainage est un paramètre ajustant le taux de drainage. En effet, celui-ci est sous estimé lorsque le sol est très humide. Ce coefficient est affecté par la valeur de la teneur en eau volumique à la capacité au champ.

Nous allons maintenant observer les rendements en biomasse et en grain lors des différentes années. Le graphique le plus représentatif de l'évolution du rendement journalier est, comme pour la pluviométrie, le rendement observé le long de la saison culturale.

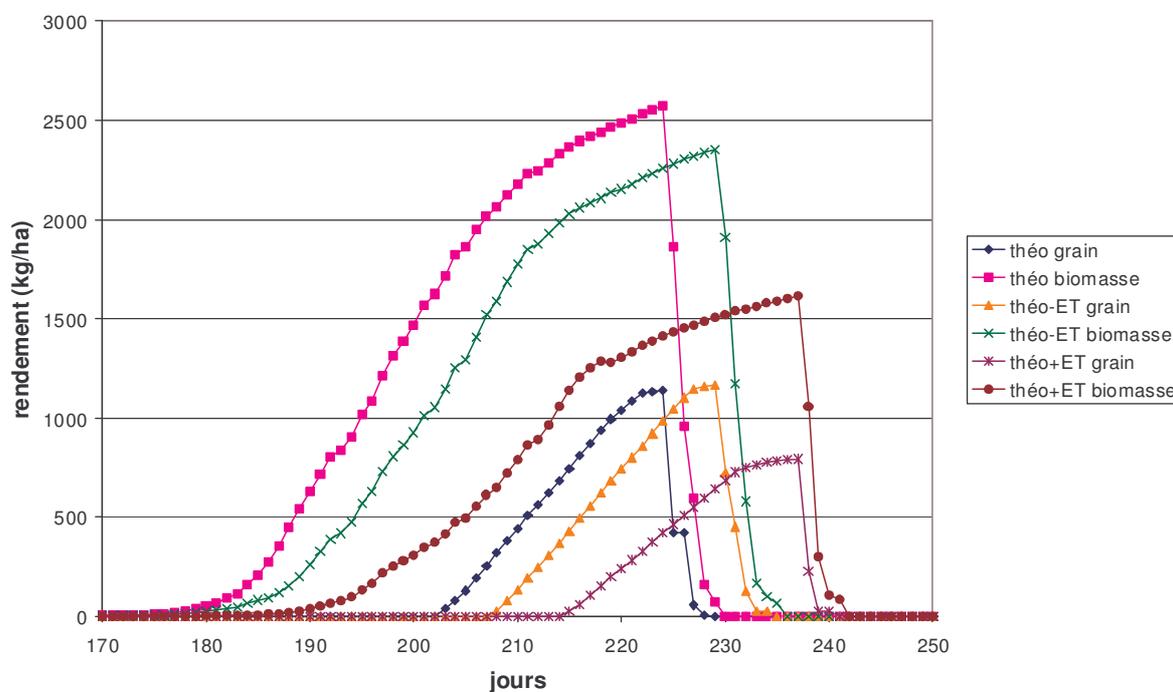


Fig 5.19 : rendements cumulés en grain et en biomasse des années de pluviométrie théorique

En ce qui concerne les années théoriques de pluviométrie, les rendements correspondants ne présentent pas une enveloppe, dont les courbes extrêmes seraient les années théoriques + et – l'écart type comme on pourrait s'y attendre (Fig 5.19). Au contraire, l'année ayant connu la meilleure pluviométrie est celle connaissant les moins bons rendements, tant en grain qu'en biomasse, alors que l'année à faible pluviométrie connaît un rendement en biomasse plus proche de celui de l'année théorique moyenne et un rendement en grain même supérieur.

Ceci est explicable par le lessivage de nitrates bien plus important lors des années à forte pluviométrie. La Fig 5.20 représente le flux de nitrates modélisé à travers la dixième couche de sol (180-200 cm) pour les trois années théoriques de pluviométrie.

On remarque directement que le lessivage est plus important pour l'année théorique + ET que pour l'année théorique moyenne, alors qu'il est inexistant lors de l'année théorique à faible pluviométrie. Rappelons que toutes les simulations débutent avec le même stock initial de

nitrate dans le sol qui est de 20 kg/ha entre 15 et 30 cm de profondeur. La différence de lessivage a donc un impact très significatif sur la différence de rendement.

Paul (1989) a observé que dans les sols sableux, 100 mm de pluie peuvent provoquer une descente du pic de nitrates de 40 cm de profondeur, même en une semaine, soit à une vitesse bien supérieure à la vitesse de croissance des racines qui se retrouvent donc dans une situation d'inaccessibilité à l'azote.

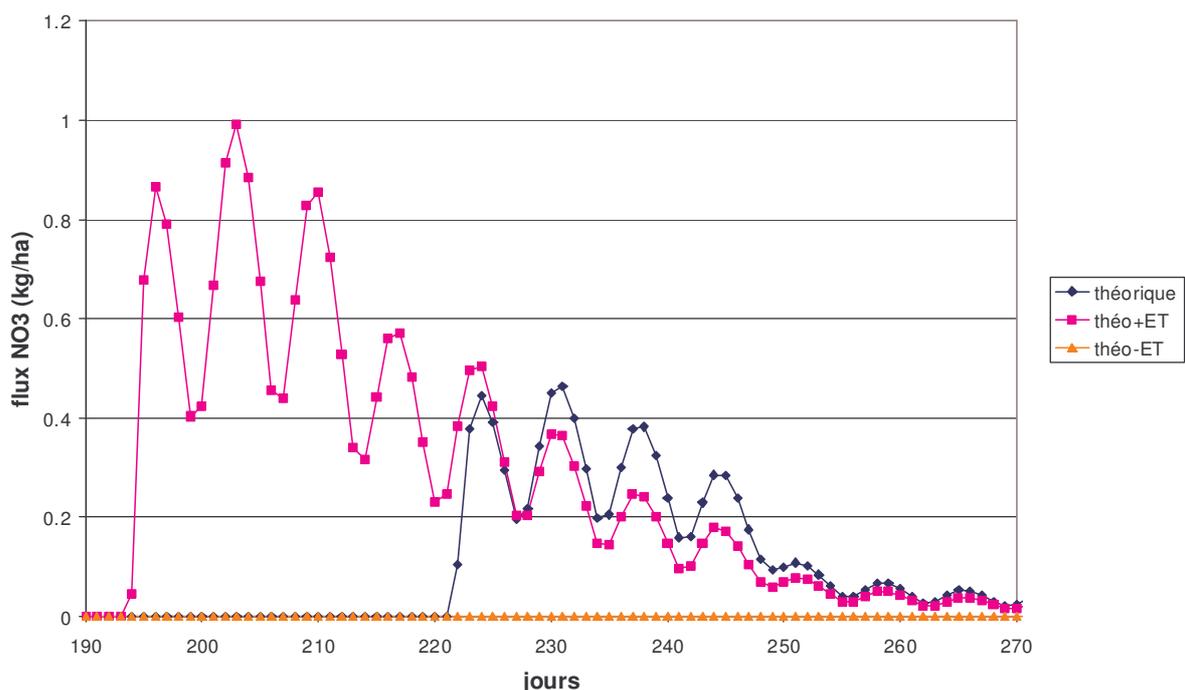


Fig 5.20 : flux de nitrates journalier à travers la dixième couche de sol (180-200 cm)

A noter également à la figure 5.20, les variations cycliques du lessivage. Un pic est observé tous les 7 jours, ceci provenant de la distribution hebdomadaire des pluies théoriques.

La figure 5.21 représente la pluviométrie et le lessivage de l'azote pour l'année 1985. On y observe également une succession de pics de lessivage, provenant de l'espacement des pluies.

On observe un délai de 1 jour entre la pluie et son effet sur le lessivage au-delà de la dixième couche de sol (180-200cm). La faible rétention d'eau dans le sol explique que la courbe de lessivage soit aussi accidentée, en réponse à la pluviométrie.

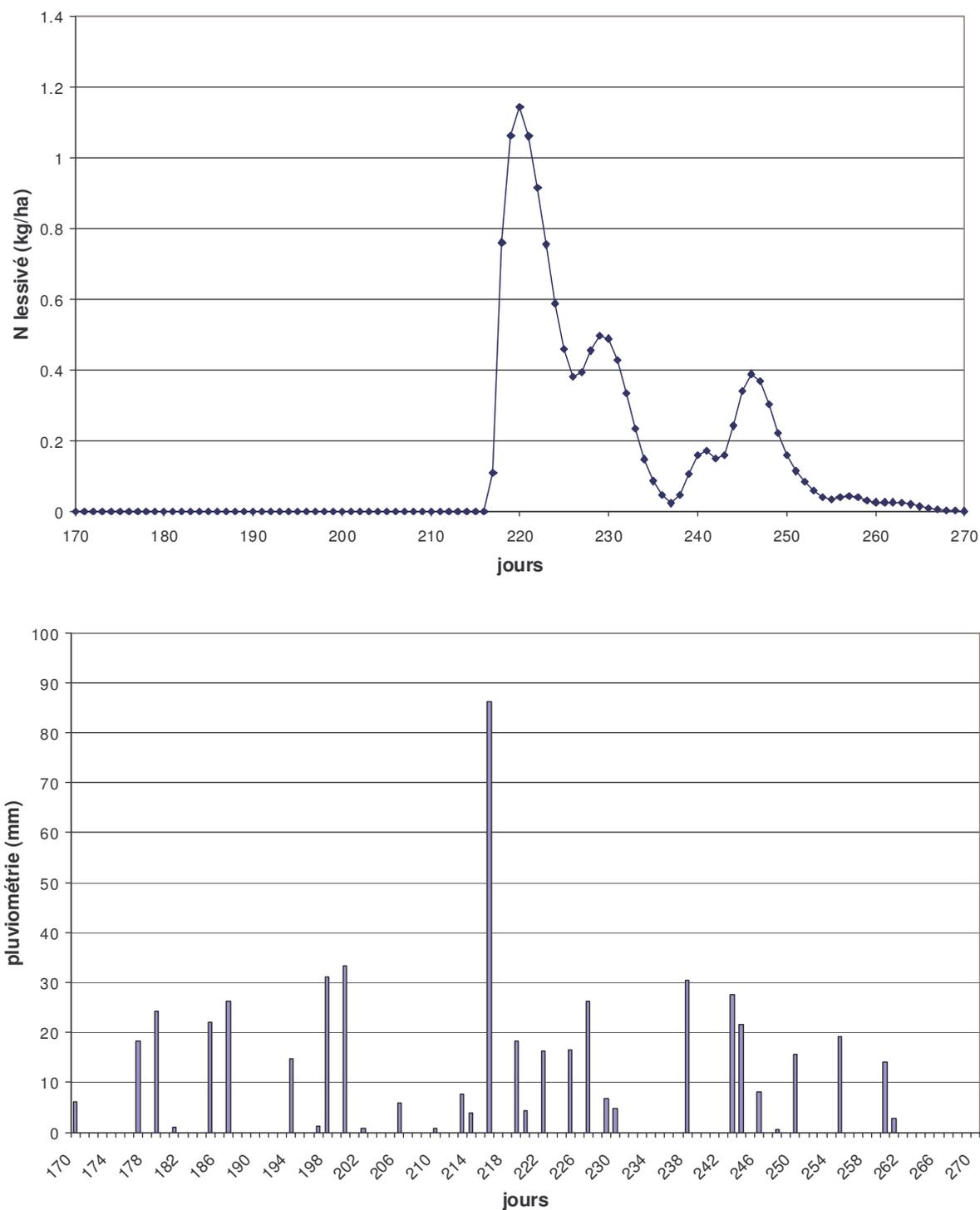


Fig. 5.21 pluviométrie et lessivage du Nitrate au-delà de la dixième couche de sol (180-200 cm) durant la saison de culture 1985

Observons maintenant les différences entre les rendements en biomasse des années de pluviométrie réelle (Fig 5.22).

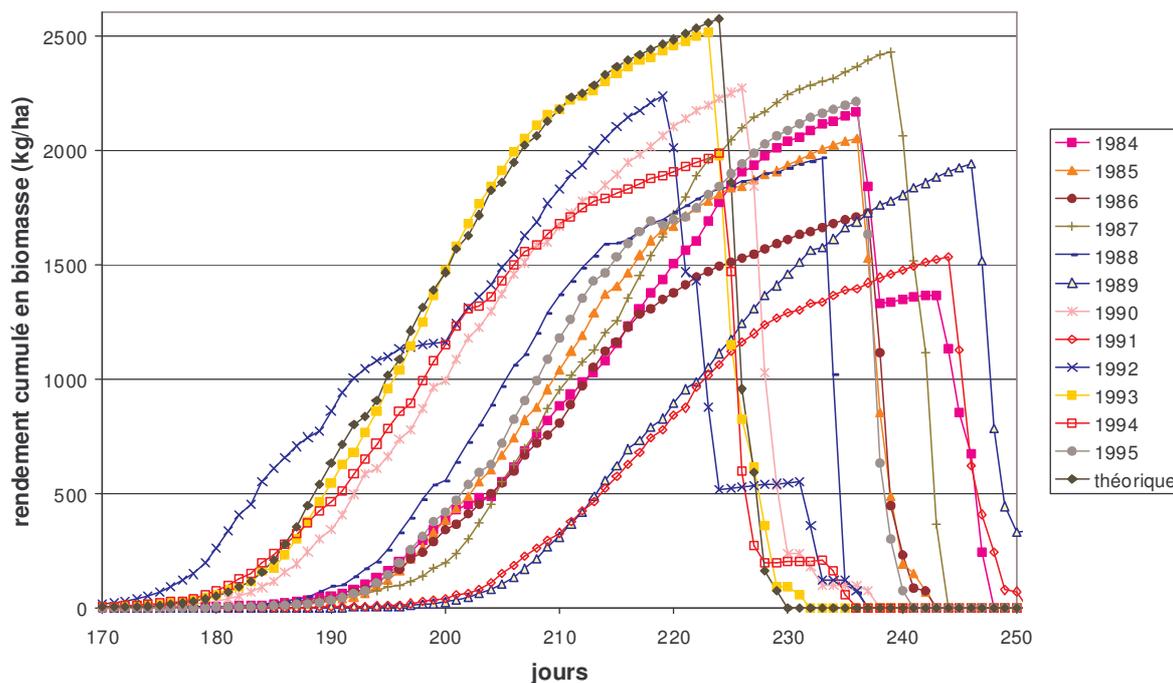


Fig 5.22 : rendement cumulé en biomasse en fonction du temps

Une première chose à noter dans cette figure 5.22 est que ce ne sont pas nécessairement les années commençant leur croissance le plus tôt qui connaissent les meilleurs rendements. Ceci est dû au fait que la variété de mil modélisée par le logiciel APSIM est en réalité une variété indienne et non nigérienne. Cette variété indienne n'est pas sensible au photopériodisme, au contraire des variétés nigériennes. La figure 5.23 représente la variation du rendement total en biomasse en fonction des différentes années simulées.

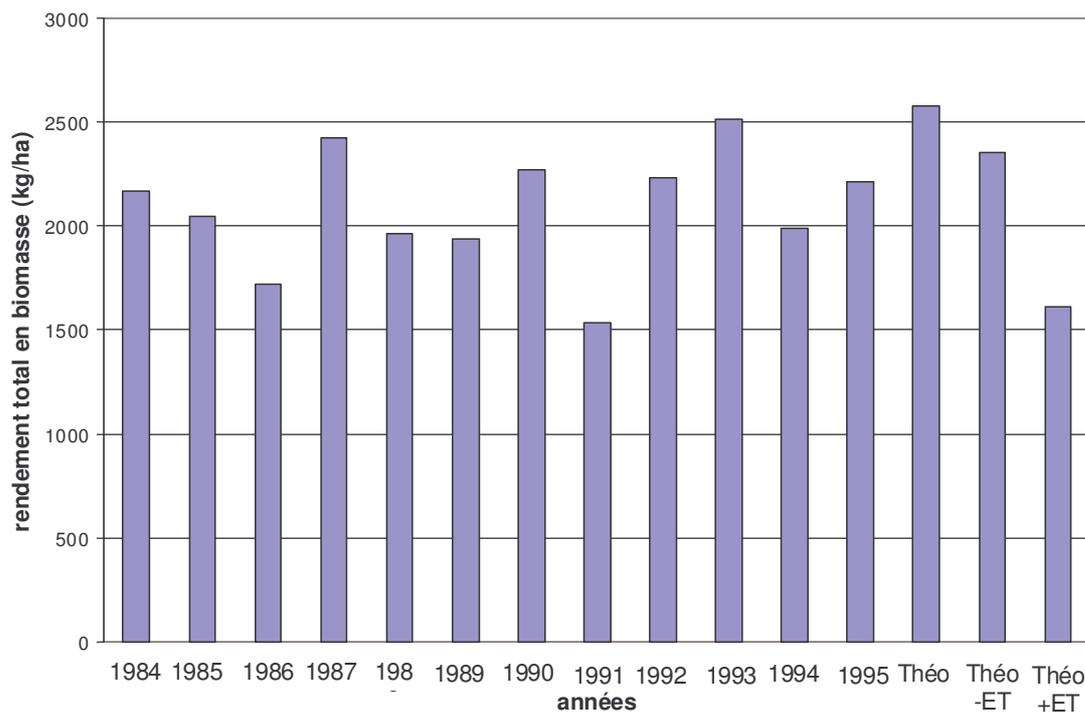


Fig. 5.23 : rendement total en biomasse observé lors des différentes années simulées

L'année connaissant les plus hauts rendements est l'année de pluviométrie moyenne théorique. D'autres années, ayant connu des pluies plus importantes que l'année théorique moyenne, comme 1986 ou 1988, par exemple, connaissent des rendements plus faibles que les autres années de pluviométrie moindre.

La figure 5.24 représente la relation entre rendement en biomasse et lessivage cumulé entre semis et récolte. On y observe une relation claire de décroissance des rendements suite à l'augmentation du lessivage.

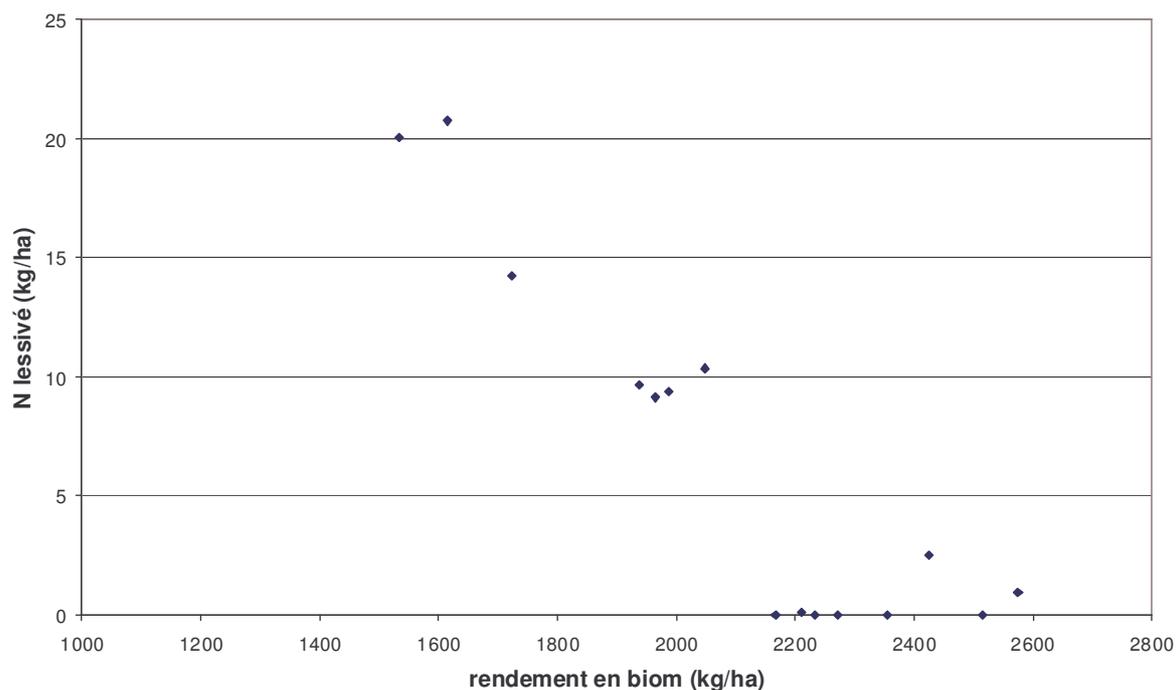


Fig 5.24 relation entre lessivage de l'azote cumulé entre semis et récolte, et rendement en biomasse pour les différentes années de l'analyse (théoriques et réelles).

Cependant, le lessivage n'est pas l'unique élément à prendre en compte dans l'étude du rendement modélisé par APSIM. Ainsi, malgré un lessivage important (Fig. 5.20), l'année théorique moyenne possède un rendement en biomasse supérieur à l'année théorique à faible pluviométrie qui, elle, ne compte aucun lessivage à cette profondeur. Il y a donc une pluie minimale à rencontrer pour optimiser le rendement.

De même, la distribution de la pluie est extrêmement importante. L'accent a été mis sur la distribution lors des années de pluviométrie théorique, et nous observons des rendements importants en conséquence. Outre son impact sur le lessivage, la distribution est également importante pour la croissance et le développement du mil. Comme cité plus haut, la floraison est une étape particulièrement sensible au manque d'eau.

Les figures 5.25 et 5.26 représentent les relations entre rendement total en biomasse et en grain et la pluie cumulée durant les périodes de croissance en biomasse et de remplissage des grains.

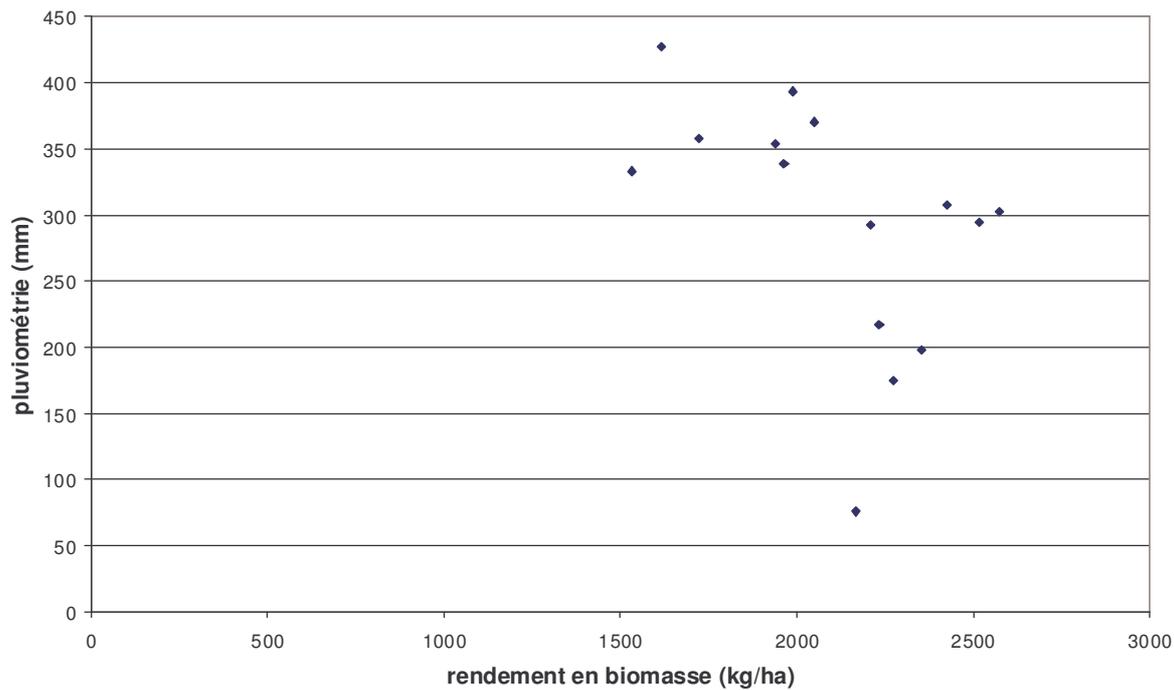


Fig. 5.25 : relation entre rendement total en biomasse et pluviométrie cumulé durant la période de croissance en biomasse.

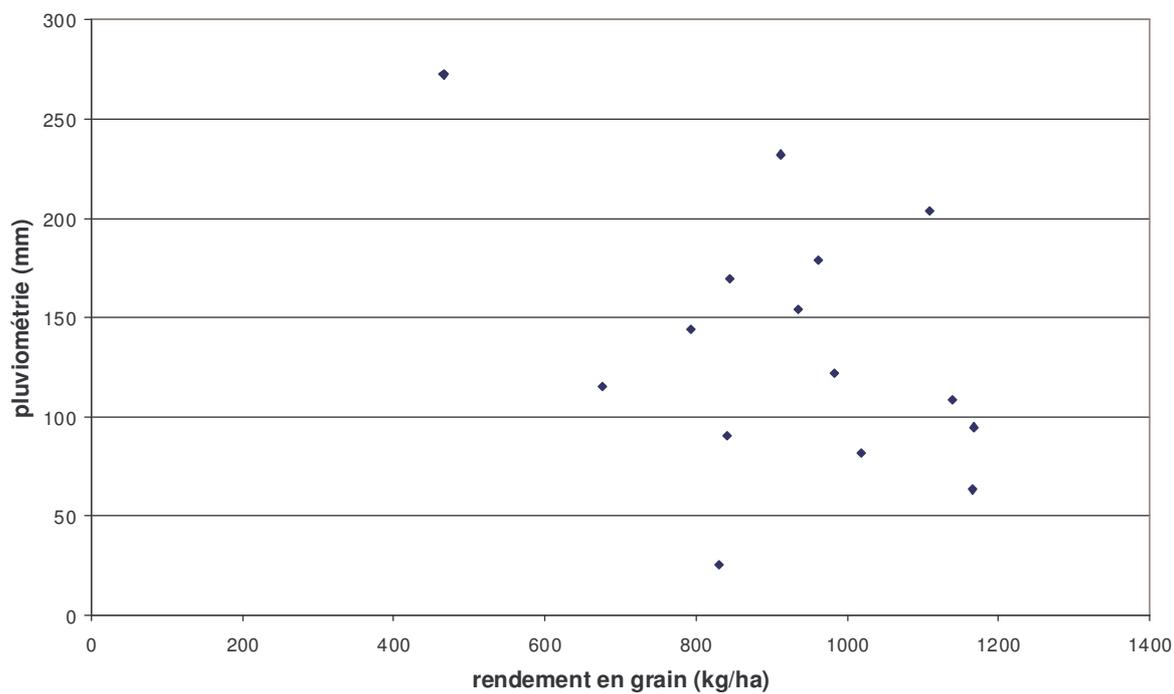


Fig. 5.26 : relation entre rendement total en grain et pluviométrie cumulée durant la période de remplissage des grains.

On remarque une relation plus nette à la figure 5.25 qu'à la figure 5.26, mais dans les deux figures, nous observons que la pluie cumulée la plus élevée est accompagnée d'un rendement très faible voire le plus faible, alors que le rendement la pluie cumulée la plus faible n'est pas accompagnée du rendement le plus faible. Même si la tendance générale n'est pas nette, on remarque néanmoins que l'augmentation de la pluviométrie s'accompagne plutôt d'une baisse de rendement que le contraire, et ce dans ces deux figures.

La comparaison entre les rendements en biomasse et les rendements en grain permettent de mettre en évidence les années ayant connu des problèmes de sécheresse durant leur floraison. En effet, à la floraison, la croissance du mil est pratiquement terminée.

*Tableau 5.20 : rendements en grain et en biomasse, et rapport rendement en grain / rendement en biomasse pour les différentes années de l'étude*

| années  | Rendement (kg/ha) |             | Rapport<br>r grain/ r biom |
|---------|-------------------|-------------|----------------------------|
|         | en grain          | en biomasse |                            |
| 1984    | 831               | 2167        | 0.38                       |
| 1985    | 961               | 2048        | 0.47                       |
| 1986    | 844               | 1723        | 0.49                       |
| 1987    | 1108              | 2425        | 0.46                       |
| 1988    | 982               | 1963        | 0.5                        |
| 1989    | 840               | 1937        | 0.42                       |
| 1990    | 1018              | 2272        | 0.45                       |
| 1991    | 675               | 1533        | 0.44                       |
| 1992    | 466               | 2233        | 0.21                       |
| 1993    | 1166              | 2515        | 0.46                       |
| 1994    | 912               | 1987        | 0.46                       |
| 1995    | 934               | 2210        | 0.42                       |
| théo    | 1138              | 2574        | 0.44                       |
| théo-et | 1166              | 2354        | 0.49                       |
| théo+et | 792               | 1615        | 0.49                       |

Le Tableau 5.20, représentant les rendements en biomasse et en grain, permet d'effectuer cette comparaison.

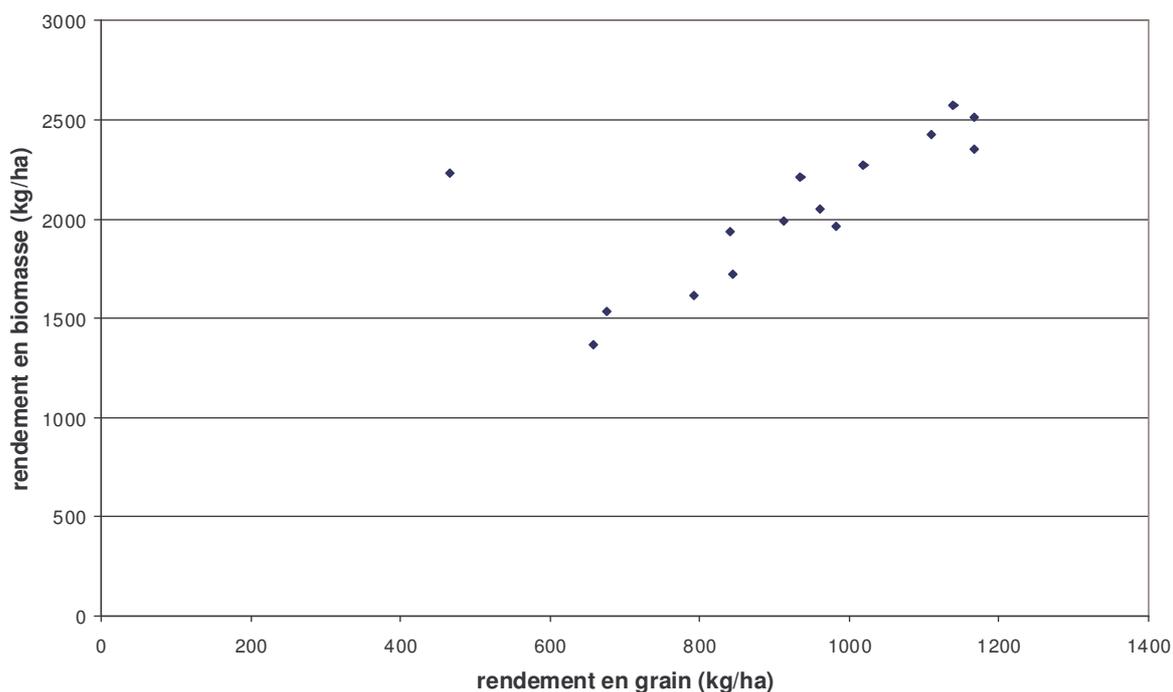
En fin de période de croissance, les années ayant connu les meilleurs rendements en biomasse sont, en ordre décroissant : l'année théorique moyenne, 1993, 1987, 1990, 1992, 1995, 1984, 1985, 1994, 1988, 1989, 1986 et 1991. Concernant les rendements en grain, il s'agit de 1993, l'année théorique moyenne, 1987, 1990, 1988, 1985, 1995, 1994, 1986, 1989, 1984, 1991 et 1992.

L'année 1993 a connu une pluviométrie particulièrement bien distribuée, tant au niveau de la floraison qu'au niveau du remplissage des grains, puisqu'elle possède un rendement cumulé en grain supérieur à l'année théorique moyenne.

L'année 1988, malgré un rendement en biomasse plus faible que bien d'autres années, a connu un rendement en grain très important par rapport à ces mêmes autres années. La pluviométrie au moment de la floraison n'a donc pas manqué, au contraire. On observe d'ailleurs pour cette année 1988 un rapport des rendements supérieur aux autres années.

Par contre, les années 1984 et 1992 ont connu un très faible rendement en grain, en comparaison à leur rendement en biomasse, ce qui suppose un problème lors de la floraison, ce qui est confirmé par leur rapport des rendements qui sont très faibles dans les deux cas.

La figure 5.27, représentant la relation entre rendement en grain et rendement en biomasse confirme que cette année 1992 est celle qui a connu le plus grand problème, car est la seule à s'éloigner du nuage de points.



*Fig. 5.27 : relation entre rendement en grain et rendement en biomasse pour les différentes années de l'analyse (théoriques et réelles)*

## 2.2. Analyse de sensibilité

### 2.2.1 Paramètres internes

Comme expliqué dans la partie Matériels et Méthodes, l'analyse de sensibilité d'APSIM n'a été effectuée que sur les paramètres concernant le cycle de l'azote dans le sol. Les valeurs par défaut de ces paramètres, provenant de mesures effectuées au centre ICRISAT de Sadoré, sont reprises au Tableau 5.21. Le logiciel est programmé pour utiliser des valeurs de paramètres différentes selon la profondeur. Celles-ci sont également précisées dans le Tableau 5.21.

*Tableau 5.21 : valeurs de base des paramètres internes d'APSIM concernant le cycle de l'azote dans le sol.*

|  | Profondeur (cm) |       |       |       |       |       |        |         |         |         |
|--|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
|  | 0-15            | 15-30 | 30-45 | 45-60 | 60-75 | 75-90 | 90-120 | 120-150 | 150-180 | 180-200 |
| % C org.                                 | 0.3             | 0.18  | 0.13  | 0.11  | 0.11  | 0.1   | 0.09   | 0.07    | 0.07    | 0.07    |
| pH eau                                   | 4.9             | 4.9   | 4.9   | 5     | 5     | 5.1   | 5.5    | 5.5     | 5.6     | 5.8     |
| Fraction microbienne du pool humique (%) | 0.03            | 0.02  | 0.02  | 0.015 | 0.01  | 0.01  | 0.01   | 0.01    | 0.01    | 0.01    |
| Fraction inerte du pool humique (%)      | 0.44            | 0.52  | 0.62  | 0.75  | 0.8   | 0.85  | 0.9    | 0.99    | 0.99    | 0.99    |
| NO <sub>3</sub> (mg/kg)                  | 2               | 1     | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5    | 0.5     | 0.5     | 0.5     |
| NH <sub>4</sub> (mg/kg)                  | 0.6             | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1    | 0.1     | 0.1     | 0.1     |

A ces 6 paramètres il faut encore ajouter le rapport C/N du pool humique du sol s'élevant à 14.5, et pour lequel nous avons également analysé la sensibilité du logiciel.

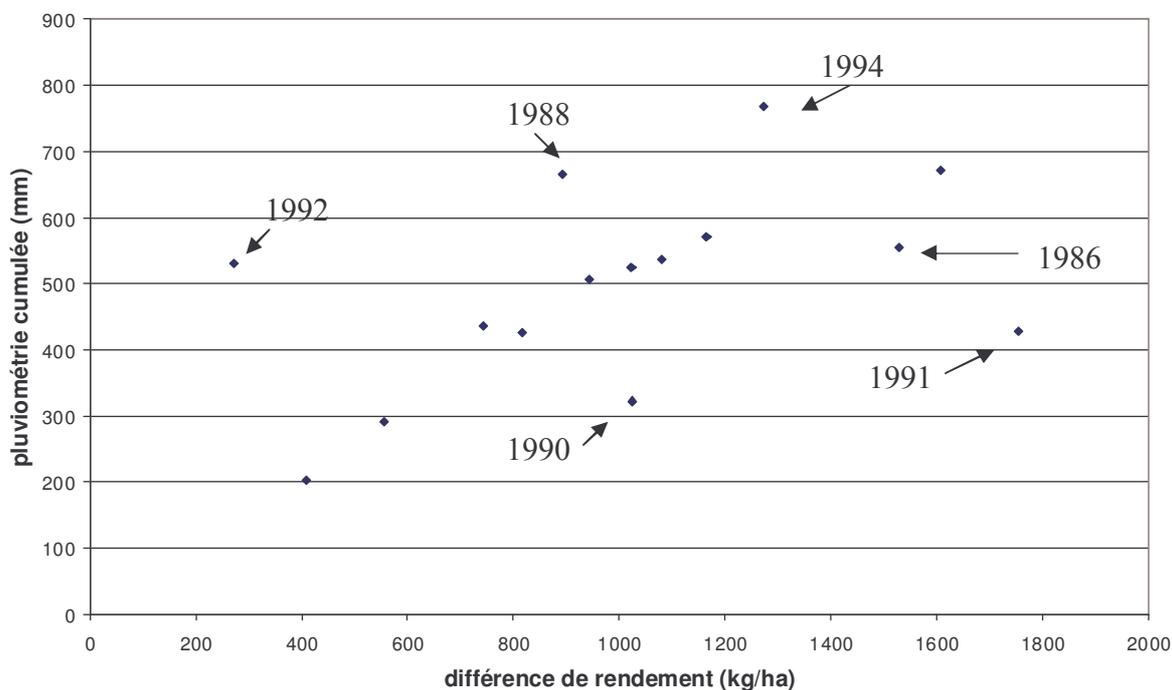
Afin d'analyser cette sensibilité, nous allons observer des courbes représentant le rendement final (en grain et en biomasse) en fonction du pourcentage de variation du paramètre en question.

### 2.2.2 Sensibilité aux paramètres internes

Nous allons commencer par citer et tenter d'expliquer les éléments récurrents observés lors de l'analyse de sensibilité de chaque paramètre, et nous parlerons plus tard des quelques cas particuliers.

Premièrement, comme déjà signalé plus haut, les trois années de pluviométrie théorique ne forment pas une enveloppe autour des autres années réelles comme on pourrait le penser, et l'année théorique à faible pluviométrie possède un rendement plus élevé que l'année théorique à forte pluviométrie. Nous n'allons pas revenir ici sur l'explication du lessivage des nitrates.

Deuxièmement, on remarque que plus la pluviométrie est importante, plus l'effet de la variation du paramètre est marqué. La figure 5.28 montre la relation entre pluviométrie cumulée entre semis et récolte et la différence entre les rendements en biomasse à 20% et 200% de la valeur par défaut du rapport C/N pour les différentes années de l'étude.



*Fig 5.28 : relation entre pluviométrie saisonnière cumulée entre semis et récolte et la différence entre rendements à 20% et 200% du rapport C/N par défaut, pour les différentes années de l'étude.*

De cette figure 5.28 se dégage une tendance générale d'augmentation de la différence de rendement suite à l'augmentation de la pluviométrie.

S'écartent de la tendance générale les années 1986, 1990 et 1991 d'une part, et 1988, 1992 et 1994 d'autre part. Le premier groupe d'années a connu une pluviométrie inférieure aux années ayant connu une différence de rendement en biomasse comparable.

Le deuxième groupe d'années a connu une pluviométrie supérieure aux années ayant connu une différence de rendement en biomasse comparable. Ces exceptions sont certainement explicables par la variation de distribution de la pluviométrie lors des différentes années observées. En particulier, nous avons déjà mis en exergue les difficultés lors de la floraison pour l'année 1992. Nous n'approfondirons pas ce problème dans le présent mémoire.

### 2.2.3 Sensibilité à la matière organique

La variation du rapport C/N, du taux initial de carbone organique ainsi que de la fraction microbienne du pool humique se rapportent au même phénomène. Le taux de carbone organique initial est un indicateur du taux de matière organique dans le sol, et donc d'azote minéralisable et finalement mobilisable par la plante.

La fraction microbienne du pool humique représente la matière organique dont le temps de décomposition est très faible. L'augmentation de ces deux paramètres représente une augmentation d'azote minéralisable.

Comme expliqué plus haut, la variation de la fraction microbienne et du taux de carbone organique ont le même impact sur les rendements que ce soit en biomasse ou en grain.

On remarque cependant que l'effet de la variation du carbone organique est légèrement supérieur à l'effet de la variation de la fraction microbienne du pool humique. Ceci est observable aux figures 5.29 et 5.30.

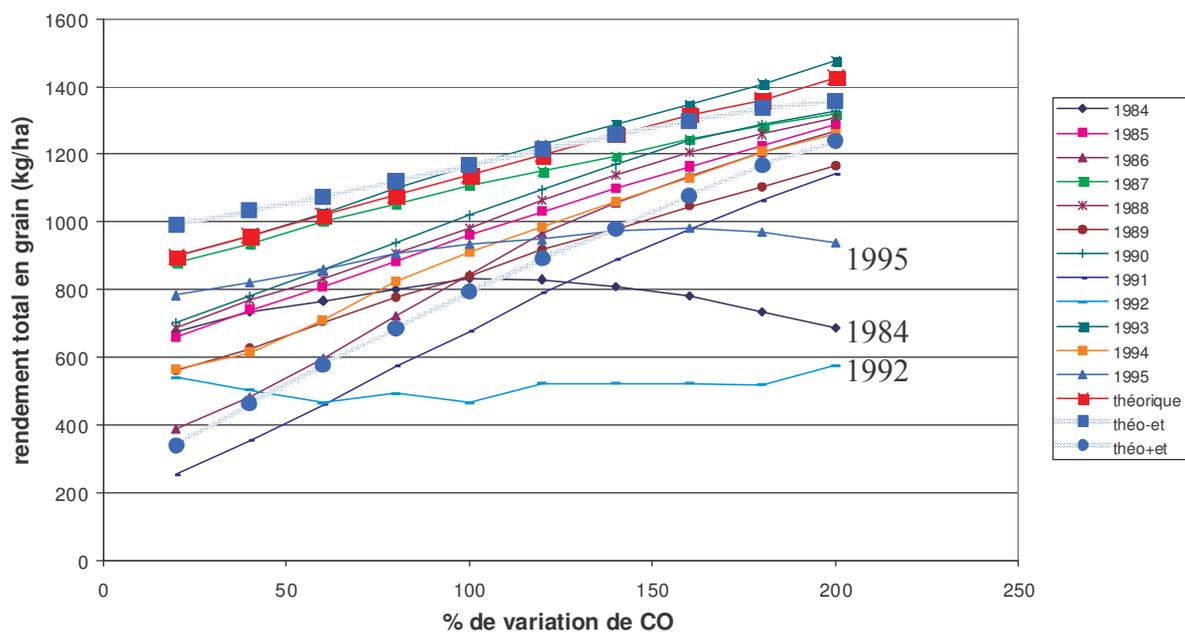


Fig. 5.29 : rendement total en grain en fonction de la variation du taux de carbone organique initial.

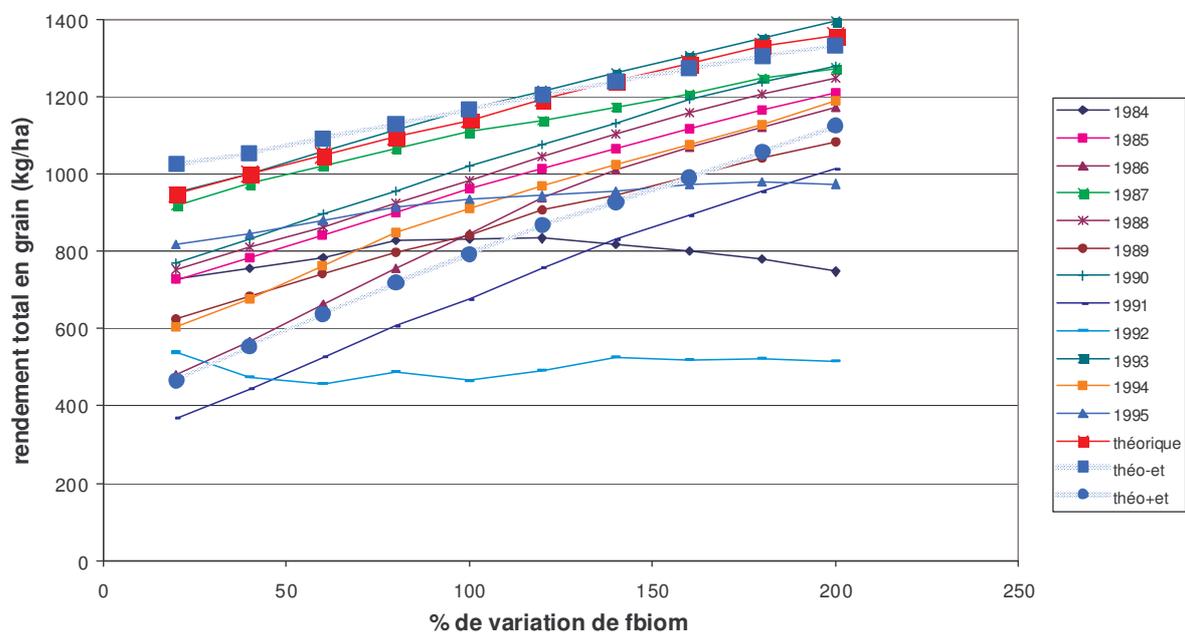


Fig 5.30 : rendement total en grain en fonction de la variation de la fraction microbienne du pool humique

Comme cité précédemment, on observe à ces figures 5.29 et 5.30 que 3 années ont des courbes atypiques, et il s'agit des trois années pour lesquelles la pluviométrie avait été jugée « difficile ».

La Fig 5.31 (rendement total en biomasse en fin de saison en fonction du pourcentage de variation du rapport C/N) permet une autre vue du même phénomène d'accessibilité à l'azote. On remarque une tendance générale des courbes qui consiste en une diminution de rendement lorsque le rapport C/N augmente. Il n'y a rien d'étonnant ici, au vu des faibles taux d'azote existant dans les sols.

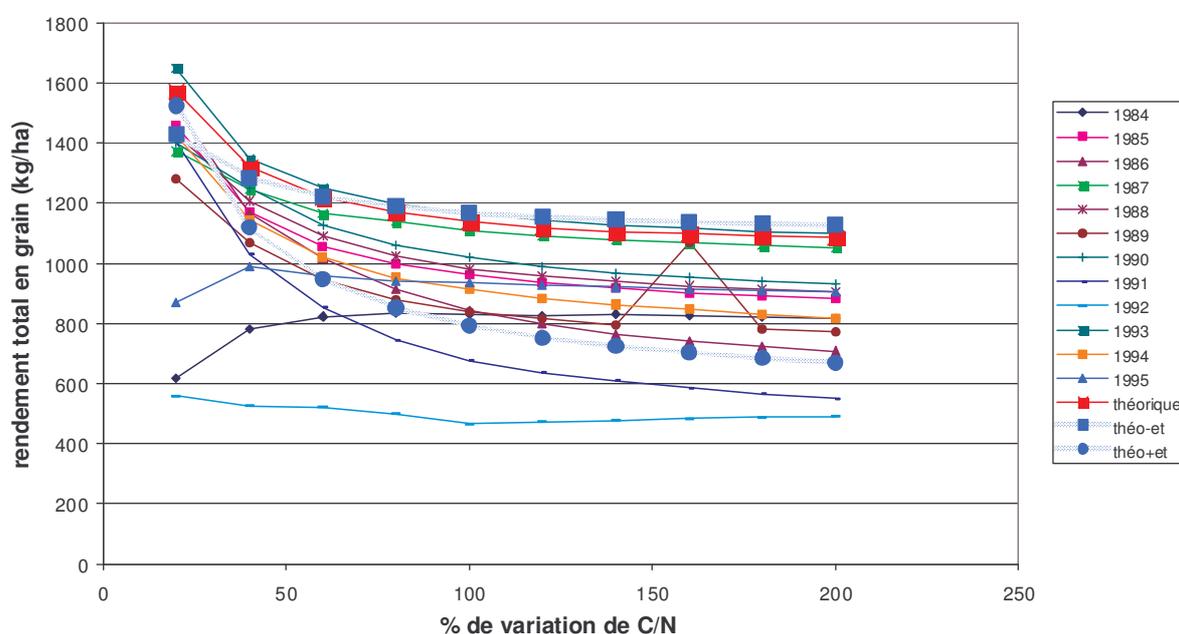


Fig 5.31 : rendement en grain total en fin de saison en fonction du pourcentage de variation du rapport C/N

Les courbes de la Fig. 5.31 présentent des allures asymptotiques. Le rapport C/N est surtout une valeur indicatrice du sens d'évolution de l'azote organique du sol : pour des valeurs de  $C/N < 20-25$  dans le sol, une minéralisation de l'azote organique peut être attendue. Au contraire si on a un rapport  $C/N > 20 - 25$ , on peut voir une immobilisation de N minéral par les microorganismes du sol pour leur propre croissance, provoquant ainsi un appauvrissement en N minéral dans la rhizosphère qui peut se traduire par une « faim d'azote » pour la plante (Paul 1989).

Dans notre cas, le rapport C/N de base étant de 14.5, les valeurs critiques sont atteintes à partir de 160%, cependant aucune diminution de rendement n'est réellement observée à partir de ce pourcentage. Peut-être que l'effet des micro-organismes n'a pas été pris en compte dans la paramétrisation du logiciel.

De plus, des rapports de C/N < 10 n'étant pas réalistes, les trois premiers points (20%, 40% et 60%) n'ont pas grand intérêt. En réalité, nous remarquons que la variation du rapport C/N entre des valeurs réalistes n'a que peu d'effets sur le rendement, sauf pour trois années : 1986, 1991 et théorique + ET. Aucune théorie n'a pu expliquer ces exceptions.

La variation d'un autre paramètre, la fraction inerte du pool humique, représente la même réalité que la variation de la fraction microbienne du pool humique. En effet, si la fraction inerte augmente, l'apport d'azote organique diminue. Nous retrouvons donc sans surprise une réponse décroissante des rendements en biomasse et en grain à l'augmentation de cette fraction inerte (voir Fig. 5.32).

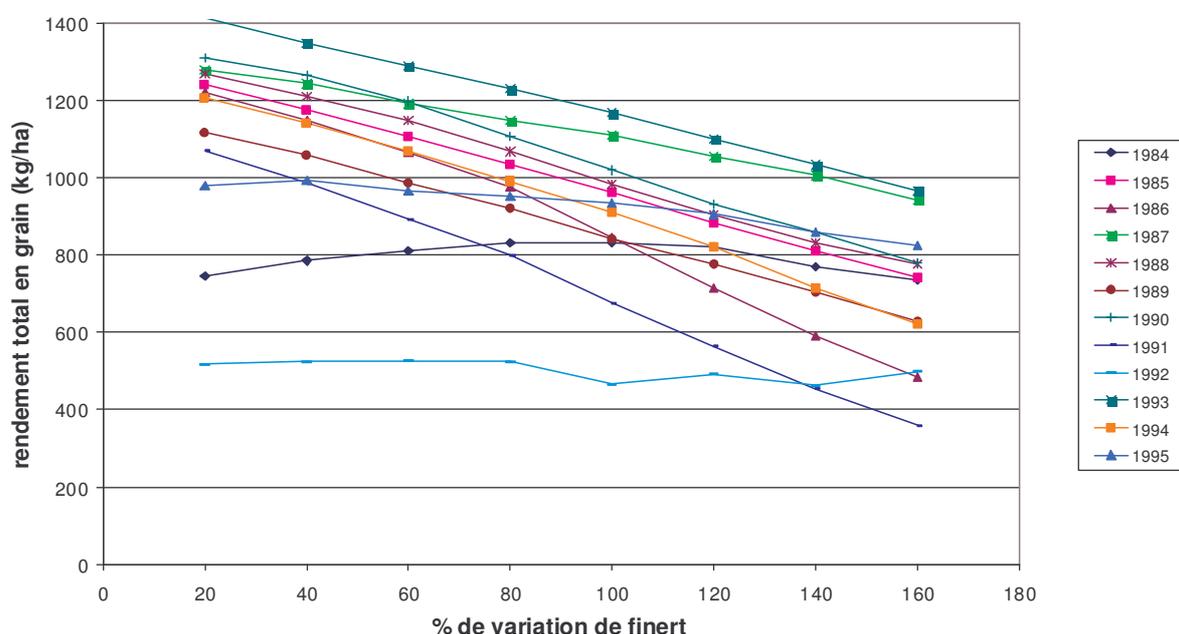
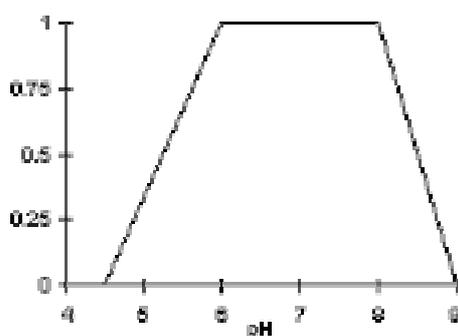


Fig 5.32 : rendement total en grain en fonction de la variation de la fraction inerte du pool humique

## 2.2.4 Sensibilité au pH du sol

Dans APSIM, la paramétrisation a conféré au pH une grande importance sur le taux de nitrification, et donc un impact direct sur l'apport d'azote à la plante.

La Fig. 5.33 provient des fichiers explicatifs d'APSIM



*Fig 5.33 : facteur de pondération du taux de nitrification de l'ammonium en fonction du pH du sol tel que paramétré dans APSIM*

L'étude de sensibilité du rendement au pH n'a pas pu être effectuée avec la même gamme de variations de la valeur de base du paramètre que pour les autres paramètres. Nous avons en effet préféré rester dans des gammes de pH crédibles. Nous n'avons donc pas dépassé 80% du paramètre de base inférieurement, et 140 % supérieurement. Ceci correspond à un minimum de 3.92 et à un maximum de 6.86 en surface.

La Fig. 5.34 représente le rendement en grain en fonction de la variation du pH-eau du sol. Pour plus de lisibilité de cette figure, nous avons placé le Tableau 5.22 représentant les différents pH utilisés dans l'analyse de sensibilité, pour les différentes profondeurs. Nous remarquons immédiatement que lorsque la valeur du pH est de 80% de la valeur de base, le rendement chute fortement, ce qui est certainement dû à la nitrification inexistante à cette acidité, telle que paramétrée dans APSIM (Fig 5.33).

Par contre, la variation du pH entre 100% et 140% de la valeur de base n'est pas très marquée, alors que pour cette variation, le taux de nitrification de l'ammonium augmente fortement.

En réalité, dans APSIM, le taux de nitrification est estimé par la formule suivante :

$nitrification\ rate = potential\ rate \times \min (water\ factor, temperature\ factor, pH\ factor)$

Le taux potentiel de nitrification dépend du taux d'ammonium du sol. Ce taux est multiplié par le minimum atteint suite à l'action de l'humidité, de la température et du pH.

Donc dans notre cas, lorsque le pH était très faible, il imposait son minimum au calcul du taux de nitrification car ce minimum était plus faible que les minima des effets de l'humidité et du pH. Cependant, l'augmentation du pH n'est pas à l'abri de ces minima.

Tableau 5.22 : pH des différentes couches de sol utilisés lors de l'analyse de sensibilité

| % du paramètre par défaut | Profondeur (cm) |       |       |       |       |       |        |         |         |         |
|---------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
|                           | 0-15            | 15-30 | 30-45 | 45-60 | 60-75 | 75-90 | 90-120 | 120-150 | 150-180 | 180-200 |
| 80%                       | 3.92            | 3.92  | 3.92  | 4     | 4     | 4.08  | 4.4    | 4.4     | 4.48    | 4.64    |
| 100%                      | 4.9             | 4.9   | 4.9   | 5     | 5     | 5.1   | 5.5    | 5.5     | 5.6     | 5.8     |
| 120%                      | 5.88            | 5.88  | 5.88  | 6     | 6     | 6.12  | 6.6    | 6.6     | 6.72    | 6.96    |
| 140%                      | 6.86            | 6.86  | 6.86  | 7     | 7     | 7.14  | 7.7    | 7.7     | 7.84    | 8.12    |

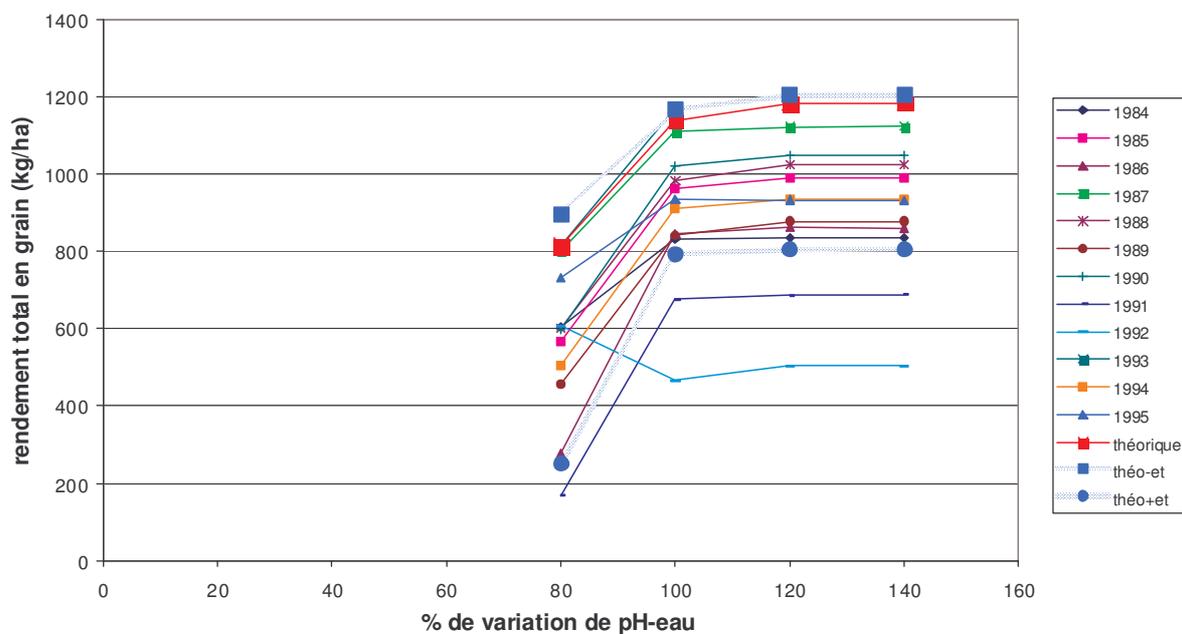


Fig 5.34 : rendement en grain total en fonction de la variation du pH-eau du sol

L'effet du pH sur le rendement en biomasse est équivalent à l'effet sur le rendement en grain. Nous avons remarqué dans la première partie de cette analyse de résultats, que le nombre d'échantillons ayant un pH-eau inférieur à 4.9 est très faible. Nous pouvons donc conclure, que pour les conditions locales, la sensibilité au pH eau du sol est négligeable.

### 2.2.5 Sensibilité à la teneur initiale en azote minéral du sol

Une nette amélioration du rendement en grain est observée suite à l'augmentation de la concentration originale en nitrate (Fig. 5.35).

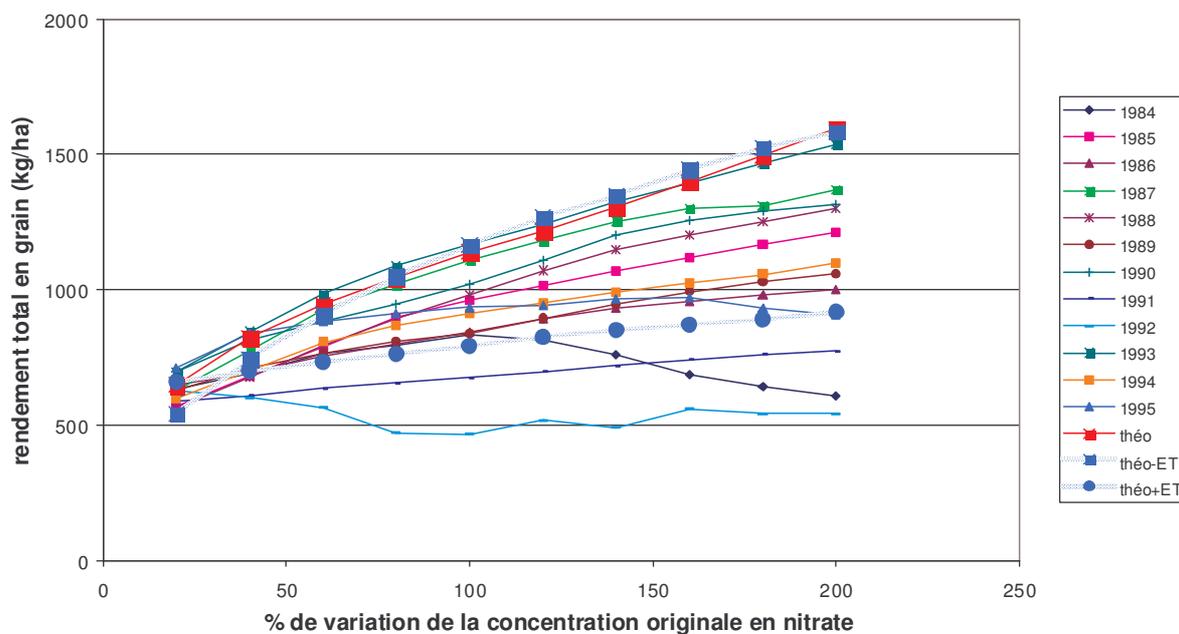
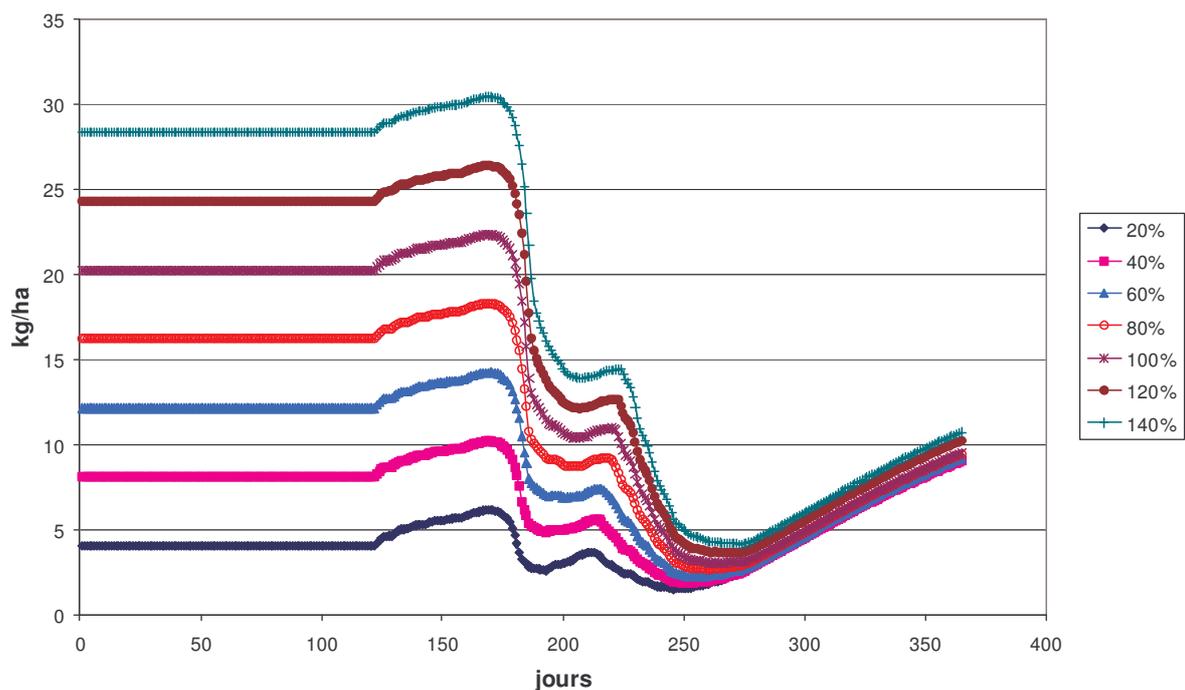


Fig 5.35 : rendement total en grain en fonction de la variation de la concentration originale en nitrate du sol

Pour le nitrate, APSIM permet de visualiser la concentration au cours de l'année. C'est ce qui est présenté à la Fig 5.36 représentant la variation de la teneur en nitrate au cours de la seule année théorique moyenne, et ce pour plusieurs concentrations de nitrate.



*Fig 5.36 : variation de la teneur en nitrate du sol au cours de l'année, pour plusieurs concentrations originales, pour la pluviométrie théorique*

La Fig 5.36 illustre bien le fait que les différences de concentration s'amenuisent au cours du temps. Quelle que soit la teneur en nitrate de départ présentée dans cette figure, la teneur en fin d'année est presque identique.

De plus, à l'observation de la Fig 5.37 représentant le lessivage des nitrates à 2 m de profondeur au cours du temps pour plusieurs concentrations initiales, nous observons que les taux de lessivages sont bien plus importants au début de l'année jusqu'au début de la croissance du mil que lors de la deuxième partie de l'année. Ceci est assez réaliste, puisqu'aux premières pluies, le sol n'est pas protégé par la végétation. Cependant, lors de la deuxième partie de l'année (à partir du 255<sup>e</sup> jour), les différences de lessivage entre courbes provenant de teneurs différentes, ne sont pas très élevées.

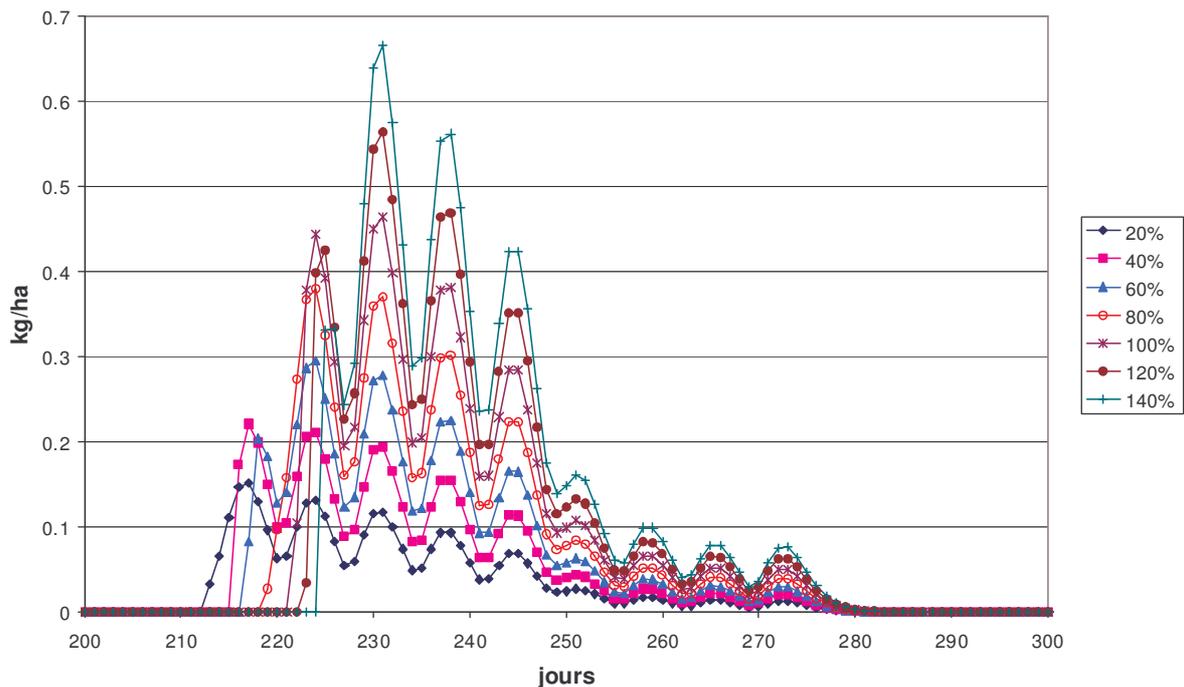


Fig 5.37 : lessivage des nitrates au-delà de la dixième couche de sol (180-200cm) au cours du temps, pour différentes concentrations de nitrate

Le cas de la variation de concentration en ammonium est similaire à la variation de concentration en nitrate (Fig. 5.38).

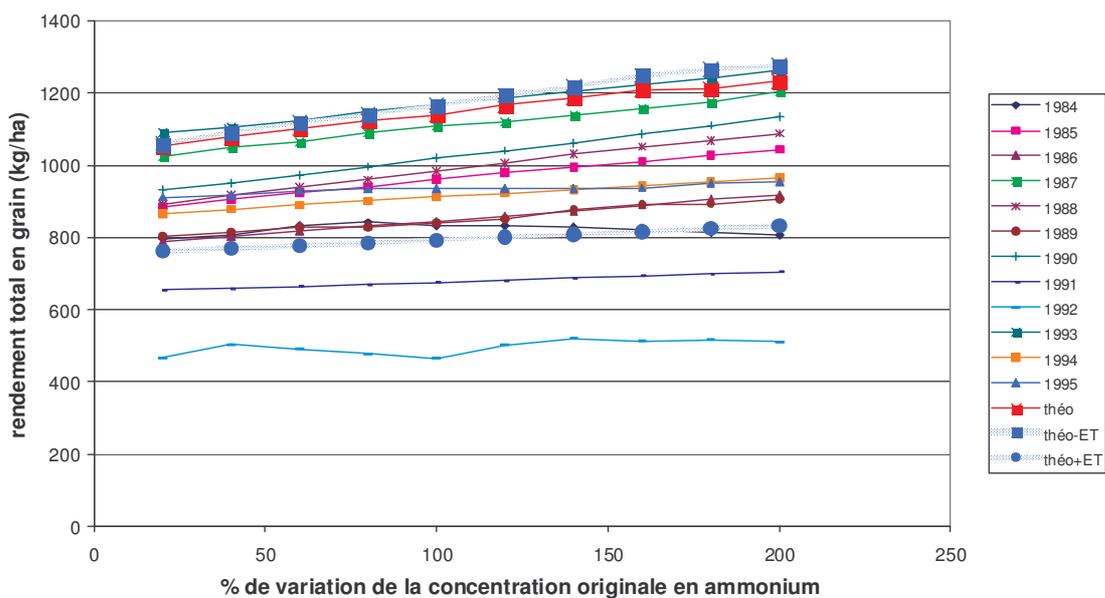


Fig 5.38 : rendement en grain total suite à la variation de la concentration en ammonium originale

La figure 5.39 permet de comprendre la dynamique de la teneur en ammonium telle que modélisée par APSIM.

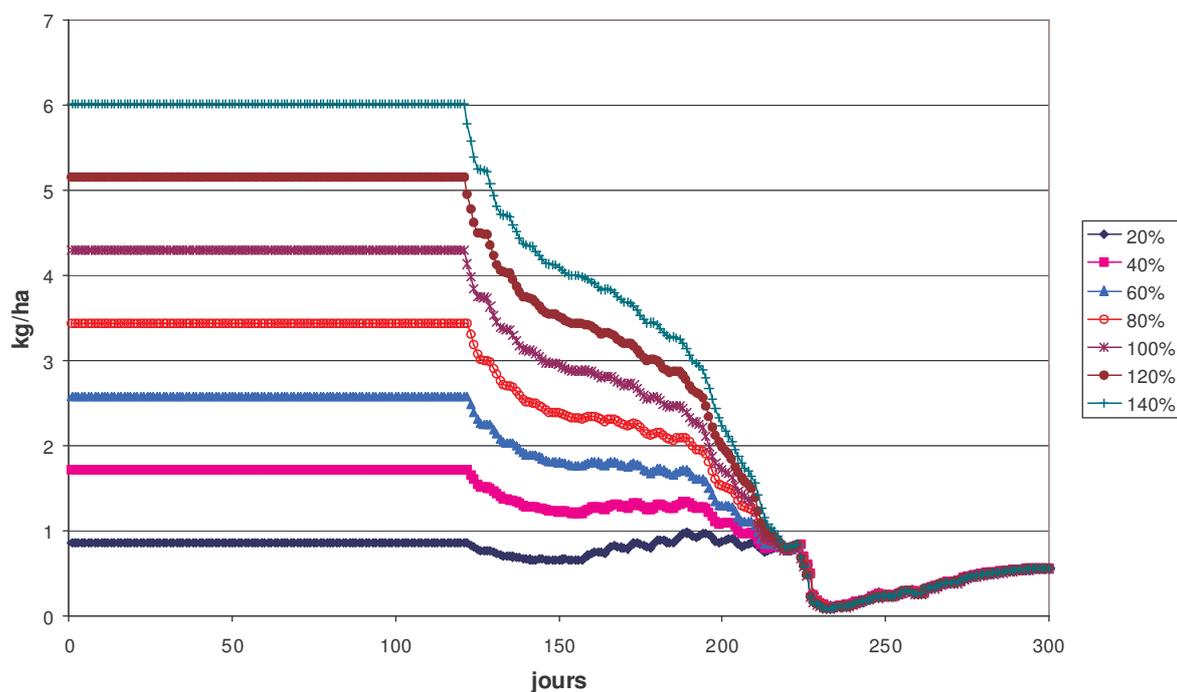


Fig 5.39 : variation de la concentration en ammonium du sol au cours de l'année pour plusieurs concentrations initiales

Au 123<sup>e</sup> jour, la nitrification débute, suite à la première pluie amenant une humidification du sol suffisante. En effet, comme expliqué au point B.2, l'humidité du sol est une des conditions limitant la nitrification : avant le 123<sup>e</sup> jour, l'humidité du sol étant insuffisante, la nitrification de l'ammonium était nulle (voir Fig 5.40).

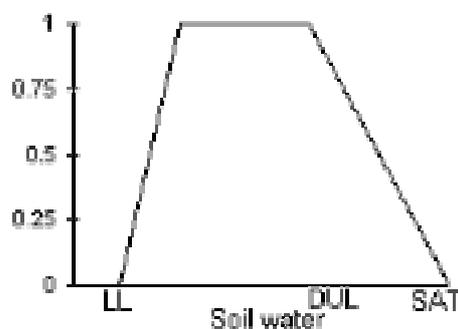


Fig 5.40 : facteur d'humidité, affectant le taux de nitrification dans APSIM, en fonction de l'humidité du sol. (LL =point de flétrissement, dul=capacité au champ, sat=teneur en eau du sol à saturation)

La nitrification commence donc ce 123<sup>e</sup> jour, expliquant la hausse d'augmentation en nitrate observable à cette période sur la figure 5.36. On observe que plus la concentration initiale est forte, plus la nitrification est forte expliquant la hausse des rendements.

Aux figures 5.36 et 5.39, nous observons que la concentration en ammonium et en nitrate est pratiquement égale en fin d'année, quelle que soit la concentration originale.

Nous pouvons en tirer la conclusion que la concentration optimale en azote minéral initial n'a pas été atteinte, et que les quantités sur lesquelles nous travaillons sont très proches du minimum. Ceci est également bien visible aux figures 5.35 et 5.38 où les courbes n'amorcent pas encore l'arrivée à un plateau.

Une dernière observation concernant l'azote minéral est le fait que contrairement aux autres paramètres internes étudiés, l'effet de la variation de concentration de nitrate et d'ammonium est moins important lorsque la pluviométrie totale augmente. Ceci se voit clairement aux figures 5.35 et 5.38 surtout à l'observation des années théoriques. La figure 5.41 présente la relation entre différence de rendement entre 20% et 200% de la teneur en nitrate par défaut, et la pluviométrie saisonnière cumulée, pour les différentes années de l'étude.

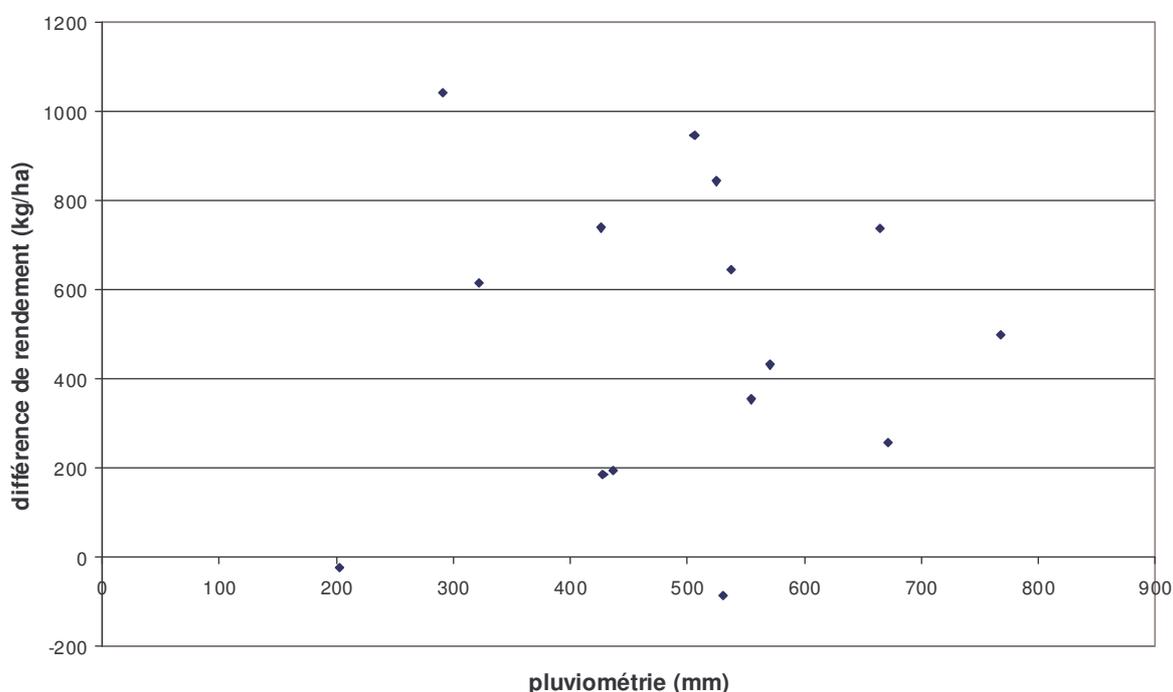


Fig. 5.41 : relation entre différence de rendement entre 20% et 200% de la teneur en nitrate par défaut, et la pluviométrie saisonnière cumulée, pour les différentes années de l'étude

La diminution de cette différence suite à l'augmentation de la pluviométrie est observable à la figure 5.41. Ceci est certainement dû au fait que la concentration en azote minéral est le seul paramètre étudié directement lié au lessivage dont nous avons déjà noté l'importance de l'impact sur les rendements. L'effet du lessivage provoque une moindre augmentation de rendement suite à l'augmentation des concentration de nitrate et ammonium pour les années à pluviométrie plus forte.

### 2.3 Conclusion

Il est difficile de juger d'un quelconque ordre d'importance d'influences des paramètres sur le rendement modélisé par APSIM tant les importances des valeurs par défaut des paramètres sont différentes.

Ainsi, des paramètres tels que le rapport C/N ou le pH eau du sol ne peuvent varier autour de leur valeur par défaut autant que les taux d'azote initiaux (très faibles) par exemple. En d'autres termes, une étude de sensibilité se base sur la comparaison de valeurs de sorties du logiciel, provenant de variations identiques sur des paramètres différents. Dans notre cas, pour certains paramètres, l'utilisation des bornes 20% et 200% sont irréalistes (pH et C/N) par exemple. Dans le cas de la fraction inerte, l'étude de sensibilité n'a pas pu être menée jusqu'à la borne 200% car la fraction de 100 % de fraction inerte était déjà atteinte auparavant. Enfin, dans le cas de la teneur en nitrate et en ammonium, les bornes de 20% et 200% ne suffisent pas à atteindre le maximum de leur action sur le rendement.

Nous devons signaler que les paramètres pH eau du sol et C/N ne reflètent pas la réalité du lieu. En effet, le rapport C/N n'a pas été mesuré au Niger. Concernant le pH-eau du sol, nous avons remarqué dans la première partie de l'analyse des résultats que le pH diminuait avec la profondeur, ce qui n'est pas le cas dans les mesures de pH utilisées par le logiciel, une erreur a peut-être été effectuée dans la mesure. De plus, les taux de carbone organique utilisés par APSIM (0.6% entre 0 et 15 cm de profondeur) sont plus élevés que ceux réellement relevés dans nos conditions (le maximum étant de 0.32 % dans l'étude intra-parcellaire).

Pour les paramètres pour lesquels les bornes ne posent pas de problème, nous avons calculé le pourcentage moyen de variation des rendements (PMVR) de toutes les années réelles de l'étude, avec la formule suivante :

$$PMVR = \frac{\text{Rendement}(200\%) - \text{Rendement}(20\%)}{\text{Rendement}(100\%)}$$

Ensuite, pour chaque paramètre, nous avons effectué une moyenne du PMVR de l'ensemble des années réelles de l'étude, auquel nous avons ôté les trois années dont les courbes ne suivaient pas la tendance générale (1984, 1992, 1995). Les résultats sont présentés au tableau 5.23.

*Tableau 5.23 : moyenne des PMVR sur l'ensemble des années réelles ôté de 1984, 1992 et 1995 pour différents paramètres de l'étude de sensibilité*

| paramètres                           | PMVR moyen |
|--------------------------------------|------------|
| Fraction microbienne du pool humique | 0.12       |
| Teneur en ammonium initiale          | 0.03       |
| Teneur en nitrate initiale           | 0.13       |
| Taux de carbone organique initial    | 0.15       |

Les paramètres directement liés à la matière organique (fbiom, c.o.) montrent un impact important sur le rendement. Ceci est dû au fait que ces derniers paramètres sont liés à de nombreux phénomènes dans la paramétrisation (voir partie Matériels et Méthodes). Le paramètre finert, absent du tableau 5.23 confirme l'impact des paramètres liés à la matière organique (Fig.5.32).

Cependant, les taux d'azote initiaux (N03 et NH4) sont sans doute les paramètres ayant le plus gros impact sur les rendements. Ceci n'est, en réalité, pas visible sur les figures présentées, ni au tableau 5.23, puisque ces taux d'azote ne montrent pas plus d'importance que les paramètres liés à la matière organique. L'explication est à chercher dans les valeurs par défaut de taux d'azote. Ceux-ci sont très faibles, et même le doublement de leur valeur par défaut ne conduit pas à un taux réellement très important.

Enfin, nous devons rappeler que cette étude de sensibilité a été effectuée avec un logiciel modélisant la croissance et le développement d'une variété indienne de mil. Cette variété, non

photopériodique comme au Niger, n'a pas le même comportement que la variété locale, ce qui empêche une comparaison avec des mesures de terrain pour le moment.

Après avoir introduit des paramètres plus proches des valeurs locales (pour le pH et le taux de carbone) et avoir modélisé la variété locale du mil, une autre étude de sensibilité, en comparaison avec des mesures de culture celle-ci devrait permettre de donner le poids adéquat à chaque paramètre dans la paramétrisation.

## VI Conclusions et perspectives

Le dosage des éléments chimiques présents dans nos échantillons a mis en exergue la pauvreté de ces sols en éléments chimiques et leur acidité. De plus, à cause de cette pauvreté, des éléments en faible quantité peuvent néanmoins avoir une importance prédominante sur les phénomènes bio-pédologiques. L'aluminium, par exemple, n'est pas présent en quantité énorme dans ces sols, mais constitue néanmoins un élément chimique très important sur le complexe d'échange de ces sols, car adsorbe sur ses oxydes le peu de phosphore présent dans le sol.

Suite à l'analyse de la variabilité spatiale des propriétés chimiques sur le territoire du Fakara, il ressort plusieurs conclusions : la fertilité intrinsèque des sols étudiés, en l'absence de toute fertilisation, est très faible. La variabilité intra-parcellaire est très élevée, même supérieure à la variabilité inter-parcellaire. De plus, les différences entre les trois types de sol cultivés étudiés ne sont pas très importantes. Ensuite, sur base de la littérature et de la connaissance des sols, nous pouvons insister sur la grande importance de la matière organique dans la fertilité chimique de ces sols. Les faibles résultats de l'analyse comparative du mode de fertilisation sont certainement dus au nombre restreint d'échantillons et ne constitue donc pas à proprement parler une contradiction à cette affirmation. Enfin, nous savons que les paysans de la zone d'étude appliquent leurs amendements de façon localisée au sein des champs, souvent à doses très faibles (sauf pour le parcage dont les doses sont très variables). Ceci accroît encore la variabilité spatiale intra-parcellaire.

Suite à ces conclusions, nous pouvons nous poser des questions quant à l'utilité réelle d'une carte potentielle de la fertilité chimique de ce territoire. En effet, connaissant par la littérature l'énorme contribution de la matière organique à la fertilité chimique et sa gestion hétérogène au niveau de la parcelle, une cartographie de la fertilité (en admettant qu'elle soit réalisable techniquement et financièrement vu l'extrême variabilité spatiale) aurait une validité dans le temps très limitée.

Concernant les perspectives offertes par cette étude, nous pouvons confirmer la bibliographie dans le sens que l'importance de la contribution de la matière organique à la fertilité chimique

pourrait constituer un point positif. Une gestion appropriée de la matière organique par parcage, fumure transportée ou jachère pourrait en effet améliorer les rendements de culture et ce, indépendamment du type de sol concerné. Une gestion de cette matière organique homogène au niveau de la parcelle devrait également diminuer fortement la micro-variabilité spatiale.

Concernant l'étude de sensibilité du logiciel APSIM à ses paramètres internes concernant le cycle de l'azote, nous devons tout d'abord insister à nouveau sur le fait qu'une analyse de sensibilité précise ne peut se faire qu'en comparaison avec des mesures effectuées sur le terrain.

Cependant, notre analyse de sensibilité a permis de mettre quelques éléments en lumière. Tout d'abord, nous avons remarqué que la pluviométrie à elle seule explique de grandes différences de rendement. Ce paramètre étant considéré comme limitant au Niger, cela n'est pas étonnant, cependant, l'augmentation de pluviométrie n'est pas nécessairement accompagné d'une augmentation de rendement. On peut même signaler que l'augmentation de la pluviométrie s'accompagne plutôt d'une augmentation de lessivage, et donc d'une diminution de rendement plutôt que le contraire.

Ensuite, nous avons remarqué que les différents paramètres internes liés à la matière organique montraient un impact assez important sur les rendements. Ceci est plutôt réjouissant car est en accord avec les conclusions de l'étude de variabilité de la fertilité chimique.

Enfin, les paramètres ayant les impacts les plus élevés sur les rendements sont les taux initiaux d'azote (nitrate et ammonium). La recherche bibliographique avait déjà fait remarquer que le mil était une culture dont la réponse à la fertilisation minérale azotée était très élevée, et la paramétrisation de la nitrification, dénitrification et minéralisation a donc été bien réalisée.

Cependant, comme cité plus haut, la vérification des poids relatifs donnés à chacun des phénomènes et des paramètres internes ne pourra s'effectuer qu'avec des mesures effectuées sur le terrain, et en utilisant uniquement des paramètres internes issus de mesures locales. Le fait que certains paramètres internes ne correspondent pas aux conditions locales ont constitué une limite à cette étude.

## Bibliographie

1. Alzouma M ; 1990 ; Etude écologique de la croissance et du rendement du mil (*pennisetum americanum* (L.) Leeke) au sahel. Effets de l'association avec les légumineuses et autres relations. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur es sciences. Faculté des sciences de Louvain-la-Neuve ; 120
2. Baidu-Forson J, Renard C., Deuro N., Reddy C. & Kadi M ; 1994 ; Evaluation agro-économique de nouveaux systèmes de production en milieu paysan au Niger. Programme d'exploitation des ressources. ICRISAT compte rendu des travaux, n°4 Mol. V. 1989. Ridging with different levels of soil loosening
3. Balasubramanian V & Nnadi LA ; 1980 ; crop residue management and soil productivity in Savanna Areas of Nigeria. In : Organic recycling in Africa. FAO soils bulletin No 43; 106-120
4. Bationo A & S.C.Geiger; 1991; Fertility status of selected millet producing soils of West Africa with emphasis on phosphorus. *Soil Science* vol 152, No. 5; 271-279
5. Bationo A. & Mokwunye AU; 1991b ; Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa : the experience in the Sahel. Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa (Ed. Mokwunye AU), 195-215
6. Bationo A. & A.U. Mokwunye;1991c; 'Role of manures and crop residue in alleviating soil fertility constraints to crop production: With special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa'. *Fertilizer Research* 29: 117-125.
7. Bationo A., A. Buerkert, M.P. Sedogo, B.C. Christianson & A.U. Mokwunye; 1991d; a critical review of crop residue use as soil amendment in the west African semi-arid tropics; international fertilizer development center (ifdc)/ICRISAT; 305-322
8. Bationo, A., C.B. Christianson, W.E. Baethgen & A.U. Mokwunye; 1992; 'A farm-level evaluation of nitrogen and phosphorus fertilizer use and planting density for pearl millet production in Niger'. *Fertilizer Research* 31: 175-184.
9. Bationo A., C.B. Christianson & M.C. Klaij ; 1993; the effect of crop residue and fertilizer use on pearl millet yield in Niger, *Fertilizer research* 34 : 251-258
10. Bationo A. ; 1995 ; L'utilisation du <sup>15</sup>N dans les recherches agronomiques : efficience des engrais azotes et fixation biologique de l'azote. Papier présenté à la réunion régionale sur les recherches en gestion intégrée de la fertilité des sols. Niamey 1-15

11. Bationo A Lompo F & Koala S ; 1998 ; Research on nutrient flows and balances in west Africa : state-of-the-art. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 21-35
12. Blaize D. ; 1988 ; guide des analyses courantes en pédologie ; INRA ; 172p
13. Brouwer J., S.C. Geiger, & R.J. Vandenbeltd; 1992; Variability in the growth of *Faidherbia albida*, a termite connection? ICRISAT conference paper no. CP787; 131-135
14. Buekert A., Roger D. Stern, & H. Marschner; 1995; Post stratification clarifies treatment effects on pearl millet growth in the Sahel, *Agron. J.* 87:752-761
15. Chappel A, Warren A, Taylor N & Charlton M; 1998; Soil flux (loss and gain) in southwestern Niger and its agricultural impact. *Land degradation and development*. Vol 9. 295-310
16. Charreau C & Poulain J ;1964 ; manuring of millet and sorghum *Agr Soils* 9 : 177-191
17. Charreau C & Nicou R ; 1971 ; l'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest-africaine et ses incidences agronomiques *Agron Trop* 26 :209-255, 565-631, 903-978 et 1237-2282
18. Christianson, C.B., A. Bationo, J. Henao & P.L.G. Vlek; 1990; 'Fate and efficiency of N fertilizers applied to pearl millet in Niger'. *Plant and Soil* 125: 221-231
19. Christianson, C.B. & P.L.G. Vlek; 1991; 'Alleviating soil fertility constraints to food production in West Africa: Efficiency of nitrogen fertilizers applied to food crops'. *Fertilizer Research* 29: 21-33
20. Davis J.G., A. Manu, L.R. Hossner & N. Persaud; 1994; phosphorus management of a millet/cowpea inter-crop system on sandy dunal soils of western Niger, *Journal of plant nutrition*, 17(6), 899-910
21. De Ridder, N. & H. Van Keulen; 1990; 'Some aspects of the role of organic matter in sustainable intensified arable farming systems in the West African semi-arid tropics (SAT)'. *Fertilizer Research* 26: 299-310
22. De Rouw A Rajot JL & Schmelzer G. ; 1997 ; Effets de l'apport de bouses de zébus sur les composantes de rendement du mil, sur les mauvaises herbes et sur l'encroûtement superficiel du sol au Niger. Colloque et séminaire : la conduite du champ cultivé, points de vue d'agronomes . (Ed : Biarnès A)
23. Doorenbos J. & W.O. Pruitt ; 1986 ; les besoins en eau des cultures ; bulletin FAO d'irrigation et de drainage.
24. Dufey J. ;1999 ; syllabus de pédologie, tome 1 (MILA 2110) , p I 44-45

25. Dufey G. ;2002 ; Evaluation de techniques agricoles adaptées à la culture associée mil-niébé au Niger , mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de bio-ingénieur de l'université catholique de Louvain-la-neuve (UCL) ; 105 p.
26. Esse P.C., A. Buerkert, P. Hiernaux, & A. Assa ; 2001; decomposition of and nutrient release from ruminant manure on acid sandy soil in the Sahelian zone of Niger, West Africa; *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83 ( 2001) 55-63
27. FAO, site Internet : [www.fao.com](http://www.fao.com). Présentation du Niger
28. FAO ; 1980 ;improvement and production of maize, sorghum and millet, prepared with the support of the Swedish international development authority; 226 p.
29. Fussel LK, Serafini PG, Bationo A & Klaij MC ; 1987 ; Management practices to increase yield and yield stability of pearl millet in Africa. *Proceeding of the international pearl millet Workshop, ICRISAT*, 255-267
30. Greenland D.J., A. Wild & D. Adams; 1992; organic matter dynamics in soils of the tropics – from myth to complex reality; *soil science society of America and American society of agronomy, SSSA Special publication no.29*; 17-33
31. Hafner H. Bley J. Bationo A. & Martin P ;1992; Long term nitrogen balance for pearl millet in a acid sandy soil of Niger; In: *Z. Pflanzenernähr. Bodenk*, Band 156, Heft , 1993, S. 169 – 176
32. Hafner H., E. George, A. Bationo & H. Marschner; 1993; Effect of crop residues on root growth and phosphorus acquisition of pearl millet in an acid sandy soil in Niger, *Plant and soil* 150:117-127
33. Hermann, L., K. Stahr & M.V.K Sivakumar ;1995; 'Dust deposition on soils in Southwest Niger'. In: A. Buerkert, B.E. Allison and M. von Oppen (eds.) *Proceedings of the international symposium, Wind erosion in West Africa: The problem and its control*: 35-47. University of Hohenheim, Germany, 5-7 December 1994. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany; 35-47
34. Hiernaux & Ayantunde; 2004; report of research activities; *ILRI* ; 95 : 3-41
35. Hiernaux P & Gérard B; 1999; The influence of vegetation pattern on the productivity, diversity and stability of vegetation : the case of 'brousse tigrée' in Sahel. *Acta Oecologica* 20 (3) 147-158
36. Keating B.A. & al ; 2003 ; An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation; *European Journal of Agronomy* 18: 267-288
37. Klaij M Renard C & Reddy KC; 1994; Low input technology options for millet-based cropping systems in the Sahel. *Expl. Agric.* Vol 30, 77-82

38. Laclavère G. ; 1981 ; Atlas du Niger ; éditions j.a. 64 p.
39. Lamers, J.P.A. & P.R. Feil; 1995; 'Farmers' knowledge and management of spatial soil and crop growth variability in Niger, West Africa'. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 43 (4): 375-389
40. Leisinger Klaus M. & Schmitt Karin; 1995; An ecological and development challenge. Survival in the Sahel. ISNAR
41. McBride M.B. ;1994 ; Environmental chemistry of soils; Oxford university press; 416p
42. Mc Intire. J & Powell.JM; 1993; African semi-arid tropical agriculture cannot grow without external inputs. Modeling nutrient cycles in plant/animal/soil systems 540-551
43. Mc Lean, E.O; 1982; Soil pH and lime requirement. A.L., R.H. Miller and D.R. Keeney, eds. 1982. Methods of soils analysis. Part 2. Chemical and microbiological methods. 2<sup>nd</sup> ed. ASA, SSSA Publ. Madison, USA ; 199-209
44. Maiti R.K. & F.R. Bidinger ; 1981; Growth and development of the pearl millet plant ; ICRISAT research bulletin n° 6.
45. Manu A., A. A. Pfordresher, S.C. Geiger, L.P. Wilding, & L.R. Holssner; 1996; Soil parameters related to crop growth variability in Western Niger. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:283-288
46. Moreau C ; 1997 ; Phytotechnie et ecophysiologie du mil en zone sahélienne ; faculté des sciences agronomiques de Louvain-la-Neuve ; 5-10
47. Olsen, S.R., & Sommers, L.E.; 1982; Phosphorus in A.L. Page (ed.), Methods of soil analysis part 2 : chemical and microbiological properties ; Madison, WI : soil science society of America ; 403-430
48. Organisation Météorologique Mondiale (OMM) ; 1993 ; l'agrométéorologie du Mil. Rapport CMAG n°56
49. Paul E.A. & F.E. Clark ; 1989 ; Soil microbiology and biochemistry ; academic press inc.; 470 p.
50. Pereira B ; 2002 ; approche système pour une simulation prospective des territoires appliqués à la gestion de la fertilité des sols dans la région du Fakara (Niger). Mémoire de fin d'étude ; université catholique de Louvain-la-Neuve, faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale ; 104 : 25-40

51. Piéri, C.; 1985; 'Food crop fertilization and soil fertility: the IRAT experience'. In: H.W. Ohm & J.G. Nagy (eds.) *Appropriate technologies for farmers in semi-arid West Africa*. Purdue University, West Lafayette, IN.
52. Piéri, C. ;1986 ; 'Fertilisation des cultures vivrières et fertilité des sols en agriculture paysanne subsaharienne'. *Agronomie Tropicale* 41: 1-20.
53. Poulain JF; 1980; crop residues in traditional cropping systems in West Africa. Effects on the mineral balance and level of organic matter in soils and proposals for their better management. In : organic recycling in Africa. FAO soils bulletin No 43 ; 38-71
54. Rebafka, F. P., A. Hebel, A. Bationo, K. Stahr & H. Marschner ;1994; 'Short- and long-term effects of crop residues and of phosphorus fertilization on pearl millet yield on an acid sandy soil in Niger, West Africa'. *Field Crops Research* 36: 113-124.
55. Scott-Wendt J., L.R Hossner & R.G. Chase; 1987; Variability in Pearl Millet fields in semi-arid West Africa. *Arid soil research and rehabilitation*. Vol.2, pp 49-58
56. Scott-Wendt, J., L.R. Hossner & R.G. Chase ;1988a; 'Variability in pearl millet (*Pennisetum americanum*) fields in semiarid West Africa'. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 2:49-58.
57. Sivakumar MVK; 1992; Growth and yield of millet and cowpea in relay and intercrop systems in the Sahelian zone in years when the onset of the rainy season is early. *Expl Agric*, vol 29, 417-427
58. Sivakumar M.V.K., A. Maidoukia & R.D. Stern; 1993; *Agroclimatology of West Africa : Niger*, second edition; ICRISAT information bulletin n°5
59. Stelly M ; 1981; Chemistry in the soil environment ; ASA special publication number 40 ; American society of agronomy ; soil science society of America ;
60. Subbarao G.V. Renard C. Bationo A. van Duivenbooden N. & Biolders C; 1999; *Alternative technologies for Sahelian Crop Production Systems in West Africa*. Management of arid ecosystem, 121-132
61. Swinton S, M. Robert & R Deusen; 1988; *The Rationality of Intercropping in Sahelian Africa : Evidence From Niger*. *Challenge in Dryland Agriculture*
62. Taupin JD, Dever L, Fontes J-CH, Guero Y, Ousmane B, & Vachier P ; 1991 ; Evaluation de l'évaporation à travers les sols par modélisation des profils isotopiques sous climat sahélien : exemple de la vallée du Niger. *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publication no. 199, 191. pp 159-171

63. Van Wambeke A; 1992; Soils of the tropics. Library of Congress Cataloging-in-publication Data, McGraw-Hill, Inc. 280 pp.
64. Weaver R.W., J.S. Angle & P.S. Bottomley; 1994; methods of soil analysis; soil science society of America
65. Wendt, J.W.; 1986; *Pearl millet (Pennisetum typhoides) response to sandy Ustalfs near Niamey, Niger, West Africa*. M.Sc. thesis, Department of Soil and Crop Sciences, Texas A&M University, College Station
66. Wendt, J.W., A. Berrada, M.G. Gaoh & D.G. Schulze; 1993; 'Phosphorus sorption characteristics of productive and unproductive Niger soils'. *Soil Science Society of America Journal* 57 (3): 766-773.

|  |
|--|
| <b>Annexe 1 : questionnaire paysan</b> |
|--|

**Nom du paysan :** .....

**Village :** .....

**Activités pratiquées**

Agriculture .....

Elevage .....

Commerce .....

Autres ..... (citer) : .....

**Elevage :** Espèces (citer) : .....

Cheptel de petits ruminants : ..... Nature ..... (moutons, chèvres, etc)

Cheptel de gros ruminants : ..... Nature : ..... (bœufs, ânes, etc)

**Agriculture :**

Spéculations pratiquées et variétés (langue locale)

.....

.....

.....

**Mil :**

Nombre de parcelles possédées : .....

Caractéristiques des parcelles : (distances au village, type de sol en langue locale),

Pratiques de gestion de fertilité antérieures de chaque parcelle (engrais, fumure par parcage ou transport, résidu de récolte, jachère, etc. en 2002 et 2003), pratique de gestion prévue en 2004,

Durée de mise en culture depuis la dernière jachère

| Parcelle et superficie (ha) | Distance au village (km) | Type de sol (lang. Locale) | Année fin dernière jachère | Culture et pratique de gestion de fertilité antérieure |      | Pratique de gestion programmée |
|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|--|------|--------------------------------|
|                             |                          |                            |                            | 2002   | 2003 | 2004                           |
| Parcelle 1<br>.....ha       |                          |                            |                            |  |      |                                |
| Parcelle 2<br>.....ha       |                          |                            |                            |  |      |                                |
| Parcelle 3<br>.....ha       |                          |                            |                            |  |      |                                |
| Parcelle 4<br>.....ha       |                          |                            |                            |  |      |                                |
| Parcelle 5<br>.....ha       |                          |                            |                            |  |      |                                |
| Parcelle 6<br>.....ha       |                          |                            |                            |  |      |                                |

**Accord de participation à l'étude :** Favorable...

non favorable : .....

## Annexe 2 : informations générales des parcelles de l'étude régionale

|         | Type de sol          | pratique de fertilisation | village     | nom du paysan             |
|---------|----------------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
| FER01   | ferralic<br>Arenosol | aucune                    | Tigo Tegui  | Issofo Bingui             |
| FER02   | ferralic<br>Arenosol | aucune                    | Fallanga    | Hassam Moussa             |
| FER03   | ferralic<br>Arenosol | aucune                    | Bagoua      | Moumouni Amani            |
| FER04   | ferralic<br>Arenosol | aucune                    | Tondikiboro | Saley Tahirou             |
| FER05   | ferralic<br>Arenosol | aucune                    | Tigo Tegui  | Zacharie Adamo            |
| FER06   | ferralic<br>Arenosol | aucune                    | Korto       | Moussa Amadou             |
| FERP1   | ferralic<br>Arenosol | parcage                   | Fallanga    | Saley Amidou              |
| FERP2   | ferralic<br>Arenosol | parcage                   | camp Peul 2 | Oumarou Bidere            |
| FERP3   | ferralic<br>Arenosol | parcage                   | Bagoua      | Abibou Amani              |
| FERP4   | ferralic<br>Arenosol | parcage                   | camp Peul 3 | Bourima Abdou             |
| FERP5   | ferralic<br>Arenosol | parcage                   | camp Peul 1 | Oumarou Bidere            |
| FERF1   | ferralic<br>Arenosol | transportée<br>fumure     | Korto       | Garba Maman               |
| FERF2   | ferralic<br>Arenosol | transportée<br>fumure     | Fallanga    | Seibou Amadou             |
| FERF3   | ferralic<br>Arenosol | transportée<br>fumure     | Bagoua      | Abibou Amani              |
| FERF4   | ferralic<br>Arenosol | transportée<br>fumure     | Sama Dey    |                           |
| FERF5   | ferralic<br>Arenosol | transportée               | Tondikiboro | Hassam Tondi              |
| FERE1   | ferralic<br>Arenosol | engrais                   | Korto       | Moussa Sounna             |
| FERE2   | ferralic<br>Arenosol | engrais                   | Fallanga    | Seibou Amadou             |
| FERE3   | ferralic<br>Arenosol | engrais                   | Bagoua      | Teibou Boubaka            |
| FERE4   | ferralic<br>Arenosol | engrais                   | Sama Dey    | Gibo Amadou               |
| FERE5   | ferralic<br>Arenosol | engrais                   | Tondikiboro | Oumarou Diouri            |
| FERE6   | ferralic<br>Arenosol | engrais                   | Tigo Tegui  | Zacharie Adamo            |
| CAMBI01 | arenic<br>Cambisol   | aucune                    | Korto       | Moussa Sounna<br>Mamoudou |
| CAMBI02 | arenic<br>Cambisol   | aucune                    | Tigo Tegui  | Moussa                    |
| CAMBI03 | arenic<br>Cambisol   | aucune                    | Sama Dey    | Ibrahim Issaka            |
| CAMBI04 | arenic<br>Cambisol   | aucune                    | Tondikiboro | Garba Timba               |
| CAMBI05 | arenic<br>Cambisol   | aucune                    | Dey Tegui   |                           |
| CAMBIP1 | arenic               | parcage                   | Korto       | Ibrahim Maman             |

|         |                    |                       |             |                           |  |
|---------|--------------------|-----------------------|-------------|---------------------------|--|
|         | Cambisol<br>arenic |                       |             |                           |  |
| CAMBIP2 | Cambisol<br>arenic | parcage               | Tondikiboro | Amani Inssa               |  |
| CAMBIP3 | Cambisol<br>arenic | parcage               | Sama Dey    | camp Peul                 |  |
| CAMBIP4 | Cambisol<br>arenic | parcage               | Bogosay     |                           |  |
| CAMBIP5 | Cambisol<br>arenic | parcage<br>fumure     | Dey Tegui   |                           |  |
| CAMBIF1 | Cambisol<br>arenic | transportée<br>fumure | Fallanga    | Seibou Amadou             |  |
| CAMBIF2 | Cambisol<br>arenic | transportée<br>fumure | Sama Dey    | Issoufo Abdulai<br>Adamou |  |
| CAMBIF3 | Cambisol<br>arenic | transportée<br>fumure | Korto       | Moumouni                  |  |
| CAMBIF4 | Cambisol<br>arenic | transportée<br>fumure | Tigo Tegui  | Ida Adamo                 |  |
| CAMBIF5 | Cambisol<br>arenic | transportée           | Tondikiboro | Saley Tahirou             |  |
| CAMBIE1 | Cambisol<br>arenic | engrais               | Korto       | Adamou Sounna             |  |
| CAMBIE2 | Cambisol<br>arenic | engrais               | Sama Dey    | Issoufo Abdulai<br>Adamou |  |
| CAMBIE3 | Cambisol<br>arenic | engrais               | Korto       | Moumouni                  |  |
| CAMBIE4 | Cambisol<br>arenic | engrais               | Bagoua      | Bachir Boubaka            |  |
| CAMBIE5 | Cambisol<br>arenic | engrais               | Tigo Tegui  | Ida Adamo                 |  |
| LIXI01  | arenic Lixisol     | aucune                | Korto       |                           |  |
| LIXI02  | arenic Lixisol     | aucune                | Fallanga    | Oumarou Abdoul            |  |
| LIXI03  | arenic Lixisol     | aucune                | Bagoua      | Moumouni Amani            |  |
| LIXI04  | arenic Lixisol     | aucune                | Tondikiboro | Seidou Ide                |  |
| LIXIP1  | arenic Lixisol     | parcage               | Korto       | Garba Maman               |  |
| LIXIP2  | arenic Lixisol     | parcage               | camp Peul 1 | Bello Amadou              |  |
| LIXIP3  | arenic Lixisol     | parcage               | Fallanga    | Seibou Amadou             |  |
| LIXIP4  | arenic Lixisol     | parcage               | Bagoua      | Seidou Boubaka            |  |
| LIXIP5  | arenic Lixisol     | parcage<br>fumure     | Tondikiboro | Saley Tahirou             |  |
| LIXIF1  | arenic Lixisol     | transportée<br>fumure | Fallanga    | Seibou Amadou             |  |
| LIXIF2  | arenic Lixisol     | transportée<br>fumure | Korto       | Moussa Amadou             |  |
| LIXIF3  | arenic Lixisol     | transportée<br>fumure | Bagoua      | Tahirou Saley             |  |
| LIXIF4  | arenic Lixisol     | transportée<br>fumure | Dey Tegui   |                           |  |
| LIXIF5  | arenic Lixisol     | transportée           | Bogosay     |                           |  |
| LIXIE1  | arenic Lixisol     | engrais               | Korto       | Abdoulai Amadou           |  |
| LIXIE2  | arenic Lixisol     | engrais               | Fallanga    | Seibou Amadou             |  |
| LIXIE3  | arenic Lixisol     | engrais               | Bogosay     |                           |  |
| LIXIE4  | arenic Lixisol     | engrais               | Dey Tegui   |                           |  |

|   |
|---|
| <b>Annexe 3 : résultats de l'analyse granulométrique, par type de sol</b> |
|---|

*Cambi = arenic Cambisol, lixi=arenic Lixisol, fer=ferralic Arenosol*

| Type de sol | prof (cm) | % sable | % Limons grossiers | % Limons fins | % Argile |
|-------------|-----------|---------|--------------------|---------------|----------|
| cambiE1A    | 0-20      | 0.937   | 0.021              | 0.027         | 0.013    |
| cambi03A    | 0-20      | 0.914   | 0.031              | 0.026         | 0.027    |
| cambiE2A    | 0-20      | 0.914   | 0.029              | 0.031         | 0.023    |
| cambiE1B    | 20-50     | 0.933   | 0.022              | 0.021         | 0.022    |
| cambi03B    | 20-50     | 0.870   | 0.042              | 0.025         | 0.061    |
| cambiE2B    | 20-50     | 0.906   | 0.018              | 0.038         | 0.036    |
| lixiP2A     | 0-20      | 0.942   | 0.011              | 0.030         | 0.015    |
| lixiF2A     | 0-20      | 0.932   | 0.030              | 0.026         | 0.010    |
| lixiF1A     | 0-20      | 0.929   | 0.018              | 0.028         | 0.024    |
| lixiP2B     | 20-50     | 0.922   | 0.023              | 0.022         | 0.031    |
| lixiF2B     | 20-50     | 0.935   | 0.020              | 0.020         | 0.023    |
| lixiF1B     | 20-50     | 0.885   | 0.024              | 0.020         | 0.068    |
| ferF2A      | 0-20      | 0.904   | 0.031              | 0.030         | 0.033    |
| ferP4A      | 0-20      | 0.921   | 0.021              | 0.013         | 0.043    |
| fer01A      | 0-20      | 0.944   | 0.008              | 0.023         | 0.024    |
| ferF2B      | 20-50     | 0.918   | 0.001              | 0.021         | 0.058    |
| ferP4B      | 20-50     | 0.932   | 0.001              | 0.018         | 0.047    |

**Annexe 4 : données brutes de l'analyse des propriétés chimiques de l'étude  
intra-parcellaire**

| <b>Bonne<br/>croissance</b> | pH eau | pH KCl | Ca c<br>moleC/k | K<br>cmolec/kg | Mg<br>cmolec/kg | somme<br>base<br>cmolc/kg |
|-----------------------------|--------|--------|-----------------|----------------|-----------------|---------------------------|
| INTRA1A                     | 6.4    | 5.74   | 0.80            | 0.045          | 0.210           | 1.14                      |
| INTRA2A                     | 6.2    | 5.96   | 0.53            | 0.095          | 0.258           | 0.91                      |
| INTRA3A                     | 5.95   | 5.32   | 0.44            | 0.040          | 0.162           | 0.64                      |
| INTRA4A                     | 6.09   | 5.91   | 0.53            | 0.086          | 0.172           | 0.79                      |
| INTRA5A                     | 5.9    | 5.82   | 0.57            | 0.047          | 0.255           | 0.87                      |
| INTRA6A                     | 6.01   | 5.32   | 0.28            | 0.068          | 0.121           | 0.47                      |
| INTRA7A                     | 5.99   | 5.83   | 0.42            | 0.104          | 0.166           | 0.69                      |
| INTRA8A                     | 6      | 5.35   | 0.25            | 0.056          | 0.11            | 0.43                      |
| INTRA9A                     | 5.8    | 5.31   | 0.63            | 0.052          | 0.199           | 0.88                      |
| INTRA10A                    | 5.88   | 5.43   | 0.32            | 0.065          | 0.132           | 0.53                      |
| INTRA11A                    | 5.92   | 5.69   | 0.35            | 0.033          | 0.109           | 0.49                      |
| INTRA12A                    |        |        |                 |                |                 |                           |
| INTRA13A                    | 5.84   | 5.23   | 0.34            | 0.018          | 0.11            | 0.47                      |
| max                         | 6.4    | 5.96   | 0.80            | 0.10           | 0.258           | 1.14                      |
| min                         | 5.8    | 5.23   | 0.25            | 0.018          | 0.109           | 0.431                     |
| moyenne                     | 5.998  | 5.57   | 0.45            | 0.059          | 0.16            | 0.69                      |
| variance                    | 0.027  | 0.07   | 0.026           | 0.0006         | 0.002           | 0.05                      |
| écart type                  | 0.167  | 0.27   | 0.16            | 0.025          | 0.05            | 0.22                      |

| <b>Croissance<br/>moyenne</b> | pH eau | pH KCl | Ca c<br>moleC/kg | K<br>cmolec/kg | Mg<br>cmolec/kg | somme<br>base<br>cmolc/kg |
|-------------------------------|--------|--------|------------------|----------------|-----------------|---------------------------|
| INTRA1B                       | 5.91   | 5.72   | 0.485            | 0.060          | 0.18            | 0.73                      |
| INTRA2B                       | 6.35   | 5.13   | 0.320            | 0.024          | 0.07            | 0.41                      |
| INTRA3B                       | 5.87   | 5.41   | 0.450            | 0.045          | 0.17            | 0.67                      |
| INTRA4B                       | 6.23   | 6.18   | 0.565            | 0.119          | 0.18            | 0.86                      |
| INTRA5B                       | 5.94   | 5.32   | 0.344            | 0.018          | 0.11            | 0.47                      |
| INTRA6B                       | 5.84   | 5.32   | 0.296            | 0.059          | 0.11            | 0.47                      |
| INTRA7B                       | 6.5    | 5.66   | 0.365            | 0.080          | 0.14            | 0.62                      |
| INTRA8B                       | 5.96   | 5.41   | 0.338            | 0.043          | 0.10            | 0.48                      |
| INTRA9B                       | 5.66   | 5.26   | 0.236            | 0.022          | 0.08            | 0.34                      |
| INTRA10B                      | 5.89   | 5.29   | 0.312            | 0.043          | 0.10            | 0.46                      |
| INTRA11B                      | 6.09   | 5.58   | 0.291            | 0.029          | 0.08            | 0.40                      |
| INTRA12B                      | 5.87   | 5.34   | 0.334            | 0.053          | 0.13            | 0.51                      |
| INTRA13B                      | 5.86   | 5.24   | 0.316            | 0.028          | 0.13            | 0.48                      |
| max                           | 6.5    | 6.18   | 0.56             | 0.11           | 0.188           | 0.86                      |
| min                           | 5.66   | 5.13   | 0.23             | 0.018          | 0.074           | 0.34                      |
| moyenne                       | 5.99   | 5.45   | 0.35             | 0.048          | 0.127           | 0.53                      |
| variance                      | 0.05   | 0.077  | 0.008            | 0.0007         | 0.001           | 0.02                      |
| écart type                    | 0.23   | 0.277  | 0.09             | 0.027          | 0.037           | 0.14                      |

## Annexe 5 : tests de normalité des propriétés chimiques de l'étude intra-parcellaire

*A=zone de bonne croissance, B=zone de croissance moyenne, C=zone de mauvaise croissance*

### Tests of Normality

|          | Kolmogorov-Smirnov |    |      | Shapiro-Wilk |    |      |
|----------|--------------------|----|------|--------------|----|------|
|          | Statistic          | df | Sig. | Statistic    | df | Sig. |
| pH eauA  | .222               | 12 | .105 | .891         | 12 | .152 |
| pH eauB  | .246               | 12 | .043 | .905         | 12 | .244 |
| pH eauC  | .129               | 12 | .200 | .983         | 12 | .976 |
| pH KCIA  | .213               | 12 | .139 | .873         | 12 | .080 |
| pH KCIB  | .236               | 12 | .064 | .859         | 12 | .050 |
| pH KCIC  | .205               | 12 | .175 | .880         | 12 | .094 |
| CaA      | .163               | 12 | .200 | .943         | 12 | .501 |
| CaB      | .232               | 12 | .074 | .884         | 12 | .106 |
| CaC      | .144               | 12 | .200 | .939         | 12 | .471 |
| KA       | .130               | 12 | .200 | .968         | 12 | .836 |
| KB       | .198               | 12 | .200 | .860         | 12 | .051 |
| KC       | .120               | 12 | .200 | .975         | 12 | .915 |
| MgA      | .167               | 12 | .200 | .900         | 12 | .215 |
| MgB      | .170               | 12 | .200 | .932         | 12 | .426 |
| MgC      | .194               | 12 | .200 | .927         | 12 | .394 |
| sumbaseA | .393               | 12 | .000 | .463         | 12 | .010 |
| sumbaseB | .324               | 12 | .001 | .742         | 12 | .010 |
| sumbaseC | .181               | 12 | .200 | .921         | 12 | .357 |

### Tests of Normality

|        | Kolmogorov-Smirnov |    |      | Shapiro-Wilk |    |      |
|--------|--------------------|----|------|--------------|----|------|
|        | Statistic          | df | Sig. | Statistic    | df | Sig. |
| P A    | .150               | 12 | .200 | .945         | 12 | .524 |
| P B    | .323               | 12 | .001 | .550         | 12 | .010 |
| P C    | .193               | 12 | .200 | .910         | 12 | .282 |
| ECECA  | .180               | 12 | .200 | .924         | 12 | .374 |
| ECECB  | .149               | 12 | .200 | .967         | 12 | .822 |
| ECECC  | .156               | 12 | .200 | .941         | 12 | .485 |
| acidA  | .238               | 12 | .059 | .876         | 12 | .085 |
| acidB  | .223               | 12 | .100 | .793         | 12 | .010 |
| acidC  | .154               | 12 | .200 | .925         | 12 | .382 |
| alA    | .292               | 12 | .006 | .830         | 12 | .022 |
| alB    | .252               | 12 | .034 | .769         | 12 | .010 |
| alC    | .147               | 12 | .200 | .939         | 12 | .471 |
| C orgA | .318               | 12 | .001 | .801         | 12 | .010 |
| C orgB | .136               | 12 | .200 | .973         | 12 | .898 |
| C orgC | .170               | 12 | .200 | .944         | 12 | .511 |

\* This is a lower bound of the true significance.

\*\* This is an upper bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

**Annexe 6 : données bruts de l'analyse des propriétés chimiques de l'étude  
inter-parcellaire**

|          | pH eau | pH KCL | Ca<br>cmolec/kg | K cmoleC /kg | Mg c<br>molec/kg | Somme<br>bases<br>cmoles/kg | P mg/kg | H+Al<br>méq/100g | AL<br>méq/100g |
|----------|--------|--------|-----------------|--------------|------------------|-----------------------------|---------|------------------|----------------|
| INTER1   | 5.77   | 5.17   | 0.349           | 0.052        | 0.119            | 0.5300                      | 3.8     | 0.16             | 0.04           |
| INTER2   | 5.54   | 4.77   | 0.227           | 0.047        | 0.083            | 0.3754                      | 6.5     | 0.46             | 0.24           |
| INTER3   | 5.95   | 5.1    | 0.407           | 0.053        | 0.135            | 0.6150                      | 3.5     | 0.17             | 0.06           |
| INTER4   | 5.71   | 5.02   | 0.321           | 0.053        | 0.143            | 0.5440                      | 2.9     | 0.18             | 0.05           |
| INTER5   | 5.58   | 4.89   | 0.228           | 0.044        | 0.084            | 0.4111                      | 5.5     | 0.3              | 0.11           |
| INTER6   | 5.66   | 5.01   | 0.251           | 0.049        | 0.099            | 0.4243                      | 2.7     | 0.22             | 0.07           |
| INTER7   | 5.46   | 4.64   | 0.236           | 0.090        | 0.095            | 0.4582                      | 5.5     | 0.35             | 0.14           |
| INTER8   | 5.72   | 4.87   | 0.141           | 0.044        | 0.071            | 0.3357                      | 5.6     | 0.25             | 0.06           |
| INTER9   | 5.41   | 4.7    | 0.195           | 0.058        | 0.085            | 0.3713                      | 2.6     | 0.34             | 0.15           |
| INTER10  | 5.74   | 5.02   | 0.253           | 0.054        | 0.099            | 0.4146                      | 3.3     | 0.2              | 0.08           |
| INTER11  |        |        |                 |              |                  |                             |         |                  |                |
| INTER12  | 5.67   | 4.79   | 0.238           | 0.080        | 0.096            | 0.4374                      | 3.0     | 0.26             | 0.12           |
| INTER13  | 5.82   | 4.95   | 0.226           | 0.051        | 0.091            | 0.3800                      | 3.0     | 0.4              | 0.07           |
| INTER14  | 5.68   | 4.82   | 0.233           | 0.044        | 0.088            | 0.3673                      | 3.9     | 0.28             | 0.14           |
| INTER15  | 5.6    | 4.7    | 0.161           | 0.049        | 0.061            | 0.2791                      | 5.3     | 0.42             | 0.22           |
| INTER16  | 5.84   | 4.84   | 0.184           | 0.061        | 0.072            | 0.3295                      | 6.1     | 0.31             | 0.15           |
| INTER17  | 5.88   | 5.02   | 0.284           | 0.068        | 0.109            | 0.4801                      | 3.0     | 0.24             | 0.1            |
| INTER18  | 5.82   | 5.04   | 0.387           | 0.053        | 0.145            | 0.5856                      | 3.2     | 0.21             | 0.06           |
| max      | 5.95   | 5.17   | 0.406           | 0.09         | 0.144            | 0.615                       | 6.48    | 0.46             | 0.24           |
| min      | 5.4    | 4.64   | 0.140           | 0.043        | 0.060            | 0.279                       | 2.55    | 0.16             | 0.04           |
| moyenne  | 5.69   | 4.90   | 0.254           | 0.0558       | 0.098            | 0.4316                      | 4.077   | 0.279            | 0.109          |
| variance | 0.021  | 0.02   | 0.005           | 0.00016      | 0.0006           | 0.008                       | 1.789   | 0.008            | 0.003          |

**Annexe 7 : données brutes de l'analyse des propriétés chimiques de l'étude régionale**

| Prof 0-20 cm | pH eau | pH KCL | Ca cmolc/kg | K cmolc/kg | Mg cmolc/kg | somme bases |
|--------------|--------|--------|-------------|------------|-------------|-------------|
| FER01A       | 5.45   | 4.27   | 0.110       | 0.056      | 0.051       | 0.229       |
| FER02A       | 5.8    | 4.22   | 0.084       | 0.063      | 0.037       | 0.191       |
| FER03A       | 5.4    | 4.24   | 0.193       | 0.056      | 0.090       | 0.346       |
| FER04A       | 5.44   | 4.38   | 0.140       | 0.033      | 0.069       | 0.247       |
| FER05A       | 5.2    | 4.06   | 0.542       | 0.160      | 0.224       | 0.947       |
| FER06A       | 5.32   | 4.42   | 0.288       | 0.123      | 0.112       | 0.539       |
| FERP1A       | 4.89   | 4.39   | 0.234       | 0.048      | 0.095       | 0.382       |
| FERP2A       | 5.8    | 5.27   | 0.425       | 0.163      | 0.211       | 0.817       |
| FERP3A       | 5.48   | 4.27   | 0.133       | 0.034      | 0.061       | 0.231       |
| FERP4A       | 5.6    | 4.55   | 0.325       | 0.062      | 0.129       | 0.534       |
| FERP5A       | 5.94   | 4.77   | 0.405       | 0.205      | 0.244       | 0.877       |
| FERF1A       | 5.3    | 4.7    | 0.063       | 0.212      | 0.027       | 0.337       |
| FERF2A       | 5.83   | 5.13   | 0.269       | 0.061      | 0.094       | 0.456       |
| FERF3A       | 5.23   | 4.17   | 0.279       | 0.050      | 0.091       | 0.422       |
| FERF4A       | 6.32   | 4.63   | 0.194       | 0.182      | 0.103       | 0.484       |
| FERF5A       | 5.76   | 4.33   | 0.218       | 0.073      | 0.095       | 0.399       |
| FERE1A       | 5.65   | 4.98   | 0.378       | 0.053      | 0.152       | 0.589       |
| FERE2A       | 5.38   | 4.27   | 0.171       | 0.040      | 0.072       | 0.293       |
| FERE3A       | 5.59   | 4.46   | 0.206       | 0.055      | 0.083       | 0.352       |
| FERE4A       | 6.5    | 4.23   | 0.149       | 0.054      | 0.068       | 0.275       |
| FERE5A       | 5.96   | 4.49   | 0.203       | 0.050      | 0.078       | 0.344       |
| FERE6A       | 5.25   | 4.07   | 0.262       | 0.064      | 0.105       | 0.457       |
| CAMBI01A     | 5.62   | 4.78   | 0.133       | 0.044      | 0.050       | 0.258       |
| CAMBI02A     | 5.1    | 4.45   | 0.159       | 0.033      | 0.069       | 0.271       |
| CAMBI03A     | 5.43   | 4.26   | 0.202       | 0.050      | 0.086       | 0.351       |
| CAMBI04A     | 5.38   | 4.49   | 0.188       | 0.029      | 0.071       | 0.306       |
| CAMBI05A     | 5.75   | 4.4    | 0.084       | 0.033      | 0.031       | 0.164       |
| CAMBIP1A     | 5.8    | 4.79   | 0.297       | 0.050      | 0.118       | 0.468       |
| CAMBIP2A     | 5.82   | 4.57   | 0.211       | 0.062      | 0.075       | 0.361       |
| CAMBIP3A     | 5.26   | 4.08   | 0.070       | 0.113      | 0.055       | 0.249       |
| CAMBIP4A     | 5.73   | 4.31   | 0.170       | 0.112      | 0.093       | 0.392       |
| CAMBIP5A     | 5.25   | 5.15   | 0.292       | 0.112      | 0.166       | 0.579       |
| CAMBIF1A     | 5.92   | 5.01   | 0.166       | 0.078      | 0.071       | 0.334       |
| CAMBIF2A     | 5.56   | 4.31   | 0.150       | 0.090      | 0.074       | 0.328       |
| CAMBIF3A     | 5.15   | 4.31   | 0.087       | 0.019      | 0.033       | 0.161       |
| CAMBIF4A     | 5.42   | 4.2    | 0.147       | 0.075      | 0.067       | 0.306       |
| CAMBIF5A     | 5.64   | 4.63   | 0.261       | 0.082      | 0.099       | 0.444       |
| CAMBIE1A     | 5.59   | 4.89   | 0.119       | 0.037      | 0.045       | 0.220       |
| CAMBIE2A     | 5.66   | 4.32   | 0.171       | 0.056      | 0.071       | 0.308       |
| CAMBIE3A     | 5.63   | 4.92   | 0.165       | 0.049      | 0.067       | 0.291       |
| CAMBIE4A     | 5.67   | 4.35   | 0.168       | 0.097      | 0.093       | 0.362       |
| CAMBIE5A     | 5.7    | 4.55   | 0.199       | 0.045      | 0.073       | 0.333       |
| LIXI01A      | 5.42   | 4.24   | 0.234       | 0.068      | 0.091       | 0.417       |
| LIXI02A      | 6.45   | 4.27   | 0.110       | 0.056      | 0.051       | 0.228       |
| LIXI03A      | 5.5    | 4.31   | 0.147       | 0.024      | 0.059       | 0.251       |
| LIXI04A      | 5.26   | 4.24   | 0.044       | 0.022      | 0.018       | 0.091       |
| LIXIP1A      | 5.82   | 4.98   | 0.130       | 0.040      | 0.056       | 0.247       |
| LIXIP2A      | 5.79   | 4.6    | 0.224       | 0.165      | 0.124       | 0.539       |
| LIXIP3A      | 5.31   | 4.64   | 0.156       | 0.093      | 0.072       | 0.335       |

| Prof : 0-20<br>cm | pH eau                       | pH KCL            | Ca cmolc/kg      | K<br>cmolc/kg | Mg<br>cmolc/kg | somme<br>bases |
|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------|---------------|----------------|----------------|
| LIXIP4A           | 5.41                         | 4.22              | 0.151            | 0.046         | 0.074          | 0.273          |
| LIXIP5A           | 5.49                         | 4.35              | 0.187            | 0.054         | 0.063          | 0.310          |
| LIXIF1A           | 6.01                         | 5.09              | 0.194            | 0.096         | 0.081          | 0.402          |
| LIXIF2A           | 5.7                          | 4.93              | 0.427            | 0.105         | 0.170          | 0.719          |
| LIXIF3A           | 5.55                         | 4.34              | 0.227            | 0.077         | 0.089          | 0.415          |
| LIXIF4A           | 5.08                         | 4.75              | 0.319            | 0.074         | 0.134          | 0.536          |
| LIXIF5A           | 5.7                          | 4.74              | 0.303            | 0.083         | 0.141          | 0.543          |
| LIXIE1A           | 5.64                         | 4.79              | 0.216            | 0.080         | 0.110          | 0.424          |
| LIXIE2A           | 5.38                         | 4.25              | 0.095            | 0.024         | 0.041          | 0.162          |
| LIXIE3A           | 5.17                         | 4.58              | 0.197            | 0.045         | 0.084          | 0.344          |
| LIXIE4A           | 4.81                         | 4.28              | 0.083            | 0.066         | 0.053          | 0.210          |
| Prof : 0-20<br>cm | acidité<br>d'éch<br>cmolc/kg | Al+++<br>cmolc/kg | ECEC<br>cmolc/kg | P<br>mg/kg    |                |                |
| FER01A            | 0.37                         | 0.22              | 0.599            | 5.4           |                |                |
| FER02A            | 0.53                         | 0.32              | 0.721            | 5.3           |                |                |
| FER03A            | 0.46                         | 0.27              | 0.806            | 3.7           |                |                |
| FER04A            | 0.37                         | 0.18              | 0.617            |               |                |                |
| FER05A            | 0.5                          | 0.28              | 1.447            | 7.1           |                |                |
| FER06A            | 0.27                         | 0.16              | 0.809            | 7.2           |                |                |
| FERP1A            | 0.28                         | 0.17              | 0.662            | 4.3           |                |                |
| FERP2A            | 0.1                          | 0                 | 0.917            | 3.6           |                |                |
| FERP3A            | 0.26                         | 0.1               | 0.491            | 3.5           |                |                |
| FERP4A            | 0.26                         | 0.13              | 0.794            | 3.9           |                |                |
| FERP5A            | 0.18                         | 0.08              | 1.057            | 3.9           |                |                |
| FERF1A            | 0.52                         | 0.3               | 0.857            | 4.6           |                |                |
| FERF2A            | 0.22                         | 0.06              | 0.676            | 4.5           |                |                |
| FERF3A            | 0.3                          | 0.12              | 0.722            | 5.9           |                |                |
| FERF4A            | 0.18                         | 0.1               | 0.664            | 7.6           |                |                |
| FERF5A            | 0.23                         | 0.1               | 0.629            | 7.8           |                |                |
| FERE1A            | 0.22                         | 0.07              | 0.809            | 2.7           |                |                |
| FERE2A            | 0.35                         | 0.15              | 0.643            | 3.9           |                |                |
| FERE3A            | 0.24                         | 0.08              | 0.592            |               |                |                |
| FERE4A            | 0.46                         | 0.22              | 0.735            | 3.7           |                |                |
| FERE5A            | 0.23                         | 0.1               | 0.574            | 3.6           |                |                |
| FERE6A            | 0.56                         | 0.34              | 1.017            | 7.4           |                |                |
| CAMBI01A          | 0.24                         | 0.07              | 0.498            | 4.7           |                |                |
| CAMBI02A          | 0.38                         | 0.17              | 0.651            | 4.9           |                |                |
| CAMBI03A          | 0.3                          | 0.16              | 0.651            | 3.8           |                |                |
| CAMBI04A          | 0.22                         | 0.08              | 0.526            | 6.3           |                |                |
| CAMBI05A          | 0.52                         | 0.3               | 0.684            | 6.3           |                |                |
| CAMBIP1A          | 0.16                         | 0.06              | 0.628            | 6.3           |                |                |
| CAMBIP2A          | 0.16                         | 0.06              | 0.520            | 4.7           |                |                |
| CAMBIP3A          | 0.6                          | 0.4               | 0.849            | 5.3           |                |                |
| CAMBIP4A          | 0.38                         | 0.22              | 0.772            | 6.6           |                |                |
| CAMBIP5A          | 0.14                         | 0.04              | 0.719            |               |                |                |
| CAMBIF1A          | 0.18                         | 0.05              | 0.514            | 3.1           |                |                |
| CAMBIF2A          | 0.34                         | 0.2               | 0.668            | 5.5           |                |                |
| CAMBIF3A          | 0.33                         | 0.16              | 0.490            | 6.1           |                |                |
| CAMBIF4A          | 0.36                         | 0.2               | 0.666            | 7.7           |                |                |
| CAMBIF5A          | 0.16                         | 0.04              | 0.604            | 5.6           |                |                |
| CAMBIE1A          | 0.19                         | 0.08              | 0.410            | 5.1           |                |                |
| CAMBIE2A          | 0.28                         | 0.13              | 0.588            | 4.4           |                |                |

| Prof 0-20<br>cm | acidité<br>d'éch<br>cmolc/kg | Al+++<br>cmolc/kg | ECEC<br>cmolc/kg | P mg/kg |
|-----------------|------------------------------|-------------------|------------------|---------|
| CAMBIE3A        | 0.22                         | 0.11              | 0.510            | 2.7     |
| CAMBIE4A        | 0.3                          | 0.14              | 0.662            | 5.1     |
| CAMBIE5A        | 0.16                         | 0.06              | 0.493            | 3.8     |
| LIXI01A         | 0.36                         | 0.2               | 0.777            | 7.0     |
| LIXI02A         | 0.37                         | 0.22              | 0.598            | 5.4     |
| LIXI03A         | 0.44                         | 0.24              | 0.691            | 4.1     |
| LIXI04A         | 0.45                         | 0.28              | 0.541            | 7.5     |
| LIXIP1A         | 0.2                          | 0.08              | 0.447            | 2.6     |
| LIXIP2A         | 0.18                         | 0.08              | 0.719            | 7.5     |
| LIXIP3A         | 0.2                          | 0.04              | 0.535            | 4.3     |
| LIXIP4A         | 0.42                         | 0.25              | 0.693            | 6.6     |
| LIXIP5A         | 0.3                          | 0.12              | 0.610            | 7.6     |
| LIXIF1A         | 0.15                         | 0.06              | 0.552            | 4.2     |
| LIXIF2A         | 0.18                         | 0.08              | 0.899            | 7.1     |
| LIXIF3A         | 0.24                         | 0.1               | 0.655            | 7.7     |
| LIXIF4A         | 0.16                         | 0.06              | 0.696            | 5.7     |
| LIXIF5A         | 0.2                          | 0.1               | 0.743            |         |
| LIXIE1A         | 0.3                          | 0.13              | 0.724            | 2.02    |
| LIXIE2A         | 0.42                         | 0.22              | 0.582            | 4.5     |
| LIXIE3A         | 0.26                         | 0.16              | 0.604            | 4.6     |
| LIXIE4A         | 0.56                         | 0.4               | 0.770            | 7.5     |

| Prof : 20-50 cm | pH eau | pH KCl | Ca cmolc/kg | K cmolc/kg | Mg cmolc/kg | somme bases cmolc/kg |
|-----------------|--------|--------|-------------|------------|-------------|----------------------|
| FER01B          | 5.2    | 4.2    | 0.142       | 0.050      | 0.084       | 0.320                |
| FER02B          | 5.05   | 4.13   | 0.049       | 0.031      | 0.025       | 0.110                |
| FER03B          | 5.17   | 4.3    | 0.139       | 0.041      | 0.068       | 0.259                |
| FER04B          | 5.35   | 4.3    | 0.097       | 0.033      | 0.045       | 0.186                |
| FER05B          | 4.91   | 3.97   | 0.422       | 0.113      | 0.245       | 0.809                |
| FER06B          | 5.32   | 4.27   | 0.435       | 0.110      | 0.147       | 0.733                |
| FERP1B          | 5.25   | 4.03   | 0.137       | 0.060      | 0.062       | 0.272                |
| FERP2B          | 5.7    | 4.38   | 0.241       | 0.167      | 0.182       | 0.622                |
| FERP3B          | 5.16   | 4.19   | 0.079       | 0.028      | 0.037       | 0.145                |
| FERP4B          | 5.51   | 4.34   | 0.234       | 0.037      | 0.107       | 0.396                |
| FERP5B          | 5.6    | 4.22   | 0.191       | 0.246      | 0.144       | 0.599                |
| FERF1B          | 5      | 4.69   | 0.019       | 0.040      | 0.014       | 0.096                |
| FERF2B          | 5.5    | 4.68   | 0.122       | 0.072      | 0.053       | 0.309                |
| FERF3B          | 5.01   | 4.12   | 0.122       | 0.025      | 0.047       | 0.194                |
| FERF4B          | 5.85   | 4.17   | 0.096       | 0.131      | 0.063       | 0.292                |
| FERF5B          | 5.71   | 4.33   | 0.269       | 0.085      | 0.103       | 0.470                |
| FERE1B          | 5.42   | 4.79   | 0.242       | 0.036      | 0.113       | 0.416                |
| FERE2B          | 5.25   | 4.15   | 0.181       | 0.031      | 0.090       | 0.307                |
| FERE3B          | 5.2    | 4.27   | 0.057       | 0.028      | 0.025       | 0.113                |
| FERE4B          | 5.16   | 4.12   | 0.059       | 0.037      | 0.032       | 0.139                |
| FERE5B          | 5.41   | 4.25   | 0.21115185  | 0.057798   | 0.09544     | 0.370                |
| FERE6B          | 4.97   | 3.96   | 0.165       | 0.044      | 0.062       | 0.284                |
| CAMBI01B        | 5.5    | 4.75   | 0.080838    | 0.035786   | 0.03746     | 0.18226              |
| CAMBI02B        | 5.25   | 4.27   | 0.0735526   | 0.035275   | 0.031745    | 0.152616             |
| CAMBI03B        | 5.26   | 4.11   | 0.08375715  | 0.033702   | 0.042724    | 0.16977              |
| CAMBI04B        | 5.05   | 4.32   | 0.0854288   | 0.022574   | 0.033102    | 0.147975             |
| CAMBI05B        | 5.5    | 4.38   | 0.05711055  | 0.015335   | 0.022287    | 0.099059             |
| CAMBIP1B        | 5.51   | 4.84   | 0.1130734   | 0.046018   | 0.099428    | 0.276129             |
| CAMBIP2B        | 5.56   | 4.3    | 0.15157125  | 0.043934   | 0.060364    | 0.256478             |
| CAMBIP3B        | 4.93   | 4.01   | 0.0721554   | 0.046108   | 0.055101    | 0.193364             |
| CAMBIP4B        | 4.7    | 4.22   | 0.06105265  | 0.072251   | 0.037337    | 0.173553             |
| CAMBIP5B        | 5.14   | 4.82   | 0.18655115  | 0.093815   | 0.10132     | 0.390925             |
| CAMBIF1B        | 5.69   | 4.78   | 0.0842811   | 0.088187   | 0.061063    | 0.249706             |
| CAMBIF2B        | 4.97   | 4.12   | 0.0834827   | 0.04754    | 0.03598     | 0.185221             |
| CAMBIF3B        | 5.21   | 4.74   | 0.0178642   | 0.013417   | 0.0088      | 0.059668             |
| CAMBIF4B        | 5.43   | 4.22   | 0.10336785  | 0.105428   | 0.048234    | 0.271487             |
| CAMBIF5B        | 5.47   | 4.35   | 0.1400194   | 0.083276   | 0.060076    | 0.303371             |
| CAMBIE1B        | 5.64   | 4.86   | 0.1000994   | 0.055598   | 0.028044    | 0.19385              |
| CAMBIE2B        | 5.44   | 4.19   | 0.1198099   | 0.069897   | 0.047946    | 0.247545             |
| CAMBIE3B        | 5.34   | 4.25   | 0.08560345  | 0.01334    | 0.044862    | 0.163805             |
| CAMBIE4B        | 5.17   | 4.22   | 0.08859745  | 0.041721   | 0.046548    | 0.183193             |
| CAMBIE5B        | 5.59   | 4.47   | 0.2317855   | 0.064705   | 0.101772    | 0.415263             |
| LIXI01B         | 4.8    | 4.18   | 0.11239975  | 0.052938   | 0.064394    | 0.255537             |
| LIXI02B         | 5.24   | 4.15   | 0.0872252   | 0.042322   | 0.046301    | 0.179283             |
| LIXI03B         | 5.02   | 4.26   | 0.066367    | 0.020771   | 0.031704    | 0.123537             |
| LIXI04B         | 5.22   | 4.3    | 0.06544385  | 0.026629   | 0.026728    | 0.122583             |
| LIXIP1B         | 4.94   | 4.82   | 0.07542385  | 0.029634   | 0.034212    | 0.145836             |
| LIXIP2B         | 5.52   | 4.24   | 0.1264965   | 0.155654   | 0.072453    | 0.375996             |
| LIXIP3B         | 4.95   | 4.4    | 0.1319855   | 0.090579   | 0.07636     | 0.313881             |
| LIXIP4B         | 5.2    | 4.21   | 0.10137185  | 0.041657   | 0.051236    | 0.19883              |
| LIXIP5B         | 5.32   | 4.27   | 0.1085325   | 0.042693   | 0.03561     | 0.190988             |

| Prof : 20-<br>50 cm | pH eau | pH KCl | Ca cmolc/kg | K<br>cmolc/kg | Mg<br>cmolc/kg | somme<br>bases<br>cmolc/kg |
|---------------------|--------|--------|-------------|---------------|----------------|----------------------------|
| LIXIF1B             | 5.47   | 4.69   | 0.16249935  | 0.131225      | 0.086023       | 0.40201                    |
| LIXIF2B             | 5.41   | 4.28   | 0.19762895  | 0.082496      | 0.07159        | 0.370215                   |
| LIXIF3B             | 5.4    | 4.29   | 0.2262965   | 0.055061      | 0.086763       | 0.372903                   |
| LIXIF4B             | 5.88   | 4.47   | 0.16858715  | 0.076804      | 0.061598       | 0.325229                   |
| LIXIF5B             | 5.73   | 4.37   | 0.09518425  | 0.061776      | 0.041161       | 0.205991                   |
| LIXIE1B             | 5.11   | 4.59   | 0.1678636   | 0.054741      | 0.077347       | 0.310887                   |
| LIXIE2B             | 5.07   | 4.15   | 0.08650165  | 0.368608      | 0.036432       | 0.500825                   |
| LIXIE3B             | 4.98   | 4.41   | 0.10177105  | 0.027652      | 0.054155       | 0.203578                   |
| LIXIE4B             | 4.61   | 4.27   | 0.0603291   | 0.051493      | 0.034335       | 0.161049                   |

**Annexe 8 : tests de normalité sur les propriétés chimiques de l'étude régionale, type de sol par type de sol**

Tests of Normality *ferr=ferralsic Arenosol, cambi=arenic Cambisol, lixi=arenic Lixisol*

|                   | Kolmogoro<br>v-Smirnov |    |      | Shapiro-<br>Wilk |    |      |
|-------------------|------------------------|----|------|------------------|----|------|
|                   | Statistic              | df | Sig. | Statistic        | df | Sig. |
| pH eau<br>ferr    | .132                   | 18 | .200 | .974             | 18 | .820 |
| pH eau<br>cambi   | .145                   | 18 | .200 | .956             | 18 | .496 |
| pH eau lixi       | .103                   | 18 | .200 | .973             | 18 | .810 |
| pH Kcl ferr       | .206                   | 18 | .042 | .894             | 18 | .046 |
| pH Kcl<br>cambi   | .158                   | 18 | .200 | .943             | 18 | .375 |
| pH Kcl lixi       | .235                   | 18 | .010 | .879             | 18 | .027 |
| Ca ferr           | .105                   | 18 | .200 | .961             | 18 | .586 |
| Ca cambi          | .164                   | 18 | .200 | .941             | 18 | .353 |
| Ca lixi           | .158                   | 18 | .200 | .953             | 18 | .470 |
| K ferr            | .298                   | 18 | .000 | .799             | 18 | .010 |
| K cambi           | .158                   | 18 | .200 | .922             | 18 | .176 |
| K lixi            | .112                   | 18 | .200 | .919             | 18 | .146 |
| Mg ferr           | .202                   | 18 | .050 | .885             | 18 | .035 |
| Mg cambi          | .217                   | 18 | .025 | .885             | 18 | .035 |
| Mg lixi           | .159                   | 18 | .200 | .962             | 18 | .609 |
| Base éch<br>ferr  | .143                   | 18 | .200 | .896             | 18 | .049 |
| Base éch<br>cambi | .133                   | 18 | .200 | .955             | 18 | .487 |
| Base éch<br>lixli | .115                   | 18 | .200 | .970             | 18 | .761 |

\* This is a lower bound of the true significance.

\*\* This is an upper bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality

|                  | Kolmogoro<br>v-Smirnov |    |      | Shapiro-<br>Wilk |    |      |
|------------------|------------------------|----|------|------------------|----|------|
|                  | Statistic              | df | Sig. | Statistic        | df | Sig. |
| Acidité ferr     | .191                   | 15 | .147 | .921             | 15 | .263 |
| Acidité<br>cambi | .154                   | 15 | .200 | .890             | 15 | .072 |
| Acidité lixi     | .147                   | 15 | .200 | .931             | 15 | .344 |
| Al ferr          | .191                   | 15 | .148 | .938             | 15 | .399 |
| Al cambi         | .146                   | 15 | .200 | .882             | 15 | .053 |
| Al lixi          | .150                   | 15 | .200 | .906             | 15 | .143 |
| ECEC fer         | .193                   | 15 | .139 | .841             | 15 | .013 |
| ECEC<br>cambi    | .160                   | 15 | .200 | .961             | 15 | .683 |
| ECEC lixi        | .120                   | 15 | .200 | .980             | 15 | .953 |
| P ferr           | .242                   | 15 | .018 | .820             | 15 | .010 |
| P cambi          | .132                   | 15 | .200 | .953             | 15 | .541 |
| P lixi           | .257                   | 15 | .009 | .767             | 15 | .010 |

\* This is a lower bound of the true significance.

\*\* This is an upper bound of the true significance.

a Lilliefors Significance Correction

**Annexe 9 : Pluviométrie cumulée des années de l'étude de sensibilité  
d'APSIM**

