



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

Thèse

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université d'Abomey-Calavi

En

Gestion de l'environnement

École Doctorale Pluridisciplinaire « Espace, Cultures et
Développement »

Discipline : Aménagement de l'Espace

Spécialité : Sciences du sol



*Phénomène de la toxicité ferreuse dans les bas-fonds
rizicoles au Sud-Bénin: perceptions locales,
variabilité et impacts de différents modes de
répartition toposéquentielle de l'eau*

Thèse présentée et soutenue publiquement le 29 juin 2017

par :

Jean G. GBÈTO DANSOU

Devant un jury composé de :

- M. Adam AHANCHEDE, Professeur Titulaire : Président
- M. Guillaume Lucien AMADJI Professeur Titulaire : Directeur de thèse
- M. Bernard AHAMIDE, Maitre de Conférences : Examineur
- M. Jean SOGEDJI, Maitre de Conférences : Examineur
- M. Kissao GNANDI, Maitre de Conférences : Examineur

Dédicace

Ce travail est dédié aux chercheurs et aux étudiants passionnés des sciences du sol.

Que les résultats de ces travaux permettent de poursuivre des problématiques de recherche sur les sols de notre pays et en particulier sur les sols humides. Les différents phénomènes qui se produisent dans nos sols interpellent chacun de nous dans l'amélioration des conditions de production des cultures.

Remerciements

L'aboutissement de cette thèse est le fruit des appuis techniques et financiers de plusieurs institutions. Il s'agit de la Faculté des Langues, des Arts et des Sciences Humaines (FLASH) qui a bien voulu m'accepter pour la conduite de ces études ; la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (FSA/UAC) qui a apporté tout son soutien technique dans la conduite de ces études ; du PPAAO qui a apporté son soutien financier pour la réalisation de ces études. **Je voudrais remercier les responsables de ces institutions pour leur soutien et leur disponibilité dans la réalisation de cette thèse.**

Enfin je remercie les producteurs pour avoir cru aux résultats de ces études qui apporteront des solutions durables aux problèmes auxquels ils sont confrontés et également pour avoir décidé de mettre leurs parcelles à la disposition de ces études.

Je voudrais remercier :

- Mon Directeur de thèse **Prof. Guillaume AMADJI** (Professeur titulaire à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin) pour m'avoir encadré tout au long de cette thèse ;
- Le comité de thèse composé **des Professeurs Romain GLELE KAKAÏ ; Euloge AGBOSSOU et du Sieur Pierre VISSOH ;**

- les rapporteurs pour le temps qu'ils ont passé à lire mon manuscrit dans le détail pour évaluer mon travail et pour leurs commentaires très développés et pertinents ;
- **le Dr. Ir. Hervé AHOLOUKPE**, Chargé de recherche au CAMES, Chercheur en Sciences du Sol au Centre de Recherches Agricoles des Plantes Pérennes (CRAPP) de l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) pour ses conseils, critiques, suggestions et ses observations dans la réalisation du présent document ;
- **Monsieur ODJO Théophile** pour sa contribution en ce qui concerne les analyses statistiques lors du traitement des données.

Aussi voudrais-je remercier :

- les Sieurs et Dames : **DAASSI Rodrigue, HOUSSOUKPEVI Issiakou, AZON Nadège, AHOUANGNIMON Soulia** pour leur assistance lors des travaux de laboratoire et du terrain ;
- **le personnel du secrétariat administratif** de l'Ecole doctorale de la FLASH/Université d'Abomey-Calavi, reçoive à travers ces lignes, l'expression de ma profonde gratitude ;
- mon frère et ami **Gaston C. DOSSOUHOUI**, j'adresse mes remerciements sincères et fraternels pour tout son soutien ;

- Monsieur **Charles GBLAGADA** qui a toujours répondu présent à mes nombreuses sollicitations au cours de ces travaux.

J'ai une pensée spéciale pour **toute ma famille**. Leurs prières et leurs encouragements incessants ont été d'un grand soutien pour moi.

Je rends un hommage particulier à mes **feus parents**.

Que toutes les personnes que je n'ai pas pu citer dans cette rubrique de remerciement trouvent à travers ces lignes l'expression de toute ma reconnaissance pour leurs soutiens quotidiens et continus qui m'ont permis de conduire à terme cette thèse.

Enfin, j'ai une pensée forte et pleine d'émotion pour mes enfants **Gertrude, Murielle et Axel**. Leur patience et leur grande affection ont été pour moi une source de motivation. Que ce travail soit pour vous un exemple à dépasser.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Table des matières	v
Liste des figures	xvi
Liste des annexes	xviii
Résumé	xxii
Abstract	xxvi
Introduction générale	2
1. Problématique de recherche	2
2. Questions de recherche	6
3. Objectifs de recherche	7
3.1. Objectif global	7
3.2. Objectifs spécifiques	7
4. Structuration de la thèse	8
Première Partie : Etat des Connaissances et orientation de la recherche	11

Chapitre 1: Etat des connaissances et hypothèses de recherche	11
1.1 Introduction	11
1.2 Etat du fer dans le sol et la plante.....	11
<i>1.2.1. Les formes du fer dans le sol.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.2. Le fer dans les sols de bas-fond.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.3. Le fer dans la plante</i>	<i>15</i>
1.3. Toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizicoles	19
<i>1.3.1. Développement de la toxicité ferreuse</i>	<i>19</i>
<i>1.3.2. Problématique de la toxicité ferreuse</i>	<i>26</i>
<i>1.3.3. Symptômes de toxicité ferreuse</i>	<i>27</i>
<i>1.3.4. Techniques de correction de la toxicité ferreuse</i>	<i>29</i>
<i>1.3.5. Rôle du fer actif dans les processus d'humification</i>	<i>31</i>
1.4. Azote et phosphore dans le sol	32
<i>1.4.1. Etat de l'azote dans les sols</i>	<i>32</i>
<i>1.4.2. Etat du phosphore dans le sol</i>	<i>40</i>
1.5. La matière organique du sol	45
<i>1.5.1. Statut de la matière organique du sol et conditions environnementales l'influençant....</i>	<i>47</i>

1.5.2. <i>Activité microbienne du sol et minéralisation de la matière organique</i>	49
1.5.3. <i>Matière organique et activités microbiennes dans les sols en conditions d'hydromorphie</i>	51
1.6. Plante du riz.....	54
1.6.1. <i>Classification variétale</i>	57
1.6.2. <i>Impact environnemental de la riziculture</i>	64
1.6.3. <i>Importance du riz</i>	65
1.7 <i>Conclusion et hypothèses de recherche</i>	70
Chapitre 2: Cadre d'étude et Methodologie générale	73
2.1 Cadre d'étude.....	73
2.2 Méthodologie générale.....	78
2.2.1. <i>Caractérisations physiques et chimiques du sol du bas-fond</i>	78
2.2.2. <i>Pluviométrie de la zone d'étude</i>	82
2.2.3. <i>Définition des différents modes de répartition de l'eau selon la toposéquence du bas-fond</i>	83
2.2.4. <i>Dispositif expérimental</i>	84
2.2.5. <i>Collecte des données</i>	87

2.2.6	<i>Analyse physicochimiques des échantillons</i>	88
2.2.7	<i>Analyse statistique des données</i>	91
Chapitre 3:	Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond	93
3.1.	Introduction	94
3.2.	Matériel et Méthodes.....	97
3.2.1	<i>Milieu d'étude Voir le chapitre 2 « Cadre de l'étude »</i>	97
3.2.2	<i>Echantillonnage</i>	97
3.2.3	<i>Analyse de la perception locale de la toxicité ferreuse</i>	97
3.2.4	<i>Typologie des producteurs</i>	98
3.2.5	<i>Effet de la toxicité ferreuse sur le rendement en riz paddy</i>	98
3.2.6	<i>Identification des pratiques paysannes réduisant la toxicité ferreuse</i>	98
3.3.	Résultats et Discussion.....	99
3.3.1.	<i>Caractéristiques socioprofessionnelles des producteurs</i>	99
3.3.2.	<i>Pratiques agricoles dans le bas-fond d'Awokpa</i>	101
3.3.3.	<i>Perceptions locales de la toxicité ferreuse</i>	104
3.3.4.	<i>Perceptions de la toxicité ferreuse selon les catégories de producteurs</i>	105

3.3.5. <i>Effet des modes d'inondation sur la perception de la toxicité ferreuse</i>	114
3.3.6. <i>Effet de la toxicité ferreuse sur le rendement en riz paddy</i>	115
3.3.7. <i>Pratiques paysannes réduisant la toxicité ferreuse</i>	117
3.4. Conclusion.....	119
Chapitre 4: Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz	120
4.1. Introduction	120
4.2. Matériel et Méthodes.....	122
4.2.1 <i>Milieu d'étude (voir cadre de l'étude du chapitre 2)</i>	122
4.2.2 <i>Echantillonnage (voir paragraphe 3.2.2. du chapitre 3)</i>	122
4.2.3 <i>Collecte des données</i>	122
4.2.4 <i>Traitement et analyses des données</i>	124
4.3. Résultats	125
4.3.1 <i>Effet de la toxicité ferreuse sur les paramètres de croissance des plants du riz suivant les modes d'inondation</i>	125
4.3.2 <i>Effet de modes de répartition de l'eau sur les paramètres de rendement</i>	126
4.3.3 <i>Analyse financière</i>	127
4.5. Conclusion.....	133

Chapitre 5: Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation	134
5.1. Introduction	134
5.2 Matériels et méthodes.....	137
5.2.1. Milieu d'étude	137
5.2.2. Evaluation des stocks de carbone organique et sa répartition granulométrique sous différents modes de répartition de l'eau	137
5.2.3. Evaluation du dégagement du CO₂ dans le sol du bas-fond sous différents modes d'inondation.....	144
5.2.4. Evaluation de l'effet des modes d'inondation sur les paramètres agronomiques de riz	148
5.3. Résultats	149
5.3.1. Influence du mode d'irrigation sur le stock et la structure de la matière organique ..	149
5.3.2. Effet du mode de répartition de l'eau sur le dégagement du dioxyde de carbone (CO₂) par le sol du bas-fond.....	156
5.3.3. Influence du mode de répartition de l'eau sur la production du riz dans le bas-fond....	160
5.4 Discussion	163
5.4.1. Les modes de répartition de l'eau et stocks de carbone organique du sol.....	163
5.4.2. Mode de répartition de l'eau et fractions organo-minérales du sol.....	164

5.4.3. <i>Mode de répartition de l'eau et dégagement de CO₂</i>	168
5.4.4. <i>Croissance et productivité du riz sous les modes de repartition de l'eau</i>	172
5.5 Conclusion.....	175
Chapitre 6: Effet des caractéristiques physico-chimiques du sol sur la toxicité ferreuse et sur le développement du riz	177
6.1 Introduction	177
6.2 Matériel et Méthodes.....	180
6.2.1 <i>Milieu d'étude (Voir chapitre 2 cadre de l'étude et Méthodologie générale)</i>	180
6.2.2. <i>Méthodes</i>	180
6.3 Résultats et Discussion	182
6.3.1. <i>Evaluation des paramètres physico-chimiques du sol du bas-fond d'Awokpa</i>	182
6.3.2. <i>Dynamique du potentiel redox (Eh) du sol du bas-fond d'Awokpa durant la période de végétation du riz</i>	185
6.3.3. <i>Effet du mode de repartition de l'eau sur l'acidité active (pH eau) du sol du bas-fond d'Awokpa</i>	191
6.3.4. <i>Influence du mode d'irrigation sur la dynamique de la teneur en Fer Ferreux dans les sols du bas-fond d'Awokpa</i>	196
6.3.5. <i>Effet des différents traitements sur les paramètres de croissance du riz</i>	202

6.3.6. <i>Effet de la répartition de l'eau selon la toposéquence du bas-fond sur les paramètres de rendement du riz</i>	204
6.4 Conclusion.....	206
Chapitre 7: Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse	207
7.1 Introduction	207
7.2 Matériels et Méthodes	211
7.2.1. <i>Milieu d'étude (voir cadre de l'étude)</i>	211
7.2.2 <i>Méthodes</i>	211
7.3 Résultats	219
7.3.1 <i>Caractérisation physico-chimique du site d'expérimentation</i>	219
7.3.2. <i>Variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse</i>	223
7.3.3. <i>Effet du mode de répartition toposéquentielle de l'eau sur les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse</i>	231
7.3.4. <i>Corrélation de Pearson entre les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse</i>	237
7.3.6. <i>Effet du mode de répartition de l'eau sur la production du riz</i>	240

7.4.1. <i>Caractérisation physico-chimique du bas-fond</i>	249
7.4.2. <i>Variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse</i>	251
7.4.3. <i>Effet du mode de répartition de l'eau sur les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse</i>	254
7.4.4. <i>Effet du mode de répartition de l'eau sur la production du riz</i>	256
7.5 Conclusion	258
Troisième partie : Discussion et Conclusion générale	261
Chapitre 8: Discussion et Conclusion générale	261
8.1 Discussion générale	261
8.2 Conclusion générale et suggestions	269
8.2.1. <i>Conclusion générale</i>	269
8.2.2. <i>Suggestions</i>	272
Références bibliographiques	276
Annexes	323

Liste des Tableaux

Tableau 1.1: Valeurs physico-chimiques moyennes de l'eau d'irrigation et du sol pour les bas-fonds selon le niveau de toxicité en fer	21
Tableau 2.1: Pluviométrie de la zone d'expérimentation	82
Tableau 3.1: Répartition des enquêtés selon les catégories de producteurs	100
Tableau 3.2: Itinéraire technique du riz.....	103
Tableau 3.3: Comparaison des perceptions des producteurs à celles scientifiques.....	107
Tableau 3.4: Analyse de la variance des Rendements selon la manifestation de la toxicité ferreuse et les catégories de producteurs.....	116
Tableau 3.5: Rendements moyens (tonnes/ha) selon les victimes ou non de la toxicité ferreuse	117
Tableau 3.6: Répartition des producteurs victimes de la toxicité ferreuse	119
Tableau 6.1: Caractéristiques physico chimiques du sol du bas-fond.....	183
Tableau 6.2: Effet des traitements sur le tallage des plants.....	202
Tableau 6.3: Effet des traitements sur le rendement du riz	205
Tableau 7.1: Caractérisation physico-chimique du site d'expérimentation.....	221
Tableau 7.2: Variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol(CV).....	224
Tableau 7.3: Effet du mode de répartition de l'eau sur les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse	234
Tableau 7.4: Corrélation entre les différentes propriétés chimiques du sol (valeur de R ² et significativité).....	237
Tableau 7.5:Corrélation entre les paramètres de production du riz (valeur de R ² et significativité)...	244

Tableau 7.6: Relation entre les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse et le rendement en grain du riz en fonction des modes d'inondation.....	247
---	-----

Liste des figures

Figure 1.1: Processus de minéralisation de l'azote	35
Figure 1.2: Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans le sol (d'après Nicolardot et al. 1997 cité par M Mattieu.....	39
Figure 2.1: Carte administrative de la commune de Zè.....	75
Figure 2.2: Profil pédologique du sol de haut de pente du bas-fond (P1)	79
Figure 2.3: Profil pédologique du sol de mi- pente du bas-fond (P2à).....	80
Figure 2.4: Profil pédologique du profil du sol en bas de pente (P3).....	81
Figure 2.5: Schéma de l'installation des parcelles expérimentales suivant la toposéquence du bas-fond	85
Figure 2.6: Schéma du dispositif expérimental	86
Figure 3.1: Perceptions locales de la toxicité ferreuse	105
Figure 3.2: <i>Projection des perceptions et des catégories de producteurs dans un référentiel à deux dimensions</i>	113
Figure 5.1: Prélèvement du sol avec le cylindre densité	139
Figure 5.2: Bille de verre (a) et tamis utilisé (b) Pipette de Robinson avec allonge pour le prélevement de FOM (c).....	142
Figure 5.3: Récapitulatif du protocole de fractionnement granulométrique proposé. Adapté de Feller (1979) et de Segda (2006)	143
Figure 5.4: Dispositif de captage de CO2 dégagé dans chaque parcelle inspiré de Chevallier, (1999)	146

Figure 5.5: Dispositif de captage du CO ₂ dégagé; A: Traitement T1; B : Traitement T2; C : Traitement T3	147
Figure 6.1: Evolution du potentiel redox Eh à la profondeur 0-10 cm.....	187
Figure 6.2: Evolution du potentiel redox Eh à la profondeur 10-20 cm.....	188
Figure 6.3: Evolution du potentiel redox Eh à la profondeur 20-30 cm.....	189
Figure 6.4: Effet année, traitement, profondeur et reprise sur le pH.....	191
Figure 6.5: Evolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 0-10 cm	194
Figure 6.6: Evolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 10-20 cm	194
Figure 6.7: Evolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 20-30 cm	195
Figure 6.8: Teneur en fer ferreux à la profondeur 0-10cm.....	198
Figure 6.9: Teneur en fer ferreux à la profondeur 10-20cm.....	199
Figure 6.10: Teneur en fer ferreux à la profondeur 20-30 cm.....	200
Figure 7.1: Prélèvement d'échantillons de sol à la tarière.....	213
Figure 7.2: pH-mètre utilisé pour la mesure in situ.....	215
Figure 7.3: Evolution de l'Eh et du pH au cours de la campagne de production (A : Profondeur 00-10, B : 10-20 et C : 20-30 cm).....	227
Figure 7.4: Evolution de fer libre et du fer ferreux au cours de la campagne de production (A : Profondeur 00-10, B : 10-20 et C : 20-30 cm)	230
Figure 7.5: Relation entre l'Eh et le pH du sol.....	238

Liste des annexes

Annexe 1: Résumés des articles publiés	323
Annexe 2: Effet des traitements sur les paramètres du sol déterminants de la toxicité ferreuse.....	331
Annexe 3: Résultats d'analyses de sol.....	340
Annexe 4: Dynamique de la température dans les sols de bas-fond.....	344
Annexe 5: Dynamique du phosphore assimilable dans les sols de bas-fond.....	347
Annexe 6: Dynamique de l'ammonium dans les sols de bas-fond	350
Annexe 7: Dynamique du nitrate dans les sols de bas-fond	353
Annexe 8: Résultats de l'analyse de la variance à deux facteurs (valeurs de F) paramètres physico-chimiques du sol.....	356
Annexe 9: Résultats de l'analyse de variance à un facteur (Valeur de F) des paramètres de croissances du riz considérant le mode d'irrigation	359
Annexe 10: Résultats de l'analyse de variance à un facteur (Valeur de F) des paramètres de production du riz considérant le mode d'irrigation:	360
Annexe 11: Interprétation des résultats d'analyses physico - chimiques du sol d'Awopka.	361
Annexe 12: Résultats des tests de comparaison des rendements moyens des trois modes.....	365
Annexe 13: Calcul des charges variables totales pour la production d'1 ha de semences de riz.....	367
Annexe 14: Compte de production au niveau des modes de répartition de l'eau.....	370
Annexe 15: Résultats des tests de comparaison des marges nettes des trois modes.....	373

Liste des sigles et acronymes

ADRAO	: Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest
AFRICA RICE	: Centre du Riz pour l'Afrique
ANOVA	: Analysis Of Variance (Analyse de Variance)
BAC	: Bloc Aléatoire Complet ;
C org	: Carbone Organique ;
C	: Carbone
CAMES	: Conseil Africain et Malgache de l'Enseignement Supérieur ;
CBF	: Cellule Bas-fonds
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CH ₄	: Méthane
CO ₂	: Dioxyde de carbone
DGR	: Direction de génie Rural
Eh/eV	: Potentiel Redox
FAO	: Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
Fe L	: Fer libre
Fe ²⁺	: Fer ferreux
Fe ³⁺	: Fer ferrique

FM50 et FM200	: Fraction minérale fine et Fraction minérale grossière
FO	: Fraction organique,
FO50 et FO200	: Fraction organique fine et Fraction organique grossière
FOM	: Fraction Organo-Minérale
FSA	: Faculté des Sciences Agronomiques ;
g	: Gramme
GES	: Gaz à effet de serre
GIEC (<i>en anglais</i>)	: Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat
GLM	: General Linear Model
GTC	: Giga tonne de carbone;
ha	: Hectare
INRAB	: Institut National des Recherches Agricoles du Bénin
IPCC (<i>en anglais</i>)	: Intergovernmental Panel on Climate Change
JAR	: Jour Après Repiquage ;
JAS	: Jours Après Semis
K	: Potassium
LSD	: les paires significativement différentes
LSS	: Laboratoire des Sciences du Sol
LSSEE	: Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et de l'Environnement
m ²	: Mètre carré
MAEP	: Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche

MO	: Matière Organique ;
MOD	: Matière Organique Dissoute
MOS	: Matière Organique du Sol
MS	: Matière Sèche ;
N	: Azote
NERICA	: New Rice for Africa
NH ₄ ⁺	: Ammonium
NO ₂	: Dioxyde d'azote
NO ₃ ⁻	: Nitrate
OPASISI	: Optimisation de la Production Agricole en Système Intégré Sans Intrants
Pass	: Phosphore assimilable
pH	: Potentiel Hydrogène ;
SAS (<i>en anglais</i>)	: Statistical Analysis System ;
SNDR	: Stratégie Nationale pour le Développement de la Riziculture au Bénin
SNK	: Student-Newman-Keuls
T1	: Régime naturel d'écoulement de l'eau sur le bas-fond
T2	: Inondation suivi de drainage
T3	: Inondation permanente du site d'expérimentation
UAC	: Université d'Abomey-Calavi.

Résumé

Le Bénin dispose de beaucoup de bas-fonds dont la superficie est estimée à plus de 260000 ha. Il se produit dans ces bas-fonds d'importants phénomènes qui sont des produits de l'oxydoréduction. Il s'agit des phénomènes de la toxicité ferreuse, du dégagement du dioxyde de carbone, de méthane et de sulfure d'hydrogène. D'autres phénomènes très bénéfiques pour la plante du riz se développent également, à savoir la minéralisation de l'azote organique (l'ammonification et la nitrification).

La toxicité ferreuse est considérée comme l'un des problèmes les plus rencontrés en riziculture de bas-fond en Afrique de l'Ouest. Elle peut dans ses stades avancés conduire à la perte quasi-totale de la production.

La présente étude a évalué les perceptions locales de la toxicité ferreuse au niveau du bas-fond rizicole d'Awokpa dans la commune de Zê. Les perceptions des populations de la toxicité ferreuse se résument aux résultats de l'effet de l'eau sur du fer contenu dans le sol (38,5%), de l'accumulation de l'eau (38%), du soleil sur le fer dans l'eau (3%), du fer ruisselé de l'amont (2%) et 19% des producteurs qui n'arrivent pas à l'expliquer.

L'étude s'est focalisée : sur l'évaluation de la dynamique de la teneur du sol en fer libre, FeO, P₂O₅, NH₄ et NO₃ dans le bas-fond ; sur les mesures des paramètres physiques des sols (Eh, pH et T°C). Elle établit les relations qui existent entre les paramètres de production et l'évolution de l'accumulation du (FeO) en fonction des modes de répartition de l'eau.

Le potentiel redox a d'une manière générale varié de 29 à 199 mv avec de fortes valeurs allant jusqu'à 200 mv en fin de cycle de

production. Le pH a quant à lui varié de 4,8 à 7,4 pour descendre jusqu'à 4,5 en fin de production alors que la température est restée plus ou moins stable avec une moyenne de 28,5°C (cf annexe 4). La teneur en fer ferreux et en fer libre a respectivement varié de 500 à 8000 ppm et de 6000 à 12000 ppm. Les plus fortes concentrations du fer ferreux et du fer libre ont été obtenues en profondeur. La teneur en Phosphore assimilable varie de 11 à 26 ppm. Les plus fortes baisses de phosphore assimilable ont été observées à la phase de fructification du riz (cf annexe 5). Quant à l'ammonium et au nitrate, leurs teneurs dans la solution du sol varient respectivement de 21 à 39 ppm et de 18 à 45 ppm. La chute de la teneur de ces deux formes d'azote a commencé deux mois après le repiquage (cf annexes 6 et 7).

Les stocks de carbone (C) ont été calculés sur les parcelles rizicoles de chaque traitement, sur les profondeurs 0-10cm, 10-20cm et 20-30cm. Cinq fractions granulométriques de la matière organique ont été séparées et leurs teneurs respectives en C ont été déterminées. Les résultats révèlent que le stock de C varie significativement ($p < 0,05$) selon le mode de répartition de l'eau avec T1 (165,4±33,1 t/ha) ayant le stock le plus élevé. Les concentrations en C des fractions organiques grossières sont significativement supérieures à celles dans les fractions organiques fines et organo-minérales. Il n'y a pas de différence significative ($p > 0,05$) de concentration en C des fractions des sols sous les trois modes de répartition de l'eau aux profondeurs 0-10cm et 10-20cm. La quantité de CO₂ dégagée du sol varie significativement ($p < 0,05$) selon les modes de répartition de l'eau avec le mode T1 présentant la quantité de CO₂ la plus élevée. Les résultats ont aussi montré que selon le mode de saturation d'eau

dans le bas-fond, la quantité de CO₂ dégagé est inversement proportionnelle à la teneur en carbone organique du sol.

Les résultats de cette étude ont montré que les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse (pH, Eh, Fe²⁺ et Fer libre) ont une forte variabilité dans le temps et dans l'espace pendant la période d'étude. De même, la teneur en fer ferreux [Fe²⁺] du sol, principal déterminant édaphique de la toxicité ferreuse, est faible au niveau des sols du mode d'inondation suivie de drainage. Les fortes teneurs en fer ferreux ont été observées au niveau des sols situés en bas de pente où l'inondation est permanente. Ce qui témoigne d'une forte réduction du sol due à son humidité excessive.

Le rendement du riz est calculé en rapportant la production de riz paddy à l'hectare.

Les principaux paramètres de rendement selon la toposéquence du bas-fond sont déterminés et se résument comme il suit :

- En haut de pente où le traitement est l'écoulement naturel de l'eau, les talles par plant sont au nombre de $7,52 \pm 0,28$ tandis que celles fertiles sont au nombre de $6,23 \pm 0,36$; le poids des panicules par plant est de $211,96 \text{ g} \pm 6,86$ alors que le rendement est estimé à $2,4753 \pm 0,1469$ t/ha. Les charges de production sont de 658000 FCFA et le ratio bénéfice/coût est égal à 0,50 ;
- A mi-pente où le traitement est l'inondation suivie du drainage, les talles par plant sont au nombre de $11,17 \pm 0,43$ tandis que celles fertiles sont au nombre de $9,75 \pm 0,31$; le poids des panicules par plant est de $417,69 \pm 12,89$ g alors que le rendement est estimé à $3,7758 \pm 0,1917$ t/ha. Les charges

de production sont de 693000 FCFA et le ratio bénéfice/coût est égal à 1,18

- En bas de pente où le traitement est l'inondation permanente, les talles par plant sont au nombre de $10,21 \pm 0,36$ tandis que celles fertiles sont au nombre de $7,71 \pm 0,30$; le poids des panicules par plant est $276,38 \pm 13,5$ g alors que le rendement est estimé à $3,1898 \pm 0,1642$ t/ha. Les charges de production sont de 658000 FCFA et le ratio bénéfice/coût est égal à 0,95.

Mots clés : Toxicité ferreuse, Dynamique, Bas-fond, Riz, Bénin.

Topic: Ferrous toxicity phenomenon in the rice paddies in Southern Benin: local perceptions, variability and impacts of various modes of flood

Abstract

Benin has a lot of lowlands whose surface is estimated at more than 260000 ha. In those lowlands, there are important phenomena which are products of redox. These include the toxicity and release of carbon dioxide, methane and hydrogen sulphide. Other phenomena that are very beneficial to the rice plant also develop, namely mineralization of organic nitrogen (ammonification and nitrification). Ferrous toxicity is considered as one of the most common problems in lowland rice in West Africa. It can in the advanced stages lead to the near total loss of production. The present study evaluated local perceptions of ferrous toxicity on the level of the rice hollow. Perceptions of ferrous toxicity in Awokpa populations are summarized in the results of water effect on iron in soil (38.5%), water accumulation (38%), of the sun on iron in water (3%), iron run-off from upstream (2%) and 19% of producers who can not explain it. The study focused on the evaluation of soil iron content dynamics, FeO, P₂O₅, NH₄ and NO₃ in the shallow bottom; On the measurements of the physical parameters of the soils (Eh, pH and T ° C). It establishes the relations between the production parameters and the evolution of the accumulation of (FeO) as a function of the distribution modes of the water. The redox potential has generally varied from 29 to 199 mV with high value up to 200 mv at the end of the production cycle. The pH varied from 4.8 to 7.4

to go down to 4.5 at the end of production while the temperature remained more or less stable with an average temperature of 28.5 ° C. The ferrous iron and free iron content respectively varied from 500 to 8000 ppm and from 6000 to 12000 ppm. The highest concentrations of ferrous iron and free iron were obtained in depth. The assimilable phosphorus content varies from 11 to 26 ppm. The highest decreases in assimilable phosphorus were observed at the fruiting phase of rice. As for ammonium and nitrate, their contents in the soil solution vary from 21 to 39 ppm and 18 to 45 ppm respectively. The decline in the content of these two forms of nitrogen began two months after transplanting. Carbon stocks were calculated on the rice plots of each treatment on the depths 0-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm. Five particle size fractions of the organic material were separated and their respective contents of carbon were determined. The results show that the carbon stock varies significantly ($p < 0,05$) according to the distribution of water with T1 ($165,4 \pm 33,1$ t / ha) with the highest stock. The C-concentrations of the coarse organic fractions are significantly higher than those in the organic and fine organo-mineral fractions. There was no significant difference ($p > 0,05$) in the C concentration of soil fractions under the three irrigation regimes at depths 0-10 cm and 10-20 cm. The amount of CO₂ released from the soil varies significantly ($p < 0,05$) depending on the irrigation regime with the T1 regime with the highest CO₂ content. Our results also showed that depending on the water saturation regime in the bottom, the amount of CO₂ released is inversely proportional to the organic carbon content of the soil. The results of this study showed that the chemical properties of the soil determining the ferrous toxicity (pH, Eh, Fe²⁺ and free FeOX) have a

high variability over time and in space during the study period. The results showed that the ferrous iron [Fe^{2+}] content of the soil, the main edaphic determinant of ferrous toxicity, is low in the soils of the flood regime followed by drainage. High levels of ferrous iron were observed in soils at the bottom of the slope where permanent flooding was observed. This is indicative of a great reduction in soil due to excessive soil moisture. The yield of rice is calculated by comparing the production of paddy rice to ha. The main yield parameters according to the shallow toposequence are determined and are as follows:

➤ At the top of the slope where the treatment is the natural flow of water, the tillers per plant are 7.52 ± 0.28 while the fertile ones are 6.23 ± 0.36 ; the weight of the panicles per plant is $211.96 \text{ g} \pm 6.86$ whereas the yield is estimated at $2.4753 \pm 0.1469 \text{ t / ha}$. Production costs are 658000 and the profit / cost ratio is equal to 0.50

➤ At mid-slope where the treatment is flooding followed by drainage, tillers per plant are $11,17 \pm 0,43$ while fertile ones are $9,75 \pm 0,31$; the weight of the panicles per plant is $417.69 \text{ g} \pm 12.89$ whereas the yield is estimated at $3.7758 \pm 0.11917 \text{ t / ha}$. Production costs are CFAF 693000 and the profit / cost ratio is equal to 1.18

➤ At the bottom of the slope where the treatment is the permanent flood, the tillers per plant are 10.21 ± 0.36 while the fertile ones are 7.715 ± 0.30 ; the weight of the panicles per plant is $276.38 \text{ g} \pm 13.5$ whereas the yield is estimated at $3.1898 \pm 0.1642 \text{ t / ha}$. Production costs are 658000 and the profit / cost ratio is equal to 0.95.

Key words: Iron toxicity, Dynamic, Shallow, Rice Benin.

INTRODUCTION

Introduction générale

1. Problématique de recherche

Les projections des Nations Unies indiquent que la population ouest africaine estimée à 358 millions de personnes en 2016 avec un taux de croissance de 2,7% par an, pourrait atteindre 455 millions de personnes d'ici 2025 et presque le double d'ici 2050 (FAO, 2016). Cette situation impose à l'agriculture, la croissance de sa production à un taux minimum de 4% par an, soit plus de deux fois le taux atteint les décennies précédentes, pour assurer la sécurité alimentaire et réduire la pauvreté (Bationo *et al.*, 1998).

Le secteur agricole, dans l'accomplissement de sa mission de développement socio-économique, du fait des pratiques culturales utilisées, se trouve confronté à des problèmes dont la dégradation des sols, la baisse des rendements, la faible diversification des cultures, etc. (Djihinto, 1997). En région tropicale humide, la mise en valeur des terres rencontre des difficultés liées souvent à l'inadéquation des pratiques utilisées par rapport aux caractéristiques des sols. Dans beaucoup de cas, l'absence de la prise en compte des contraintes hydriques, physiques, chimiques et microbiologiques des sols reste préjudiciable à leur exploitation. Pourtant, il est depuis très longtemps connu que certains paramètres des sols jouent un rôle capital dans la gestion de la nutrition végétale et qu'un approvisionnement adéquat en éléments nutritifs dépend de leur optimisation (Troeh *et al.*, 2005).

Introduction générale

L'agriculture béninoise ne se soustrait pas de ces contraintes. A l'instar de celle des pays de l'Afrique subsaharienne, cette agriculture demeure extensive. Le Gouvernement béninois, dans son souci permanent d'assurer le bien-être des populations, a retenu pour l'horizon 2021, des objectifs quantitatifs de réduction de la pauvreté et de développement (Capo-Chichi *et al.*, 2009). Pour atteindre ces objectifs, des orientations stratégiques et politiques en matière de promotion des filières agricoles occupent une place prioritaire dans les choix de l'Etat. A cet effet, douze filières prioritaires ont été identifiées et retenues par le gouvernement béninois dans le Programme Spécial de Relance du Secteur Agricole. La culture du riz figure parmi ces filières prioritaires (MAEP, 2010).

Le riz qui autrefois était considéré comme un repas de fête au Bénin, est aujourd'hui consommé au quotidien tant en milieu rural qu'en milieu urbain. La quantité totale consommée chaque année est en pleine évolution. De 69.206 tonnes en 2003, elle passe à environ 110.800 tonnes en 2010 pour atteindre 178.000 tonnes environ en 2018 (SNDR, 2011). Les besoins en consommation du riz sont devenus élevés allant de 25 à 30 kg/hab/an, soit 175.000 à 210.000 tonnes l'an (SNDR, 2011) alors que les données de l'Office National pour la Sécurité Alimentaire (ONASA) montrent que les quantités de riz disponibles par habitant et par an sont très faibles : 4,35 kg, 6,57 kg et 3,09 kg en 2007, 2008 et 2009 respectivement (Benin Country Stat, 2011). Au regard de ces besoins, l'aménagement et la bonne gestion des domaines rizicoles est d'une impérieuse nécessité pour l'intensification de la production du riz.

Introduction générale

Au Bénin, une grande partie de la production rizicole se fait dans les bas-fonds. Dans la plupart des cas, c'est un système de production qui dépend de la survenance des pluies. Les bas-fonds sont généralement non aménagés avec des rendements encore inférieurs à la moyenne estimée à 3 tonnes de riz paddy à l'hectare. La production du riz de bas-fond est confrontée à plusieurs contraintes qui sont : la baisse de fertilité des sols d'année en année, le faible niveau de maîtrise de l'eau pour une intensification de l'exploitation, l'enclavement des zones de production par rapport aux marchés, la forte pression des adventices, des insectes, des termites, et de certains autres ravageurs, la présence de toxicité ferreuse dans certains bas-fonds, le manque ou le faible niveau d'encadrement, le manque de crédit de campagne et les difficultés d'approvisionnement en semences et en engrais.

Dans les bas-fonds, situés généralement sur sols hydromorphes (sol de bas de pente), la migration du fer le long de la toposéquence par lessivage latéral est importante pour l'enrichissement absolu des sols tropicaux en fer. Il peut être plus ou moins complètement éliminé du sol du haut de pente par dissolution et lessivage puis s'accumuler dans des eaux qui l'entraînent et le transportent vers le bas-fond situé à des distances considérables du point de départ (Segalen, 1964, Diatta *et al.*, 1998). La toxicité ferreuse apparaît lorsque, sous l'effet réducteur du milieu, les bactéries mettent en place une respiration anaérobie libérant de grandes quantités d'ions ferreux (Fe^{2+}) dans la solution. Ces quantités d'ions ferreux solubles entraînent un déséquilibre en éléments de la solution du

Introduction générale

sol qui se répercute au niveau de la plante et sur le prélèvement des éléments nutritifs par la plante (Bode *et al.*, 1995, Fageria, *et al.*, 2008). En somme, la toxicité ferreuse n'est qu'un résultat du phénomène d'oxydoréduction qui varie selon la teneur en eau du bas-fond. La notion de la variabilité du phénomène d'oxydoréduction des sols est donc un concept très important à ne pas négliger. Elle intègre tout un système et fait appel à des pratiques et méthodes adéquates pour la durabilité des systèmes de production rizicole.

L'influence du mode hydrique est tout aussiperceptible sur les stocks organiques et la respiration du sol. Le mode hydrique est par ailleurs critique pour la minéralisation de l'azote du sol car le modèle de libération de l'azote minéral est affecté par le dessèchement du sol. Broadbent (1979) a conclu que le processus de minéralisation est affecté par la température du sol, le mode hydrologique, la sécheresse suivie par la saturation en eau du sol, la nature et la quantité de la matière organique et la teneur en argile.

Au Bénin les résultats des travaux de recherche conduits dans le bas-fond de Niaouli au sud-Bénin (Hodomihou *et al.* 2011), Gaoue *et al.*, (2016) ont montré respectivement que les doses de 120 kg/ha du phosphate naturel et 1,2 t/ha de silice qui ont le plus amélioré les paramètres chimiques du sol et du rendement du riz. Ainsi ces doses pourraient être recommandées en riziculture de bas-fond où la toxicité ferreuse est présente. Or, l'un des problèmes qui minent la production rizicole au Bénin est l'accès aux intrants spécifiques dont le phosphate et la silice.

Introduction générale

Au vu de tout cela, on peut faire remarquer que les bas-fonds du sud Bénin, bien que favorables à la production du riz présentent certaines caractéristiques parfois défavorables à une bonne conduite de la culture du riz. Il s'agit notamment de la toxicité ferreuse de la solution du sol. C'est pour minimiser les désastres de ce phénomène et favoriser l'intensification de la production du riz qu'on se propose d'approfondir les connaissances sur le phénomène de la toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizicoles au Sud-Bénin, vecteur de la toxicité ferreuse. A cet effet, différentes questions de recherche sont formulées.

2. Questions de recherche

Les questions de recherche abordées dans la présente étude sont les suivantes :

- o Quel est l'impact du mode de répartition de l'eau sur le développement du phénomène d'oxydo-réduction ?
- o Quel est l'effet des caractéristiques physico-chimiques du sol sur la toxicité ferreuse ?
- o Quels sont les déterminants édaphiques de la production du riz en condition de milieu réduit du sol ?
- o Quel est l'effet du mode de répartition de l'eau sur le statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un bas-fond rizicole ?

3. Objectifs de recherche

3.1. Objectif global

Cette recherche s'est fixée comme objectif global d'étudier les phénomènes de la toxicité ferreuse dans les bas-fonds du sud Bénin et leur influence sur la productivité du riz.

3.2. Objectifs spécifiques

- o Evaluer l'impact du mode de répartition de l'eau sur le phénomène de la toxicité ferreuse et la rentabilité de la production rizicole dans un bas-fond ;
- o Etudier l'effet des caractéristiques physico-chimiques du sol sur la toxicité ferreuse et sur le développement du riz ;
- o Analyser les déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse ;
- o Etudier l'effet du mode de répartition de l'eau sur le statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un bas-fond rizicole.

4. Structuration de la thèse

Le présent manuscrit de thèse est présenté en trois parties et huit chapitres qui suivent l'introduction générale. Les chapitres correspondent à des articles publiés ou soumis, ou des pré-articles à soumettre.

La première partie est consacrée à l'étude bibliographique et à la méthodologie de la thèse à savoir :

- Le chapitre 1 détaille l'état des connaissances sur le sujet de la thèse assorti des objectifs et des hypothèses de recherche.
- Le chapitre 2 présente la description du cadre d'étude et la méthodologie générale.

La deuxième partie est consacrée à différentes études ayant permis de répondre aux questions de la recherche.

- Le chapitre 3 présente, la perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond
- Le chapitre 4 étudie la toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz
- Le chapitre 5 étudie le statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes de répartition.

Introduction générale

- Le chapitre 6 présente les résultats de l'effet des caractéristiques physico-chimiques du sol sur la toxicité ferreuse et sur le développement du riz.
- Le chapitre 7 traite de l'analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse.

La troisième partie est essentiellement centrée sur la discussion et la conclusion générale des résultats (chapitre 8). Dans une première section, la question et les hypothèses de recherche sont rappelées, puis les effets du phénomène de toxicité sur le sol et la plante sont analysés et discutés dans une deuxième section. Dans la troisième section, les conclusions partielles des parties précédentes sont prises en compte pour analyser la durabilité des systèmes de cultures dans les bas-fonds du Bénin dans le contexte actuel de changement climatique. Enfin, la conclusion générale fait le point des principaux apports de l'étude et propose des perspectives de recherche, à court, moyen et long terme.

PREMIERE PARTIE
ETAT DES
CONNAISSANCES ET
ORIENTATION

Première Partie : Etat des Connaissances et orientation de la recherche

Chapitre 1: Etat des connaissances et hypothèses de recherche

1.1 Introduction

Avant de définir et de mettre en œuvre une stratégie de recherche, il convient de faire tout d'abord le point des connaissances sur le concept du phénomène de la toxicité ferreuse dans les sols de bas-fond sous différents modes de répartition d'eau selon sa toposéquence et son rôle dans les échanges entre les paramètres physicochimiques et la plante du riz. Il est également nécessaire de faire la synthèse des études antérieures sur l'effet des modes de répartition d'eau sur les paramètres de production rizicole. Les conclusions tirées de ce point des connaissances permettent de formuler des hypothèses de recherche.

1.2 Etat du fer dans le sol et la plante

1.2.1. Les formes du fer dans le sol

L'origine du fer dans le sol est surtout liée à l'altération des matériaux silicatés. Le fer peut alors prendre l'une de ces quatre formes :

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

a) Une forme colloïdale

L'hydrate ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou hydroxyde ferrique peut se fixer par ses charges positives sur les charges négatives des argiles, voire à l'intérieur de ses leurs feuillets. L'hydroxyde ferrique peut alors servir de pont entre l'argile électronégatif et les humus électronégatifs aussi. Le complexe argile-hydroxyde ferrique-humus, floculé, est caractéristique des sols bruns. Ce sont les hydroxydes ferriques qui donnent leur couleur à l'argile. Elle est brune en climat humide, quand l'hydroxyde est très hydraté, brun rouge ou rouge franc dans les régions sèches où l'hydroxyde est peu hydraté (régions méditerranéennes et tropicales). L'hydrate ferrique peut aussi se trouver sous une forme libre. C'est le cas lorsque le complexe argile – hydroxyde-humus est détruit lors d'une acidification du sol. L'hydroxyde ferrique libéré est d'une belle couleur rouge. Il est facilement lessivé, entraîné vers les horizons inférieurs où il peut se concrétionner (par exemple, autour des racines sous l'action des acides organiques).

b) Une forme soluble et échangeable

En milieu réducteur, pauvre en oxygène (et souvent acide), le fer bivalent est sous forme d'hydrate ferreux moyennement soluble ou de carbonate ferreux insoluble. En présence de gaz carbonique, le carbonate ferreux est solubilisé en bicarbonate ferreux, soluble, qui libère les ions Fe^{++} .

Le Fe^{++} est tout à fait assimilable sous cette forme, mais du fait de la très faible activité bactérienne et racinienne qui règne en milieu asphyxique, le fer a plutôt tendance à s'accumuler

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

jusqu'au point d'être toxique. Cet excès de fer, en outre participe à l'acidification du sol laquelle est favorable à la libération de fer... on est là typiquement devant un processus de régulation en tendance.

c) Une forme pseudo soluble

Le fer, aussi bien à l'état ferreux que ferrique, peut s'associer à la silice ou à des matières organiques pour former des complexes pseudos solubles sous une forme colloïdale dispersée. En milieu peu acide et pauvre en matières organiques, il se forme des complexes ferri-siliciliques en milieu aéré et des complexes ferro-siliciliques en milieu peu aéré. Ces complexes dispersés peuvent être floculés par un excès de calcium (chaulage brutal). Ils deviennent alors insolubles et inutilisables pour les plantes qui souffrent de carence ferrique ou chlorose. C'est sous cette forme pseudo soluble et mobile que le fer peut migrer, soit vers le bas dans les sols bruns lessivés, soit vers le haut dans les sols rouges. En milieu acide et riche en matières organiques solubles, il se forme des complexes ferro-humiques, électronégatifs, dispersés et migrant facilement en profondeur. Ces complexes sont caractéristiques des podzols et des sols podzoliques.

d) Une forme cristalline

L'oxyde ferrique peut se cristalliser et former autour des grains de sable soit un simple film, soit un simple ciment qui réunit ces grains en concrétions, en blocs, jusqu'à former, dans certaines conditions de véritables bancs rocheux. Selon les climats, le degré d'humidité et divers autres facteurs, l'oxyde ferrique

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

crystallise sous forme de stilpnosidérite $\text{Fe}_2\text{O}_3(2\text{H}_2\text{O})$, de couleur ocre jaune, sous climat humide sous forme de goéthite $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})$, de couleur brun rouge, sous climat moyennement humide et sous forme d'hématite Fe_2O_3 , de couleur rouge, sous climat très sec. Dans les régions arrosées, après migration en profondeur des différentes formes du fer, la cristallisation peut conduire à la formation d'aliôs, c'est-à-dire à la formation d'une véritable cuirasse de grès ferrugineux. Cette formation d'aliôs est fréquente dans les podzols ou les sols podzoliques installés sur une roche mère sableuse. Dans les régions sèches, méditerranéennes et tropicales, la migration du fer se fait vers la surface. Les sols ont une teinte rouge caractéristique. La cristallisation du fer conduit à la formation de latérite, véritable cuirasse de grès ferrugineux qui affecte, de plus en plus, les sols tropicaux. Sous climat tropical, le comportement du fer est très lié à celui de l'aluminium.

1.2.2. Le fer dans les sols de bas-fond

Indépendamment des changements saisonniers dus aux conditions climatiques, au drainage et à l'irrigation (riz irrigué), des variations importantes sur de petites distances (horizontales et verticales) existent au niveau des valeurs du potentiel redox et des concentrations en Fe^{2+} (Howler et Bouldin, 1971). La distribution du potentiel redox et du Fe réduit dans le profil a été décrite par Ratering et Schnell (2000) et par Liesack et al., (2000). L'épaisseur de la couche superficielle oxydée peut varier de 2 à 10 millimètres et est partiellement déterminée par une réoxydation microbienne de l'ion ferreux. Les concentrations en fer ferreux les plus élevées sont présentes à la profondeur de sol

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

comprise entre 2 et 15 centimètre. Ces concentrations peuvent encore diminuer dans les couches plus profondes où le sol contient moins de matière organique (Revsbech et al., 1980). Les variations horizontales en fer ferreux (Fe^{2+}) sont liées à la rhizosphère et au dégagement d'oxygène par les racines de riz (Yamanouchi et al., 1989). Son importance est déterminée par la formation de l'aerenchyme et de la densité racinaire (Frenzel et Bosse, 1999). La rhizosphère joue un double rôle. Elle présente des conditions privilégiées pour l'oxydation de l'ion ferreux mais peut également être un centre de réduction (Prade et al., 1990). Les micro-organismes chemo-organotrophiques présents (pseudomonas, clostridium, ou bacille) jouent un rôle essentiel dans cette réduction et cette mobilisation des oxydes de fer (Mâchez et Ottow, 1977). Schwertmann (1985) estime que certains champignons peuvent également être capables de réduire ces oxydes de fer. Tous ces microorganismes réducteurs du fer sont abondants dans la rhizosphère car ils y trouvent des exsudats organiques racinaires comme donateurs d'énergie riche en électron (Benckiser et al., 1983; Wang et Liu, 1992). Cependant, les processus de la réoxydation du fer dominant dans la rhizosphère de la plupart des riz de type indica, entraînant une accumulation importante de fer oxydé (Fe^{3+}) et la formation d'une plaque de fer autour des racines (Kirk et al., 1990).

1.2.3. Le fer dans la plante

Les plants de riz ont tendance à absorber plus de fer que la plupart des autres espèces végétale. De plus l'ion ferreux est abondant voir très abondant dans les sols de rizières. Puisque le

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

fer réduit est facilement absorbé, les mécanismes d'absorption du fer oxydé (Fe^{3+}) sont probablement de moindre importance dans les environnements inondés (Mengel, 1972). Après absorption dans le cortex de la racine, le fer réduit (Fe^{2+}) peut atteindre le xylème après le passage symplastique par la bande de Caspari. Cependant, une grande partie des ions ferreux absorbés peut directement atteindre le xylème par une voie apoplastique. Cette voie a été montrée notamment pour le sodium (Yeo et al., 1987; Tsuchiya et al., 1995). Elle peut également être observée après des dommages sur la racine de riz résultant de l'arrachage de la plantule et son repiquage. Dans le xylème, le transport de l'ion ferreux suit le flux acropète de transpiration. Cette absorption et ce transport du fer ne sont pas les mêmes pour les plants cultivées en condition aérobique (riz pluvial) ou dans des conditions non toxique. Dans ce cas, le transport du fer est dominé par l'ion ferrique (Fe^{3+}) complexé avec le citrate (Clark et al., 1973; Schmidt, 1999) ou avec des composés peptidiques d'hydrate de carbone. En atteignant la zone apoplastique de la feuille, le fer réintègre le symplasma. Les mécanismes exacts par lesquels le fer est assimilé par les cellules foliaires ne sont pas encore bien compris. Toutefois chez le riz, l'assimilation doit se faire sous forme réduite (Fe^{2+}) puisque c'est la forme physiologiquement active du fer dans la cellule.

Dans la cellule, les quantités excessives de fer peuvent catalyser la synthèse de composés à base d'oxygène actif telle que le superoxide, des radicaux hydroxyles, et le H_2O_2 (Marschner, 1995). Ces réactions sont considérablement amplifiées quand le

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

fer est abondant, et le fer lui-même, peut faire partie de radicaux perferryl fortement réactifs (Halliwell et Gutteridge, 1984) ou s'associer à des acides gras (Peterson, 1991). Les radicaux libres sont responsables des dommages provoqués par la toxicité ferreuse (Thongbai et Goodman, 2000). Ils endommagent irréversiblement les lipides membranaires (Thompson et Legge, 1987), les protéines (Chevrier et al., 1988; Miyao et al., 1995), et acides nucléiques (Elstner, 1982) et affectent la charge électrique de la membrane (Vladimirov, 1980). Parallèlement, une activité des phénol-oxydase augmente et entraîne une accumulation de polyphénols oxydés (Yamauchi et Peng 1993). Bien que le fer soit très peu présent dans la matière vivante (de 50 à 100 $\mu\text{g.g}^{-1}$ de matière sèche, il demeure un élément essentiel et indispensable à la vie de la plante (Guerinot et Yi, 1994). Cet élément (micro-élément ou oligo élément) est très impliqué dans le métabolisme des végétaux. Composant indispensable pour les protéines et les enzymes, le fer joue un rôle important dans des processus biologiques fondamentaux tels que la photosynthèse, la synthèse de la chlorophylle, la respiration, la fixation et l'assimilation de l'azote (Kim et Rees, 1992), et la synthèse de l'ADN par l'action de la ribonucléotide réductase (Reichard, 1993).

Il intervient également comme cofacteur de nombreuses enzymes nécessaires à la synthèse d'hormones végétales comme l'éthylène, la lipoxygénase, l'acide 1- aminocyclopropane-1-carboxylique oxydase (Siedow, 1991) ou l'acide abscissique, des composés qui sont impliqués dans de nombreuses voies contrôlant le développement des végétaux et leurs réponses

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

adaptatives aux conditions fluctuantes du milieu. Une carence en fer affecte sévèrement le développement et la croissance des plantes et un excès de fer dans la cellule est toxique. La réactivité du fer avec les formes réduites de l'oxygène produit des espèces radicalaires qui peuvent conduire à une perte d'intégrité et à la mort cellulaire. Il existe donc une fenêtre optimale de la concentration en fer pour assurer le bon fonctionnement de la plante.

Le fer est un constituant majeur des systèmes redox des plantes. Grâce à ses propriétés physico-chimiques, notamment son affinité avec les sites actifs des métalloprotéines, il intervient comme co-facteur dans les réactions redox nécessaires à la production et à l'utilisation de l'oxygène. Cependant, la meilleure fonction qu'on lui connaît est son rôle structural dans les noyaux prosthétiques des systèmes enzymatiques comme les cytochromes, les catalases et les peroxydases. Ces enzymes sont par ailleurs, les principaux constituants du chloroplaste et des mitochondries (Marschner, 1995 ; Mengel et Kirby, 1987). Le cytochrome intervient essentiellement comme un transporteur d'électrons dans la chaîne respiratoire. Le fer interagit aussi avec les protéines non hémiques telles que les protéines à noyau de sulfure de fer (ferredoxine, superoxydesdismutase). Le fer intervient également dans la synthèse protéique. Dans les membranes thylacoïdales environ 20 atomes de fer sont directement impliqués dans le transport d'électrons par unité de PSII et PSI.

1.3. Toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizières

1.3.1. Développement de la toxicité ferreuse

En production du riz de bas-fonds, surtout sur sols hydromorphes (sol de bas de pente), la migration du fer le long de la toposéquence par lessivage latéral est importante pour l'enrichissement absolu des sols tropicaux en fer. Il peut être plus ou moins complètement éliminé du sol du haut de pente par dissolution et lessivage puis s'accumuler dans des eaux qui l'entraînent et le transportent vers le bas-fond situé à des distances considérables du point de départ (Diatta *et al.*, 1998).

Le développement de la toxicité ferreuse est dû à la présence d'une importante quantité de fer soluble (Fe^{2+}) dans la solution de sol provenant de la réduction du fer ferrique (très peu soluble). En effet, elle apparaît lorsque, sous l'effet réducteur du milieu, les bactéries mettent en place une respiration anaérobie libérant de grandes quantités d'ions ferreux (Fe^{2+}) dans la solution. Ces quantités d'ions ferreux solubles entraînent un déséquilibre en éléments de la solution du sol qui se répercute sur le développement et la nutrition minérale de la plante (Bode *et al.*, 1995, Fageria, *et al.*, 2008). En Afrique de l'Ouest, la toxicité ferreuse est préoccupante car les pertes de rendements qu'elle engendre sont estimées entre 12 et 100% dans les bas-fonds, avec une moyenne avoisinant les 45 % (Sahrawat, 2004; Becker et Asch 2005 ; Audebert, 2006). Gheysen (2009) rapporte que chez le riz les pertes dues à la toxicité ferreuse sont fonction de la variété, du stade de croissance, de l'état de

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

fertilité du sol et de la sévérité du stress. Plusieurs signes précurseurs indiquent l'apparition du stress. Il s'agit entre autre des conditions réductrices du fer rencontrées fréquemment dans les sols engorgés, du manque de gestion de l'eau (Audebert et Fofana, 2009), du stade de développement de la plante, d'une forte température et d'une faible disponibilité en tampon redox. Ces conditions peuvent augmenter la quantité du fer ferreux (Fe^{2+}) absorbable par la plante (Mbonankira, 2014). De plus, selon Ottow et *al.*,(1993), cité par Audebert (2006), un milieu extérieur pauvre en oxygène, un pH acide, un sol qui présente des déficiences minérales en phosphore (P), potassium (K) et zinc (Zn) ainsi qu'un excès de substances toxiques (H_2S) sont autant de facteurs qui augmentent la sévérité de la toxicité ferreuse. D'après les résultats des travaux résultant d'une étude sous régionale de criblage à la toxicité ferreuse effectuée en Afrique de l'Ouest, le hot spot de la toxicité ferreuse se caractérise par des valeurs du potentiel redox et de pH respectivement de 100-125 mV et 5-6,5 (ADRAO, 2006). Le tableau 1 montre les valeurs des caractéristiques physico-chimiques moyennes de l'eau d'irrigation et du sol pour les bas-fonds en présence du stress de la toxicité ferreuse.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

Tableau 1.1: Valeurs physico-chimiques moyennes de l'eau d'irrigation et du sol pour les bas-fonds selon le niveau de toxicité en fer

Toxicité	Symptômes	Scores Eau/Sol		
		pH	Redox (mV)	Oxygène (mg.l ⁻¹)
Absence	1	5,5-7	< 50	> 6
Présence	7-9	5-6,5	100-125	< 3

Source : A. Audebert (ADRAO, 2006).

La toxicité ferreuse résulte non seulement de la réduction bactérienne mais aussi des pratiques culturales. Par exemple la submersion des rizières crée des conditions spéciales peu riches en oxygène favorisant la réduction du fer et d'autres substances souvent toxiques pour le riz. Alors les principales méthodes de lutte contre ce stress sont essentiellement liées aux pratiques culturales. Des pratiques telles que le décalage de la date de semis, le travail du sol, la gestion de l'eau dans les casiers rizicoles, l'utilisation des variétés tolérantes au stress et une fertilisation adéquate minimisent l'effet de la toxicité ferreuse sur le riz (ADRAO, 2002 ; Sahrawat, 2004 ; Becker et Asch, 2005). En ce qui concerne la fertilisation des casiers rizicoles, l'application d'éléments nutritifs tels que P, K, Ca, Mg, Si et Zn, peut atténuer la toxicité ferreuse en augmentant la tolérance de la plante et corriger le déséquilibre nutritionnel de la solution du sol (Audebert, 2006b ; Sahrawat, 2010 ; Ethan et *al.*, 2011). A ce

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

propos Hodomihou *et al.*, (2011), ont rapporté que le phosphate naturel appliqué à une dose de 120 kg/ha a amélioré significativement les propriétés chimiques du sol et le rendement du riz dans le bas-fond de Niaouli (bas-fond présentant une toxicité ferreuse initiale) situé au Sud-Bénin. Gaoue *et al.*, (2016) ont également montré que l'apport de la silice à une dose de 1,2 t/ha améliore le rendement de riz toujours dans le même bas-fond. De même, la gestion de la matière organique peut permettre de complexer le fer du sol, le rendant alors non assimilable (Audebert, 2006). L'usage de variétés de riz tolérantes à la toxicité ferreuse se révèle être une autre alternative, plus intéressante et plus économique pour les producteurs (Sahrawat, 2004 ; Audebert et Fofana, 2009 ; Chérif *et al.*, 2009). En effet, la vulnérabilité à la toxicité ferreuse est fortement liée au type de variétés de riz. Ainsi plusieurs programmes d'amélioration variétale ont été entrepris afin d'obtenir de variétés tolérantes au stress de la toxicité ferreuse et assurant à la fois de bons rendements. Plusieurs cultivars avec différents degrés de tolérance ont alors fait l'objet de nombreux criblages en vue de sélectionner les variétés les mieux adaptées à la toxicité ferreuse (de Dorlodot *et al.*, 2005 ; Abdoul, 2006 ; Diatta et Sahrawat, 2006 ; Nyamangyoku, 2006 ; Stein *et al.*, 2009). Etant donné que la toxicité ferreuse est souvent associée à un mauvais contrôle de l'eau (Audebert et Fofana, 2009), la gestion de l'eau au niveau des bas-fonds par un système de drainage est également primordiale afin d'éliminer le fer des parcelles rizicoles ou de l'empêcher d'être assimilé par la plante (Delville *et al.*, 1996). A ce propos, Gbèto Dansou *et al.*, (2015),

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

ont rapporté que les producteurs du riz dans le bas-fond d'Awokpa au Sud-Bénin procèdent au drainage des casiers rizicoles pour faire face au phénomène de la toxicité ferreuse. Cette pratique a été efficace en ce sens qu'elle a permis aux producteurs d'avoir un rendement moyen égal à celui des parcelles non victimes de la toxicité ferreuse.

La toxicité ferreuse se manifeste dans les rizières lorsque d'importantes quantités de fer (Fe^{2+}) sont mobilisées et accumulées dans la solution du sol, notamment au niveau du bas-fond. Ce fer peut provenir de la mise en solution in situ, dans le bas-fond lui-même, ou du transfert de fer solubilisé des pentes adjacentes du bas-fond. Dans les sols tropicaux de plateau, bien drainés, bien aérés, les teneurs en fer sont extrêmement faibles. Toutefois, des travaux ont mis en évidence l'influence que peut avoir la couverture végétale sur les processus de migrations du fer (Boquel et Suavin, 1974 ; Audebert *et al.*, 2006). Les litières peuvent libérer, directement ou par biodégradation, des acides organiques susceptibles de former des complexes organo-métalliques qui rendent possible la migration du fer vers des milieux comme les rizières où il précipiterait ensuite sous forme d'hydroxydes. Par ailleurs, le fer peut être entraîné dans le bas-fond par des transferts verticaux ou par le ruissellement et l'érosion, ou être présent dans les bas-fonds où il sera transformé en fer ferreux soluble (Diatta *et al.*, 1998; ADRAO, 2002) qui peut précipiter sous forme de complexes ferriques ou ferreux, ou sous forme d'hydroxydes ferriques selon les paramètres physico-chimiques du milieu.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

La toxicité ferreuse est un syndrome de désordre alimentaire lié à la présence de grandes concentrations d'ions ferreux (Fe^{2+}) dans la solution du sol. Bien que la plupart des sols minéraux soient riches en fer, l'expression des symptômes de toxicité ferreuse dans les tissus foliaire et la baisse de rendement de riz qui en découle ne se produisent que dans des conditions spécifiques d'inondations, qui entraîne la réduction par la flore microbienne des ions ferriques (Fe^{3+}) insolubles en ions ferreux (Fe^{2+}) solubles et assimilables par les plantes (Ponnamperuma, 1972). La sévérité de l'expression de la toxicité ferreuse chez le riz est liée à un certain nombre de facteurs de sol. Ceux-ci sont principalement (1) la teneur et la minéralogie de l'argile, (2) la quantité de Fe échangeable présent dans le sol, (3) le pH du sol, et (4) la présence de facteurs de stress alimentaire. Une large gamme de sols cultivés est potentiellement toxique si les conditions physicochimiques sont présentes, tels les sols sulfato acide (Tinh, 1999); les sols acides argileux, les sols tourbeux (Deturck, 1994), et les sols des vallées inférieures (bas-fond) recevant les écoulements hydriques des pentes adjacentes (Sahrawat et Diatta, 1995). Les concentrations en ions ferreux (Fe^{2+}) dans la solution du sol des bas-fonds affectés peuvent aller de 10 à 2000 mg.l^{-1} . Au niveau des bas-fonds, les concentrations en fer dans le sol dépendent des conditions pédologique, morphologique, et climatique. Le fer est l'un des éléments les plus répandus de l'écorce terrestre. Sa présence dans les sols, notamment tropicaux, est une donnée acquise depuis longtemps (Lawton, 1959). Sous forme oxydé, le fer (Fe^{3+}) peut migrer des parties hautes du paysage pour se

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

mobiliser et s'accumuler vers les parties basses. Ces migrations de fer le long des toposéquences par lessivage latéral sont importantes pour l'enrichissement absolu des sols de bas-fonds tropicaux en cet élément. Il peut être plus ou moins complètement éliminé du sol du haut de pente par dissolution et lessivage puis s'accumuler dans des eaux qui l'entraîne et le transporte horizontalement et latéralement (circulation de subsurface ou inferroflux) vers le bas-fond pouvant être situé à des distances considérables du point de départ (Référence). Dans les zones de résurgence de la nappe phréatique, on observe souvent une auréole jaunâtre à jaune rougeâtre, due à l'émergence du fer dissout dont une partie est oxydée au contact de l'air. En surface, c'est la forme ferrique (Fe^{3+}) qui est entraînée vers le bas-fond par les eaux de ruissellement. Le fer ainsi mobilisé va enrichir les parties basses en particulier les bas-fonds où il s'accumule (Diatta et al, 1998).

D'une manière générale, la toxicité Ferreuse se produit seulement dans des états anoxiques de sol (Ponnamperuma *et al.*, 1967). Les sols de rizière sont soumis à des changements périodiques d'oxygénation, en fonctions des saisons climatiques et de culture.

En milieu engorgé, l'oxygène est présent à des concentrations moins élevées et est épuisé rapidement par la respiration des micro-organismes du sol et par les racines des plantes (Prade *et al.*, 1990). Avec l'épuisement de l'oxygène, les composés de type NO^{3-} , Mn^{4+} , Fe^{3+} , et SO_4^{2-} peuvent agir en tant qu'accepteurs d'électron pour la respiration microbienne et ainsi se trouver sous forme réduite dans les rizières inondées.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

L'oxygène et les nitrates sont utilisés dans les premières heures de l'inondation. La réduction du manganèse (Mn^{4+}) se produit également rapidement, puisque la teneur en manganèse des sols est habituellement basse (Ponnamperuma, 1977). C'est quelques jours après l'inondation, lorsque le potentiel rédox du milieu devient inférieur à 180-150 mV que la réduction du fer ferrique Fe^{3+} commence (Patrick et Reddy, 1978). Sous l'effet réducteur de ce milieu engorgé l'ion ferrique Fe^{3+} se réduit en ion ferreux (Fe^{2+}), de plus les bactéries présentes dans le milieu mettent en place une respiration anaérobie libérant de grandes quantités d'ion ferreux (Fe^{2+}) dans la solution. En raison du faible niveau d'aménagement de la plupart des bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest concrétisé notamment par des exutoires mal adaptés, le drainage est insuffisant. L'engorgement complet du bas-fond au cours de la saison provoqué par ce mauvais contrôle de l'eau engendre les conditions favorables pour l'expression de la toxicité ferreuse (Kosakiet *al.*, 1986; Okusami, 1986 ; Audebert et Sahrawat, 2000). Il faut chaque fois faire une synthèse sur la base des différents modes du site d'étude

1.3.2. Problématique de la toxicité ferreuse

Le développement de la toxicité ferreuse est dû à la présence d'une importante quantité de fer soluble (Fe^{2+}) dans la solution de sol provenant de la réduction du fer ferrique (très peu soluble). Elle se produit généralement en milieu anaérobie, dans des sols inondés tels que les bas-fonds qui par leur situation topographique recueillent le fer qui est lessivé et ruisselé des pentes du plateau vers le bas-fond. En Afrique de l'ouest, la

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

toxicité ferreuse est préoccupante car les pertes de rendements qu'elle engendre sont estimées entre 12 et 100% dans les bas-fonds, avec une moyenne avoisinant les 45 % (Sahrawat, 2004 ; Becker et Asch 2005 ; Audebert, 2006). Chez le riz, les pertes dues à la toxicité ferreuse dépendent du génotype, du stade de croissance, de l'état nutritionnel du sol et de la sévérité du stress (Gheysens, 2009).

1.3.3. Symptômes de toxicité ferreuse

Le symptôme visuel typique lié aux processus décrits ci-dessus, et en particulier à l'accumulation des polyphénols oxydés, est appelé « bronzing » ou « yellowing » du riz. En raison de la faible mobilité du fer dans la plante, ces symptômes caractéristiques débutent par de petites ponctuations rougeâtres à brunes sur les feuilles âgées (Vizier, 1988). Ces ponctuations se propagent ensuite à toute la feuille qui brunit. Dans le développement ultérieur du symptôme, les bouts de feuille deviennent jaune-orange puis se dessèchent par le haut pour certaines variétés de riz. Ces symptômes sont particulièrement développés sur les organes foliaires âgés qui présentent des taux de transpiration élevés (Yamanouchi et Yoshida, 1981). Par la suite, la feuille entière devient orange à brun ou, brun pourpre quand la toxicité est sévère (Fairhurst et Witt, 2002).

Ces symptômes peuvent se produire à différentes étapes de croissance et peuvent affecter le riz au stade jeune plant, pendant toute la croissance végétative, et aux stades de la reproduction. Selon le stade de croissance d'apparition, d'autres

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

symptômes et des effets sur la croissance peuvent y être associés. Dans le cas d'une toxicité se produisant pendant le stade plantule, le développement des plants de riz est arrêté et le tallage extrêmement limité (Abraham et Pandey, 1989). La toxicité pendant les stades végétatifs entraîne une réduction de la hauteur et une réduction de matière sèche (Abu *et al.*, 1989), la biomasse aérienne étant plus affectée par la contrainte que la biomasse racinaire (Fageria *et al.*, 1988). La formation de talles et la proportion de talles productives peuvent être sévèrement réduites (Cheema *et al.*, 1990). Quand la toxicité ferreuse se produit enfin de phase végétative ou en début de phase reproductive, le nombre de panicules chute (Singh *et al.*, 1992), la stérilité des épillets augmente (Virmani, 1977) et les étapes de floraison et de maturation peuvent être retardées d'environ 20-25 jours. Pour certains cultivars fortement sensibles à la contrainte, aucune floraison ne peut être obtenue (Ayotade, 1979). Le pouvoir oxydant des racines décroît et leurs surfaces se noircissent par des précipités de composés de type $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Morel et Machado, 1981). Il existe de fortes corrélations entre la sévérité des symptômes de toxicité ferreuse et le rendement. La sévérité de la contrainte sur la culture varie selon la saison de culture et les années. Les pertes de rendement moyennes dues à la toxicité ferreuse se situent autour de 35-45% (Lantin et Neue, 1989 ; Audebert et Sahrawat 2000). Cependant, lorsque la culture est confrontée à la toxicité ferreuse en début de cycle, la croissance des plantes peut être fortement affectée et une perte complète de rendement envisagée (Abifarín, 1988). Les variations saisonnières et inter-saisonnières observées

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

(symptômes et rendement) sont principalement dues aux variations de transpiration et par les différences dans la translocation acropète du fer dans la plante. Ainsi, Les effets de la toxicité ferreuse sont plus prononcés en saison sèche qu'en saison humide (Sahrawat et Diatta, 1995; Audebert et Sahrawat, 2000).

1.3.4. Techniques de correction de la toxicité ferreuse

La lutte contre la toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizicole sollicite différentes actions. Des pratiques culturales telles que la date du semis, la culture sur billons, une meilleure gestion de l'eau et une fertilisation adéquate peuvent minimiser l'effet de la toxicité ferreuse sur le riz (ADRAO, 2002 ; Sahrawat, 2004 ; Becker et Asch, 2005). Etant donné que la toxicité ferreuse est souvent associée à un mauvais contrôle de l'eau (Audebert et Fofana, 2009), la gestion de l'eau au niveau du bas-fonds par un système de drainage est primordiale afin d'éliminer le fer qui est entré dans la parcelle ou en l'empêchant d'entrer (Delville *et al.*, 1996). Selon *Wopereis et al.*, 2008, on peut empêcher l'accumulation du fer dans les bas-fonds en interrompant ou en bloquant les flux de sub-surface (routes, canalisations). Sur le plan gestion de l'eau, une meilleure circulation de l'eau peut permettre d'évacuer le fer en excès dans l'eau d'irrigation et aider à oxygéner la solution du sol. La gestion de la matière organique peut également permettre de complexer le fer, le rendant ainsi non assimilable (Audebert,

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

2006). Pour Kirk (2004), les manifestations de la toxicité ferreuse peuvent être associées à des déficiences en phosphore, en zinc ainsi qu'à l'acidité et la baisse de la fertilité chimique du sol. Ainsi, l'application d'éléments nutritifs tels que P, K, Ca, Mg et Zn, peut atténuer la toxicité ferreuse en augmentant la tolérance de la plante et corriger le déséquilibre nutritionnel de la solution du sol (Audebert, 2006b ; Sahrawat, 2010 ; Ethan *et al.*, 2011). Selon Dobermann et Fairhurst (2000), l'apport de ces éléments nutritifs joue un rôle important dans le maintien du pouvoir oxydant des racines. L'usage de variétés de riz tolérantes à la toxicité ferreuse se révèle être une autre alternative, plus intéressante et plus économique pour les producteurs (Sahrawat, 2004 ; Audebert et Fofana, 2009 ; Chérif *et al.*, 2009). En effet, la susceptibilité au stress ferreux diffère fortement d'une variété de riz à l'autre. Les programmes d'amélioration variétale entrepris visent l'obtention de variétés mieux adaptées à la toxicité et qui assurent à la fois un bon rendement.

Selon l'échelle où l'on se situe, la correction des contraintes passera par différentes voies ou techniques. Ainsi au niveau de la vallée (toposéquence) on cherchera à minimiser le flux de subsurface drainant les ions ferriques vers le bas-fond par une stabilisation des sols avec des cultures pérennes et à fort enracinement ; il est également envisageable de tenter de capturer ce flux par différents moyens avant qu'il n'arrive au bas-fond. Construction de drain, haie végétale appropriée etc. Au niveau du bas-fond il faut s'attacher à éliminer le fer par une gestion de l'eau adéquate. Pour cela le rôle du déversoir est

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche primordial. Des techniques culturales peuvent également être examinées sur l'ensemble du bas-fond pour complexer le fer. Ainsi une gestion de la matière organique peut être envisagée. Enfin à l'échelle de la parcelle des pratiques culturales appropriées et la création de variété tolérantes sont les deux principales voies pour résoudre cette contrainte.

Toutefois tenter de résoudre la problématique de toxicité ferreuse uniquement par des apports de fertilisant n'est pas réellement envisageable dans les conditions ouest africaines en raison du faible niveau d'investissement des paysans. Il faut également prendre en compte le niveau des infrastructures des bas-fonds cultivés, les possibilités de gestion de l'eau, les techniques pouvant être utilisées par les paysans.

1.3.5. Rôle du fer actif dans les processus d'humification

Contrairement à ce que l'on pressent intuitivement, on remarque fréquemment que sur des sols forestiers pourtant acides (pH <5.5) se développe un mull forestier acide sans accumulation de litière et avec une bonne minéralisation de l'humus formé. Or on sait généralement qu'en milieu acide l'activité biologique est plutôt réduite et que la matière organique a tendance à s'accumuler. On sait aussi que les humus formés dans ces conditions sont peu minéralisables. C'est donc que sur ces sols forestiers (sols bruns), l'activité biologique est soutenue. Une des raisons de cette activité biologique soutenue tient au fait que le fer issu des minéraux silicatés altérés par hydrolyse acide (acidolyse) se retrouve sous forme d'hydroxyde

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

de fer dont une des propriétés est de se fixer aux colloïdes électro-négatifs des sols, c'est-à-dire les humus et les argiles. Dans ces conditions, le " fer libre " (hydroxyde de fer) favorise grandement l'humification d'abord en insolubilisant les substances pré humiques ce qui rend plus probable la fabrication d'acides fulviques et d'acides humiques. C'est aussi dans ces conditions que l'humine d'insolubilisation peut être fabriquée. En outre, les hydroxydes de fer permettent d'établir des ponts entre les humus et les argiles pour la construction d'un complexe *argile - hydroxyde de fer - humus*, de couleur brune caractéristique de ces sols bruns forestiers.

Enfin, l'action positive du fer libre s'arrête avant la stabilisation de l'humine et celle des acides humiques. Ces substances restent donc accessibles à certaines formes de biodégradabilité plus ou moins rapide.

1.4. Azote et phosphore dans le sol

1.4.1. Etat de l'azote dans les sols

L'azote est le seul élément nutritif qui n'est pas issu de la roche mère. On le trouve dans la nature sous deux états : à l'état libre où il constitue 80% de l'atmosphère terrestre et à l'état combiné, sous la forme organique ou minérale (DENIS, 2000).

- Azote Libre

L'azote de l'atmosphère est la principale source de l'azote utilisé par les plantes. Ce gaz inerte représente 78% des gaz de l'atmosphère et est fixé biologiquement pour former l'ammoniac.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

- Azote Combiné

On appelle azote combiné, l'azote sous toutes ses formes, à l'exception de l'azote moléculaire N_2 . Il s'agit de l'azote organique et/ou de l'azote minéral.

Azote organique (Norg)

L'azote organique est celui combiné à des atomes de carbone qui constituent la matière organique. Cette forme n'est pas assimilable par la plante. Elle est la source d'approvisionnement en azote des végétaux provenant de la population microbienne du sol et de l'accumulation des différents déchets (végétaux et animaux) dans le sol (DENIS, 2000). Sous forme organique, l'azote constitue les réserves du sol. Cette forme organique évolue, passe par différents stades pour aboutir à la minéralisation. Lorsque les déchets végétaux sont enfouis, ils sont attaqués par des micro-organismes (champignons, levures, bactéries) qui vont les transformer en produits de plus en plus simples. Pour PAGNI (1998), l'azote organique est l'azote qui est lié au carbone pour former des molécules complexes. Dans les êtres vivants, l'azote organique se trouve principalement sous forme de protéines, d'acides nucléiques (ADN, ARN).

Azote minéral

C'est le produit de la décomposition de l'azote organique par la flore et la faune du sol notamment par la microflore bactérienne et fongique. Pour KACHAKA (2009) l'azote minéral provient

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

aussi, pour une part non négligeable, de l'azote ammoniacal fixé sur les argiles. Il existe trois formes d'azote minéral. Il s'agit de : l'azote ammoniacal ou ammonium, nitrique et nitrite.

- Azote ammoniacal ou ammonium (NH_4^+)

L'azote ammoniacal résulte de la combinaison de l'azote (N) et de l'hydrogène (H). Sa formule chimique NH_4^+ est très proche de celle du gaz ammoniac (NH_3) d'où elle dérive et qui se volatilise dans l'air. C'est une forme essentiellement transitoire et est le premier résultat de transformation dans le sol de l'azote organique (ammonification). Il est soluble dans l'eau mais bien retenu par le pouvoir sorbant du sol. Les ions NH_4^+ , issus de l'ammonification, sont retenus sur le complexe sorbant grâce à leurs charges positives, ce qui limite le risque d'entraînement en profondeur, mais aussi la disponibilité instantanée pour les plantes. L'ammonium étant fixé par le sol, il ne peut se déplacer dans le sol. Aussi l'absorption par la plante ne peut s'effectuer que dans un périmètre proche de la zone racinaire. Certains de ces ions sont fixés plus ou moins durablement entre les feuillets d'argile (la montmorillonite), mais la plupart sont oxydés par les bactéries nitrifiantes (Nitrobacter, Nitrosomonas), et transformés en nitrates.

Minéralisation de l'azote organique

La minéralisation est la réaction biologique conduisant à la formation de l'azote minérale (Nitrique et Ammoniacal) à partir de l'azote organique. Cette renaissance de l'azote minéral se

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche
produit en trois étapes : l'ammonification, l'oxydation de l'ammonium et l'oxydation du nitrite; les deux dernières étapes sont combinées dans ce qu'on appelle la nitrification.

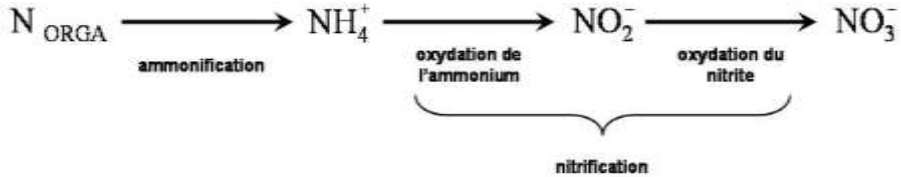


Figure 1.1: Processus de minéralisation de l'azote

Ammonification

L'ammonification est la transformation de l'azote organique en ammonium (NH_4^+) sous l'action de micro-organismes hétérotrophes qui utilisent des substrats carbonés comme source d'énergie (VALE, 2006) car, elles n'ont pas la capacité d'oxyder le NO_2^- en NO_3^- . Cette forme est transitoire et sera transformée ensuite en azote nitrique. Vu la diversité des micro-organismes ammonifiants, l'ammonification est un processus sans exigence écologique particulière, car quelles que soient les conditions de l'environnement, il se trouve toujours dans les sols des espèces microbiennes ammonifiantes adaptées à ces conditions, sauf bien sûr s'il s'agit de conditions incompatibles avec la vie.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

- Perte de l'azote du sol

L'azote est le premier élément minéral limitant le niveau de production de nombreux systèmes de productions agricoles dans le monde. C'est paradoxal que cet élément, qui représente une charge importante pour l'agriculteur, échappe au système et vienne polluer les cours d'eau, les nappes souterraines et l'atmosphère. Les pertes d'azote sont une question des plus préoccupantes. Il existe trois formes de pertes :

Perte par volatilisation ammoniacale

C'est la transformation de l'azote sous forme d'ammonium en ammoniac qui est volatilisé. Voici la réaction: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

La volatilisation est souvent la principale voie de perte d'azote lorsque des amendements riches en azote comme l'urée sont appliqués au sol. Elle se produit lorsqu'il y a accumulation d'azote ammoniacal [NH_3 (gaz) et NH_4^+ (solide)] près de la surface du sol. Rochette (2008), souligne que c'est pendant les 5 premiers jours d'application de l'urée que les risques de la volatilisation d'ammoniac sont grands, mais, selon Lumpungu (1980), cela peut largement varier d'un sol à un autre et selon divers facteurs, comme : le pH du sol, la température, le mode d'apport de l'engrais (en couverture ou enfouissement), la vitesse du vent, l'humidité du sol.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

Perte par lixiviation

La lixiviation représente l'entraînement d'éléments minéraux dissous dans l'eau du sol. Pour l'ion nitrate NO_3^- , très soluble dans l'eau, on parlera donc de lixiviation et non de lessivage, qui représente l'entraînement de particules (argile, matière organique, ...) (FERRUGIA, 2001). Elle est provoquée par le drainage naturel, car l'ion nitrate, très soluble, a une grande affinité pour l'eau. Les paramètres influant sur ce phénomène de lixiviation sont la quantité d'azote minéral (NO_3^-), sa répartition dans le profil et la quantité d'eau drainée. A cela il faut ajouter l'effet de la matrice du sol, qui dans certains sols tropicaux a pour effet de retenir les nitrates dans les horizons superficiels lorsque la filtration de l'eau dans ce sol n'est pas possible si non difficile. La menace de lixiviation est plus élevée dans les sols sableux, dont la texture favorise l'égouttement rapide de l'eau. L'urée est facilement lixiviable et donc doit être employée en agriculture par un couplage le plus précis possible entre besoins et fournitures.

c) Immobilisation de l'azote

L'immobilisation s'opère simultanément avec la minéralisation. C'est une forme de perte temporaire pour les cultures où les microorganismes consomment l'azote minérale. C'est un processus par lequel les micro-organismes du sol assimilent l'azote pour leurs propres besoins de renouvellement et de croissance. L'immobilisation ou la réorganisation est d'autant plus importante que le sol a une forte activité biologique. Selon

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

GAGNON (2009), l'immobilisation et la minéralisation sont deux phénomènes qui s'opèrent simultanément et dépendent du rapport carbone-azote.

En effet, si le rapport carbone azote est :

- < 30 : Minéralisation $>$ Immobilisation, la minéralisation est plus soutenue que l'immobilisation
- > 30 : Immobilisation $>$ Minéralisation, l'immobilisation est plus contractée.

L'immobilisation ou la réorganisation ne doit pas être considérée comme une perte pour le système sol plante, mais elle représente une immobilisation de l'engrais dans le compartiment organique du sol. Elle arrive souvent lorsque, stimulés par un apport excessif en carbone facilement assimilable, les micro-organismes du sol prolifèrent, ils risquent de consommer tout l'azote disponible ; l'azote "immobilisé" dans les cellules bactériennes est alors hors de portée des plantes pour un temps. Dès l'apport d'engrais azoté (cas de l'urée) dans le sol, une compétition s'engage entre les micro-organismes du sol et la culture pour la consommation de cet azote. L'urée n'est pas sujette à une réorganisation spécifique, mais elle est plutôt immobilisée via la réaction biologique entre forme ammoniacale et micro-organismes (Recous, 1987; Le Souder & Taureau, 1997), cités par MERIGOUT (2006).

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

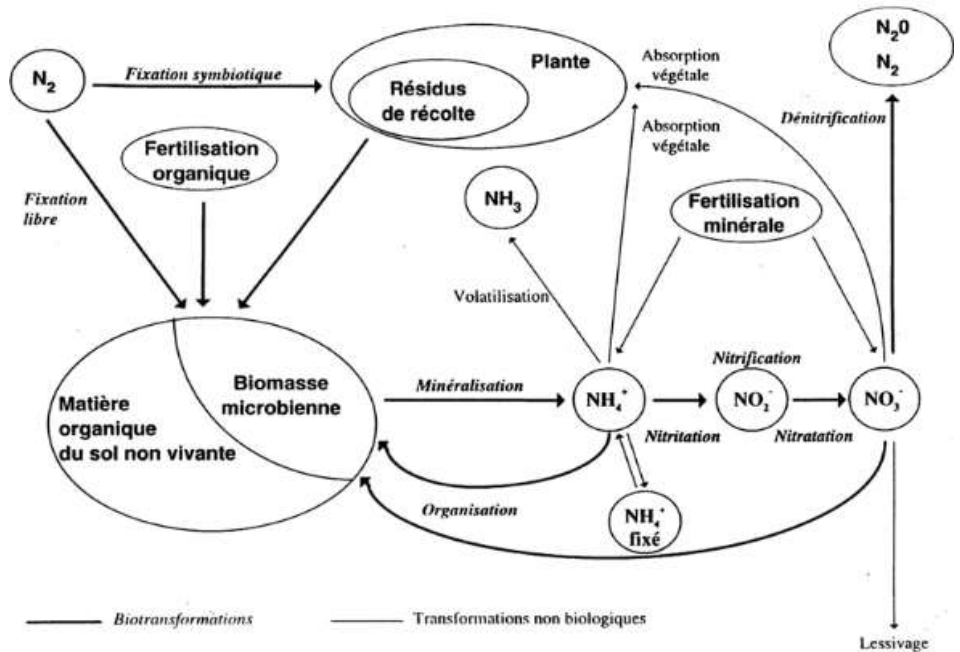


Figure 1.2: Transformations biologiques et non biologiques affectant le devenir de l'azote dans le sol (d'après Nicolardot et al. 1997 cité par M Mattieu

Aussi, les apports de la matière organique jouent un rôle important à l'approvisionnement du sol en azote après sa minéralisation (**HELLER et al., 1998**). En effet, le fumier est un excellent amendement organique des productions végétales. Il contient de l'azote sous forme minérale et organique ainsi que de nombreux autres éléments nutritifs

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche (TREMBLAY *et al.*, 2001). De même BERTSCHINGER *et al.* (2003), signalent qu'après l'utilisation du fumier mûr, il y aura une augmentation lente de la teneur en azote minéral du sol. Malgré la localisation des apports de fumure au niveau des bassins des arbres, les auteurs ont remarqué que le sol des interlignes présentent des teneurs en azote comparables à celles des bassins des arbres. Ceci serait dû à la grande mobilité de cet élément dans le sol.

1.4.2. Etat du phosphore dans le sol

a) Différentes formes de phosphore dans le sol

C'est l'ensemble de toutes les formes de phosphore présentes dans un échantillon de sol, qu'elles soient minérales ou organiques (Baize, 2000). La teneur en phosphore total dans la plupart des sols est comprise entre 0.02 à 0.08 % (Gervy, 1970). Les sols dérivant des roches ignées sont plus riches en phosphore totale que les roches issues des roches sédimentaires (Duthil, 1976). Le phosphore assimilable est aussi appelé << réserve assimilable >> ou << fraction labile >>, c'est le phosphore susceptible d'être absorbé par les racines (Baize, 2000). A la notion de réserve globale de phosphore (P) s'est donc très vite substituée celle de quantité facilement accessible aux racines des plantes, c'est-à-dire capable de participer à la fois à l'alimentation du végétal et au maintien de la concentration de la solution du sol en phosphore. Gervy (1970) estime qu'un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 0,3‰, moyennement

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

riche quand cette dernière est comprise entre 0.15 ‰ et 0.3 ‰, et pauvre quand elle est inférieure à 0.15‰.

b) Phosphore dans les sols rizicoles

Le mode d'irrigation des casiers rizicoles influence également les propriétés physico-chimiques du sol. En effet, Jose *et al.*, (1997) ont rapporté qu'un sol mal drainé retient plus le phosphore qu'un sol modérément drainé. Tandis qu'un sol bien drainé agit comme une source potentielle de P en fonction de la période de l'année. Un sol modérément drainé a également le potentiel d'agir comme un puits pour P. La capacité de rétention du P du sol semble être contrôlée par la teneur en matière organique et des oxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al).

Prem *et al.*, (2011) rapportent que la variation spatiale des éléments qui sont directement (Fe, Mn) ou indirectement (P) influencée par des processus d'oxydo-réduction est très élevée par rapport à la variation d'Al, qui n'a pas de redox sensible. Bien que le site d'expérimentation n'ait pas été surveillé pendant trois mois, les conditions redox ont considérablement changé, et le Fe, Mn et P soluble ont présenté une grande variation dans le temps. Par conséquent, cette étude a démontré que, pour évaluer correctement l'état redox ainsi que la solubilité de Fe, Mn et P dans les sols des zones humides, il est essentiel d'avoir une résolution d'échantillonnage élevée dans l'espace et dans le temps.

Aussi il est à noter que les oscillations temporelles observées dans les configurations spatiales de la variabilité des propriétés

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

du sol dans les champs de riz ont également été rapportées précédemment même si cette question a été moins fréquemment abordée (Morales *et al.*, 2011a ; Morales *et al.*, 2011b ; Zhao *et al.*, 2009 ; Simmonds *et al.*, 2013). Une bonne production de riz exige un état de fertilité du sol adéquat et des niveaux particulièrement satisfaisants de N, P et K. Dans les sols inondés, les changements électrochimiques majeurs qui se produisent ont une profonde influence sur la disponibilité des éléments nutritifs du sol. Ainsi, les inondations augmentent le pH des sols acides et diminuent le pH des sols calcaires et sodiques. Dans les sols acides le P est associé à des composés Fe et Al, alors que dans les sols, avec un pH supérieur à 6,5 le P est principalement associé à du calcium et du magnésium. L'inondation des sols en général modère le pH vers une condition de pH neutre, et par conséquent la disponibilité de P est favorisée (Fageria et Baligar 1999 ; Linqvist et Ruark, 2011). La variabilité des propriétés physico-chimiques peut entraîner une variabilité de rendement entre les champs. Bien que de nombreuses études aient suggéré l'amélioration de la productivité du riz à travers une meilleure gestion des variétés et des cultures (Ladha *et al.*, 1998; Fukai et Basnayake, 2001), la grande variation observée au niveau des champs semble empêcher l'adoption de ces technologies. Pour améliorer la production de riz, il est surtout important de quantifier les distributions et la disponibilité de l'eau et la fertilité des sols par rapport à la toposéquence dans les bas-fonds, et leur effet sur la productivité du riz.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

c) Dynamique du phosphore dans le sol

La connaissance de la dynamique d'un élément est indispensable au diagnostic de la fertilité d'un sol et à l'estimation des correctifs à apporter (BOSC, 1976). D'après GROS (1977), il existe un équilibre permanent entre les divers états du phosphore dans le sol. Ainsi la matière organique, à son tour, libère du phosphore dans la solution du sol après minéralisation. DUTHIL (1976) estime que l'équilibre le plus rapide et le plus important existe entre le phosphore dissout dans la solution du sol et le phosphore échangeable, et estime que ces deux dernières formes représentent la réserve alimentaire en phosphore. Donc le phosphore peut être absorbé, précipité, comme il peut être dissout. Le phosphore organique peut être minéralisé ou réorganisé (RAZI, 2006). L'emploi de l'isotope P^{32} , met en évidence trois phénomènes dans le sol : L'adsorption de l'anion phosphorique sur le complexe, la mobilisation et la rétrogradation.

d) Le phosphore soluble (dans la solution du sol)

La solution du sol est une source alimentaire possible mais très réduite par rapport aux besoins des végétaux, sa concentration est très faible et presque constante du fait des échanges continuels avec le phosphore adsorbé (DIEHL, 1975).

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

e) Le phosphore insoluble des roches mères

Les formes dites << insolubles >> ne font néanmoins pas partie des réserves inassimilables de phosphore existant dans le sol. Des modifications de pH, l'action de la matière organique, l'activité microbienne, la possibilité d'utilisation directe des phosphates minéraux par plusieurs espèces végétales font que ces formes de phosphore exercent un rôle non négligeable dans la nutrition des plantes (Gervy, 1970). Duthil (1976), montre qu'en sols calcaires les ions orthophosphates en solution évoluent en présence de calcite vers des formes insolubles suivant un enchaînement régulier des réactions conduisant à la formation de : - Phosphate monocalcique, Phosphate bicalcique et Phosphate tricalcique.

f) Le phosphore facilement échangeable

Ce sont les ions phosphoriques adsorbés sur le complexe adsorbant du sol. Ils participent aux échanges constants (SOL - SOLUTION) et constituent l'essentiel du << pool alimentaire >> des plantes (Fardeau *et al.*, 1991). L'acide phosphorique est un anion, et ne peut être retenu par le complexe que par l'intermédiaire d'un cation : fer, aluminium, potassium, mais plus généralement le calcium (Lambert, 1979).

1.5. La matière organique du sol

La matière organique du sol (MOS) est une notion assez large qui a été beaucoup discutée par les chercheurs. Bien que la définition exacte de la MOS soit assez diversifiée, les fondements de son concept et les réflexions sur son rôle sont souvent convergents (Aholoukpe, 2013). Ainsi, le terme "matière organique du sol" désigne un ensemble de substances et composés carbonés hétérogènes issus d'apports successifs de matières d'origines végétales et animales (Craswell 2001 ; Manlay 2007 ; d'Annunzio 2008). Elle présente deux composantes essentielles suivant son degré d'altération : la fraction organique fraîche (matières organiques figurées) et la fraction organique humifiée (Theng, 1987). Elle est composée d'éléments majeurs (carbone, hydrogène, oxygène et azote) et d'éléments secondaires (soufre, phosphore, potassium, calcium, magnésium). La fraction organique du sol a depuis longtemps été identifiée comme étant une composante majeure dans le maintien des fonctions clés et de la fertilité du sol (Morel, 1989).

La MOS joue un rôle crucial dans le fonctionnement physique, chimique et biologique du sol. Plusieurs auteurs rapportent que la MOS contrôle de nombreuses propriétés du sol (physiques, chimiques et biologiques) et les grands cycles biogéochimiques (Craswell, 2001 ; Nadwa, 2001 ; Dielset *al.*, 2004 ; Rossi *et al.*, 2009 ; Clément, 2011., ...). Selon Martius et al. (2001), les sols prennent vie de leurs matières organiques. D'importantes communautés de microorganismes et d'animaux du sol (vers de terre, termites, mille-pattes, acariens,

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

champignons, bactéries, et microbes) jouent un rôle important dans les services écosystémiques, en particulier dans le recyclage du carbone et d'autres éléments nutritifs de la plante. Craswell et Lefroy (2001) ont rappelé que sans la MOS la surface de la terre serait un mélange stérile de minéraux d'altération. La MOS est aussi source de carbone et d'énergie pour les organismes hétérotrophes (Chaussod, 1996), et joue à ce titre un rôle clé dans le biofonctionnement des sols. La présence de la matière organique stimule significativement les activités microbiennes, notamment enzymatiques et augmente la biomasse microbienne (Küsel et Drake, 1999). La MOS fournit aussi une grande diversité d'habitats aux microorganismes du sol, entraînant ainsi la diversification des communautés microbiennes (Weil *et al.*, 2004). Sous l'action des organismes, les composés organiques sont dégradés, minéralisés, participant ainsi au déstockage du carbone organique du sol, principal composant de la matière organique. La nature de la matière organique du sol est très complexe ; principalement constituée des composés humiques, des racines, des microorganismes, des lombriciens....C'est pourquoi il serait plus juste de parler des matières organiques du sol. Parmi les composantes des matières organiques du sol, une distinction importante est faite entre les substances non humiques et les substances humiques. Les substances non humiques sont des molécules appartenant à des familles chimiques identifiées : hydrates de carbone, protéines, acides aminés, lipides, tanins, lignines et acides organiques. Une partie de ces molécules peut être dissoute dans la solution du sol mais la plus grande partie est associée aux minéraux et aux

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

substances humiques. Les substances humiques sont des macromolécules acides, de tailles variables, de composition chimique et de structures complexes. Elles sont définies sur une base opérationnelle par des critères de solubilité en milieux alcalins et non alcalins.

1.5.1. Statut de la matière organique du sol et conditions environnementales l'influençant

Le statut de la MOS est considéré comme un indicateur fort de la fertilité du sol et de la dégradation des terres (Manlay, 2007). Selon Frisque (2007), un des indicateurs principaux de la qualité d'un sol est sa teneur en matières organiques. Celles-ci constituent la partie vivante du sol et lui confèrent la plupart de ses propriétés. Les différences de toute nature, que l'on peut observer entre les divers stades d'évolution de la matière organique des sols entre écosystèmes à l'équilibre, peuvent s'expliquer par des différences d'environnement d'une part et, par des différences de quantité et de qualité de la matière organique entrant dans le sol d'autre part. La vitesse d'évolution de la matière organique c'est à dire, pour l'essentiel, l'intensité de l'activité microbienne, dépend en effet beaucoup de la température et de l'humidité du sol. L'intensité moyenne de ces deux facteurs physiques, et la manière dont ils varient dans le temps, contrôle donc fortement la taille des différents stades, et par voie de conséquence, la quantité de matière organique totale présente. Si le climat conserve à peu près les mêmes caractéristiques sur de longues périodes de temps, il est en

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

principe incapable d'engendrer une différenciation qualitative de la matière organique entre deux sols.

La texture des sols qui, par différents mécanismes, module l'accessibilité spatiale des composés organiques aux micro-organismes, agit elle aussi sur la vitesse de dégradation de la matière organique, sur la taille des divers stades et sur la teneur en matière organique totale. La quantité de matière organique à évolution lente dans un sol est d'autant plus élevée que le sol est argileux; en ce sens, la texture du sol influence fortement la qualité du sol total en augmentant la taille relative des stades les plus évolués, les plus humifiés.

Enfin, la quantité et la nature biochimique de la matière organique d'un sol dépend aussi de la quantité et de la nature des apports végétaux (Annabi *et al.*, 2009). Ces derniers sont fonction de la production primaire des couverts herbacés et ligneux, de l'allocation des photosynthétats entre les parties aériennes et souterraines des plantes et de l'incorporation des parties végétales mortes au sol. L'incorporation est maximale dans le cas des racines, mais beaucoup plus faible et variable dans les cas des parties aériennes car elle dépend de l'activité de la faune, de la fréquence des feux et de la vitesse d'action des micro-organismes lors des premiers stades de décomposition de la litière.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

1.5.2. Activité microbienne du sol et minéralisation de la matière organique

a) Méthodes d'évaluation de l'activité microbienne du sol

Les apports de matière organique provoquent une augmentation de l'activité des micro-organismes dans le sol (ITAB *et al.*, 2002). La méthode la plus ancienne et la plus simple pour évaluer l'activité globale de la microflore consiste à mesurer la minéralisation du carbone et de l'azote en conditions contrôlées, proches de l'optimum biologique ou in situ dans les conditions de production en milieu réel (Bachelier, 1966 et 1968 a.). Dans la pratique, plusieurs études ont montré que les échantillons de sol sont généralement incubés durant 28 jours à 28°C au laboratoire et à une teneur en eau voisine de la capacité au champ (Nicolardot *et al.*, 1982; Feller *et al.*, 1983; Djegui, 1992; Sedogo, 1993; ITAB *et al.*, 2002; Annabi *et al.*, 2009; Sahrawat, 2010; Aholoukpe, 2013; Tete, 2014; Liu *et al.*, 2015; Chevallier *et al.*, 2016). Le résultat de cette incubation correspond cependant à la respiration potentielle du sol. La minéralisation du carbone lors d'une incubation en conditions contrôlées, encore appelée "respiration du sol", donne une information sur le coefficient de minéralisation du carbone lorsqu'elle est rapportée à la biomasse microbienne. En considérant que le flux de C-CO₂ respiré provient de l'ensemble des microorganismes, on peut exprimer ce flux par unité de biomasse. Le résultat, appelé "respiration spécifique" (Chaussodet *et al.*, 1986) a la dimension d'un taux de renouvellement (unité : j⁻¹). Cette mesure très simple complète

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

donc utilement la détermination de la biomasse microbienne. On accède à la fois à la taille du compartiment vivant du sol et à son taux de renouvellement apparent. Ces déterminations très simples, voire rustiques, s'avèrent très utiles pour "caractériser" des échantillons de sol. Elles prennent tout leur intérêt lorsqu'il s'agit de comparer des traitements différents sur un même type de sol. On peut également effectuer ces déterminations sur un grand nombre de parcelles et "caler" les résultats sur quelques parcelles de référence. Il est par ailleurs possible d'extrapoler au champ les observations de laboratoire (c'est-à-dire de transformer des vitesses de minéralisation exprimées en mg N/kg/jour en kg N/ha produit pendant une période donnée) en utilisant un calcul de jours normalisés qui prend en compte les effets de la température et de l'humidité sur la minéralisation de l'azote du sol (Recous, 1995 ; Rodrigo *et al.*, 1997) et qui permet ainsi de convertir des jours d'incubation à température et humidité constantes en jours in situ à humidité et températures variables (ou vice versa). A titre d'exemple et indépendamment de l'effet de l'humidité, les résultats obtenus au cours de l'incubation d'un sol pendant 46 jours à 28°C correspondraient à la minéralisation annuelle d'un sol dont la température moyenne annuelle serait de 10°C. Des incubations plus longues permettent de mieux cerner les différents compartiments de la MO du sol, en fonction de leur dégradabilité.

1.5.3. Matière organique et activités microbiennes dans les sols en conditions d'hydromorphie

Dans les environnements anaérobies, particulièrement dans les sols de rizières, trois importantes réactions redox interviennent dans la décomposition de la matière organique des sols (MOS) : oxydation de la matière organique avec réduction du fer, oxydation de la matière organique avec réduction des sulfates et conversion de la matière organique en dioxyde de carbone et en méthane (Lu *et al.*, 2002), qui servent de source de carbone et d'énergie pour les microorganismes et leurs activités. L'évolution de la fraction organique est différente de celle des milieux aérés. Dans les sols de rizières, l'hydromorphie bloque l'évolution de la matière organique, qui s'accumule en surface sous une forme moins décomposée. Cette décomposition dépend du type d'hydromorphie présente. Dans le cas d'une hydromorphie temporaire, la décomposition est partielle avec des tâches d'oxydo réduction. Par contre, on assiste à la gleyfication dans le cas d'une hydromorphie totale. L'évolution particulière de la matière organique, avec la formation de composés peu polymérisés dans ces sols, à fort pouvoir réducteur et complexant, facilite la réduction et la mobilisation des éléments minéraux comme le fer. Des travaux (Yao et Conrad, 1999; Chidthaisong et Conrad, 2000) ont aussi montré qu'en milieu moyennement réducteur, on observe une importante production d'alcools et d'acides organiques grâce à la transformation du saccharose, de la cellulose pure et aussi de la paille de riz. Alors qu'en milieu très réducteur, on avait une

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

forte production de méthane (Vallery, 2010) et de sulfures, due à la décomposition de la cellulose qui est le constituant majeur des pailles de riz.

Les effets du manque d'oxygène sur la dégradation de la matière organique ont souvent été abordés dans divers travaux. Selon Holmer (1999) et Sun *et al.* (1997), la biodégradation de certains détritiques organiques réfractaires et de macromolécules complexes, comme les lipides, est plus lente sous conditions anoxiques. Ainsi, un taux de matières organiques élevé est très souvent maintenu sous ces conditions. Ce qui favorise, pour Kristensen *et al.* (1995), l'accumulation de matières organiques dissoutes (MOD), qui est accompagnée très souvent d'une faible production de CO₂. Cette accumulation des MOD dans les pores des sols contribue à préserver les matières organiques (Henrichs, 1995).

La désorption des matières organiques du sol (MOS) est l'un des mécanismes susceptibles de participer à la mobilité et à la disponibilité du fer dans les sols. La présence de charges négatives sur les matières organiques provoque l'adsorption des composés inorganiques (métaux,...) à leurs surfaces. Cette adsorption varie en fonction de la nature des matières organiques et du pH du milieu.

L'activité microbienne peut être mesurée à travers le volume de la biomasse active, la forte minéralisation de la matière organique induisant un dégagement du dioxyde de carbone. Ce dégagement de CO₂ est mesuré soit *in situ*, soit au laboratoire.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

In situ, le CO₂, dégagé du sol est recueilli dans une cloche de capture et ensuite dosé, soit par la méthode de la circulation d'air, avec capture à la sortie dans un barboteur à potasse ou à baryte, soit, plus simplement, par la méthode de l'enrichissement en CO₂, de l'atmosphère de la cloche de capture, avec prélèvement d'une fraction de cette atmosphère et dosage simultané de sa teneur en gaz carbonique à l'aide des tubes réactifs Drager (tubes gradués dans lesquels, sous l'influence du CO₂, se produit une transformation d'une combinaison de l'hydrazone qui est mise en évidence par un réactif coloré). L'atmosphère du sol ne suit pas toujours l'activité biologique globale de celui-ci, ni son dégagement de CO₂. Il peut néanmoins être intéressant d'en suivre les variations en implantant dans le sol à diverses profondeurs des sondes fixes et en prélevant régulièrement des échantillons d'air à travers, là aussi, des tubes réactifs Drager (Bachelier, 1968 b).

En laboratoire, la mesure du dégagement de CO₂ d'un sol en récipient fermé correspond en fait à l'évaluation de son potentiel d'activité biologique ; celui-ci dépend du carbone minéralisable présent, qui n'est lui-même qu'en partie fonction de l'activité biologique globale du sol (Bachelier, 1966 et 1968 a). En effet, un fort dégagement de CO₂, correspondant à la réhumidification d'un échantillon de sol desséché peut indiquer : soit que cet échantillon de sol avait un métabolisme très actif, était traversé par un flux énergétique important et présentait de fortes teneurs en carbone minéralisable rapidement renouvelable, soit, au contraire, que cet échantillon de sol était le siège de biostases microbiennes que le dessèchement a plus ou

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche
moins cassées en libérant les substances énergétiques de type glucidique qui s'y trouvaient bloquées avec l'engorgement du flux énergétique.

1.6. Plante du riz

Selon le Memento de l'agronome et Wikipédia, le riz est une plante annuelle glabre à chaume dressé ou étalé de hauteur variable, allant de moins d'un mètre jusqu'à cinq mètres pour les riz flottants. C'est une plante prédisposée au tallage, formant un bouquet de tiges, à racines fasciculées. Les fleurs, en épillets uniflores, sont groupées en panicules de 20 à 30 cm, dressées ou pendantes. Le fruit est un caryopse enveloppé dans deux glumelles grandes, coriaces et adhérentes, l'ensemble formant le riz complet. La masse volumique du riz blanc cru en vrac est d'environ 0,9 g/cm³.

Selon la texture du caryopse, on distingue les variétés ordinaires, à tégument blanc ou rouge ; ou glutineuses (riz gluant, *sweet rice*). Les variétés de riz africain sont généralement à tégument rouge.

Les riz appartiennent au genre *Oryza* L. qui comprend 22 espèces, dont deux sont cultivées, *Oryza sativa* L., originaire de l'Asie, la plus cultivée et *Oryza glaberrima* Steud., ou riz de Casamance, originaire d'Afrique de l'Ouest.

Oryza sativa provient de divers événements de domestication ayant eu lieu environ 5000 ans av. J.-C. en Inde du Nord, et

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche autour de la frontière sino-birmane. Le parent sauvage du riz cultivé est *Oryza rufipogon* (anciennement, les formes annuelles de *Oryza rufipogon* ont été nommées *Oryza nivara*). À ne pas confondre avec le riz, nommé riz sauvage, du genre botanique *Zizania*.

Oryza glaberrima provient de la domestication de *Oryza barthii*. On ne sait pas où a eu lieu la domestication, mais elle semble dater d'avant 500 av. J.-C.. Depuis quelques dizaines d'années, ce riz est de moins en moins cultivé en Afrique où le riz asiatique lui est de plus en plus préféré. Aujourd'hui, des variétés hybrides *sativa-glaberrima* combinant les qualités des deux espèces sont diffusées sous le nom de *Nérica*.

À partir de sa récolte, le riz peut être commercialisé à plusieurs stades de transformation :

- le riz paddy (terme venant du malais *padi*, qui désigne le riz sur pied dans la rizière) est à l'état brut, c'est un « riz non décortiqué », qui a conservé sa balle après battage. Il est aussi cultivé en aquariophilie, pour ses paramécies dans le germe du grain.
- le riz cargo, ou riz complet, ou riz brun, est le « riz décortiqué » dont seule la balle du riz a été enlevée, mais dont le son et le germe sont toujours présents.
- le riz blanc, ou riz usiné, ou riz blanchi, dont le péricarpe et le germe ont été enlevés : il ne reste quasiment que les réserves amyliacées (l'endosperme).
- le riz étuvé, souvent appelé riz incollable, est un riz blanc, ou riz cargo, soumis à un traitement thermique

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

avant commercialisation pour éviter que les grains ne collent entre eux.

Lors de sa commercialisation à des fins alimentaires, ou lors de son utilisation dans des recettes, les différentes variétés de (grains de) riz peuvent être classées suivant deux critères : la taille des grains et leur appartenance à un type de riz ayant des caractéristiques particulières.

La classification usuelle du riz, suivant la taille de ses grains, dont la taille des variétés commerciales est généralement comprise entre 2,5 mm et 10 mm, est la suivante :

- Le riz long grain, dont les grains doivent mesurer au minimum 7 à 8 mm et sont plutôt fins. À la cuisson, les grains gonflent peu, leur forme est préservée et ils ne s'agglutinent quasiment pas. Ce sont des riz souvent utilisés lors de la préparation de plats principaux, ou comme accompagnement. Beaucoup d'espèces du groupe variétal indica sont vendus sous cette appellation.
- Le riz à grain médium, ou grain moyen, dont les grains sont plus larges que le riz long grain (le rapport entre longueur et largeur oscille entre 2 et 3) et qui atteignent une longueur comprise entre 5 et 6 millimètres, peut être, suivant les variétés, mangé en accompagnement ou appartenir à une variété de riz gluant (comme le *california mochi*, par exemple). Le plus souvent, ce type de riz est légèrement plus collant que le riz long.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

- Le riz à grain court, riz rond, ou riz à grain ovale, est la variété la plus utilisée pour les desserts ou encore les risottos. Les grains mesurent généralement 4 à 5 mm de long pour 2,5 mm de large. Ils collent souvent entre eux.

Cette classification s'accompagne aussi de classifications sur des critères plus gustatifs. On distingue souvent le riz gluant asiatique (dont les grains sont souvent longs ou moyens et s'agglutinent entre eux), les riz parfumés qui ont une saveur particulière (le basmati étant le plus connu en Occident), ou encore le riz à risotto (qui est le plus souvent du riz rond ou moyen, comme l'Arborio ou le Carnaroli).

De plus, on utilise dans certaines parties du monde différents cultivars pour obtenir différentes couleurs de riz, comme rouge (Madagascar), jaune (Iran) ou encore violet (Laos).

1.6.1. Classification variétale

Le riz cultivé existe en de très nombreuses variétés, plusieurs milliers, qui ont été classées historiquement en trois groupes : *japonica* à épillet court, *indica* à épillet très long, et un groupe intermédiaire, anciennement nommé *javanica*.

Aujourd'hui, on classe le riz asiatique en deux sous-espèces, *indica* et *japonica*, sur une base moléculaire, mais aussi d'incompatibilité reproductive. Ces deux groupes correspondent à deux événements de domestication ayant eu lieu de part et d'autre de l'Himalaya. Les riz anciennement nommés *javanica*

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche
appartiennent au groupe *japonica*. On parle parfois de *japonica*
tropicaux.

La sous-espèce *indica* regroupe des *indica* classiques, les
écotypes « aus », et des écotypes flottants.

La sous-espèce *japonica* regroupe les *japonica* tempérés et
tropicaux (*ex-javanica*, généralement adaptés à la culture
« sèche », c'est-à-dire sans inondation du champ), les riz long
grain parfumés (basmati et sari) et des écotypes flottants.

Les milliers de variétés de riz existantes sont parfois classées
selon leur degré de précocité, selon la longueur du cycle
végétatif (en moyenne 160 jours). On parle alors de variétés très
précoces (90 à 100 jours, écotypes « aus »), précoces, semi-
précoces, tardives, très tardives (plus de 210 jours). Ce mode de
classement, s'il est pratique d'un point de vue agronomique, n'a
cependant aucune valeur taxonomique.

Il existe plus de 360 variétés de riz inscrites dans le catalogue
européen des espèces et variétés. Environ 118 variétés de riz
sont inscrites au catalogue officiel français.

Le riz sauvage appartient à un genre voisin : la zizanie, *Zizania*
aquatica L. et *Zizania palustris*, originaire de la région des
Grands Lacs, en Amérique du Nord.

Le genre *Oryza* comprend une vingtaine d'espèces différentes.
De nombreuses classifications de ces espèces en complexes, en

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

tribus, en séries, etc., ont été proposées, et se recoupent plus ou moins les unes les autres. La classification proposée ici présente l'avantage d'être simple, et reprend les travaux les plus récents. La base de ces classifications est l'organisation du génome (ploïdie, niveau d'homologie des génomes, etc.), mais est cohérente avec les caractéristiques morphologiques observées chez ces différentes espèces.

- Complexe *sativa*. Dans ce groupe se retrouvent les deux espèces de riz cultivées, leurs parents sauvages, et des espèces proches.
 - *Oryza sativa* Linn., le riz cultivé asiatique, une espèce cultigène.
 - *Oryza sativa* f. *spontanica* auct.
 - *Oryza rufipogon* Griff. est le parent supposé de l'espèce cultivée *Oryza sativa*, le riz asiatique. Certains individus de cette espèce sont des plantes annuelles, d'autres sont pérennes. Traditionnellement, la forme annuelle de *Oryza rufipogon* était nommée *Oryza nivara*. Ce nom d'espèce ne doit plus être utilisé aujourd'hui, car les formes annuelles et pérennes sont tout à fait interfertiles, et ne forment pas deux populations distinctes. Afin d'ôter toute ambiguïté, on écrit parfois *Oryza rufipogon sensu lato* pour désigner cette espèce dans sa nouvelle acceptation sur la forme pérenne, sur la forme annuelle (ex-*Oryza nivara*).

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

- *Oryza meridionalis* Ng.
- *Oryza glumaepatula* provient d'Amérique du Sud. Cette espèce ne peut pas être distinguée de *Oryza rufipogon* sur une base morphologique. Cependant, il s'agit bien d'une espèce différente, car les plantes d'*Oryza glumaepatula* et d'*Oryza rufipogon* ne sont pas interfertiles.
- *Oryza glaberrima* Steud., le riz de Casamance. Espèce cultigène, il fut vraisemblablement domestiqué en Afrique de l'Ouest à partir de l'espèce sauvage annuelle *Oryza barthii*. *Oryza glaberrima* n'est cultivée qu'en Afrique de l'Ouest (du Sénégal jusqu'au Lac Tchad), alors qu'*Oryza barthii* est présent en Afrique de l'Est (Tanzanie) et Australe (Zambie).
- *Oryza barthii* A. Chev., probable parent sauvage du riz de Casamance (*Oryza glaberrima*). Cette espèce existe également sous la forme d'adventices dont certaines ont été historiquement nommées *Oryza stapfii* A. Chev. On trouve aussi dans la littérature le nom *Oryza breviligulata* qui est synonyme de *Oryza barthii*.
- *Oryza longistaminata* Chev. & Roch.

Le riz est cultivé de diverses manières. La riziculture pluviale, sans inondation du champ, est une culture non aquatique, elle se distingue des cultures aquatiques, la riziculture inondée où le niveau d'eau n'est pas contrôlé, et la riziculture irriguée où la

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche
présence d'eau et son niveau sont contrôlés par le cultivateur. Un champ cultivé en riz est nommé rizière.

Près de 2 000 variétés de riz sont aujourd'hui cultivées. Les difficultés liées à la culture du riz font que, contrairement au blé, il est cultivé dans très peu de pays. Ainsi, près de 90 % de la production mondiale est fournie par l'Asie des moussons. À elles seules, les productions totales additionnées de la Chine et de l'Inde dépassent la moitié de la production mondiale. Cela s'explique notamment par les exigences du riz en matière climatique.

En effet, les besoins de la plante en chaleur, en humidité et en lumière sont très spécifiques. Ce n'est que dans les régions tropicales et subtropicales que le riz peut être cultivé toute l'année. L'intensité lumineuse exigée limite sa production aux zones se situant entre le 45^e parallèle nord et le 35^e parallèle sud, tandis que les conditions pédologiques requises s'avèrent plus souples, la plante étant relativement accommodante. La culture du riz requiert cependant une humidité importante : les besoins s'élèvent au moins à 100 mm d'eau par mois.

Le riz entraîne donc une forte consommation domestique en eau.

À tous ces obstacles climatiques s'ajoute la difficulté à récolter le riz. La récolte n'est pas partout automatisée (moissonneuses), ce qui nécessite une main-d'œuvre humaine importante. Cet aspect des coûts en capital humain joue un rôle prépondérant dans la considération du riz comme une culture de pays pauvres.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

La riziculture « irriguée » exige des surfaces planes, des canaux d'irrigation, des levées de terre, elle est effectuée en plaine ou bas-fonds. En zone montagneuse, ce type de culture est parfois pratiqué en terrasses. De plus, les plantules de riz aquatique sont en premier lieu obtenues sous pépinière avant d'être repiquées sous une lame d'eau, dans un sol préalablement labouré. Sur le long terme, l'entretien pose aussi de sérieux problèmes, car il exige sarclage et désherbage de la terre avant d'effectuer la récolte à la faucille obligatoire, et dont les rendements s'avèrent faibles. Ce mécanisme est celui de la culture rizicole dite « intensive », car ayant les meilleurs rendements et permettant plusieurs récoltes par an (jusqu'à sept tous les deux ans, soit plus de trois par an dans le delta du Mékong).

La riziculture « inondée » se pratique dans des zones naturellement inondables. Dans cette catégorie entrent deux types de culture, l'un à faible profondeur, et comparable à la culture irriguée mais moins contrôlé, l'autre à forte profondeur (parfois entre 4 et 5 mètres lors de crues) où des variétés particulières de riz flottant, comme *Oryza glaberrima*, sont cultivées. Ces cultures sont traditionnelles dans le delta central du Niger au Mali, de Ségou à Gao, ou même Niamey. Semé sans repiquage, ce riz aquatique est à croissance rapide, mais peu productif. Le terme « riz flottant » est impropre, bien que les tiges fortement allongées et pleines d'air flottent au moment de la décrue. Il faut y préférer « riz de crue », ou *deep flood rice*. Il faut des variétés photosensibles. Le cycle dépend à la fois de la pluviométrie et de la crue : germination et tallage se font en

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

pluvial, montaison sous crue montante jusqu'à 4 cm/jour, épiaison et floraison sous crue stable, maturation et récolte à la décrue.

Au Mali, cette culture va de Ségou à Gao, le long du fleuve et des rivières importantes. Au-delà du delta central, la crue peut tarder à baisser : il faut alors récolter en pirogue (Lac Télé en particulier). Parfois, il existe des situations intermédiaires où le niveau d'inondation est partiellement contrôlé : des aménagements simples d'un coût de l'ordre du dixième des coûts pour l'irrigation, permettent de retarder la crue et la décrue. Des compléments d'aménagements permettent de diminuer la hauteur d'eau pour chaque zone d'altitude. Il faut changer de variété tous les 30 cm de hauteur d'eau. Il y a peu de recherche à ce sujet, mais les variétés traditionnelles résistent mieux aux aléas d'inondation. Elles sont peu productives mais fort gouteuses.

Il existe également une riziculture dite « pluviale », dépendant uniquement de la pluviométrie. Le riz pluvial n'est pas cultivé « les pieds dans l'eau » et ne requiert pas d'irrigation en continu. Ce type de culture peut se rencontrer dans les zones tropicales d'Afrique de l'Ouest. Ces cultures sont « extensives » ou « sèches », et offrent des rendements plus faibles que la riziculture irriguée.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

1.6.2. Impact environnemental de la riziculture

Besoins en eau douce

Les besoins en eau du riz sont estimés à plus de 8 000 m³/ha. La culture du riz nécessite des quantités très importantes d'eau, plus de 1 500 tonnes d'eau par tonne de riz. C'est la raison pour laquelle elle est localisée dans des zones arrosées ou humides, comme la Chine du Sud, les deltas du Mékong et du fleuve Rouge au Vietnam, ou la Camargue en France.

Effet de serre La culture intensive du riz contribue à l'effet de serre, car elle est à l'origine de l'émission d'une quantité assez importante de méthane (environ 120 gs par kg de riz) puissant gaz à effet de serre.

En riziculture, deux types de bactéries agissent : les bactéries anaérobies se développant en l'absence d'oxygène ; les bactéries aérobies se développant en présence d'oxygène. Les bactéries anaérobies produisent du méthane, et les aérobies en consomment. Les techniques d'irrigation couramment utilisées pour la riziculture favorisent le développement principal des bactéries anaérobies, donc la production de méthane n'est que très peu absorbée par les bactéries aérobies. Conséquence, une grande quantité de méthane est produite et lâchée dans l'atmosphère (P. A. Roger *et al.*, 1999). Des techniques alternatives d'irrigation pourraient cependant être utilisées pour limiter ce problème.

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

La production d'un kilogramme de riz correspond à l'émission de 120 g de méthane. La riziculture représente de ce fait le deuxième producteur mondial de méthane avec 60 millions de tonnes par an ; juste derrière l'élevage des ruminants, qui génère 80 millions de tonnes par an.

Ces dernières années, la hausse de la production de riz fut surtout due à la hausse des rendements, environ 4,5 t/ha. La production générale de riz fluctue moins que celle du blé, du fait notamment des moindres enjeux économiques et politiques.

En 2014, la production mondiale de riz complet s'est élevée à 740 millions de tonnes (Mt) contre seulement 585, en 2003 (source : FAO).

Historiquement, si l'Égypte fait partie des plus grands producteurs exploitants du riz, elle connaît des difficultés depuis 2008. Sa politique en affaires internationales a interdit en effet, dès 2008, l'exportation de ses productions de riz. Le Mali est grand producteur de deux types de riz : riz de crue (*glaberrima*) traditionnel et riz irrigué (office du Niger).

1.6.3. Importance du riz

Le riz nourrit plus de 4 milliards d'habitants dans le monde (FAO, 2001). C'est l'aliment de base de 17 pays d'Asie et du Pacifique, 8 pays en Afrique, 7 pays d'Amérique latine et des Caraïbes, et 1 pays du Proche-Orient (FAO, 2004). Dans les

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

pays en développement, le riz représente 27% de l'apport énergétique et 20 % des protéines alimentaires (FAO, 2004).

L'Afrique de l'Ouest constitue la principale zone de production de riz en Afrique. Le Nigeria, où le riz est devenu un produit stratégique de l'économie, avec un marché d'environ un milliard de dollars américain, en est le plus grand producteur avec 46% des volumes produits (Mollard et Walter, 2008). Il est suivi de la Côte d'Ivoire (13%), du Mali et de la Guinée (12%). A noter que la production rizicole ivoirienne a cependant baissé de 20% depuis 2001 du fait du conflit armé et de la disponibilité insuffisante des intrants agricoles (Roger et Le Mer, 1999).

Depuis quelques années, le riz fait partie des céréales les plus consommées au Bénin. Autrefois considérée comme un aliment de luxe essentiellement consommé les jours de fête, cette céréale occupe une place de plus en plus importante dans l'alimentation quotidienne des populations. Elle occupe d'ailleurs la troisième place en termes de production de céréales après le maïs et le sorgho (Abel, 2009) et représente la deuxième céréale en termes de consommation après le maïs (CCR-B, 2011). Le riz bénéficie de nos jours d'un grand intérêt politique dans le cadre du développement des filières. La quantité moyenne de riz consommée par an par habitant est de l'ordre de 25 à 30 kg, soit une consommation totale annuelle variant entre 175 000 et 210 000 T, d'après les données de la SNDR (2011). Les besoins en consommation augmentent de jour en jour alors que la

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche
capacité de production nationale ne parvient pas à y faire face.

En effet, le riz est une source de magnésium; il contient de la niacine, de la vitamine B6, de la thiamine, du phosphore, du zinc et du cuivre ainsi que des traces d'acide pantothénique, de potassium et du fer chez certaines variétés. Selon Truswell (2002), le riz est riche en glucides complexes; il est le féculent le plus facile et le plus rapide à digérer ne comportant qu'une faible teneur en matières grasses. Il est une source de protéines, contenant les huit acides aminés indispensables sans cholestérol (Truswell, 2002). Des études effectuées par Watanabe et *al.*, (2004) ont montré que les variétés de *O. glaberrima* ont un taux plus élevé en protéine (en moyenne 11,56%) que celles d'*O. sativa*(en moyenne 7,86%). De plus, cette étude a confirmé les résultats d'Olufowe (1979) qui stipulent que le taux de protéine dans les grains de *O. glaberrima* est supérieur à 11%. Les grains de 72% des NERICA testés ont des teneurs en protéine plus ou moins élevées (en général 9,51 à 11,69%) que celles des parents; de plus, leurs teneurs en protéines sont de 25% plus élevées que celui de certains riz importés. Le riz blanc est l'une des céréales les plus pauvres en protéines (certaines variétés améliorées en fournissent cependant jusqu'à 14 g pour 100 g) à cause de l'absence de la couche d'aleurone, cette dernière étant riche en protéines (Mollard et Walter, 2008).

Outre son usage comme aliment de base, le riz est utilisé dans la production d'amidon, de poudre de riz, de glucose,

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

d'acide acétique, d'alcool fermenté ou non et de bière (Danvi et Assigbé, 2003). Les balles de riz servent de combustibles et les cendres d'engrais; la paille est utilisée d'une part comme litière et d'autre part comme matière première dans la fabrication de pâte à papier ou dans la fabrication du papier mural (CIRAD-GRET, 2002).

Malgré les potentialités dont dispose le pays, le Bénin occupait une position relativement marginale dans la production de riz en Afrique de l'Ouest. En effet, sa production de riz ne représentait que 3,15 % de la production totale de riz en Afrique de l'Ouest (FAO, 2007).

Avec les différents efforts, la surface emblavée annuellement pour la production de paddy selon DPP/MAEP a régulièrement augmenté avec des baisses respectivement en 2003-2004 (23 440 ha), 2007-2008 (25 531 ha) et 2014-2015 (78 048 ha).

Selon la même source, l'évolution de la production de paddy reste semblable à celle de la superficie avec des chutes de production en 1999-2000 (34 040 T), en 2003-2004 (54 183 T), en 2006-2007 (61 818 T) et en 2014-2015 (234 145 T).

Durant toute la période, le rendement annuel moyen a dépassé une seule fois la barre des 3t/ha pour atteindre 3,285 t/ha en 2009-2010, suite aux efforts consentis par différentes structures en l'occurrence le Programme d'Urgence d'Appui à la Sécurité Alimentaire (PUASA) qui a mis d'importantes

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche quantités d'engrais en place et la gratuité des semences certifiées.

- En dépit des performances observées aussi bien au niveau de la production que du rendement, la production locale est loin de couvrir les besoins de la population en consommation du riz. Ces besoins qui étaient de 30 000 tonnes de riz dans les années 1960 pour une population de 2 millions d'habitants sont de 80 000 t en 2003 pour une population de 6,7 millions d'habitants. Ainsi, de 24 500 t de déficit dans les années 1960, le déficit est passé à plus de 50 000 t en 2003 et à plus de 100 000 t en 2012. Ce déficit chronique du solde national en riz ouvre la porte aux importations y compris les dons. La situation de production et de consommation du riz au Bénin en 2015 se présente comme ci-après :
- Selon la DPP/MAEP la production du riz en 2015 est estimée à 234 145 tonnes de riz paddy soit environ 150 000 tonnes de riz blanc.
- Selon Africarice, la consommation du riz par habitant et par an est au Bénin est de 46,1 Kg en 2015 et la consommation globale de riz usiné et résiduel dans le pays est de 501 000 tonnes.
- Selon la même source le Bénin a un déficit de 350 000 tonnes de riz usiné importées pour la consommation.

1.7 Conclusion et hypothèses de recherche

Au Bénin, la promotion de la riziculture a toujours été perçue comme une nécessité depuis les années 60. Les différents plans de développement économique et social ont toujours mis en exergue que le Bénin « peut produire sur son sol non seulement de quoi satisfaire les besoins de sa consommation en riz, mais aussi une partie des besoins de ses voisins, notamment le Nigéria ». Toutefois, la disponibilité et l'utilisation effective de variétés performantes, la faiblesse des espaces aménagés, la pénibilité des opérations post-récolte (battage, décorticage, etc.), le taux élevé de brisures (30% en moyenne) et la non disponibilité d'engrais spécifiques ont longtemps constitué et constituent encore des facteurs limitants.

Aujourd'hui, la mise au point des variétés de riz NERICA (New Rice Cultivars for Africa) offre des opportunités d'amélioration de la productivité et suscite un engouement remarquable chez les producteurs et les opérateurs privés. De plus, l'augmentation constante de la population des pays à forte tradition rizicole et la stagnation de leur production, pourraient dégager à moyen et long termes un espace de placement du riz local que le Bénin mettra à profit. La forte tendance à la dépendance vis-à-vis du riz importé doit être inversée en œuvrant pour un accroissement de la production nationale de riz de qualité marchande et à un prix compétitif.

Dans les bas-fonds, la production du riz de bas-fond est confrontée à plusieurs contraintes dont les principales sont la

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

baisse de la fertilité des sols due à la monoculture de riz et la présence de la toxicité ferreuse (Sahrawat, 2004).

Les bas-fonds du sud Bénin, bien que favorables à la production du riz présentent certaines caractéristiques parfois défavorables à une bonne conduite de la culture du riz. C'est pour répondre à certaines préoccupations des producteurs et favoriser l'intensification de la production du riz qu'on se propose d'approfondir les connaissances sur les phénomènes d'oxydoréduction dans les bas-fonds.

L'hypothèse centrale de cette étude stipule que les modes de distribution de l'eau dans le bas-fond selon sa toposéquence influence le phénomène de la toxicité ferreuse et a un impact sur la production du riz. Pour valider cette hypothèse centrale, il est nécessaire de répondre à certaines questions à travers :

- ✓ les perceptions de la toxicité ferreuse diffèrent selon les catégories de producteurs ;
- ✓ la lame d'eau influence l'évolution des stocks de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, P_2O_5 , NO_3^- du sol selon les modes de répartition toposéquentielle de l'eau ;
- ✓ le temps de séjour de l'eau influence l'évolution des stocks de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, P_2O_5 , NO_3^- du sol selon les modes de répartition toposéquentielle de l'eau ;
- ✓ La présence de Fe_2O_3 , FeO , P_2O_5 , NO_3^- , influence les caractéristiques physico-chimiques du sol ;
- ✓ Les modes de répartition de l'eau influe significativement l'évolution des déterminants

Chapitre 1 : Etat des connaissances et hypothèses de recherche

édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse ;

- ✓ Les modes de répartition de l'eau à écoulement naturel a un fort potentiel de dégagement du dioxyde de carbone (CO₂) par rapport aux modes de répartition toposéquentielle de l'eau ;
- ✓ Il y a une relation forte et significative entre les déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse et le rendement du riz considérant les modes de répartition toposéquentielle de l'eau ;
- ✓ le rendement en riz paddy varie significativement suivant les modes de répartition toposéquentielle de l'eau.

Cette étude intitulée « Phénomène de la toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizicoles au Sud-Bénin: perceptions locales, variabilité et impacts des différents modes de répartition toposéquentielle de l'eau » a été essentiellement axée sur la perception locale de la toxicité ferreuse et sur les paramètres physiques et chimiques des sols du bas-fond influençant la production rizicole. Elle vise à améliorer la production rizicole dans les bas-fonds du Sud-Bénin.

Chapitre 2: Cadre d'étude et Methodologie générale

L'objet de ce chapitre est de présenter dans un premier temps, le cadre de l'étude à travers ses caractéristiques climatiques, pédologiques géologiques, géographiques, hydrologiques et démographiques. Dans un second temps, les différentes méthodes utilisées pour le test des hypothèses ont été présentées dans la section méthodologie générale. Les méthodes d'analyses des données ont été décrites de façon succincte. Au niveau de la méthodologie générale nous avons pris en compte le matériel et les méthodes qui sont communs aux chapitres pour éviter leur répétition. Mais au niveau des chapitres le détail est fait sur les méthodes spécifiques au test des hypothèses. Ce manuscrit ayant respecté la forme d'une "thèse articles", nous n'avons pas pu éviter certaines répétitions dans les résultats.

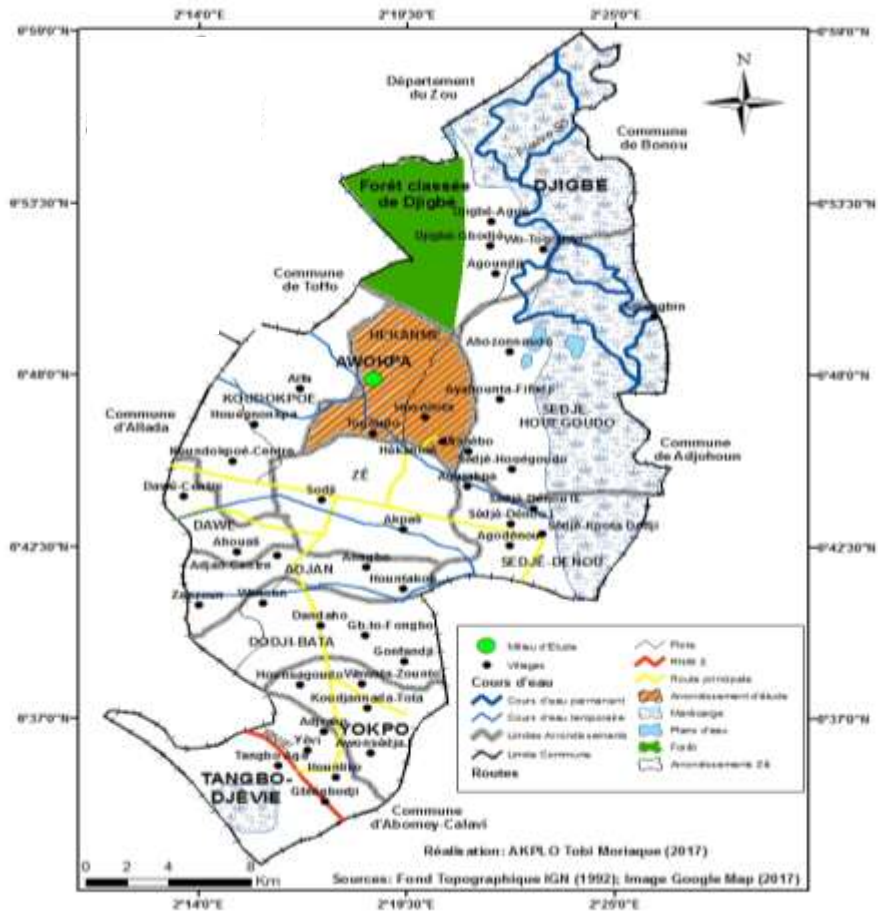
2.1 Cadre d'étude

Le bas-fond d'Awokpa situé dans la commune de Zè a servi de cadre à notre étude. Il a été choisi pour l'étude car malgré son aménagement sommaire, les producteurs continuent de subir les conséquences de la toxicité ferreuse (Gbèto Dansou, 2015) sur la production du riz. Ce bas-fond est destiné à la production semencière au sud Bénin de la variété NERICA-L20 du riz.

La commune de Zè, subdivision administrative du département de l'Atlantique, est comprise entre 6°32 et 6°87 de latitude Nord d'une part et entre 2°13 et 2°26 de longitude Est d'autre part. Avec une superficie de 653 km², elle est la commune la plus

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

vaste du Département dont elle occupe 19,88% du territoire. Elle est limitée au Nord par les communes de Zogbodomey et de Toffo, au Sud par les communes d'Abomey-Calavi et de Tori-Bossito, à l'Est par les communes d'Adjohoun et de Bonou, à l'Ouest par la commune d'Allada (figure 2.1).



Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

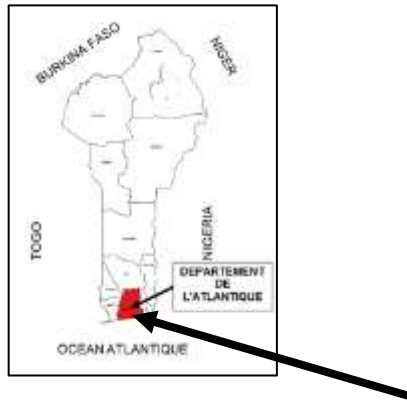


Figure 2.1: Carte administrative de la commune de Zè

Relief

Le relief de la Commune de Zè est un élément du vaste plateau d'Allada d'une altitude moyenne de 100m qui s'incline légèrement vers la côte et surplombe au Nord la dépression de la Lama. Il est composé de quelques petites dépressions constituées de bas-fonds. Les formations géologiques qui composent ce relief sont constituées essentiellement de dépôts sablo-argileux altérés en faciès de terre de barre.

Climat

Le climat de la commune de Zè est de type béninien marqué par des hauteurs pluviométriques de 1000 mm de pluie en moyenne, une amplitude thermique annuelle relativement faible (inférieure à 5°C) et par une succession de quatre saisons distinctes :

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

- Une grande saison pluvieuse d'Avril à Juillet (700 à 800 mm d'eau en 31 jours de pluie) ;
- Une petite saison pluvieuse de Septembre à Novembre (400 à 500 mm d'eau en 21 jours de pluie) ;
- Une grande saison sèche de Décembre à Mars ;
- une petite saison sèche centrée sur le mois d'Aout.

Enfin, les manifestations de l'harmattan se font sentir à partir de la 3^{ème} décade de décembre et s'étendent jusqu'au mois de février.

Hydrographie

Le réseau hydrographique n'est pas dense et est très localisé. En effet, seule la zone

Nord de la commune est irriguée par les affluents du fleuve Ouémé tels que la Sô. Plusieurs bas-fonds parsèment le territoire de la communesurtout dans les arrondissements de Hèkanme, Sèdjè, Houégoudo, Djigbé, Dodji-Bata. Cette situation favorise le développement de la riziculture, des cultures de contre-saison et de décrue, sans oublier la pisciculture.

Géologie,

La géologie des sols est composée de :

- Couverture sédimentaire récente dans la zone nord-ouest : elle est faite de formations sablo-argileuse et gravillonnaire ;

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

- Couverture sédimentaire du continental terminal sur le reste du territoire : elle est faite de sable, d'argile et de grès.

Sols et végétations

Le territoire de la Commune est dominé par des sols faiblement ferrallitiques communément appelés terre de barre. Les terres sont de teinte rouge et servent de support à toutes les cultures pluviales. Les sols hydromorphes à horizon superficiel gris assez riche constituent le substrat des plans d'eau et des bas-fonds.

Le couvert végétal s'articule autour de quatre ensembles à savoir : les forêts claires et formations boisées dont la forêt classée de Djigbé (3441 ha), les formations arborées et arbustives, les formations aquatiques et les plantations d'*Elaeis guineensis* (palmier à huile) d'une superficie de 3056 ha installées par la SONADER et gérées actuellement par des Coopératives d'Aménagement Rural (CAR). L'on peut y rencontrer des espèces telles que *Milicia Excelsa* (Iroko), *Ceiba pentandra* (Fromager), *Adansonia digitata* (baobab), *Thalia welwischii*, *Nymphea Lotus* etc.

Le bassin-versant du bas-fond est pratiquement exploité ou mis en jachère. On y rencontre diverses cultures annuelles (maïs, manioc, ananas, niébé, arachide, taro etc.) et pérennes (palmier à huile, manguiers, orangers, citronniers, bananier, teck, accacias etc.).

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

Données démographiques

Le recensement Général de la Population et de l'Habitation (R G P H) de 2013 estime la population de la Commune de Zè à **106 913** hts soit 7,64% de la population du département de l'Atlantique av un taux d'accroissement de 2,78%. D'une densité de 164hts/km² soit la plus faible du département, elle est composée de 51 704 hommes et de 55 209 femmes et est à ma majorité rurale (84,92%). Elle s'étend sur une superficie de 653 km².

2.2 Méthodologie générale

La méthodologie générale de recherche adoptée peut se définir à partir des étapes d'étude prévues et des méthodes mises en oeuvre. Son élaboration tient compte des objectifs spécifiques et du chronogramme.

2.2.1. Caractérisations physiques et chimiques du sol du bas-fond

Installation et description de profils pédologiques sur une toposéquence du bas bas-fond d'Awokpa

Selon la topo-séquence du bas-fond, trois profils pédologiques ont été installés. Il s'agit de :

- un premier profil qui se situe au niveau de la rupture de pente à une altitude de 25 m et à une pente inférieure à 2% (Figure 4a)
- un deuxième profil qui se situe à mi-pente au niveau du lit mineur secondaire de l'axe d'écoulement des eaux du

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

bas-fond à une altitude de 25m avec une micro topographie plate (Figure 4b)

- un troisième profil qui est proche de la rivière Awo toujours à une altitude de 25m avec une microtopographie quasi plate. (Figure 4c)

La description de chacun de ces profils pédologiques a permis d'avoir les résultats ci-après :



Figure 2.2: Profil pédologique du sol de haut de pente du bas-fond (P1)

➤ Description du profil situé en Haut de Pente (P1) :

- 0 – 8cm : couleur brun; taches ocres rouge, peu nombreuses, nettes ; Limon sableux ; structure faiblement développée, polyédrique subangulaire ; consistance friable à frais ; poreux, nombreux pores de toutes tailles ; nombreuses très fines et fines racines ; activité biologique intense, terricule de vers de terre et débris de charbon de bois ; transition distincte et régulière.
- 8 – 25 cm : couleur gris brun clair et brun olive; taches rouges, assez nombreuses et nettes ; limon argilo – sableux ; structure faiblement développée, débit angulaire ; consistance peu collante, non plastique ; peu poreux ; assez nombreuses très fines racines, peu nombreuses moyennes ; activité biologique peu intense ; transition distincte et régulière.

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

- 25 – 40cm : couleur brun; taches rouge, marron, jaunatre, assez nettes, nombreuses et distinctes (presque bariolées) ; limon argilo – sableux à limon sableux; structure massive in situ, débit polyédrique subangulaire moyen ; consistance non collante, non plastique ; peu poreux ; assez nombreuses très fines racines ; quelques nodules fero-manganiques, peu nombreuses moyennes ; activité biologique ralentie ; transition distincte et régulière.
- 40 – 70cm : couleur brune; pas de taches ; sableux ; structure fondue; consistance non collante, non plastique ; très peu poreux ; assez nombreuses très fines, fineset moyennes racines verticales ; nappe à 70cm



➤ Description du profil situé à mi-pente (P2)

0 – 32cm : horizon tourbeux gris ; structure grumeleuse ; non collant, non plastique ; une activité biologique trèsintense, présence de terricule de vers de terre ; nombreuses très fines et fines racines ; nappe à 32cm.

Figure 2.3: Profil pédologique du sol de mi- pente du bas-fond (P2)

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale



➤ Description des horizons du troisième profil (P3)

- 0 – 20cm : horizon gris, couleur Brun grisâtre, tourbeux en surface ; Limon; structure grumeleuse, non collant non plastique ; poreux ; abondantes fines, très fines et moyennes racines ; activité biologique très intense, terricule de vers de terre ; transition distincte et régulière.
- 20 – 40 cm : couleur brun grisâtre foncé; argileux ; structure massive faiblement développée, polyédrique subangulaire ; très nombreuses fines, très fines et moyennes racines ; activité biologique peu intense ; nappe à 40cm.

Figure 2.4: Profil pédologique du profil du sol en bas de pente (P3)

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

D'une manière générale, cette description des profils permet de dire que le bas-fond d'Awokpa a un sol hydromorphe, sablo-limoneux en haut de pente et limon sableux à drainage pauvre reposant sur un horizon de sable en mi et bas de pente. Les systèmes racinaires sont assez bien développés et constitués de racines très fines, fines et moyennes. Il a une structure faible dans l'ensemble, à débit polyédrique subangulaire avec des activités biologiques développées dans les deux premiers horizons et avec la présence de terricules de vers de terre.

2.2.2. Pluviométrie de la zone d'étude

L'expérimentation s'est déroulée du mois d'août au mois de décembre de 2014 à 2015 et la pluviométrie correspondante est respectivement de 513,36 mm en 28 jours et 188,60 mm en 14 jours. Selon le CARDER Atlantique/Littoral/MAEP, rapport annuel 2014 et 2015, la pluviométrie de la Zone d'étude est la suivante)

Tableau 2.1: Pluviométrie de la zone d'expérimentation

MOIS	Année 2014		Année 2015	
	Hteur (mm)	Nbre de jours	Hteur (mm)	Nbre de jours
Janvier	44,28	3	28,20	2
Février	189,72	6	28,20	1
Mars	85,56	6	146,16	7
Avril	175,56	7	89,28	4
Mai	98,64	6	107,4	6
Juin	89,64	4	102	5

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

Juillet	61,68	3	60	1
Aout	195,60	7	27,6	1
Septembre	100,8	8	12	1
Octobre	139,68	9	59	7
Novembre	33	1	90	5
Décembre	44,28	3	0	0
Total	1187,76	60	750,68	40

Source : CARDER Atlantique/Littoral / MAEP, rapport annuel 2014 et 2015

Il y a une forte disparité dans la répartition des pluies des deux années et surtout pendant la période de conduite des essais. Les lames d'eau observées dans les casiers ont en 2015 baissé et les parcelles en bas de pente ont parfois fonctionné comme celles qui sont en mi-pente.

2..2.3. Définition des différents modes de répartition de l'eau selon la toposéquence du bas-fond

Gbèto Dansou *et al.*, (2015) ont répertorié trois modes de répartition de l'eau par les producteurs du bas-fond d'Awokpa pour faire face au problème de la toxicité ferreuse. Ces trois modes ont été définis en tenant compte de la toposéquence du bas-fond. Ils ont été considérés comme des traitements pour la conduite de l'essai. Il s'agit du : mode d'écoulement naturel de l'eau des casiers rizicoles (EN), inondation suivie de drainage (ID) et inondation permanente du casier rizicole (IP).

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

- Ecoulement naturel des eaux et captage d'une partie des eaux : c'est une pratique que les producteurs ont adoptée pour exploiter le bas-fond au-delà des endroits d'étalement des eaux. C'est un mode d'inondation du site qui est observé au bord du bas-fond, en haut de pente et surtout au niveau des premiers casiers.
- Inondation suivie de drainage : c'est une pratique que les producteurs ont adoptée pour évacuer l'excédent des eaux venues du plateau et du débordement des eaux de la rivière Awo et pour irriguer les casiers rizicoles en cas d'installation d'un trou de sécheresse. Elle consiste à installer des diguettes autour du casier pour retenir de l'eau en cas de nécessité et ouvrir un drain pour évacuer les eaux excédentaires.
- Inondation permanente : c'est une pratique qui est observée au niveau des parcelles situées aux endroits où ni les principaux drains, ni les drains secondaires ne peuvent évacuer les eaux excédentaires vers la rivière Awo. Ce sont des parcelles qui se situent parfois en dessous du niveau de la rivière.

2.2.4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est "Spatially-balanced complete block design", qui est un plan factoriel à deux facteurs à savoir : mode de répartition toposéquentielle de l'eau à trois niveaux, blocs à quatre niveaux. Les blocs représentent le facteur principal et ont été installés sur les différentes parties de la pente transversale du bas-fond à savoir le haut de pente, mi- pente et

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

bas de pente (Figure 2). Chaque bloc comporte trois unités expérimentales correspondant aux trois modes de répartition de l'eau dans le bas-fond qui constituent les traitements. Chaque unité expérimentale correspond aux casiers rizicoles ayant une superficie de 400 m² (20 m x 20 m). Pour le contrôle de la variabilité intra-parcellaire, des micro-parcelles de 4 m² (2m x 2m) de superficie ont été implantées à l'intérieur des parcelles. Elles ont été installées sur la diagonale des unités parcellaires. La figure 3 présente le schéma du dispositif expérimental. Les plants de riz ont été repiqués avec un écartement de 20 cm x 20 cm correspondant à une densité de 100 plants par micro-parcelle.

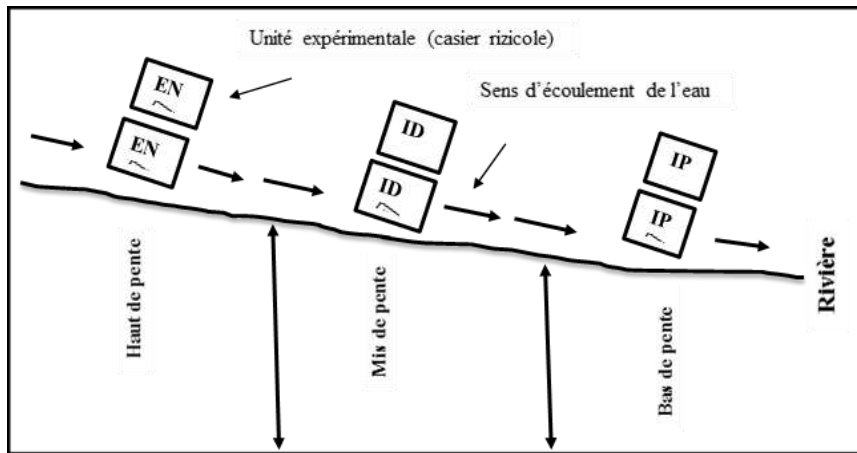


Figure 2.5: Schéma de l'installation des parcelles expérimentales suivant la toposéquence du bas-fond

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

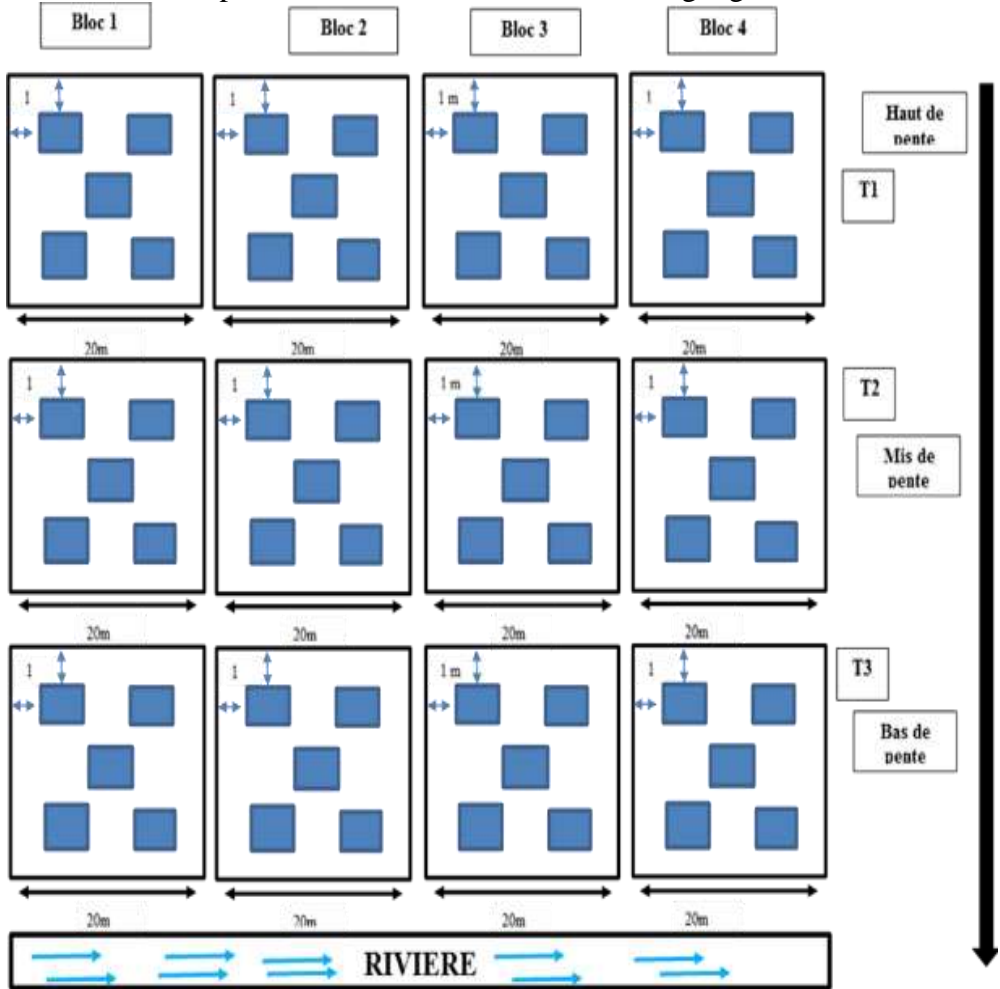


Figure 2.6: Schéma du dispositif expérimental

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

2.2.5. Collecte des données

Collecte des données

Le suivi de l'essai a duré quatre mois (Juillet – Novembre 2015) et les paramètres de croissance et de production des plants ont été collectés au niveau de chaque traitement.

Le matériel végétal qui est utilisé dans le cadre de la conduite de cet essai est la variété de riz NERICA-L20. Cette variété de riz a été sélectionnée par l'Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest (ADRAO) et est adaptée à la culture du riz dans les bas-fonds (Sié *et al.*, 2013) ce qui justifie d'ailleurs le nom de NERICA L20, L étant '*Lowland*' qui signifie *bas-fond*'. Elle a un cycle semis-épiaison de 89 jours et arrive à semi maturité après 110 jours. Deux différentes sortes d'engrais minéraux ont été utilisées: l'engrais "coton" (N:P:K :S :B,23 :14 :23 :5 :1) et l'urée. L'engrais NPK est apporté en fumure de fond et l'urée en fumure d'entretien. La dose totale utilisée de N:P:K est de 82:32:30 kg ha⁻¹. Il est recommandé d'apporter l'urée en couverture en deux fractions, 35% au début tallage (DT) et 65% à l'initiation paniculaire (IP). ". Son rendement potentiel varie entre 5 et 7 t/ha avec un poids de 1000 grains de 31,28g. Le NERICA L20 est résistant à la pyriculariose, à l'égrenage et aux stress abiotiques (la sécheresse, la salinité, le froid et la toxicité ferreuse).

La hauteur des plants a été déterminée à partir de 30 jours après repiquage (JAR) et à un intervalle de 30 jours jusqu'à la

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

récolte (soit 30, 60, 90 et 120 JAR). La mesure a été effectuée au niveau de la talle principale de 10 plants par micro parcelle. Le nombre de talles par plant a été déterminé à 60 JAR par un simple comptage à la fin de la phase de l'initiation paniculaire. Chacun des 10 plants retenus par traitement a été arraché et transporté au laboratoire pour la prise des mesures de nombre de talles, denombre de talles fertiles, de biomasse sèche, de mombre de panicules par plant, du poids du rendement en grains frais et secs des paddy, et le poids des 1000 grains. Des coupes au ras du sol ont été effectuées par micro parcelle sur le reste des plants à la récolte. Ces plants ont subi le battage et le vannage et le riz paddy obtenu est pesé à l'aide d'une balance de précision au laboratoire. Le poids frais de paille et des panicules par plant a été pris et un séchage à l'étuve pendant 72 h à 60°C a permis la détermination de la matière sèche.

2.2.6 Analyse physicochimiques des échantillons

Selon le dispositif expérimental installé, des échantillons de sol sont prélevés au niveau de chaque micro-parcelle qui correspond à un prélèvement par la méthode en zigzag (Mathieu et Pieltain, 2003). Le prélèvement est fait à trois profondeurs à savoir : de 0 à 10 cm, de 10 à 20cm et de 20 à 30 cm. Les échantillons de même couche de prélèvement sont mélangés afin d'avoir un échantillon composite par profondeur représentatif de la parcelle à partir de trois échantillons de sol prélevés par micro-parcelle. Les échantillons ont été émiettés, débarrassés des racines grossières, séchés à l'air libre pendant quelques semaines, puis passés au tamis à mailles de 2 mm de diamètre.

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

Ces échantillons composites prélevés ont servi à la détermination de la granulométrie, du pH, de la teneur en carbone organique, de l'azote total, du phosphore assimilable, des bases échangeables, du fer libre et du fer ferreux. Les méthodes utilisées pour chaque analyse se présentent comme suit :

- La granulométrie: par la méthode internationale d'utilisation de la pipette de Robinson ;
- Le pH (eau): par la méthode potentiométrique dans un rapport sol/eau distillée de 1/2,5. La valeur du pH est lue grâce à un pH-mètre;
- La teneur en carbone organique: par calcination, consistant à prélever une aliquote de 5g de sol sec tamisé et broyé à 0,2 mm et mis à l'étuve pendant 24h à 105°C qu'on soumet à une combustion au four à moufle à 700°C. La teneur en matière organique est calculée par différence de poids initial et final. On admet que l'eau de constitution représente 10% du poids de l'argile avec pour terme correctif, le dixième du taux d'argile de l'échantillon de sol considéré. La teneur en carbone organique est obtenue en divisant la teneur en matière organique par 1,724 ;
- L'Azote : l'azote total est déterminé par la méthode de Kjeldahl (1883). Cette méthode consiste à minéraliser le sol par l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré en présence d'un comprimé de sélénium (servant de catalyseur). La distillation est faite par entraînement de la vapeur en présence de 50 ml de NaOH 30%. Le distillat

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

est recueilli dans un erlenmeyer qui contient 20 ml d'acide borique (H_3BO_3) et 4 gouttes d'indicateur à base de rouge de méthyle. Le titrage est fait avec l'acide sulfurique (H_2SO_4) 0,1 N

- Le phosphore assimilable par la méthode Bray 1. La solution d'extraction est composée de NH_4F et de HCl . Le filtrat est coloré par le molybdate d'ammonium en présence de l'acide ascorbique et l'intensité de la coloration est déterminée par colorimétrie à une longueur d'onde de 660 nm;
- Les bases échangeables (K^+ , Ca^{2+} Mg^{2+}): par la méthode de Metson à acétate d'ammonium (1 N) à pH = 7. Le dosage de ces bases s'est fait au spectrophotomètre à absorption atomique.
- le fer libre par la méthode de Tamm(1922) au spectromètre à absorption atomique).
- Le fer ferreux par la méthode de Ignatieff(1941) dont l'extraction a été faite sur échantillon de sol frais prélevé directement in situ avec du chlorure d'aluminium à 3% et lu au spectrophotomètre à absorption atomique.
- Les mesures du potentiel redox (Eh) et du potentiel hydrogène (pH) ont été réalisées directement sur le site à l'aide du pH LETTER pc 228 au fur et à mesure que l'échantillon est prélevé tous les 15 jours pendant le cycle de développement du riz.

Chapitre 2 : Cadre d'étude et Méthodologie générale

2.2.7 Analyse statistique des données

Le modèle PROC-GLM du logiciel Statistical Analysis System (SAS v. 9.2) a été utilisé pour les analyses statistiques. Ces analyses ont consisté en des analyses de la variance (ANOVA) à deux facteurs : les modes d'inondation et les trois horizons de sol considérés. Les moyennes ont été comparées par le test de Student Newman-Keuls au seuil de 5% entre les stocks totaux de carbone respectivement dans le sol et dans les fractions d'une part et l'effet des modes d'inondation aussi bien sur le dégagement du CO₂ que sur les paramètres agronomiques du riz mesurés d'autre part. Le logiciel Minitab 17 a été utilisé pour établir la corrélation de Pearson entre la quantité de CO₂ dégagée et la teneur en carbone du sol.

DEUXIEME PARTIE
ETUDE DU PHENOMENE
D'OXYDO-REDUCTION ET DE
LA TOXICITE FERREUSE
DANS LE BAS-FOND

Deuxième partie : Etude du phénomène d'oxydo-réduction et de la toxicité ferreuse dans le bas-fond rizicole

Chapitre 3: Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

La toxicité ferreuse est un désordre nutritionnel induit par la présence excessive du fer ferreux dans la solution du sol. Elle présente plusieurs contraintes pour la production rizicole qui ne sont pas méconnues des producteurs. Toutefois, quelques questions fondamentales restent actuellement posées : quelle est la perception locale des producteurs sur le phénomène de la toxicité ferreuse ? Une fois la perception du phénomène connue alors quelles sont les solutions endogènes utilisées.

Les résultats de ce chapitre ont été présentés sous la forme d'un article scientifique publié dans une revue indexée. Cet article est référencé comme suit :

GBÈTO DANSOU G. Jean, AMADJI L. Guillaume, GLELE KAKAI L. Romain, VISSOH V. Pierre. 2015. Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégies de lutte au Sud-Bénin (Afrique de l'Ouest). Rev. CAMES - Vol.03. Num.01. 2015. ISSN 2424-7235. Science de la vie, de la terre et agronomie. Botany 138 (1): 47-56.

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

3.1. Introduction

Le riz fait l'objet d'une demande en augmentation croissante et sa production au Bénin, bien qu'étant passée de 16.545 tonnes en 1995 à 72.960 tonnes en 2007, laisse place à des importations massives (378.000 tonnes en 2005 et 350.000 tonnes en 2007) destinées à la consommation interne (60.000 tonnes environ) et aux réexportations (MAEP, 2012). Les actions de promotion de la riziculture méritent d'être intensifiées pour atteindre en 2015 la production de 385000 tonnes de paddy pour saisir les opportunités de marché liées à la flambée des prix des denrées de grande consommation et pour conforter les stocks de sécurité alimentaire, (MAEP, 2012).

La riziculture se pratique dans des bas-fonds qui sont généralement non aménagés avec des rendements encore inférieurs à la moyenne nationale estimée à 3 tonnes à l'hectare. Ce faible rendement est une conséquence directe des pratiques agricoles non adéquates avec comme corolaire la toxicité ferreuse alors que la riziculture irriguée ou inondée représente 80% de la superficie rizicole totale et occupe 92% de la population (Achim et Fairhurst, 2000). Les oligo-éléments comme le zinc, le manganèse et le fer qui interviennent en petite quantité pour maintenir la croissance normale de la plante, en quantité élevée, ces oligo-éléments sont nuisibles à la plante. Tel est le cas du fer dans la rizière. La toxicité ferreuse est un problème important en Afrique de l'ouest particulièrement au Bénin dans les bas-fonds dont la topographie y est favorable (WARDA, 2002). La perte moyenne de rendement due à la

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

toxicité ferreuse atteint les 50 % et en fait va de 10 à 100 % (Masajo et al, 1986; Abifarin, 1988 et 1989). La toxicité ferreuse apparaît lorsque, sous l'effet réducteur du milieu, les bactéries mettent en place une respiration anaérobie libérant de grandes quantités d'ion ferreux (Fe^{2+}) dans la solution. Ces quantités d'ion ferreux solubles entraînent un déséquilibre en éléments de la solution du sol qui se répercute au niveau de la plante (Bode et al, 1995). En raison du non aménagement de la plupart des bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest, le drainage naturel est limité généralement par un encombrement de l'exutoire entraînant l'engorgement complet du bas-fond au cours de la saison des pluies. Ainsi, les conditions favorables (milieu réducteur des bas fonds) sont souvent réunies pour l'expression de la toxicité ferreuse (Kosaki et al, 1986; Okusami, 1986). Alors que la perception du phénomène pourrait varier selon les acteurs (producteurs et techniciens), et que cette divergence peut créer des difficultés dans l'harmonisation des méthodes de lutte sur le terrain, la compréhension de la perception des producteurs permettra de mieux les comprendre et de mieux les associer à la lutte contre la toxicité ferreuse. Selon Assogbadjo, (2005) la compréhension des connaissances des populations locales permet une meilleure gestion et une conservation durable des ressources naturelles. La compréhension des connaissances des populations locales permet d'appréhender les mécanismes qui gouvernent l'exploitation de la ressource, leur niveau de dépendance, les déterminants socioéconomiques des pratiques afin d'identifier celles qui militent en faveur de la gestion durable de la ressources et de l'amélioration des conditions de

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

vie des acteurs. L'objectif principal de cette étude est d'étudier les perceptions locales de la toxicité ferreuse au niveau des bas-fonds rizicoles selon les modes d'irrigation. Elle permettra d'identifier les techniques endogènes de lutte contre la toxicité ferreuse et de faciliter l'acceptation de leur amélioration.

3.2. Matériel et Méthodes

3.2.1 Milieu d'étude Voir le chapitre 2 « Cadre de l'étude »

3.2.2 Echantillonnage

L'échantillonnage est de type systématique et les unités statistiques sont les exploitants actuels et passés du bas-fond ayant au moins un an d'expérience en riziculture. Tous les 62 exploitants ont été enquêtés.

3.2.3 Analyse de la perception locale de la toxicité ferreuse

Les perceptions des producteurs et leurs explications ont été collectées au moyen d'un questionnaire administré au cours d'un entretien semi-structuré (Michael et Togho, 2002). Cet entretien semi-structuré a été entrepris, auprès des exploitants du bas-fond et aussi auprès des personnes ressources du village. Une enquête plus détaillée a été effectuée, d'Avril à Juin 2012, auprès des producteurs de façon individuelle et a permis de collecter des données sur les manifestations de la toxicité ferreuse. A partir de ces informations, une matrice de données a été élaborée et a permis d'effectuer un test χ^2 d'indépendance pour voir si la survenue de la toxicité ferreuse dépend ou non des modes d'irrigation à savoir : captage d'une partie de l'écoulement naturel des eaux, irrigation et drainage et l'inondation permanente.

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

3.2.4 Typologie des producteurs

La typologie des producteurs suivant la perception de la toxicité ferreuse a été effectuée après catégorisation des producteurs en se basant sur les facteurs (type de producteur et ancienneté). La catégorisation a été effectuée en croisant les deux facteurs. Une fois les catégories de producteurs connues, il a été effectué la typologie des producteurs au moyen d'une analyse factorielle des correspondances (AFC) avec le logiciel Minitab14.

3.2.5 Effet de la toxicité ferreuse sur le rendement en riz paddy

Afin d'évaluer l'effet de la toxicité ferreuse sur le rendement en riz paddy, une analyse de la variance à deux facteurs (type de producteur et manifestation de la toxicité ferreuse) a été effectuée sur les données de rendement collectées au niveau des producteurs. Le modèle utilisé est le GLM (General Linear Model) avec le logiciel Minitab14.

3.2.6 Identification des pratiques paysannes réduisant la toxicité ferreuse

L'identification des pratiques culturelles réductrices de la toxicité ferreuse a été faite en milieu réel pendant la période d'Avril à Juin 2012. Toutes les pratiques paysannes d'irrigation et de drainage des parcelles rizicoles sont répertoriées au moyen de questionnaire et d'observations directes. Ces observations ont été faites sur des champs disponibles au moment des enquêtes. Une analyse de la variance à un facteur (type de pratiques) a été

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

effectuée sur les taux d'infestation au moyen du logiciel Miitab14.

3.3. Résultats et Discussion

3.3.1. Caractéristiques socioprofessionnelles des producteurs

Les riziculteurs du bas-fond d'Awokpa sont majoritairement analphabètes (79%) et travaillent le bas-fond il y a en moyenne $4,30 \pm 0,44$ ans. La superficie cultivée par producteur toute catégorie confondue est de $0,61 \pm 0,08$ ha avec en tête les producteurs qui cultivent le riz destiné à la consommation. Plus des trois quarts (92%) des producteurs observent la toxicité ferreuse sur leurs parcelles et trouvent dans l'ensemble qu'elle empêche le tallage des plants de riz et entraîne un jaunissement des feuilles puis la mort des pieds de riz infestés. Elle se manifeste aussi bien chez ceux qui produisent pour la consommation que ceux qui produisent les semences. Alors que les producteurs de semence étaient plus longtemps en activité dans le bas-fond que ceux de la consommation, ils disposent en moyenne de moins de terre (-30%) que ces derniers. Comme l'on indiqué les producteurs du bas-fond Awokpa, Yamanouchi et Yoshida en 1981 et Fairhurst et Witt en 2002) ont montré que les pieds de riz victimes de la toxicité ferreuse ne tallent plus et meurent.

Le test non-paramétrique de Kruskal Wallis effectué sur les données (scores) de perception a montré que le type de producteur (semencier ou producteur de riz de consommation) et l'ancienneté ont un effet significatif sur la perception de la

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

toxicité ferreuse ($p=0,03$). Ainsi, nous avons fait la catégorisation des producteurs en se basant sur ces deux variables. Ce croisement a donné 4 catégories de producteurs (Tableau I). Les producteurs pour la consommation représentent 49.2% des exploitants du bas-fond ; les producteurs de semence représentent la majorité des exploitants (50.8%), avec 18,0% et 32,8% respectivement pour les jeunes et les anciens producteurs de semence. En effet, les premiers exploitants du bas-fond étaient les producteurs de semence et de plus, être producteur de semence permet d'avoir un marché stable et de l'argent cash. Par contre les producteurs de riz pour la consommation ont l'avantage de vendre leur production mais aussi d'en disposer pour la consommation familiale. Ce dernier cas attire plus de jeunes comme en témoigne les proportions du tableau I. L'accès à la terre dans le bas-fond est tributaire à l'adhésion au groupement des producteurs du site. La parcelle mis à disposition n'est pas rémunérée et le producteur qui y cultive est propriétaire de sa production mais doit s'acquitter de ses devoirs vis-à-vis du groupement. Les activités de production liées à sa parcelle sont sous sa responsabilité.

Tableau 3.1: Répartition des enquêtés selon les catégories de producteurs

Catégorie	Proportion (%)
Aconso	4.92
Jsemence	18.03
Asemence	32.79
Jconso	44.26

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

NB : Aconso = Ancien producteur pour la consommation, Jconso = Jeune producteur pour la consommation, Jsemence = Jeune producteur de semence, Asemence = Ancien producteur de semence.

3.3.2. Pratiques agricoles dans le bas-fond d'Awokpa

Les pratiques paysannes sont intimement liées aux différents modes d'irrigation pratiqués dans le bas-fond. Il s'agit de :

- Ecoulement naturel des eaux et captage d'une partie des eaux : c'est une pratique que les producteurs ont adopté pour exploiter le bas-fond au-delà des endroits d'étalement des eaux. C'est un mode d'irrigation qui est observé au bord du bas-fond et surtout au niveau des premiers casiers. Il consiste à capter une partie des eaux venues du plateau à l'aide des diguettes construites suivant les courbes de niveau.
- Drainage/irrigation : c'est une pratique que les producteurs ont adoptée pour évacuer l'excédent des eaux venues du plateau et du débordement des eaux de la rivière Awo et pour irriguer les casiers rizicoles en cas d'installation d'un trou de sécheresse. Elle consiste à installer des diguettes autour du casier pour retenir de l'eau en cas de nécessité et ouvrir un drain pour drainer les eaux excédentaires.
- Inondation permanente : c'est une pratique qui est observée au niveau des parcelles situées aux endroits où ni les principaux drains, ni les drains secondaires ne peuvent évacuer les eaux excédentaires vers la rivière Awo. Ce sont

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

des parcelles qui se situent parfois en dessous du niveau de la rivière. La seule technique qui peut éviter l'accumulation de l'eau est un planage adéquat.

Le bas-fond étant suffisamment riche en éléments nutritifs au début de l'aménagement, les producteurs n'étaient pas obligés d'utiliser les engrais chimiques. Alors l'itinéraire technique (Tableau 2) adoptée et pratiquée dans le bas-fond par 98% des producteurs au niveau de ce bas-fond ne prenait pas en compte l'engrais de fond. Toutefois une proportion très faible de producteurs (2%) fait un apport de fumure de fond compte tenue de leur position en haut de pente dans le bas et du nombre d'années d'exploitation des mêmes parcelles. Cette part importante de pratiquants de l'itinéraire technique en vigueur devrait permettre une faible occurrence de la toxicité ferreuse. En effet, la toxicité ferreuse ne sévit que sur les sols inondés en permanence par une réduction du fer ferrique (Fe^{3+}) en fer ferreux (Fe^{2+}) par la flore microbienne (Ponnamperuma, 1972). Mais l'inondation et la flore microbienne sont influencées par les pratiques culturales. Ce qui fait que la toxicité ferreuse sévit dans le bas-fond malgré la pratique du drainage dans l'itinéraire technique. En effet, le faible niveau d'aménagement des bas-fonds et la non maîtrise de la gestion de l'eau en Afrique de l'Ouest conduit à des drainages inadéquats et à la recrudescence de la toxicité ferreuse (Kosaki et al, 1986; Okusami, 1986 ; Audebert et Sahrawat, 2000).

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité
ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

Tableau 3.2: Itinéraire technique du riz

Activités	Début	Durée (Jrs)	Observations
Préparation du sol (Défrichage et labour)	15 Juin	15	
Pépinière	15 Juin	15	
Repiquage	1 Juillet	≤ 3	
1 ^{er} sarclage	15 Juillet	3	
2 ^e sarclage	1er aout	3	
3 ^e sarclage	15 aout	3	Si nécessaire
Epuration de semences	1 ^{er} septembre	1	Si nécessaire pour les semences
Lutte contre les ravageurs	15 septembre	30	Utilisation des épouvantails et gardiennage par les enfants
Drainage des casiers inondés	15 juillet Septembre	30 75	Utilisation de canaux secondaires et drainage vers le lit du cours d'eau.
Récolte et séchage au champ	15 octobre	7	Pour le riz de consommation

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

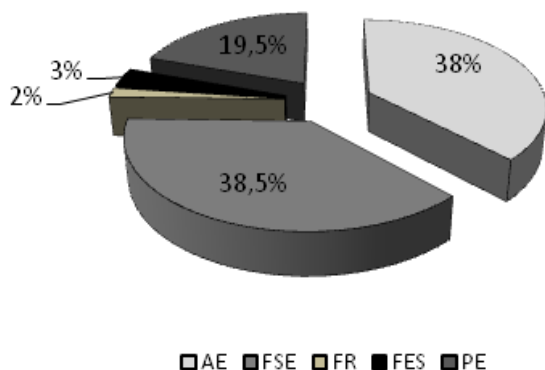
Récolte	25 octobre	7	Pour le riz certifié
Battage et vannage	20 ou 25 octobre	2	
Séchage	25 octobre	3 à 5	
Triage et calibrage	25 octobre	3 à 5	semences certifiées
Conditionnement	-	1	Après séchage et triage
Stockage et conservation	-		Après conditionnement

3.3.3. Perceptions locales de la toxicité ferreuse

Cette pellicule rougeâtre parfois violâtre observée à la surface de l'eau, selon les producteurs, est générée par le bas-fond. En ce moment-là, ils n'ont aucun intérêt à s'intéresser à la survenance du phénomène, à son développement et à son effet sur la production rizicole. Ce n'est qu'à partir de 2001, le début de l'exploitation du bas-fond que les producteurs ont commencé par se faire une idée précise de la toxicité ferreuse. Ces perceptions se résument aux résultats de l'effet de l'eau sur du fer contenu dans le sol (38%), l'accumulation de l'eau (38%), du soleil sur le fer dans l'eau (3%) et du fer ruisselé de l'amont (2%). Par contre, 19% des producteurs n'arrivent pas à expliquer la toxicité ferreuse (Figure 2).

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

Ces perceptions permettent de dire que les producteurs sont conscients que c'est la stagnation de l'eau sur la parcelle qui provoque la toxicité ferreuse. Les résultats de l'analyse de la variance montrent qu'il y a une différence significative ($p=0,008$) entre le nombre de répondants selon les perceptions.



AE = La toxicité ferreuse est la résultante d'une accumulation d'eau, FSE = La toxicité ferreuse est une conséquence de l'effet de l'eau sur du Fer contenu dans le sol, FR = Fer ruisselé, FES = La toxicité est la résultante de l'effet du soleil sur du Fer contenu dans l'eau et PE = Pas d'explication.

Figure 3.1: Perceptions locales de la toxicité ferreuse

3.3.4. Perceptions de la toxicité ferreuse selon les catégories de producteurs

Une Analyse des perceptions de la toxicité ferreuse (Figure 3) montre que les anciens producteurs de riz pour la consommation et les jeunes producteurs de semences la perçoivent comme étant

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

l'effet du fer ruisselé de l'amont et qui sous l'effet du soleil donne la toxicité ferreuse. Par contre, pour les jeunes producteurs de riz de consommation, la toxicité ferreuse est l'effet de l'accumulation de l'eau. Les anciens producteurs de semence pensent qu'elle est le résultat de l'effet de l'accumulation de l'eau sur du fer contenu dans le sol. Le tableau III fait ressortir les différences entre les perceptions des producteurs et celles de la science. Les producteurs perçoivent la toxicité ferreuse comme le contact entre le fer et l'eau pendant un temps suffisant pour observer les pellicules à la surface de l'eau. Mais les causes de la toxicité ferreuse sont nombreuses et variées.

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

Tableau 3.3: Comparaison des perceptions des producteurs à celles scientifiques

Perceptions	Définitions	Référence issue de la bibliographie	Différences	Propositions de stratégies au vu de la perception des populations locales
-------------	-------------	-------------------------------------	-------------	---

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

FR	Le fer peut provenir des plaines par ruissellement ou même par percolation naturelle ou le ruissellement des pistes adjacentes.	La toxicité ferreuse se manifeste dans les rizières lorsque d'importantes quantités de fer (Fe^{2+}) sont mobilisées et accumulées dans la solution du sol. Ce fer peut provenir du bas-fond lui-même ou du transfert de fer solubilisé des pentes adjacentes puis sera transformé en fer ferreux soluble (Diatta et Siband, 1998; ADRAO, 2002 ;	La perception des producteurs n'est qu'une des causes de la survenue de la toxicité ferreuse. Selon la référence bibliographique, même une mauvaise gestion des résidus peut entraîner une toxicité ferreuse.	Il faut une bonne gestion des résidus (sortir les résidus de récolte des parcelles).
----	---	--	---	--

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

FES	<p>Le riz étant exigeant en eau, les riziculteurs limitent l'évacuation de l'eau pour la retenir dans les parcelles et par conséquence créent des conditions optimales pour le développement de la contrainte. Les rayons</p>	<p>Majerus et al, 2007). Toutefois, les litières peuvent libérer par biodégradation des acides organiques susceptibles de former des complexes organo-métalliques qui rendent possible la migration du fer vers des milieux comme les rizières où il précipiterait ensuite sous forme d'hydroxydes (Boquel et Suavin, 1974).</p>	<p>Le producteur n'explique que la manifestation du phénomène.</p>	<p>Il est important de mieux expliquer le phénomène à cette catégorie de producteurs afin de les amener à réduire la survenance de ce phénomène. Il faut un drainage et utiliser le phosphore pour corriger la toxicité ferreuse (Hodomihou et al. 2011).</p>
-----	---	--	--	---

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

	solaires accélèrent le métabolisme des bactéries et par conséquent la réduction du fer.			
AE	La différence avec la précédente perception est qu'il y a absence de rayons solaires.		La perception des producteurs n'est qu'une des causes de la survenue de la toxicité ferreuse.	

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

FSE	<p>En plus de la précédente perception, les producteurs comparent la toxicité ferreuse à l'effet de l'eau sur la lame de la houe, lorsque celle-ci séjourne dans l'eau pendant un certain temps. Il y apparaît à la surface de</p>			
-----	--	--	--	--

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

	l'eau de pellicule résultante de la réduction du fer.			
PE	Ils en sont victimes mais ne peuvent l'expliquer	-	-	

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

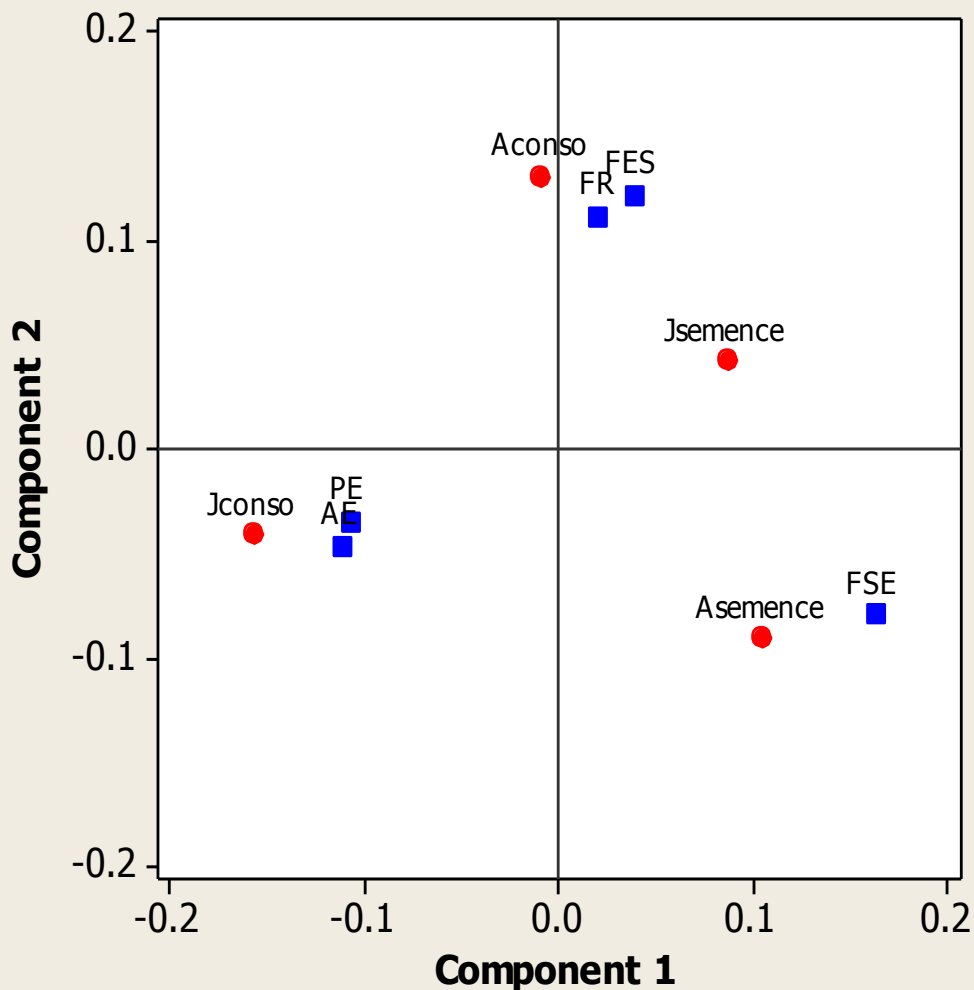


Figure 3.2: Projection des perceptions et des catégories de producteurs dans un référentiel à deux dimensions

3.3.5. Effet des modes d'inondation sur la perception de la toxicité ferreuse

Le test d'indépendance χ^2 de Pearson réalisé sur les perceptions et les modes d'irrigation a montré que la perception de la toxicité ferreuse ne dépend pas ($p=0,829$) du mode d'irrigation. En effet, la recrudescence de la toxicité ferreuse dépend principalement des facteurs comme le taux d'argile/limon, la quantité de Fe échangeable, le pH du sol et la présence de facteurs de stress nutritif. Une large gamme de sols cultivés sont potentiellement toxiques si les conditions physico-chimiques sont remplies telles que les sols acido-sulfuriques (Tinh, 1999); les sols argilo-acides (Deturck, 1994), et les bas-fonds recevant de l'eau venant de l'amont (Sahrawat et Diatta, 1995). Dans les bas-fonds, la concentration en ion ferreux dépend des conditions morphologiques et pédoclimatiques. Il ressort très clairement que la survenue de la toxicité ferreuse dépend des conditions physicochimiques du sol soumises à une stagnation d'eau à moyen et long terme et non aux modes d'irrigation (Ponnamperuma, 1972 ; Kosaki et al, 1986; Okusami, 1986 ; Audebert et Sahrawat, 2000). L'impact des modes d'irrigation sur la survenue de la toxicité pourrait être évalué en investiguant leur effet sur les paramètres physicochimiques du sol du bas-fond.

3.3.6. Effet de la toxicité ferreuse sur le rendement en riz paddy

Le taux d'infestation à la toxicité ferreuse varie de 40 à 100% sur le bas-fond. Ce taux dépend des paramètres tels que la profondeur du réceptacle qui est généralement à la base de la survenance précoce du phénomène. La survenue de la toxicité ferreuse avant le tallage du riz a un effet très néfaste sur sa production qui peut chuter de 80 à 100%. Si le réceptacle n'est pas si profond et que la survenue de la toxicité ferreuse est tardive et observée après le tallage, le taux d'infestation est faible et peut varier de 40 à 60% engendrant un effet moyen ou faible sur la production. Mais la survenue de la toxicité ferreuse après la floraison selon les producteurs n'a pratiquement pas d'effet sur la production. Une analyse de la variance sur les rendements en riz paddy a montré (Tableau 4) qu'il n'y a pas une différence significative ($p=0,085$) entre les producteurs. En effet, la pratique du drainage effectué par les victimes de la toxicité ferreuse a amélioré le rendement. Mais les rendements les plus élevés s'observent avec les producteurs qui ne sont pas victimes de la toxicité ferreuse (Tableau V). Aussi, la catégorie de producteurs n'influence pas le rendement en riz paddy ($p=0,99$) étant donné que les deux catégories ont les mêmes pratiques culturales. Mais le drainage n'est pas pratiqué de la même manière par tous les producteurs. Ce qui fait que le taux d'infestation va jusqu'à 100% dans des parcelles. A la période de conduite de la présente étude, il était difficile de trouver dans le milieu une victime qui n'a pas du tout pratiqué le drainage et qui aurait servi de bon témoin pour prouver

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

l'efficacité du drainage. Par ailleurs en république du Togo, l'évaluation des rendements de 15 variétés de riz dans le bas-fond de Amou-Oblo en 2000 sur des parcelles saines et en 2001 sur des parcelles avec toxicité ferreuse a montré une perte entre 35,8 et 79,8% selon les variétés (Abdoul, 1997 ; Aboa, 2006). Il faut remarquer que les parcelles avec toxicité ferreuse au Togo n'ont pas bénéficié de drainage car c'était une expérimentation qui évaluait l'effet du phénomène sur les rendements de 15 variétés de riz.

Tableau 3.4: Analyse de la variance des Rendements selon la manifestation de la toxicité ferreuse et les catégories de producteurs.

Source	DF	SeqSS	AdjMS	F	P
Toxicite	1	4.161	3.788	3.06	0.085
Type_Prod	1	0.273	0.000	0.00	0.990
Toxicite *Type_Prod	1	0.307	0.307	0.25	0.620

NB : Type_Prod = Types de Producteurs ; Toxicité = Toxicité ferreuse (Présence ou absence) ; DF = Degré de liberté ; SeqSS = Somme des carrés des écarts ; AdjMS = Carré moyen ajusté ; F = Statistique F de Fisher-Snedecor et P = Probabilité.

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

Tableau 3.5: Rendements moyens (tonnes/ha) selon les victimes ou non de la toxicité ferreuse

Variable	Types de Producteurs	Moyen	Erreur type
Victimes	Consommation	3.864	0.134
	Semence	3.665	0.188
Non victimes	consommation	4.375	0.528
	semence	4.58	1.82

3.3.7. Pratiques paysannes réduisant la toxicité ferreuse

Les pratiques qui permettent de réduire cette toxicité sont l'ouverture de drains principaux et secondaires (les drains principaux sont ouverts au niveau du lit mineur et ceux secondaires au niveau des casiers) et du curage des drains et du lit de la rivière. L'analyse du tableau 6 a montré que c'est une partie des jeunes qui n'étaient pas victimes de la toxicité ferreuse alors que tous les autres producteurs en sont victimes. Selon la répartition des parcelles dans le bas-fond, chaque producteur a de parcelles au début du bas-fond, au milieu et au bord de la rivière Awo selon la topo-séquence du bas-fond. Il n'est pas possible selon cette répartition qu'un producteur ne soit pas victime de ce phénomène. Ceux qui ne le sont pas sont les nouveaux qui viennent d'intégrer l'exploitation du bas-fond et à qui il est attribué des parcelles au bord du bas-fond.

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

La toxicité ferreuse touche 92% des producteurs contre 8,% qui n'en sont pas victimes. La principale pratique paysanne pour limiter son effet néfaste est le drainage, utilisé par tous les producteurs victimes. Si les opérations de drainage ne sont pas exécutées au cours de l'année et l'entretien des ouvrages suivi quotidiennement, alors le phénomène s'installe durablement et affecte les paramètres de production. En effet, le drainage a été rapporté comme une méthode qui réduit la prévalence de la toxicité ferreuse (UNDP et al, 1977). Une évaluation en Sierra Léone a montré que le drainage permet un gain de 608 kg/ha sur le rendement. Mais étant donné la recrudescence de la toxicité ferreuse dans le bas-fond, il devient urgent, au vu des résultats d'intégrer d'autres stratégies de lutte au nombre desquelles :

- L'utilisation du phosphate naturel à une dose de 120 kg/ha pour corriger la toxicité ferreuse (Hodomihou et al., 2011).
- L'utilisation de variétés de riz résistantes à la toxicité ferreuse telle que la variété TOX 3100-44-1-2-3-3 (WARDA, 2002).

Ces mesures doivent faire objet d'une étude afin d'identifier les facteurs pouvant favoriser leur adoption.

Chapitre 3 : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégie de lutte par les riziculteurs de bas-fond

Tableau 3.6: Répartition des producteurs victimes de la toxicité ferreuse

Catégorie	Proportion producteurs (%)	
	Victimes	Non victimes
Anciens producteurs pour la consommation	4,92	0
Jeunes producteurs de semences riz	16,42	1,61
Anciens producteurs de semences riz	32,79	0
Jeunes producteurs pour la consommation	37,81	6,45

3.4. Conclusion

La perception de la toxicité ferreuse par les populations locales au Sud-Bénin dans le bas-fond d'Awokpa se résume essentiellement à la manifestation du fer dans l'eau avec l'effet du soleil, par la survenance d'une pellicule rougeâtre ou violâtre en surface de l'eau. Elle se limite aussi au comportement des plants du riz et à leur productivité dans les zones infestées du phénomène. Elle dépend également de l'ancienneté des producteurs. La pratique paysanne locale pour réduire les effets de la toxicité ferreuse est le drainage. Il est efficace en ce sens qu'elle permet d'avoir un rendement moyen égal à celui des parcelles non victimes de la toxicité ferreuse.

Chapitre 4: Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

4.1. Introduction

Le fer est l'un des éléments les plus répandus de l'écorce terrestre. Sa présence dans les sols est une donnée pédologique acquise depuis longtemps (Lawton, 1958). Les migrations du fer le long de la toposéquence par lessivage latéral sont importantes pour l'enrichissement absolu des sols tropicaux en fer. Il peut être plus ou moins complètement éliminé du sol du haut de pente par dissolution et lessivage puis s'accumuler dans des eaux qui l'entraînent et le transportent horizontalement et latéralement (circulation de subsurface ou inferroflux) vers le bas-fond situé à des distances considérables du point de départ (Segalen, 1964, Diatta et al, 1998). La toxicité ferreuse apparaît lorsque, sous l'effet réducteur du milieu, les bactéries mettent en place une respiration anaérobie libérant de grandes quantités d'ion ferreux (Fe^{2+}) dans la solution. Ces quantités d'ions ferreux solubles entraînent un déséquilibre en éléments de la solution du sol qui se répercute au niveau de la plante (Bode *et al.*, 1995). En raison du non aménagement de la plupart des bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest, le drainage naturel est limité généralement par un encombrement de l'exutoire entraînant l'engorgement complet du bas-fond au cours de la saison. Ainsi, les conditions favorables (milieu réducteur des bas-fonds) sont souvent réunies pour l'expression de la toxicité ferreuse (Kosaki *etal.*, 1986; Okusami, 1986).

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

L'effet de la toxicité ferreuse se manifeste également sur les paramètres de croissance et de développement tels que la hauteur, le nombre de talles par m² et le nombre de panicules par m². Ces deux derniers font partie des composantes du rendement. Le nombre de talles étant affecté, la toxicité ferreuse semble intervenir assez tôt dans le cycle de la plante, peut-être bien avant l'apparition des symptômes (environ 30 jours après repiquage).

En zone tropicale, la culture du riz (*Oryza sativa* L.) en condition de bas-fond (avec ou sans contrôle de l'eau) est souvent confrontée au problème de toxicité ferreuse. C'est un trouble nutritionnel associé à de fortes concentrations de fer dans la solution du sol. Les conditions réductrices que l'on rencontre couramment dans les sols de bas-fond engorgés sont précurseurs de la toxicité ferreuse par la solubilisation dans la solution du sol de la quasi-totalité du fer sous forme ferreux (Fe²⁺). Ces conditions édaphiques des sols de bas-fond, nécessaires à l'apparition de la toxicité ferreuse sont dépendantes des conditions pédoclimatiques expliquant ainsi la forte variabilité spatio-temporelle de cette contrainte. Cette grande quantité d'ions ferreux en solution entraîne chez le riz un déséquilibre en éléments minéraux. Ce fer ferreux (Fe²⁺) est absorbé en abondance, se concentre dans les feuilles, entraînant une décoloration des limbes, une réduction du tallage, de la taille des plants, et provoque une baisse importante des rendements. Cette contrainte a fait l'objet d'une étude dans trois pays de la sous-région ouest africaine (Guinée, Côte d'Ivoire et Ghana) afin de quantifier ses effets sur la riziculture. L'étude confirme que la

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

toxicité ferreuse est une des contraintes édaphiques majeures des bas-fonds cultivés puisqu'en moyenne plus de 50% des bas-fonds et environ 60% des parcelles cultivées en riz sont affectés par cette contrainte. Dix pourcent de ces bas-fonds ayant même été abandonnés en raison d'une pression de toxicité ferreuse trop importante. Les études montrent également que plus de 55% des surfaces rizicoles sont affectées par l'excès de fer. L'impact sur le rendement est également significatif puisque les parcelles infectées peuvent perdre en moyenne jusqu'à 54% par rapport aux parcelles saines (Chérif et al., 2010). Ainsi, la toxicité ferreuse peut a priori déclasser la production locale et entraîner une rentabilité économique faible de la production du riz. La présente étude complète les précédentes en étudiant dans un bas-fond rizicole du Sud-Bénin, l'effet de la toxicité ferreuse sur la rentabilité de la production du riz.

4.2. Matériel et Méthodes

4.2.1 Milieu d'étude (voir cadre de l'étude de chaitre 2)

4.2.2 Echantillonnage (voir paragraphe 3.2.2. du chapitre 3)

4.2.3 Collecte des données

Les différentes données collectées concernent le mode de répartition de l'eau existant, le coût de l'ensemble des opérations culturales, le rendement cultural et certaines informations sur le producteur. Ces données ont été complétées

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

par les comptes de production. Ces comptes ont été élaborés pour la campagne 2015. L'indicateur de rentabilité utilisé dans cette étude est la marge brute, compte tenu du fait que les données relatives aux amortissements des ouvrages installés dans le bas-fond ne sont pas disponibles.

La Marge Brute (MB) d'une activité est égale à la différence entre le Produit Brut (PB) provenant de l'activité, et les Charges Variables (CV). Elle est exprimée par la relation suivante:

$$\mathbf{MB = PB - CV}$$

où

PB = Q × Pi, avec Q = Quantité du riz vendue et Pi = Prix unitaire du Produit.

CV = sommes des différentes charges variables.

Les charges variables sont celles dont le montant est directement lié au niveau des activités pour une période donnée. Ce sont les coûts des intrants (semences, engrais insecticides), la rémunération de la main d'œuvre salariée, etc.

Les charges fixes quant à elles sont les charges de structure dont le montant reste indépendant du niveau de l'activité pour une période donnée. Il s'agit, dans notre cas de l'amortissement des matériels agricoles et de la main d'œuvre familiale.

Dans cette partie, nous avons analysé successivement les points ci-après :

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

- Effet de la toxicité ferreuse sur les paramètres de croissance du riz;
- Le rendement obtenu par mode ;
- Les charges de production suivant les modes de répartition de l'eau ;
- Les recettes par modes ;
- L'établissement des comptes de production par mode.

4.2.4 Traitement et analyses des données

La saisie, le traitement des données et la réalisation des graphes sont faits à l'aide du logiciel Microsoft Excel 2013. L'analyse de variance des données collectées a été réalisée à l'aide du logiciel MINITAB 16 et le logiciel SPSS 20. Le classement des moyennes a été effectué au seuil de 5 % selon le test de Student Newman and Keuls.

4.3. Résultats

4.3.1 Effet de la toxicité ferreuse sur les paramètres de croissance des plants du riz suivant les modes d'inondation

Les modes d'inondation ont eu d'impact sur les paramètres de croissance des plants du riz à l'exception de la longueur des panicules qui ont pratiquement les mêmes longueurs (tableau7). La différence est statistiquement significative entre les trois traitements pour tous les paramètres pris en compte. D'une manière générale, c'est le traitement d'inondation suivie du drainage qui a donné les meilleurs paramètres de croissance des plants. Le développement des paramètres de croissance est donc fortement lié aux conditions de production.

Tableau 4.1: Paramètres de croissance des plants de riz

Paramètres de croissance	Hauteur des plants (cm)	Longueur des racines (cm)	Longueur des panicules (cm)	Biomasse fraîche	Biomasse sèche
Écoulement naturel de l'eau	84,66 ±5,18 ab	20,30±0.45 b	24,26±0.37a	75,83±4.06 b	43,25±5.42 b
Inondation suivie de drainage	90,08 ± 5,76 a	22,15±0.44 a	25,16±0.34 a	122,14±6.65 a	46,63±4.16 b
Inondation permanente	82,65 ±5,2 b	22,98±0.59 a	24,06±0.42 a	115,88±5.09 a	55,12±6.82 a

4.3.2 Effet de modes de répartition de l'eau sur les paramètres de rendement

Les paramètres de rendement pris en compte dans la présente étude sont : le nombre de talles et de talles fertiles par plant, poids des panicules et de 1000 grains par plant (tableau 7).

Le traitement d'écoulement naturel de l'eau a les plus faibles paramètres de rendement. Quant au traitement de l'inondation suivie du drainage, la tendance observée au niveau des paramètres de croissance se confirme au niveau des paramètres de rendement. Le traitement d'inondation permanente présente également les meilleurs paramètres de rendement. Si la plupart des paramètres de rendement ont une différence statistiquement significative par rapport aux traitements, le poids de 1000 grains de paddy ne varie que de 28 à 30 g et est sensiblement le même entre les traitements.

La différence entre les moyennes du poids sec des panicules des traitements est statistiquement significative à 95%. Tandis qu'au niveau des rendements cette différence n'est pas significative statistiquement entre le traitement d'inondation permanente et celui d'écoulement naturel de l'eau. Le taux de tallage, le taux de talles fertiles et le poids des panicules par plant ont permis d'avoir un rendement dont le poids frais obtenu au niveau des micro-parcelles varie de 2,4753 à 3,7758t/ha. Ce rendement est proche ou légèrement supérieur à celui que rapportent les rapports annuels de 2013, 2014 et 2015 du CARDER Atlantique/Littoral /MAEP du Bénin (3000 kg/ha) de la zone d'étude.

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

La répartition de l'eau dans le bas-fond a non seulement impacté le niveau de tallage des plants du riz mais aussi les paramètres de production. D'une manière générale, il existe une relation entre le tallage des plants et le rendement. Mais de façon spécifique cette relation est corrélée entre le nombre de talles fertiles par plant et le rendement par un coefficient de Pearson R de 0,337. Il existe d'effet année sur les rendements du riz alors que les répétitions (bloc) n'ont aucune influence sur les paramètres de production.

Tableau 4.2: Paramètres de rendement du riz

Traitement	Nombre de talles par plants	Nombre de talles fertiles par plants	Poids des panicules par plants (g)	Poids de 1000 grains de paddy (g)	Rendement (t/ha)
T1	7,52 ± 0,28 c	6,23±0.36 c	211,96±6.86 c	28,86 ± 0,04b	2,4753 ± 0,1469 c
T2	11,17±0,43 a	9,75±0.31 a	417,69±12.89 a	30,14± 0,13a	3,7758± 0,1917 a
T3	10,21 ± 0,36 b	7,71±0.3b	276,38±13.5 b	29,27 ± 0,22b	3,1898 ± 0,1642 b

4.3.3 Analyse financière

- a) Analyse des charges variables de production suivant les modes.

Les charges de production sont l'ensemble des dépenses liées à la production d'un ha de semences de riz dans le bas-fond. De

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

l'analyse du tableau 9 on constate que les charges variables sont égales pour les modes d'écoulement naturel de l'eau (T1) et du mode de répartition de l'eau permanente (T3). Au niveau du mode d'inondation suivie du drainage (T2), les charges variables sont légèrement supérieures aux deux autres modes à cause des charges liées à la manipulation des ouvrages de drainage et d'inondation. Le total des charges variables liées à la production d'un ha de semences de riz est de 558 000 FCFA au niveau des traitements d'inondation permanente et de l'écoulement naturel de l'eau contre 593.000 FCFA pour le mode d'inondation suivie de drainage.

Tableau 4.3: Charges variables totales liées à la production d'un hectare de semences de riz par mode

Traitement	Charges variables			Total
	Intrants	Main d'œuvre	Autres charges	
Écoulement naturel de l'eau	208000	350000		558000
Inondation suivie de drainage	208000	350000	35000	593000
Inondation	208000	350000		558000

Il apparaît que les charges liées à l'exécution des opérations culturales sont très élevées et représentent 75 % des charges variables au niveau des modes 1 et 3 contre 77 % au niveau du mode 2.

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

b) Compte de production d'un ha de riz de semence suivant les modes.

Les comptes de production d'un hectare de riz et de la rentabilité de l'opération de production de la semence du riz au niveau de chacun des traitements se présentent comme suit :

Tableau 4.4: Rentabilité de l'opération de production du riz dans le bas-fond

Traitement	Valeur de la production	Charges de production	Marge brute	Indice de rentabilité
Ecoulement naturel de l'eau	990120	558000	432120	0,77
Inondation suivie de drainage	1510320	593000	917320	1,54
Inondation	1275920	558000	717920	1,28

Il ressort que :

- Les traitements d'écoulement naturel de l'eau et celui d'inondation permanente ne sont pas rentables à cause de leur indice de rentabilité inférieur à 1,5.
- Le traitement d'inondation suivie de drainage est quant à lui rentable avec un indice de rentabilité de 1,54.

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

4.4. Discussion

Les modes de répartition de l'eau dans le bas-fond ont eu un impact sur les paramètres de production et de rendement du riz. Etant donné que la toxicité ferreuse est souvent associée à un mauvais contrôle de l'eau (Audebert et Fofana, 2009), la gestion de l'eau au niveau du bas-fond par un système de drainage est primordiale afin d'éliminer le fer qui est entré dans la parcelle ou en l'empêchant d'entrer (Delville *et al.*, 1996). Selon Wopereis *et al.*, (2008), on peut empêcher l'accumulation du fer dans les bas-fonds en interrompant ou en bloquant les flux de sub-surface (routes, canalisations). Sur le plan gestion de l'eau, une meilleure circulation de l'eau peut permettre d'évacuer le fer en excès dans l'eau d'irrigation et aider à oxygéner la solution du sol.

D'une manière générale, la toxicité Ferreuse se produit seulement dans des états anoxiques de sol (Ponnamperuma *et al.*, 1967). Les sols de rizière sont soumis à des changements périodiques d'oxygénation, en fonction des saisons climatiques et de culture.

En milieu engorgé, l'oxygène est présent à des concentrations moins élevées et est épuisé rapidement par la respiration des micro-organismes du sol et par les racines des plantes (Prade *et al.*, 1990).

Dans le cas de la présente étude, le mode d'inondation suivie de drainage a permis d'avoir les meilleurs paramètres de croissance et de rendement. Le mode d'inondation permanente a par contre enregistré les plus faibles paramètres de croissance.

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

En Afrique de l'Ouest, la toxicité ferreuse est préoccupante car les pertes de rendements qu'elle engendre sont estimées entre 12 et 100% dans les bas-fonds, avec une moyenne avoisinant les 45 % (Sahrawat, 2004 ; Becker et Asch 2005 ; Audebert, 2006). Chez le riz, les pertes dues à la toxicité ferreuse dépendent du génotype, du stade de croissance, de l'état nutritionnel du sol et de la sévérité du stress (Gheysens, 2009).

Le symptôme visuel typique lié aux processus décrits ci-dessus, et en particulier à l'accumulation des polyphénols oxydés, est appelé « bronzing » ou « yellowing » du riz. En raison de la faible mobilité du fer dans la plante, ces symptômes caractéristiques débutent par de petites ponctuations rougeâtres à brunes sur les feuilles âgées (Vizier, 1988).

Quand la toxicité ferreuse se produit enfin de phase végétative ou en début de phase reproductive, le nombre de panicules chute (Singh et *al.*, 1992), la stérilité des épillets augmente (Virmani, 1977) et les étapes de floraison et de maturation peuvent être retardées d'environ 20-25 jours. Pour certains cultivars fortement sensibles à la contrainte, aucune floraison ne peut être obtenue (Ayotade, 1979). Le cultivar utilisé dans le cadre de cette étude est la variété NERICA L20 qui est peu sensible à la toxicité ferreuse. Quand les conditions d'inondation s'installent plus tôt et d'une manière permanente, cette sensibilité augmente et conduit à une perte considérable de la production pouvant atteindre 80%. Alors l'usage de variétés de riz tolérantes à la toxicité ferreuse se révèle être une autre alternative, plus intéressante et plus économique pour les

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

producteurs (Sahrawat, 2004 ; Audebert et Fofana, 2009 ; Chérif *et al.*, 2009).

Cette variété a sa résistance limitée face à des pratiques culturales favorisant la toxicité ferreuse dans les bas-fonds. Ces limites ont été appréciées à travers l'étude de différents paramètres de développement du riz. Il s'agit du tallage (nombre de talles formées et celles fertiles par plant), de l'accumulation de la biomasse, le poids des panicules par plant, et le poids de 1000 grains de paddy qui ont été négativement influencés au niveau des traitements où il a été enregistré une forte teneur en fer ferreux dans la solution du sol. Ces résultats confirment ceux d'autres travaux (Abraham et Pandey, 1989) qui concluent que dans le cas d'une toxicité ferreuse se produisant pendant le stade plantule, le développement des plants de riz est arrêté et le tallage extrêmement limité. La toxicité ferreuse pendant les stades végétatifs entraîne une réduction de la hauteur et une réduction de matière sèche (Abu *etal.*, 1989), la biomasse aérienne étant plus affectée que la biomasse racinaire (Fageria *etal.*, 1988). La formation de talles et la proportion de talles productives peuvent être sévèrement réduites (Cheema *etal.*, 1990). Quand la toxicité ferreuse se produit enfin de phase végétative ou en début de phase reproductive, le nombre de panicules chute (Singh *et al.*, 1992), la stérilité des épillets augmente (Virmani, 1977) et les étapes de floraison et de maturation peuvent être retardées d'environ 20-25 jours. Pour certains cultivars fortement sensibles à la contrainte, aucune floraison ne peut être obtenue (Ayotade, 1979).

Chapitre 4 : Toxicité ferreuse et rentabilité de la production du riz

Le développement des paramètres de croissance est fortement lié aux conditions de production. Dans le cas de la présente étude, le traitement d'inondation suivie de drainage offre les meilleures conditions de développement du riz. Ces conditions au niveau de ce traitement n'ont toutefois pas permis d'améliorer la longueur des panicules par plant qui est pratiquement la même au niveau de tous les traitements.

4.5. Conclusion

Le phénomène d'oxydo-réduction est fortement influencé par les différents modes de répartition de l'eau dans un bas-fond qui ont impacté les paramètres de croissance et de rendement du riz. Le traitement d'inondation suivie de drainage a amoindri les effets de la toxicité ferreuse sur le développement du riz et a donné le meilleur rendement (3,775 t/ha). Ce rendement dans le bas-fond rentabilise les activités de production dans le bas-fond avec un indice de rentabilité de 1,54.

Les populations locales du Sud-Bénin perçoivent le phénomène de la toxicité ferreuse comme :

- la manifestation du fer dans l'eau avec l'effet du soleil,
- la survenance d'une pellicule rougeâtre ou violâtre en surface de l'eau.

Elles lient le phénomène au comportement des plants du riz et à leur productivité dans les zones infestées par la toxicité ferreuse.

Chapitre 5: Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

5.1. Introduction

Les enjeux mondiaux de la sécurité alimentaire de plus de 7 milliards d'habitants de la planète définissent le grand défi d'une agriculture écologiquement durable axée sur la sauvegarde du sol et de l'environnement. Les projections des Nations Unies indiquent que la population ouest africaine estimée à 358 millions de personnes en 2016 avec un taux de croissance de 2,7% par an, pourrait atteindre 455 millions de personnes d'ici 2025 et presque le double d'ici 2050 soit 885 millions (FAO, 2016). Cette situation impose à l'agriculture ouest africaine, la croissance de sa production à un taux minimum de 4 % par an, soit plus de deux fois le taux atteint les décennies précédentes, pour assurer la sécurité alimentaire et réduire la pauvreté (Bationo *et al.*, 1998). Mais, l'augmentation des effets des changements climatiques et les inquiétudes sur la sécurité énergétique constituent des freins à la réalisation de cet idéal. Un équilibre difficile, mais nécessaire doit donc être trouvé entre la préservation des conditions climatiques favorables à la vie sur terre et la satisfaction des besoins alimentaires de l'humanité. De nos jours, les pratiques agricoles du monde entier font l'objet d'études de plus en plus nombreuses pour tenter de définir leur contribution aux problèmes

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

environnementaux, comme le changement climatique. Le développement industriel et agricole progressif a entraîné des émissions accrues des gaz à effet de serre (GES) particulièrement le dioxyde de carbone (CO₂) (Jeyanny et al. 2014). Au niveau mondial, les émissions des gaz à effet de serre (GES) d'origine agricole atteignent 5120 à 6116 MT CO₂/an, ce qui représente une contribution de 10 à 12 % des émissions totales de GES d'origine humaine (IPCC, 2013). L'utilisation des terres cultivées et les pratiques agricoles qui visent à augmenter de manière durable le stock de matière organique des sols s'avèrent nécessaires dans la lutte contre le réchauffement planétaire (GIEC, 2001).

La dynamique du carbone (C) et de la matière organique du sol (MOS) selon les modes d'occupation des terres connaît un intérêt grandissant tant pour les études de fertilité des sols, que pour celles sur le cycle global du carbone (Jensen *et al.*, 1996; Dugas *et al.*, 1999). En effet, la MOS est un facteur déterminant de nombreuses propriétés édaphiques (Feller *et al.*, 1996; Aholoukpe, 2013) et constitue un des compartiments importants à prendre en considération pour la quantification des flux globaux de gaz à effet de serre (N₂O, CH₄ et CO₂), en particulier ceux d'origine agricole (Cole *et al.*, 1996). Ainsi, dans la zone intertropicale, la mise en culture de terres initialement sous végétation naturelle conduit généralement à une baisse importante des stocks de C, par suite à la fois de la minéralisation de la MOS et de phénomènes d'érosion. De plus, cette minéralisation de la MOS participe à l'effet de serres par

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

des émissions élevées de CO₂ du sol vers l'atmosphère. La restauration du stock de C des sols est donc une nécessité, tant pour des questions de durabilité des systèmes de culture, que pour des objectifs environnementaux tels que la limitation de l'effet de serres à travers la séquestration du C dans les sols (fonction «puits» du sol) (Chevallier, 1999).

La culture de riz contribue à l'émission des gaz à effet de serres (GES) (Roger *et al.*, 1998 ; FAO, 2017). En effet, le processus de production rizicole est une des principales causes d'émission de méthane et de dioxyde de carbone et de consommation d'eau élevée (Zhou et Song, 2014). La séquestration de carbone dans le sol des rizières est potentiellement une approche clé pour faire des rizières non plus une source d'émissions de gaz à effet de serres, mais un puits de carbone. Cette fonction «puits» dépend de nombreux paramètres parmi lesquels le mode d'usage des terres, les techniques culturales et le type de sol. Au Bénin, quelques études se sont intéressées à la variabilité du stock de carbone dans divers systèmes de culture surtout sur les sols ferrugineux et ferralitiques afin d'apprécier leur niveau de fertilité dans différents agrosystèmes (Djegui, 1992; Aholoukpè *et al.*, 2016). Toutefois sur les sols hydromorphes abritant la culture de riz de bas-fond, très peu d'études ont été réalisées sur le comportement de la matière organique du sol et de son activité microbienne en condition de submersion plus ou moins longue. L'estimation des stocks de carbone et sa répartition granulométrique dans le sol sous la culture de riz ainsi que le potentiel de minéralisation de la matière organique du sol en

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

condition de submersion sont les grandes préoccupations de cette étude. Elle procède d'abord à la quantification du stock total de carbone dans un sol hydromorphe et dans les fractions organo-minérales du sol puis à l'évaluation du dégagement du CO₂ dans le sol ainsi que les effets du mode de répartition de l'eau du sol sur les paramètres agronomiques du riz.

5.2 Matériels et méthodes

5.2.1. Milieu d'étude

Voir chapitre 2 Cadre de l'étude

5.2.2. Evaluation des stocks de carbone organique et sa répartition granulométrique sous différents modes de répartition de l'eau

- ✓ L'évaluation de carbone organique et sa répartition granulométrique sous différents modes d'inondation est faite au laboratoire et porteur des échantillons de sol prélevés au niveau des micro-parcelles. Trois échantillons composites par profondeur de 0 à 10 cm, de 10 à 20cm et de 20 à 30cm représentatifs de la parcelle sont obtenus à partir de trois échantillons de sol issus des prélèvements par micro-parcelle. Ces prélèvements de sol sont effectués deux semaines après le repiquage des plants de riz.

- ✓ Méthode d'estimation du stock de carbone du sol
De façon conventionnelle, le calcul du stock tient compte

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

de la densité apparente et de l'épaisseur de la couche de sol étudiée. Des cylindres de densité calibrée, de volume connu (100 cm^3) ont servi à prélever le sol suivant chaque profondeur (Figure 7). Le contenu du cylindre est pesé après dessiccation à 105°C à l'étuve pendant 24h. La densité apparente est donnée par le rapport du poids sec sur le volume.

$da = \frac{P}{V}$ avec P : poids du sol prélevé en g ; V : volume en cm

Les stocks sont calculés pour les horizons 0-10 cm ; 10-20 cm et 20-30cm de chaque parcelle. La formule du calcul des stocks de carbone du sol s'énonce :

$$C \text{ (t/ha)} = C \text{ (mg.g}^{-1} \text{ sol)} \times da \times e \times TF$$

Avec :

- C (t/ha) : le stock de carbone d'une couche de terre en t/ha;
- C (mg.g⁻¹ sol) : Lateneur en carbone mesurée dans la couche de sol en mg/g de sol ;
- da (g.cm⁻³) : la densité apparente (en g/cm³) et
- e : épaisseur en dm ;
- TF, le pourcentage de terre fine, TF = (100-% en éléments grossiers) /100.

Dans cette étude, le pourcentage de terre fine n'a pas été considéré parce que le taux de refus est négligeable compte tenu du type de sol qui n'est ni concrétionné ni graveleux. La formule devient :

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

$$C \text{ (t/ha)} = C \text{ (mg. g}^{-1} \text{ sol)} \times Da \text{ (g.cm}^{-3}\text{)} \times e \text{ (dm)}$$



Figure 5.1: Prélèvement du sol avec le cylindre densité

✓ Détermination de la teneur en carbone

Le carbone est dosé par incinération pendant 2 heures à 700°C de la matière organique sur le sol broyé et tamisé à 0,2mm comme décrit dans le paragraphe des propriétés physico-chimiques du sol. La teneur en carbone de l'échantillon est

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

déterminée par différence entre le poids de l'échantillon
avant/après calcination selon l'équation
établie par MOREL (1977):

$$\%C = \frac{(P_i - P_f) \times 100}{1,724 \times P_i}$$

P_i : poids initial de la prise d'essai

P_f: poids de l'échantillon après calcination.

La matière organique est déterminée à partir de la teneur
en carbone en considérant le coefficient empirique universel de
1,724 qui suppose que la matière organique contient 58% de
carbone.

✓ **Fractionnement granulométrique**

Le fractionnement granulométrique consiste en la
séparation mécanique des fractions en vue de leur étude
ultérieure (morphologique, physique, chimique et biologique).
Le fractionnement de la matière organique est utile et intéressant
pour décrire les différentes fractions de matières organiques
stockées dans le sol. L'intérêt du fractionnement
granulométrique réside dans sa simplicité et sa facilité de mise
en œuvre, dans son action peu dénaturante et dans son efficacité
car il permet d'obtenir des fractions organiques très différentes
quant à leur morphologie, leur composition chimique et leur
dynamique (Sedogo, 1993). C'est donc une séparation par taille
des agrégats organo-minéraux. Les méthodes de fractionnement
utilisées varient en fonction de la nature du sol et de l'objectif

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

poursuivi. La méthode de fractionnement utilisée dans notre étude dérive de celle de Feller,(1979), adaptée par Segda,(2006), Pallo *et al.*,(2009)et parAholoukpe,(2013).

Elle a consisté à séparer le sol en cinq fractions: les fractions grossières organiques (FO>200 μ m et FO50-200 μ m) et minérales (FM > 200 μ m et FM50-200 μ m) puis la fraction organo-minérale (FMO <50 μ m). Ce fractionnement a été fait sur un échantillon de 20 g de sol séché à l'air tamisé à 2 mm avec de 0,5 g d'hexamétaphosphate de sodium. L'ensemble sol-hexamétaphosphate est mis en solution aqueuse avec 200 ml d'eau distillée et dispersé par agitation pendant 2 heures en présence de 5 billes de verre de 1,5 cm (Figure 8a). La solution obtenue subit un tamisage humide successif sur les tamis 200 μ m et 50 μ m (Figure 8b) sous eau de robinet, pendant environ 15 minutes. A la base de l'ensemble des deux tamis,l'eau issue du tamisage est récupérée dans une allonge de 1 litre. A l'aide de la pipette de Robinson (Figure 8c), un volume de 100ml est prélevé de la solution après 46s de sédimentation à une profondeur de 10cm (Loi de Stokes) correspondant ainsi à lafraction inférieure à 50 μ m.

Les cinq fractions de MO obtenues ont été séchées à l'étuve à 65°C puis pesées. Les échantillons concernés sont ceux composites des trois profondeurs du premier prélèvement. Le taux moyen de carbone (Tc) contenu dans chaque fraction granulométrique de sol a été exprimé en mg.fraction.g⁻¹.sol. Ce taux a été calculé aux profondeurs considérées grâce à la formule de (Christensen 2001) qui s'écrit :

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

$$T_c = C \text{ fraction (mg/g)} / C \text{ mg/g du sol non fractionné} \times 100$$

Ce taux vise à montrer la distribution du carbone total du sol, en termes de proportion dans les fractions organo-minérales suivant chaque mode de répartition de l'eau en permettant une comparaison des teneurs de carbone organique (CO) dans ces fractions. Les résultats des teneurs en C des fractions ont été exprimés en mg.g^{-1} de fraction (teneurs) pour désigner les teneurs en carbone organique total des fractions.

La procédure utilisée pour le fractionnement est détaillée dans la figure 5.2 ci-contre.



a



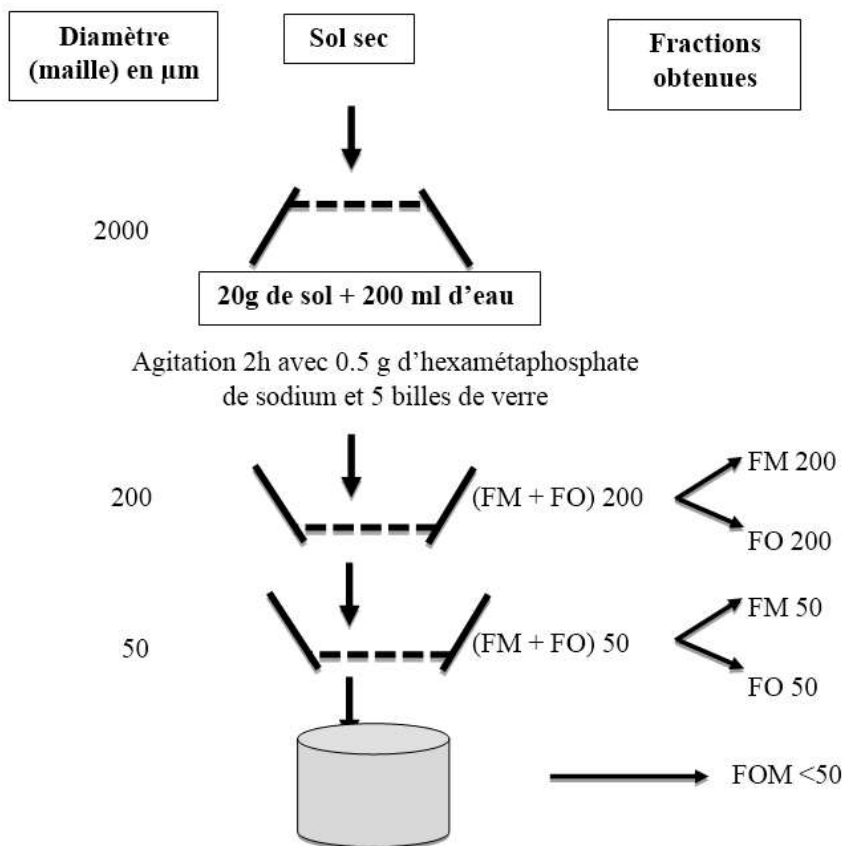
b



c

Figure 5.2: Bille de verre (a) et tamis utilisé (b) Pipette de Robinson avec allonge pour le prélèvement de FOM (c)

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation



FM : Fraction minérale ; FO : Fraction organique ; FOM : Fraction organo-minérale

Figure 5.3: Récapitulatif du protocole de fractionnement granulométrique proposé. Adapté de Feller (1979) et de Segda (2006)

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

5.2.3. Evaluation du dégagement du CO₂ dans le sol du bas-fond sous différents modes d'inondation

Le dégagement du CO₂ a été mesuré à travers la mesure de la respirométrie in situ sous culture de riz. Cette mesure a pour but d'apprécier l'intensité de l'activité microbienne dans le sol du bas-fond et d'en déduire son aptitude à la minéralisation de la matière organique sous l'effet de divers modes de répartition de l'eau. Le dispositif de mesure de minéralisation in situ de la matière organique du sol a été adapté de celui utilisé par Chevallier(1999) (Figure 10). Le principe de cette méthode est d'introduire le sol dans une enceinte (bocal) fermée afin de contenir le CO₂ respiré. Ce CO₂ est ensuite dosé pour quantifier l'activité respiratoire du sol. L'application de cette méthode dans cette étude a consisté à enfoncer dans le sol au niveau de chaque micro parcelle (Figure4) des tubes cylindriques en PVC de 100 cm de hauteur munis chacun à sa partie supérieure d'un couvercle. Les deux extrémités des tubes cylindriques témoins sont recouvertes chacune par un couvercle avant d'être enfoncé dans le sol. Chaque cylindre a un diamètre de 16 cm et est enfoncé jusqu'à 15 cm dans le sol. Le volume de chaque cylindre PVC correspondant au captage du CO₂ respiré est de 17081,6 cm³ (Figure 11). Les mesures sont réalisées par piégeage du CO₂ émis par le sol pendant 24h d'incubation, par 50 ml d'une solution de soude (0,5M). Les enceintes sont fermées hermétiquement pendant les 24h d'incubation pour

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

éviter une fuite de gaz. Le rapport des surfaces entre le piège de soude et la surface de l'enceinte est de 0,32. Le bocal contenant la soude est placé sur un deuxième cylindre en PVC de 9 cm de diamètre troué tout autour de la paroi latérale afin de permettre que le CO₂ dégagé puisse circuler et être capté facilement. Cette mesure est faite journalièrement pendant 30 jours afin de suivre le dégagement du CO₂ dans le temps. La soude est titrée en retour, au laboratoire avec une solution d'HCl (0,5M) après précipitation du CO₂ par du BaCl₂ en excès. Des solutions de soude non mises en contact avec le CO₂ émis par le sol (échantillon témoin), sont dosées afin de mesurer une éventuelle carbonatation de la soude et d'évaluer l'erreur de mesure de la méthode. La formule utilisée pour calculer la production de CO₂ par mètre carré et par heure est la suivante (Chevallier, 1999):

$$\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1} = (1/2 \times 44 \times C_{\text{HCL}} \times \Delta V_{\text{HCL}} \times 10000/S) \times (60/t)$$

où C_{HCL} est la concentration d'acide(en mole.l⁻¹), V_{HCL} la différence de volume d'acide ajouté pour titrer la soude entre le blanc et l'échantillon (ml), S la surface de l'enceinte (cm²) et t la durée de l'incubation (minute).

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

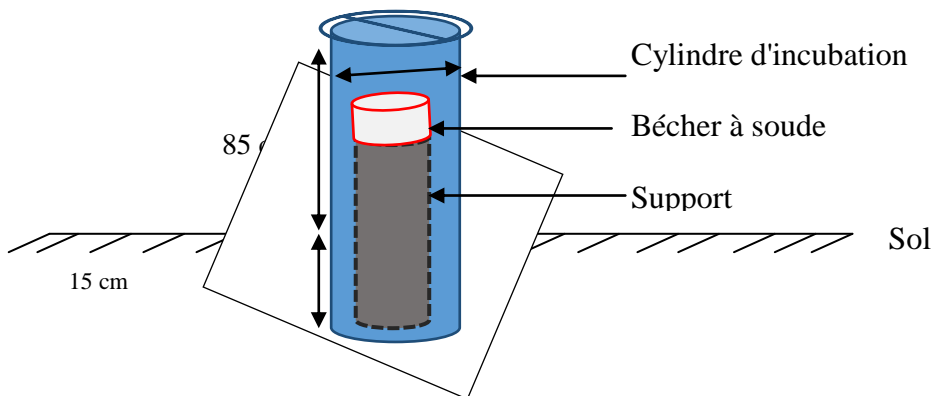


Figure 5.4: Dispositif de captage de CO₂ dégagé dans chaque parcelle inspiré de Chevallier, (1999)

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation



Figure 5.5: Dispositif de captage du CO₂ dégagé; A: Traitement T1; B : Traitement T2; C : Traitement T3

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

5.2.4. Evaluation de l'effet des modes d'inondation sur les paramètres agronomiques de riz

Mise en place et conduite de l'essai

L'itinéraire technique pratiqué est celui adopté par les producteurs semenciers dudit bas-fond. La pépinière a été installée deux semaines avant le repiquage des plants de riz sur une planche de 9m². Les casiers rizicoles (20m x 20m) ont été aménagés et les diguettes ont été confectionnées. Les casiers rizicoles du traitement à inondation suivie de drainage sont dotés d'un système manuel d'ouverture et de fermeture des drains. Chaque casier a connu les opérations de labour, planage et de mise en boue. Le repiquage a été fait suivant le système de riz intensif. Les plants ont été repiqués suivant un écartement de 20 cm entre lignes et de 20 cm entre plants soit une densité de 250.000 plants par hectare ou 10000 plants par casier de 400m². Les engrais minéraux NPK (14-23-14) et urée ont été apportés à la volée respectivement trois jours avant le repiquage et 30 jours après repiquage. Les engrais NPK ont été apportés en fumure de fond à la dose de 6kg par casier rizicole de 400m² alors que l'urée a été apportée en fumure d'entretien à la dose de 4 kg par parcelle de 400m². Un herbicidage sélectif a été fait à 15 jours après le repiquage suivi de deux sarclages manuels à 15 jours d'intervalle. La chasse aviaire a été faite à partir de 75 jours après repiquage.

5.3. Résultats

5.3.1. Influence du mode d'irrigation sur le stock et la structure de la matière organique

➤ *Stock de carbone du sol à différents modes d'inondation selon les profondeurs du sol.*

Le tableau 3 présente le stock de carbone organique des sols sous différents modes d'inondation selon la profondeur. On note une différence significative entre les effets des modes d'inondation sur le stock total de C de la couche de sol de 0 à 30 cm de profondeur. Le stock de C sous T1 ($165,4 \pm 33,1a$) est significativement supérieur à celui sous T2 ($52,5 \pm 17b$) qui est supérieur à celui sous T3 ($38,64 \pm 4,5c$). Le stock de carbone du sol est significativement similaire de la surface en profondeur pour les modes d'écoulement naturel et d'inondation suivie de drainage. Par ailleurs, le stock de carbone organique est significativement plus élevé à la profondeur 0-10 cm qu'à la profondeur 10-20 cm pour le mode de répartition de l'eau permanente du sol des parcelles rizicoles du bas-fond. Sous ce mode d'inondation permanente, le stock de carbone organique n'est pas significativement différent à la profondeur 0-10 cm et 20-30 cm. Il en est de même pour le stock de carbone aux profondeurs 10-20 cm et 20-30 cm. Le mode d'inondation permanente présente le stock de carbone le plus bas. Quelle que soit la profondeur, le stock de C sous T1 est significativement supérieur aux stocks des deux autres traitements, alors que les stocks sous T2 et T3 ne sont pas significativement différents

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

Tableau 5.1 : Stock (en t/ha) de la matière organique du sol sous différents modes d'inondation suivant les profondeurs du sol (cm).

Profondeurs	Mode de répartition de l'eau		
	T1	T2	T3
00-10 cm	66±8,2 a, α	28,6±12,9 b, α	17,95±3,49 b, α
10-20 cm	58,2±15 a, α	16,6±7,18 b, α	8,77±0,67 b, β
20-30 cm	41,2±11,3 a, α	7,29±1,85 b, α	11,91±1,82 b, $\alpha\beta$
Total sur 30 cm	165,4±33,1a	52,5±17b	38,64±4,5c

Les valeurs moyennes de stock de carbone sont présentées avec \pm leur erreur standar ; les lettres en exposant de chaque valeur indiquent la comparaison des moyennes selon le test de SNK; les lettres romaines comparent les moyennes d'une même profondeur entre les trois modes d'inondation alors que les lettres grecques comparent les moyennes des profondeurs dans un même mode d'inondation.

➤ *Effets des modes d'inondation sur la structure de la matière organique du sol*

La répartition massique des différentes fractions du sol et de leur teneur en carbone est présentée dans le tableau 4. Les bilans massiques obtenus sont de l'ordre de 990 mg.g⁻¹ soit une perte de 10 mg.g⁻¹ (1% de 1000 mg.g⁻¹). En ramenant la masse

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

de chaque type de fraction au bilan massique, on fait le constat que les fractions organiques, minérales et organo-minérales sont dans les proportions respectives de 6%, 73% et 21% dans le sol pour les trois modes d'inondation aux profondeurs considérées. Les proportions des fractions organiques et organo-minérales dans le sol ont varié entre 27,5% et 45,92% pour les trois modes d'inondation aux profondeurs considérées.

La masse de la fraction organique fine FO50 sous le mode de répartition de l'eau permanente est significativement supérieure à la masse des deux autres modes à la profondeur de 0 -10cm. La masse de cette fraction n'est pas significativement différente sous les modes d'inondation naturelle et d'inondation suivie de drainage. Par contre à la profondeur 10-20cm, la masse de cette fraction organique fine sous chacun des modes d'inondation suivie de drainage et d'inondation permanente est significativement supérieure à celle sous le mode d'écoulement naturel. A cette même profondeur, la fraction organique grossière sous le mode d'inondation suivie de drainage est significativement supérieure à celle des deux autres modes. De même, la masse de la fraction organo-minérale sous le mode d'écoulement naturel est significativement supérieure à celles des deux autres modes d'inondation. A la profondeur 20-30cm, la masse de la fraction organique fine FO50 sous le mode d'inondation permanente est significativement plus importante que celle des deux autres modes.

Il y a eu une différence très hautement significative entre les concentrations en C des fractions des sols sous les différents

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

modes d'inondation et aux différentes profondeurs considérées. Les concentrations en C des fractions organiques liées aux sables sont significativement supérieures à celles dans les fractions organo-minérales plus fines. Les concentrations en C des fractions organiques grossières sont significativement supérieures à celles dans les fractions organiques fines. Il n'y a pas eu de différence significative de concentration en C des fractions des sols sous les trois modes d'inondation aux profondeurs 0 à 10cm et 10 à 20cm sauf que la teneur en C de la fraction organique fine sous le mode de répartition de l'eau permanente est significativement supérieure à celle des deux autres modes à 0 à 10cm. Pour une même profondeur de 20 à 30cm, il y a une différence significative des concentrations en C des fractions organiques entre les sols des différents modes d'inondation. Par ailleurs, à cette même profondeur et pour les trois modes ; la concentration en C de la fraction organo-minérale n'est pas significative.

La figure 5.5 présente les teneurs en carbone organique des fractions organiques et organo-minérales selon les trois profondeurs considérées. Les quantités de carbone contenues dans les fractions organiques et organo-minérales dans les sols sous l'inondation suivie de drainage sont significativement supérieures à celles sous l'inondation permanente et sous l'écoulement naturel pour toutes les trois profondeurs considérées.

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

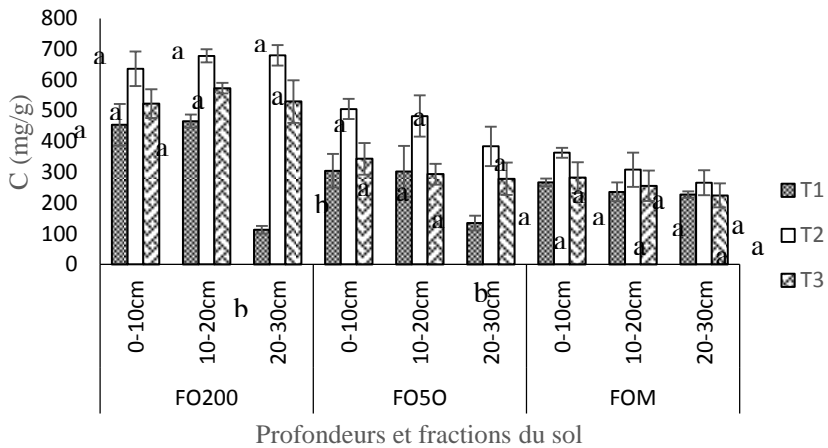
Tableau 5.2 : Distribution massique du carbone des fractions
dans le sol.

ProFraction	T1		T2		T3	
	Massfrac (mg-1sol)	C 1frac	mg.g-Massfrac (mg-1sol)	C 1frac	mg.g-Massfrac (mg-1sol)	C 1frac
FM200	481,4±34,1a	1,41±0,23a	424,7±21,81a	1,60±0,6a	414±21,8a	1,74±0,41a
FM50	234,7±29,5a	0,62±0,09b	180,8±39,50a	0,88±0,09b	164,2±22,3a	1,80±0,22a
00-10 FO200	25,36±8,67a	454,1±67,7a	74,8±21,1a	636±56,4a	70,4±13,7a	523±46,7a
FO50	37,9±17,3b	304,7±54,7b	71,4±14,2b	504,6±32,5a	144,9±16,8a	343,5±51,5ab
FOM	208,4±12,4a	266,7±12,5a	238±20,3a	363,4±16,1a	198,5±18,6a	282,3±50,2a
Total	987,76		989,7		992	
FM200	442,7±55,7a	1,51±0,21a	431,1±38,20a	1,84±0,24a	382,3±23,6a	2,27±0,58a
FM50	235,8±37,2a	0,89±0,38a	167,5±47,91a	1,33±0,53a	182,1±13,7a	1,83±0,38a
10-20 FO200	13,24±4,57b	466±21,4a	106,79±3,7a	678,4±21,81a	9±32,3ab	573,1±17,4a
FO50	31,95±6,24b	302,3±82,7a	104,4±23,4a	482,7±66,10a	106,9±13a	293,6±33,6a
FOM	264,5±25,2a	236,1±30,1a	183,4±11,9a	308±55,6a	225,84±5,2a	255,9±49,3a

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

	8a	4a	b	a	8ab	a	
Total	988,19		993,19		979,04		
FM20	451,2±68,0	1,07±0,3a	419±35a	1,95±1,33	371±29,7a	1,57±0,33a	
	6a			a			
20- 30	FM50	260,9±51	0,97±0,2b	192±40,7a	1,27±0,58	158,5±23,5a	2,49±0,25a
		a		ab			
	FO20	24,01±9,7	113±12,8	70,4±20,5a	680,1±33,40,2±12,7a	529,8±69,5	
		6a	b		4a	a	
	FO50	22±10,6b	134,4±23,68,5±10,2a	384±64a	134,8±36,6a	278,6±52,5	
			9b	b		ab	
	FOM	223,7±33,5a	227,4±10,3a	237,23±8,7a	265,8±40,274,6±55,1a	224,3±39a	
				8a			
Total	981,81		987,13		979,1		

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation



Par variable, les histogrammes avec la même lettre indiquent une différence non significative ($P < 0,05$; test de SNK).

Figure 5.5 : Teneurs en carbone des fractions organiques et organo-minérales suivant les profondeurs

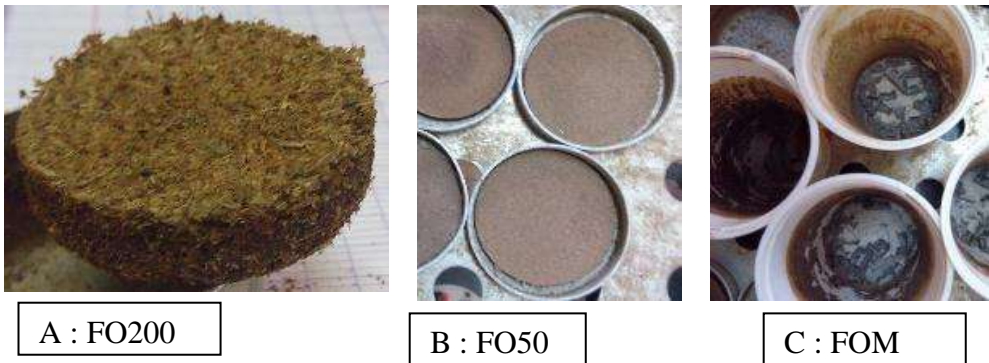


Figure 5.6 : Photos des fractions organiques du sol

5.3.2. Effet du mode de répartition de l'eau sur le dégagement du dioxyde de carbone (CO₂) par le sol du bas-fond

La figure 14 montre que le sol a dégagé du CO₂ tous les jours pendant les 30 jours d'observation. Les émissions journalières de CO₂ ont varié entre 0,00268 mg.m⁻².h⁻¹ et 0,5903 mg.m⁻².h⁻¹ pour le mode d'écoulement naturel, entre 0,01073 mg.m⁻².h⁻¹ et 0,3998 mg.m⁻².h⁻¹ pour le mode d'inondation suivie de drainage et entre 0,00537 mg.m⁻².h⁻¹ et 0,22002 mg.m⁻².h⁻¹ pour le mode d'inondation permanente. On constate une tendance décroissante de dégagement du CO₂ en fonction du temps pour tous les traitements. Les premiers jours sont marqués par une forte émission de CO₂. Il y a une différence très hautement significative entre quantité de CO₂ émis journalièrement sur chaque mode de répartition de l'eau. La figure 15 montre l'évolution du dégagement du CO₂ du sol cumulé pendant 30 jours d'incubation in situ sous les différents modes d'inondation. Il a été noté une tendance croissante d'émission cumulée du CO₂ du sol sur l'ensemble des trois modes d'inondation. Le cumul de la quantité de CO₂ dégagé sur la parcelle à écoulement naturel est significativement plus important (7,63 mg.m⁻².h⁻¹) que le cumul de CO₂ dégagé sur les parcelles aux modes d'inondation suivie de drainage (4,2 mg.m⁻².h⁻¹) et d'inondation permanente (1,54 mg.m⁻².h⁻¹).

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

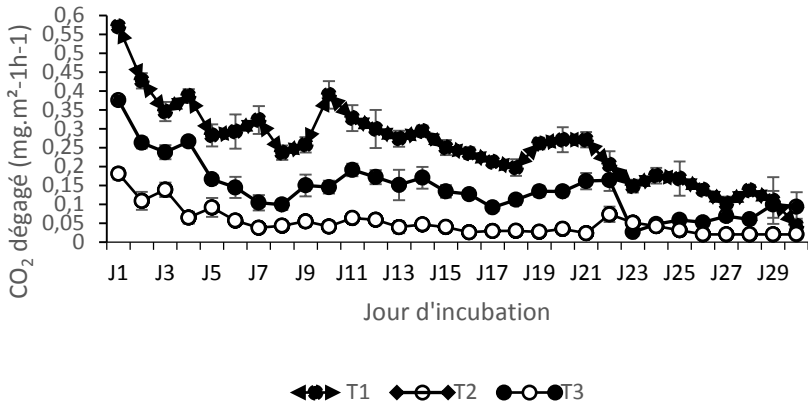
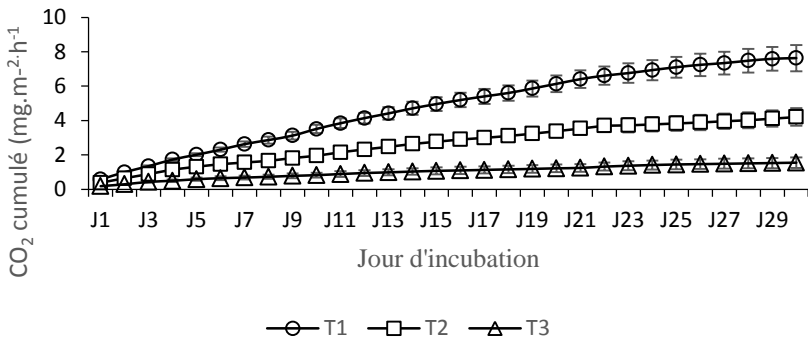


Figure 5.7: Dégagement journalier du gaz carbonique selon le mode d'inondation



T1= Ecoulement naturel; T2= Inondation suivie de drainage;
T3= Inondation permanente

Figure 5.8 : Evolution du dégagement du CO₂ en fonction du temps selon le mode de répartition de l'eau

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

*Chaque point représente la moyenne cumulée du CO₂ dégagé en mg.m⁻².h⁻¹.
La barre d'erreur représente l'erreur standard autour de la moyenne.*

Le tableau 5.3 présente la corrélation de Pearson entre le dégagement du dioxyde de carbone et la teneur en carbone organique du sol suivant chaque traitement. Il ressort de ce tableau que c'est seulement au niveau du traitement 2 que le coefficient de corrélation de Pearson est fort et significatif. De plus le coefficient de corrélation de Pearson établi entre la quantité de CO₂ dégagé et la teneur en carbone organique du sol pour tous les traitements confondus a une valeur de (-0,630) avec une probabilité (P-Value de 0,028) (données non présentées). Ce coefficient montre l'existence d'une corrélation négative significative entre la concentration en carbone du sol et la respiration du sol. On peut conclure que selon le degré de saturation d'eau du sol dans les bas-fonds, la quantité de CO₂ dégagé est inversement proportionnelle à la teneur en carbone organique du sol.

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

Tableau 5.3 : Corrélation de Pearson entre la quantité du
dioxyde de carbone (CO₂) dégagé et la teneur en carbone
organique du sol (COS) selon chaque traitement

		Traitement 1		Traitement 2		Traitement 3	
		CO ₂	COS	CO ₂	COS	CO ₂	COS
Traitement 1	CO ₂	1	0,64ns				
	COS	0,64ns	1				
Traitement 2	CO ₂			1	-		
	COS			-	1		
				0,98	0,98		
				*	*		
Traitement 3	CO ₂					1	-
	COS					-	1
						0,31ns	0,38ns
						s	s

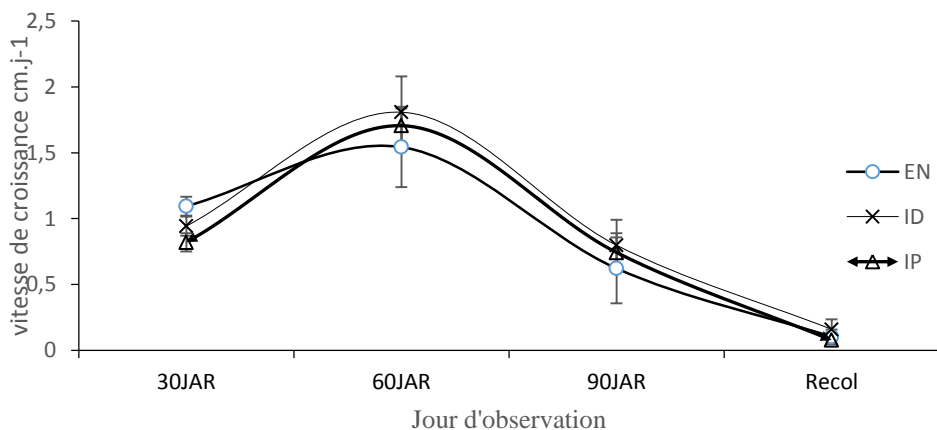
5.3.3. Influence du mode de répartition de l'eau sur la production du riz dans le bas-fond

Les résultats de l'analyse de la variance (Annexe 2) montrent que les modes d'inondation n'ont pas un effet significatif sur la vitesse de croissance des plants de riz ($P > 0,05$). Par contre, on note un effet très hautement significatif ($P < 0,001$) des modes d'inondation sur les paramètres de production. Les résultats de la figure 16 relative à l'effet des traitements sur la vitesse de croissance des plants montrent que la vitesse maximale de croissance en hauteur est obtenue 60 jours après le repiquage. Globalement, les plants de riz de la parcelle à mode d'inondation suivie de drainage ont une vitesse de croissance plus grande que ceux de la parcelle des autres modes.

Le tableau 6 présente la significativité des valeurs moyennes des paramètres de rendements à savoir le nombre de talles, le nombre de talles fertiles, la biomasse sèche moyenne de chaque plant, le poids sec moyen des panicules par plant, le rendement moyen des paddy par m^2 et le poids de 1000 grains. Les plants issus des parcelles à inondation suivie de drainage ont des paramètres de production élevés comparativement aux plants des autres modes d'inondation. Les différences sont significatives au seuil de 5%. Ainsi, on observe que le nombre de talles et le nombre de talles fertiles par plant sont significativement plus élevés au niveau du traitement T2 qu'au niveau des traitements T1 et T3. De même, la biomasse sèche par plant du traitement T2 est de 21,5g et dépasse de 40% et

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

20% respectivement celle du traitement T1 et du traitement T3. Le poids sec par plant des panicules au niveau du traitement T2 est de 34,37g et dépasse de plus de 50% et de 40% respectivement celui des panicules des traitements T1 et T3. On a observé que le rendement paddy obtenu sur la parcelle à inondation suivie de drainage est de 299,8g/m² et dépasse de 50% le rendement obtenu sur la parcelle à inondation naturelle et de 30% celui obtenu sur les parcelles à inondation permanente.



(EN) = T1= Ecoulement naturel; (ID) = T2= Inondation suivie de drainage;
(IP) = T3= Inondation permanente

La barre d'erreur représente l'erreur standard autour de la moyenne.

Figure 5.9 : Effets des modes d'inondation sur la vitesse de croissance des plants de riz

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

Tableau 5.4 : Effets des modes d'inondation sur les paramètres de croissance et de production

Mode	Talles	Talfert	Biomsec	Panise/plant	RdtFrais/m ²	Rdtsec/m ²	Poids1000grain
T1	7,025±0,39a	5,05±0,4a	13,34±0,68a	16,65±0,88a	195±16,1a	154,6±14,6a	28,86 ±0,04 b
T2	11,41±0,47b	9,93±0,45b	21,5±1,15b	34,37±1,74b	365±35,2b	299,8±29,4b	30,14 ±0,13 a
T3	9,71±0,498c	7,52±0,47c	17,14±1,06c	22,28±1,8c	266,4±22,4b	213,8±19,5b	29,27 ±0,22 b

Par variable, la même lettre indique une différence non significative (P< 0,05 ; test de SNK)

5.4 Discussion

5.4.1. Les modes de répartition de l'eau et stocks de carbone organique du sol

L'objectif est d'évaluer le stock de carbone du sol des différents modes d'inondation. Sur une profondeur de 0-30cm, le stock de carbone des sols du traitement T1 est significativement supérieur ($165,4 \pm 33,1 \text{ t.ha}^{-1}$) aux stocks de carbone du sol des traitements T2 et T3. Les travaux de recherche effectués par Volkoff *et al.*, (1999) sur les sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux du Bénin montrent que les stocks moyens de carbone étaient de 22 t.ha^{-1} dans la tranche de 0-20 cm et de 45 t.ha^{-1} dans la tranche de 0-100cm. Ces mêmes auteurs ont révélé selon le système de classification français (CPCS) que les sols hydromorphes ont respectivement sur 0-20cm et sur 0-100cm un stock de carbone moyen de 94 t.ha^{-1} et de 303 t.ha^{-1} . Ces stocks de carbone des sols de nos différents traitements sont bien situés dans la fourchette définie par Volkoff *et al.*, (1999).

L'analyse des résultats révèle que suivant chaque horizon de sol des traitements, le stock de carbone du sol est élevé et que ces stocks diminuent de la surface en profondeur. En effet le bas-fond d'Awokpa a une teneur élevée en MOS. La pratique culturale adoptée dans le bas-fond consistant à restituer au sol à chaque campagne rizicole toute la biomasse du riz explique très bien cette teneur élevée de matière organique. Ainsi toutes les parcelles des différents modes d'inondation sont soumises à ce même rythme de restitution de matières organiques. Les stocks de carbone sont plus faibles dans les sols à inondation permanente à cause de la faible densité apparente que présentent ces sols ($0,20 - 0,32 \text{ g.cm}^{-3}$). Les valeurs de la densité apparente

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

du sol du T2 et du T3 suivant les horizons considérés varient respectivement entre 0,26 et 0,5g.cm⁻³ puis 1,58 et 1,85g.cm⁻³. Ces valeurs conditionnent le stock de carbone obtenu sur ces parcelles. En condition d'inondation d'un bas-fond, la densité apparente est plus faible (0,1 à 0,3 g.cm⁻³ dans l'horizon organique) et augmente dans la couche minérale. Pour les couches organiques, elle varie de 0,1 à 0,3 g.cm⁻³ (Banville, 2009).

5.4.2. Mode de repartition de l'eau et fractions organo-minérales du sol

Nos résultats montrent que les différents modes de repartition de l'eau ont une influence sur la masse et la concentration en carbone de la fraction organique et organo-minérale du sol suivant les horizons. Le sol a une texture limoneuse et nous avons remarqué que les concentrations en C des fractions organiques (F200 et F50) sont significativement supérieures à celles dans les fractions organo-minérales plus fines (FOM) pour tous les traitements et aux profondeurs considérées. Les caractéristiques de la matière organique du sol (tableau 4) montrent une proportion élevée de fractions organiques grossières dans le sol des traitements. Les concentrations en C des fractions organiques grossières sont significativement supérieures à celles dans les fractions organiques fines. La part importante de carbone dans le sol explique bien la quantité élevée de carbone obtenu dans ces

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

fractions(Aholoukpe, 2013).Les quantités de carbone contenues dans les fractions organiques et organo-minérales dans les sols sous l'inondation suivie de drainage sont significativement supérieures à celles dans les sols sous l'inondation permanenteet l'écoulement naturel pour toutes les trois profondeurs considérées. Ces résultats confirment de nombreux travaux antérieurs sur les liens entre la matière organique du sol sous différents modes d'inondationet la fraction argileuse ou limono-argileuse du sol(Pallo *et al.*, 2009; Sedogo, 1993; Segda, 2006).En effet,Segda (2006)trouve que la baisse du taux de matière organique des sols tropicaux exondés qui survient dès leur mise en culture ainsi que la dégradation rapide de certaines propriétés du sol (structure, activité biologique...) consécutive à la mise en culture sont attribuées à l'évolution des fractions grossières . Par ailleurs, ces auteurs ont aussi montré que c'est la fraction grossière qui constitue le compartiment le plus labile, du fait que le rapport C/N de la matière organique de ces fractions est relativement plus élevé (Felleret *al.*, 1991b) que celui de la fraction organo-minérale. Il est généralement admis en effet que ce sont les fractions jeunes et labiles de la matière organique du sol qui contribuent plus aux processus de minéralisation et d'immobilisation que les fractions de matière organique vieille et plus stable (Sedogoet *al.*, 1994; Bilgo, 2005). La fraction grossière constitue par conséquent une source de carbone et d'énergie pour les microorganismes. Nos résultats montrent que les teneurs en fractions organiques et organo-minérales sont plus élevée en surface qu'en profondeur. Ce qui

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

est en adéquation avec les résultats de Powers et Schlesinger (2002). Ces auteurs ont montré que le niveau de l'horizon peut aussi expliquer la variabilité de la concentration du carbone du sol, car les argiles des horizons inférieurs emprisonnent fortement le carbone qui ne peut être facilement oxydé.

Quant à la forte teneur en carbone des fractions dans les sols inondés et semi inondés, plusieurs travaux de recherche ont permis d'expliquer l'accumulation de la matière organique. Sahrawat(2004) a montré que la décomposition de la matière organique à travers les processus de respiration et de fermentation en anaérobiose est métaboliquement moins efficace et conduit à des décompositions lentes des substrats organiques, et partant, à une accumulation nette de ces composés organiques (Axt et Walbridge, 1999; Craft, 2001). Lors de la submersion, l'oxygène est rapidement épuisé et le rôle d'accepteur d'électrons pour l'oxydation du carbone par les microorganismes anaérobies, facultatifs ou obligatoires, est pris en charge par d'autres éléments, dissous dans la solution (NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , CO_2) ou présents sous forme solide comme le manganèse (MnO_2) réduit en Mn^{2+} ou le fer ferrique [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] réduit en fer ferreux (Fe^{2+}). La formation de complexes avec les cations, les sesquioxides et les minéraux argileux dans les sols stabilisent physiquement et chimiquement la fraction d'humus de la matière organique du sol (Oades, 1988; Feller et Beare, 1997; Wang *et al.*, 2003; Rumpel *et al.*, 2004). La paille de riz constitue en majorité les matériaux de reconstitution de la matière organique de sol de nos traitements. Glissman et

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

Conrad, (2002) et Jansen *et al.*, (2003) ont montré qu'avec le temps, la paille de riz devient plus récalcitrante à la dégradation. Sahrawat, (2004) ajoute que l'humification incomplète de la matière organique du sol est ainsi liée à l'état de submersion.

Les sols étudiés, avec une teneur en carbone organique compris entre 2,5% et 5,7% peuvent être considérés comme très riches en carbone organique total selon la synthèse réalisée par Boyadgiev (1980). Cette teneur moyenne de C n'est pas significative suivant les trois modes d'inondation. Cette matière organique est plus associée aux sables (50-2000 μm) qu'aux particules argilo-limoneuses ($\emptyset < 50 \mu\text{m}$). La même observation a été faite par Aholoukpe, (2013) sur les sols ferrallitiques du Sud Bénin sous palmeraie avec une restitution totale des feuilles d'élagage. En revanche, une contre observation stipulant que la MOS est plus associée aux particules argilo-limoneuses ($\emptyset < 50 \mu\text{m}$) qu'aux sables a été faite dans d'autres régions du Burkina Faso sur des sols ferrugineux tropicaux (Sedogo, 1993; Bacyé *et al.*, 1998; Pallo *et al.*, 2006;). Les deux fractions liées aux sables F [200-2000 μm] et F [50-200 μm] ont des teneurs en carbone plus élevées dans les sols inondés que dans les sols exondés. Ceci est attribué au fait que la décomposition de la matière organique est lente dans les sols inondés d'une part et aux conditions d'hydromorphie qui y règnent d'autre part. Il apparaît donc clairement que les différences significatives obtenues entre la teneur en carbone des fractions de la MOS des différents modes d'inondation sont dues à l'état de saturation en eau du

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

sol et confortent que les sols de riziculture inondée suivie de drainage constitueraient des "puits pour le carbone". Nos résultats sont en harmonie avec ceux de Wittet *al.*, (2000) et Segda (2006) qui ont montré la capacité des systèmes de riziculture irriguée à séquestrer le carbone et l'azote durant une courte période.

5.4.3. Mode de répartition de l'eau et dégagement de CO₂

Notre étude a prouvé que le sol hydromorphe du bas-fond émet du CO₂ dans l'atmosphère sous les trois modes d'inondation. Ces résultats informent sur l'intensité de l'activité microbienne qui régit la dynamique de la matière organique. La parcelle rizicole à écoulement naturel de l'eau a favorisé un dégagement de CO₂ plus important que celui observé pour les deux autres modes d'inondation. Ces résultats concordent avec ceux de Brito *et al.*, (2010) qui avait obtenu des valeurs similaires de dégagement dans un sol à texture fine sous la canne à sucre en Sao-Polo au Brésil.

La forte émission de CO₂ dans le sol à écoulement naturel de l'eau peut s'expliquer par les conditions aérobies qui s'y règnent. Le sol humide et oxygéné a facilité une minéralisation rapide de composés organiques accumulés dans le sol. La mise en culture sur des sols exondés provoque une minéralisation de la matière organique du sol (Djegui, 1992). Les quantités maximales de carbone dégagées sous forme de gaz

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

carbonique ont été observées dès les premiers jours d'incubation. Plusieurs facteurs peuvent être à la base de ce dégagement important de CO₂ obtenu dans les parcelles rizicoles à inondation naturelle. Il s'agit de la température du sol, labiomasse microbienne, les types de microorganismes et leurs métabolismes, qui n'ont pas été prises en compte dans cette étude. Chevallier *et al.*, (2016) ont montré que les émissions de CO₂ ont augmenté avec la température dans les sols calcaires du Nord-ouest de Tunisie. Les valeurs de CO₂ dégagé sous le traitement T1 sont corrélées positivement avec la quantité de carbone organique disponible et montrent une forte minéralisation dans les sols à inondation naturelle. Le rapport C/N sur les sols du traitement T1 est plus faible que sur les sols du T2 et du T3 ; ce qui montre ainsi que la minéralisation de la matière organique est meilleure sur T1 comparativement à T2 et T3.

Le sol des parcelles inondées a émis une faible quantité de CO₂ durant toute la période d'incubation avec une tendance progressive. L'augmentation des émissions de CO₂ en début d'incubation dans les sols inondés a déjà été rapportée par Chow *et al.*, (2006) et Hao *et al.*, (2011), qui l'attribuent à la persistance d'oxygène dans le milieu autorisant la respiration aérobie. La diminution plus tard des émissions de CO₂ malgré les fortes teneurs en carbone organique total du sol (tableau 2), témoignerait de l'épuisement de l'oxygène dans le milieu et de l'installation de conditions réductrices. Le carbone organique de nos échantillons de sol serait ainsi minéralisé via des processus

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

anaérobies tels que la fermentation, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Le taux de minéralisation du carbone organique par ces processus est plus faible que celui des processus aérobies (Kristensen *et al.*, 1995; Tete, 2014). C'est donc ce qui justifie en partie les faibles émissions de CO₂ constatées sous les traitements T2 et T3 comparativement à T1. Selon Tete (2014), ces processus entraîneraient une accumulation de composés organiques dont les acides organiques tels que le butyrate, le propionate, le formate, l'acétate etc., issus de la décomposition incomplète de la matière organique et dont la minéralisation par les microorganismes anaérobies produisent du H₂, du C-CO₂ ou du C-CH₄ (Schink, 1997; Dassonville et Renault, 2002; Khalil *et al.*, 2005). En d'autres termes, tant que le sol reste inondé, les conditions réductrices du milieu ne changent pas, les processus en jeu ne changent pas, ainsi que leur taux de minéralisation du carbone organique et par ricochet une faible émission de CO₂.

Sur le sol des parcelles sous le mode d'inondation suivie de drainage, il a été noté des émissions de CO₂ plus élevées que celle émise sur le sol à inondation permanente. Une période sèche suivie d'une brutale humectation du sol peut doubler le dégagement de CO₂ (Pritchard et Brown, 1979). Ce flush de minéralisation peut s'expliquer (i) soit par une modification du pédoclimat (température, humidité) et de l'aération du sol (Jorgensen *et al.*, 1998), (ii) soit par un éclatement des agrégats du sol (slaking) et donc par une déprotection vis-à-vis de la minéralisation du C localisé au sein de ces agrégats (Roberts et

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

Chan 1990). Pour ce mode, la quantité de CO₂ dégagé est inversement proportionnelle à la quantité de carbone organique disponible.

Des trois modes de répartition toposéquentielle de l'eau étudiés, il apparaît clairement que c'est l'écoulement naturel qui dégage une quantité importante de CO₂. Le mode d'inondation permanente des bas-fonds peut être alors considéré comme étant celui qui émet une faible quantité de CO₂. Toutefois, ces modes engendrent d'autres phénomènes néfastes à la production agricole comme la toxicité ferreuse. Cette toxicité ferreuse est un désordre nutritionnel qui affecte sévèrement la production de riz (Audebert *et al.*, 2006). Un équilibre efficient doit donc être trouvé entre le système agriculture - climat - sol. Nous recommandons donc les techniques et principes d'une agriculture climato intelligente. C'est une approche qui permet de définir les mesures nécessaires pour transformer et réorienter les systèmes agricoles dans le but de soutenir efficacement le développement de l'agriculture et d'assurer la sécurité alimentaire face au changement climatique. L'agriculture intelligente face au climat (AIC) vise à traiter trois objectifs principaux : l'augmentation durable de la productivité et des revenus agricoles (sécurité alimentaire); l'adaptation et le renforcement de la résilience face aux impacts des changements climatiques (adaptation); et la réduction et/ou la suppression des émissions de gaz à effet de serre (l'atténuation), le cas échéant (FAO, 2017). Cette approche est donc nécessaire pour rendre

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

l'agriculture plus productive et plus durable pour les générations futures.

5.4.4. Croissance et productivité du riz sous les modes de repartition de l'eau

Les résultats de la présente étude ont révélé que la vitesse de croissance des plants de riz n'est pas significativement différente suivant les modes d'inondation. Cependant ces modes d'inondation ont significativement induit une meilleure production du riz. La hauteur des plants au 30JAR, 60JAR, 90JAR, 120JAR a servi à calculer leur vitesse de croissance suivant les modes d'inondation. En effet selon la fiche technique élaborée par Siéet *al.*,(2013), le NERICA L20 atteint déjà son pic de croissance après la phase de l'initiation paniculaire. Nos résultats sont donc en phase avec les résultats de cet auteur. Selon ce même auteur, la variété de riz NERICA L20 a un rendement potentiel de 5-7 t.ha⁻¹ et un poids de 1000 grains autour de 31,28g. Le mode d'inondation suivie de drainage possède les paramètres de production de riz les plus satisfaisants. Nous avons enregistré un nombre moyen de talles de 11,41 avec un taux de 88% de talles fertiles et un rendement grain de 2,99 t.ha⁻¹ avec un poids de 1000 grains de 30,14g. Les résultats obtenus pour ce traitement sont alors proches des paramètres de production potentiel de la variété de riz utilisée. Bien que la même dose de fertilisant chimique soit apportée aux plants de riz pour tous les traitements confondus, de bonnes

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

performances agronomiques ont été enregistrées pour le traitement T2. Ceci nous fait penser à d'autres processus qui ont permis d'atteindre ces performances. Il s'agit de la fertilité intrinsèque du sol et de la toxicité ferreuse qui sévit dans le bas-fond. Dans ce bas-fond, Gbèto Dansou *et al.*, (2015) ont montré que la toxicité ferreuse y sévit et les producteurs de riz la perçoivent de diverses manières. La toxicité ferreuse est un syndrome de désordre alimentaire lié à la présence de grandes concentrations d'ion ferreux (Fe^{2+}) dans la solution du sol. Bien que la plupart des sols minéraux soient riches en fer, l'expression des symptômes de toxicité ferreuse dans les tissus foliaire et la baisse de rendement de riz qui en découlent ne se produisent que dans des conditions spécifiques d'inondation, qui entraîne la réduction par la flore microbienne des ions ferriques (Fe^{3+}) insolubles en ions ferreux (Fe^{2+}) solubles et assimilables par les plantes (Ponnamperuma, 1972). La sévérité de l'expression de la toxicité ferreuse chez le riz est liée à un certain nombre de facteurs de sol. Vizier, (1990) rapporte qu'après l'inondation des parcelles, lorsque le sol est bien drainé, aéré, les complexes organo-ferriques jouent un rôle important étant donné que les quantités de fer inorganique soluble Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})^{++}$ sont très inférieures aux besoins de la plante. Ces composés organo-ferriques peuvent se former à partir d'exsudats racinaires, de substances organiques présentes dans le sol ou de produits du métabolisme microbien. L'absorption du fer par les racines est précédée d'une réduction de Fe^{3+} en Fe^{2+} et, pour les chélates, d'une séparation du composé organique du

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

fer. La réduction, au contact de la racine serait assurée par une production d'électrons provenant des cellules racinaires (Mengelet *al.*, 1978) ou par des substances réductrices produites par certaines parties des racines (Uren, 1982).

Les paramètres de production de riz obtenus sur la parcelle à inondation naturelle sont très inférieurs aux paramètres potentiels de production. Le tableau 2 relatif à la caractérisation physico-chimique du bas-fond montre que le sol à inondation naturelle a de faibles propriétés chimiques, ceci peut expliquer cette faible performance. De plus dans les sols bien drainés, la toxicité ferreuse a une très faible incidence sur les paramètres de production de riz (Audebert et al, 2006).

De même de très faibles performances ont été observées sur les sols à inondation permanente. Ce faible rendement peut être dû à la toxicité ferreuse. Dans les sols inondés, saturés d'eau, évoluant en conditions anaérobies, les teneurs en fer dans la phase liquide sont par contre, très nettement supérieures aux besoins de la plante (tableau 2). Un mécanisme de régulation intervient au niveau de la racine. De l'oxygène, transféré des parties aériennes de la plante aux racines par les aérochymes, est libéré dans le sol et oxyde le fer ferreux au contact de la racine, limitant ainsi son absorption (Van der Vom *et al.*, 1979). Ce transfert d'oxygène est efficace lorsque la plante réagit bien à l'inondation, par des adaptations métaboliques qui favorisent par exemple, l'élongation internodale (Raskin et Kende, 1984) ou la formation d'aérochymes (Smirnoff et Crawford, 1983). Le maintien d'une rhizosphère oxydée est vital pour le riz, car il

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents modes d'irrigation

prévient l'absorption de substances réduites en trop fortes quantités par la plante (Trolldenier, 1977). Or pour ce traitement le sol est en permanence inondé, ce qui rend le milieu sans oxygène participant ainsi à une forte réduction du fer. Selon Audebert, (2006) dans un environnement de toxicité ferreuse, il y a un risque de 50 % pour qu'un cultivar ait un rendement en grain entre 70 et 45 % du rendement potentiel (conditions normales).

5.5 Conclusion

Cette étude consacrée à l'influence des modes d'inondation sur le statut de la matière organique et sur la capacité du dégagement du dioxyde de carbone dans le bas-fond rizicole d'AWOKPA a permis de comprendre le comportement de la matière organique du sol dans différentes conditions de submersion du sol en eau. Les résultats de cette étude ont révélé que :

- Le stock de carbone organique est plus élevé dans le mode à écoulement naturel malgré sa faible teneur en carbone organique du sol comparativement au mode d'inondation suivie de drainage et le mode d'inondation permanente.
- Les concentrations en C des fractions organiques grossières sont significativement supérieures à celles

Chapitre 5 : Statut de la matière organique et l'activité microbienne
d'un sol rizicole en relation avec la toxicité ferreuse sous différents
modes d'irrigation

dans les fractions organiques fines et organo-minérales et ce suivant tous les trois modes.

- Le dégagement du CO_2 sur les sols rizicoles à écoulement naturel est élevé ($7,63 \text{ mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) comparativement aux sols soumis au mode d'inondation suivie de drainage ($4,2 \text{ mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) et d'inondation permanente ($1,54 \text{ mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$).
- Les sols à inondation naturelle respirent mieux et leur matière organique se minéralise plus rapidement que dans les sols à inondation permanente et à inondation suivie de drainage.
- Le mode d'inondation suivie de drainage est le meilleur mode de répartition de l'eau dans le bas-fond pour une production de riz satisfaisante.

Chapitre 6: Effet des caractéristiques physico-chimiques du sol sur la toxicité ferreuse et sur le développement du riz

Les résultats de ce chapitre ont été publiés dans une revue indexée sous forme d'article référencé comme suit :

GBÈTO DANSOU G. Jean, AMADJI L. Guillaume Lucien et AHOLOUKPE Hervé, 2016. Dynamique de Fer ferreux (FeO) du sol de bas-fond en fonction de la répartition de l'eau selon la toposéquence au sud du Bénin : Phénomène de la toxicité ferreuse et production du riz. *Journal of Applied Biosciences (JAB)* 110. 10730-10746. ISSN 1997-5902.

6.1 Introduction

La riziculture de bas-fonds se pratique dans tous les départements du Bénin en raison de la présence des bas-fonds caractérisés par des sols hydromorphes sur toute l'étendue du territoire. Dans la plupart des cas, c'est un système de production qui dépend de la survenance des pluies. Elle se pratique dans des bas-fonds qui sont généralement non aménagés avec des rendements encore inférieurs à la moyenne nationale estimée à 3 tonnes à l'hectare. Les sols présentent dans leur morphologie des traces d'engorgement ou de saturation par l'eau appelées «traits d'hydromorphie» (traits rédoxiques, traits réductiques) (Baize & Girard, 2008; MEDDE GIS Sol, 2013).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Les différents travaux de recherche ont clarifié la plupart des contraintes de développement du riz de bas-fond et ont proposé des approches de solution. Mais celle de la toxicité ferreuse a fait l'objet d'une attention particulière de la part de l'ADRAO. La toxicité ferreuse est bien connue comme le désordre nutritionnel le plus répandu et le plus sévère limitant le rendement de la riziculture ouest africaine de bas-fonds. En effet, la toxicité ferreuse est une condition provoquée par la réduction microbienne en conditions d'inondation de l'oxyde ferrique insoluble (Fe^{3+}) en oxyde ferreux soluble (Fe^{2+}) qui peut être absorbé par les plants de riz en quantités excessives. Tous les types de bas-fonds (mangrove, irrigué et pluvial) peuvent être touchés par cette contrainte avec ou sans maîtrise de l'eau (Audebert et al., 2006). Elle se traduit par une réduction de la croissance du riz (hauteur et tallage), et par une augmentation du taux de stérilité des panicules. La productivité peut ainsi chuter de 10 à 100% selon la concentration en Fe^{2+} et selon le cultivar utilisé (**Masajo., 1986 ; et Abifarin, 1989**).

La dissolution des oxydes, des hydroxydes ou des oxyhydroxydes de fer peut se faire par voie biologique, grâce aux bactéries réductrices, et par voie chimique (acides forts, composés réducteurs et/ou complexants), dans des milieux spécifiques (**Lefebvre-Drouet & Rousseau, 1995; Bousserhine., 1999**). La réduction bactérienne du fer entraîne sa solubilisation et sa mobilité sous forme de Fe^{2+} . Elle affecte les propriétés des sols ainsi que la croissance des plantes. La submersion du sol entraîne des transformations physico-

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

chimiques et biologiques des sols, conduisant la zone racinaire des plants de riz d'un environnement aérobie à un environnement anaérobie ou proche de l'anaérobiose (**Roger, 1996**). **Broadbent (1979)** a conclu que le processus de minéralisation est affecté par la température du sol, le mode hydrologique, la sécheresse suivie par la saturation en eau du sol, la nature et la quantité de la matière organique et la teneur en argile. Dans les sols de rizières, les oxydes, hydroxydes ou oxyhydroxydes de fer peuvent subir des réactions d'oxydo-réduction suivant les conditions d'aération du milieu, la composition et l'état des solutions du sol, ou la présence des microorganismes qui interviennent directement ou indirectement par ces minéraux. Les états du fer oscillent entre deux phases Fe^{2+} (de couleur verte, plus mobile) et Fe^{3+} (de couleur rouille, peu mobile). Le passage d'une forme à l'autre est contrôlé principalement par les réactions d'oxydo-réduction ci-après : $Fe^{3+} + e^- \rightleftharpoons Fe^{2+}$ Il est possible d'établir des diagrammes de l'état du fer en solution selon les conditions d'aération et les paramètres du milieu: le pH et le potentiel redox (Eh), et pour une concentration donnée (**Mc Bride, 1994**). Le phénomène d'oxydoréduction des sols est donc un concept très important qui intègre tout un système et son étude fait appel à des pratiques et méthodes adéquates pour la durabilité des systèmes de production rizicole. Dans des conditions d'oxydoréduction où la toxicité ferreuse du sol peut être fatale à la culture du riz, notamment au sud du Bénin où 80% des bas-fonds subissent la toxicité ferreuse (**Gbèto Dansou, 2015**) Il est alors nécessaire de déterminer suivant les modes de répartition

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

de l'eau, le meilleur modèle d'évolution de fer ferreux, sous le riz favorisant sa bonne productivité. La présente étude se focalisera sur les conditions de développement et de l'accumulation du fer ferreux (répartition de l'eau selon la toposéquence, évolution du potentiel redox et du pH) et sur l'évaluation de la dynamique des paramètres de production du riz. C'est pour y parvenir que les aspects ci-après ont été étudiés et analysés : i) les conditions de production (répartition de l'eau, aménagements, potentiel redox, pH) ; ii) la teneur du sol en Fer ferreux ; iii) les paramètres de production (tallage, biomasse, rendement) et iv) l'effet conjugué de chacun des paramètres au niveau des traitements.

6.2 Matériel et Méthodes

6.2.1 Milieu d'étude (Voir chapitre 2 cadre de l'étude et Méthodologie générale)

6.2.2. Méthodes

La présente étude a conduit au début de l'expérimentation à une analyse physico-chimique des sols du bas-fond pour non seulement connaître le niveau de fertilité des sols mais aussi leurs caractéristiques granulométriques. Chaque parcelle a fait l'objet de prélèvement de sol à la profondeur 0-20 cm. Ainsi 12 échantillons de sol ont été prélevés Pour chaque échantillon prélevé, il a été déterminé la texture, le pH, l'azote total, la matière organique, les cations échangeables et le taux de saturation en bases échangeables.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Les mesures du potentiel redox (Eh) et du potentiel hydrogène (pH) ont été réalisées directement sur le site à l'aide du pH LETTER pc 228 au fur et à mesure que l'échantillon est prélevé tous les 15 jours pendant le cycle de développement du riz. Le moment de prélèvement représente la fréquence F d'observation. Les observations par quinzaine durant le cycle de développement du riz ont donné au total sept fréquences d'observations (F1 à F7).

Le fer total est évalué par la méthode la plus élémentaire pour obtenir une mise en solution de la totalité du fer d'un échantillon de sol. Après une destruction de la matière organique et une attaque à l'acide chlorhydrique concentré, suivi d'une filtration, le fer est dosé par absorption atomique. Le dosage du fer libre est fait par la méthode de Tamm, 1922 qui consiste à procéder à la solubilisation des formes amorphes minérales et organiques du fer par réduction avec l'oxalate d'ammonium à pH=3 à l'abri de la lumière. L'extraction du fer ferreux a été faite sur échantillon frais prélevé directement in situ avec du chlorure d'aluminium à 3%. La lecture a été faite au spectromètre d'absorption atomique

Les essais sont suivis pendant deux campagnes agricoles de quatre mois et au niveau de chaque traitement. Les données relatives aux paramètres de croissance (*densité ; nombre de talles par plant*) et aux paramètres de production (pesée de la biomasse, de la racine, des panicules, de grains de 1000 grains paddy) sont collectées sur le site et au laboratoire. En ce qui concerne Le nombre total de talles par plant et le nombre de

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

talles fertiles, l'observation est faite à la phase de fructification sur 10 plants choisis au hasard au niveau de chaque micro-parcelle soit 600 plants par année ou 1200 plants pendant la période d'observation. Les autres paramètres de production (biomasse, poids des racines et des grains de paddy) ont été obtenus au laboratoire après leur pesage frais ou séchés à l'étuve. Le rendement de production est obtenu après pesage de toute la production fraîche ou séchée obtenue sur chaque micro-parcelle de 4 m².

Une analyse de la variance à trois facteurs (année, répétition et mode d'irrigation), au moyen du logiciel SAS version 9.2, est effectuée pour voir s'il y a une différence statistiquement significative entre les modes d'irrigation du point de vue des données collectées. Pour cela le modèle mixte sera réalisé afin d'évaluer l'effet du mode d'irrigation sur les paramètres physico-chimiques du sol et sur les paramètres de production. Cette analyse a permis de tenir compte des corrélations entre les valeurs prises à différentes dates.

6.3 Résultats et Discussion

6.3.1. Evaluation des paramètres physico-chimiques du sol du bas-fond d'Awokpa

Avant d'entreprendre l'expérimentation il a été non seulement nécessaire d'apprécier les caractéristiques granulométriques des sols du bas-fond et surtout ceux des parcelles devant abriter les essais mais également de situer leur niveau de fertilité.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Les analyses de sol sont effectuées au Laboratoire des Sciences du Sol de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (FSA/UAC).

Le tableau 2 présente le résumé des résultats de ces différentes analyses de sol.

Tableau 6.1: Caractéristiques physico chimiques du sol du bas-fond

	Couche du sol	Sol du bas-fond		
		P1	P2	P3
% Sable	0-10 cm	81,47	70,72	66,18
	10-20 cm	74,53	73,7	68,29
	20-30 cm	85,82	77,62	63,27
% Limon	0-10 cm	12	12,85	19
	10-20 cm	13,35	14,65	15,85
	20-30 cm	4,75	13,25	20,05
% Argile	0-10 cm	6,20	15,50	14,20
	10-20 cm	12	10,65	15,15
	20-30 cm	8,65	8,30	16,20
Densité apparente (g/cm ³)	0-10 cm	1,58	0,50	0,32
	10-20 cm	1,84	0,41	0,20
	20-30 cm	1,58	0,26	0,34
pH eau	0-10 cm	5,95	5,59	6,04
	10-20 cm	5,98	5,85	6,06
	20-30 cm	6,02	5,94	6,02
Eh (mV)	0-10 cm	95,52	121,38	76,07
	10-20 cm	88,36	104,23	81,66
	20-30 cm	76,63	87,59	83,71
C (g/kg)	0-10 cm	41,44	52,93	57,38
	10-20 cm	31,26	38,83	44,98

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

	20-30 cm	25,70	27,18	35,65
N (g/kg)	0-10 cm	1,8	1,7	1,8
	10-20 cm	1,3	2,1	2,0
	20-30 cm	0,9	1,2	2,2
P assimilable (mg/kg)	0-10 cm	23,66	21,74	22,81
	10-20 cm	21,92	22,63	21,91
	20-30 cm	22,09	21,04	21,74
K ⁺ (cmol/kg)	0-10 cm	1,22	1,79	1,26
	10-20 cm	1,05	1,26	0,82
	20-30 cm	0,93	1,00	0,75
Mg ²⁺ (cmol/kg)	0-10 cm	2,51	3,21	2,87
	10-20 cm	1,9	2,76	2,47
	20-30 cm	1,04	2,84	2,27
Ca ²⁺ (cmol/kg)	0-10 cm	0,88	1,53	2,03
	10-20 cm	0,65	1,42	1,86
	20-30 cm	0,88	1,53	1,83
Fer libre (mg/kg)	0-10 cm	5498,99	5270,51	6869,89
	10-20 cm	3899,62	3214,17	3671,13
	20-30 cm	3214,17	2757,20	3442,65
Fer ²⁺ (mg/kg)	0-10 cm	1 573,08	1 208,69	1 963,09
	10-20 cm	1 718,20	1 439,32	1 883,65
	20-30 cm	1 964,58	1 705,05	1 848,87
C/N	0-10 cm	23,02	31,14	31,88
	10-20 cm	24,05	18,49	22,49
	20-30 cm	28,56	22,65	16,20

Selon les caractéristiques granulométriques et chimiques,, les sols du bas-fond d'Awokpa sont limono-sableux, acides et peu fertiles,

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

6.3.2. Dynamique du potentiel redox (Eh) du sol du bas-fond d'Awokpa durant la période de végétation du riz

L'analyse statistique des données du potentiel de réduction (Eh) révèle qu'il existe un effet de l'année et du mode de répartition de l'eau sur le potentiel redox (tableau 3). La différence entre les moyennes du potentiel redox est statistiquement significative en comparant les moyennes de Eh de l'année 2014 à celles de 2015 et en comparant les différents traitements entre eux.

Tableau 6.2 : Effet année, profondeur et reprise des traitements sur le potentiel redox

Source	DDL	Carré moyen	Pr > F
Année	1	6592723.506	<.0001
Traitement	2	37368.158	0.0003
Année*Traitement	2	7146.817	0.2096
Profondeur	2	299903.383	<.0001
Année*Profondeur	2	96372.392	<.0001
Traitement * Profondeur	4	3372.569	0.5660
Année*traitement*profondeur	4	2805.183	0.6527
Répétition	3	437893.449	<.0001
Année*repetition	3	6415.300	0.2398
Traitement*repetition	6	73894.001	<.0001
Année*traitement*repetition	6	24224.108	<.0001
Profondeur*repetition	6	2719.417	0.7346
Année*profondeur*repetition	6	164.210	0.9998
Traitement*profondeur*repetition	12	3735.941	0.6327
Année*traitement*profondeur*repetition	12	1281.043	0.9923
CV%		58,76073	

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Les conditions du développement du potentiel redox (Eh) sont liées à la quantité d'eau tombée et son séjour dans le bas-fond. La quantité d'eau enregistrée du mois d'août au mois de novembre correspondant à la période de production du riz en 2014 et en 2015 est respectivement de 513 mm en 28 jours et de 188 mm en 14 jours. Cette différence observée au niveau des hauteurs de pluie et de leur répartition dans le temps a influencé les conditions d'hydromorphie dans le bas-fond et a influencé l'Eh.

Les mesures du potentiel redox au niveau de la couche 0-10 cm ont permis de constater que la tendance des données au niveau de la figure 1 est ascendante et variant de 86 à 119 mv pour tous les traitements. Mais on assiste à un détachement des données (170 mv) du traitement du mode d'écoulement naturel de l'eau à la troisième fréquence des mesures. Les casiers de ce traitement sont en haut de pente et les plants de riz sont en cette période encore jeunes et ne couvrent pas suffisamment le sol. Cette situation a permis une aération du sol et a favorisé son oxydation temporaire pendant que les casiers des autres traitements étaient encore sous eau. Les grosses pluies intervenues dans la quinzaine suivante ont favorisé une submersion de tous les casiers du bas-fond et par conséquent ont ramené tous les sols des trois traitements aux mêmes conditions de réduction. D'une manière générale les valeurs du potentiel redox ont une tendance ascendante.

A la profondeur 10-20 cm, les sols sont pratiquement au même niveau de saturation en eau et les conditions de réduction sont

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

presque les mêmes. Les différences entre les traitements ne sont pas significatives. La même tendance ascendante de la courbe du potentiel redox (figure 1) observée au niveau de la couche 0-10 cm est plus nette au niveau de la couche 10-20 cm (figure 2). Les valeurs de Eh varient de 41 à 192 mv.

A la profondeur 20-30 cm, les valeurs du potentiel redox variant entre 20 et 175 mv sont les plus faibles (figure 3) avec une évolution semblable à celle des deux premières couches. Tous les trois traitements ont enregistré leurs plus fortes valeurs de Eh au niveau de la couche 20-30 cm à la 7^e mesure intervenant vers la fin du mois de novembre et au début du mois de décembre.

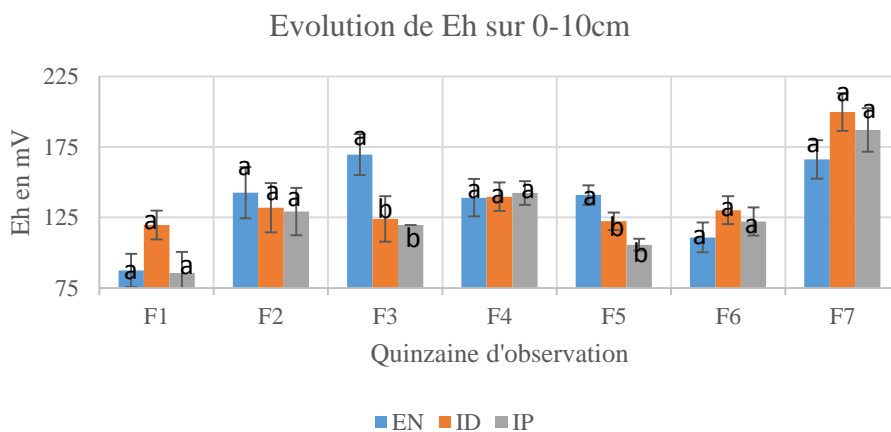


Figure 6.1: Evolution du potentiel redox Eh à la profondeur 0-10 cm

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

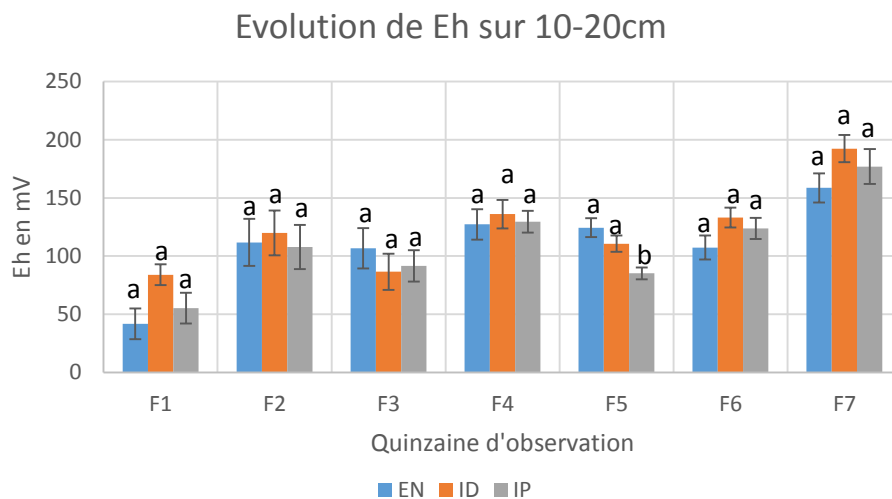


Figure 6.2: Evolution du potentiel redox Eh à la profondeur 10-20 cm

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

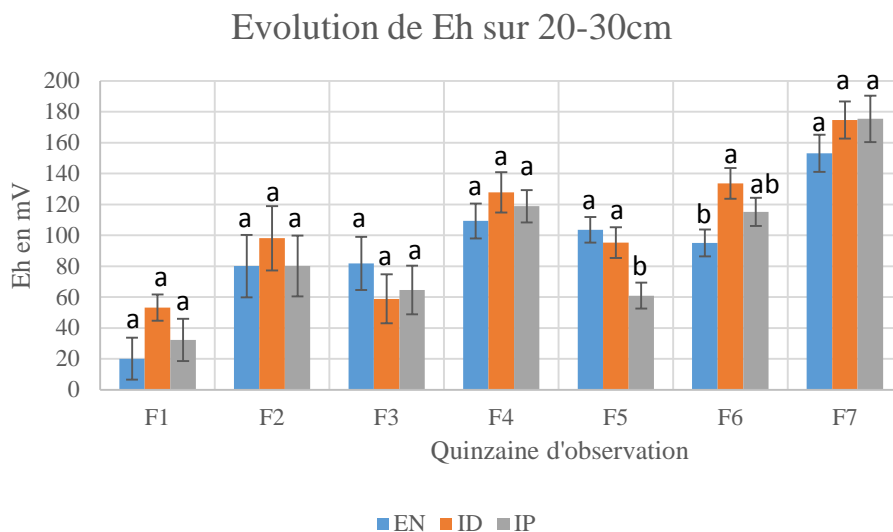


Figure 6.3: Evolution du potentiel redox Eh à la profondeur 20-30 cm

Les mesures du potentiel rédox ont permis de constater que dans le bas-fond d'Awokpa, on est en présence de deux types d'hydromorphie : l'hydromorphie moyennement réductrice et l'hydromorphie très réductrice (*Dommergues & Mangenot, 1970; Berthelin & DE Giudici 1991*). Notre étude a montré que le potentiel redox diminue avec la profondeur du sol.

Le mois d'août est sec et enregistre très peu de pluies. Ce qui aurait normalement favorisé le développement de l'oxydation des différents ions du sol et en particulier celui du fer ferreux et par conséquent permis l'augmentation du potentiel d'oxydoréduction (Eh) grâce à l'oxydation. Mais compte tenu de

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

l'état herbeux du bas-fond à cette époque et de l'importante quantité d'eau de pluie tombée dans le bas-fond pendant la période d'avril à juillet, l'humidité est généralement restée excessive et a favorisé le développement d'un milieu de réduction qui a conduit à la baisse du potentiel redox qui varient entre 74 et 133 mv. Ces résultats confirment ainsi les observations de **Vizier 1970** qui situe la valeur du Eh entre 100 et 175 mv après deux mois de submersion permanente. Une légère évolution du potentiel a été observée après le début des opérations agricoles (labour, curage des drains d'évacuation des eaux) grâce à l'aération du sol suivie d'une lente chute de Eh après le retour des pluies des mois de septembre et d'octobre. La rareté des pluies des mois de novembre et de décembre a favorisé la diminution des eaux dans les casiers et a conduit à l'évolution de la valeur de Eh qui a atteint 200 mv favorisant ainsi le développement d'un milieu d'oxydation

Les valeurs du Eh de l'écoulement naturel de l'eau sont restées au-dessus de celles des deux autres traitements pendant la période de production du riz à cause de la position de ses casiers situés en haut de pente dans le bas-fond. Le traitement 3 à inondation permanente du sol a enregistré les plus faibles valeurs de Eh à cause de la submersion prolongée des casiers situés au bas de pente alors que celles du traitement 2 d'inondation suivie de drainage sont en situation intermédiaire.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

6.3.3. Effet du mode de repartition de l'eau sur l'acidité active (pH eau) du sol du bas-fond d'Awokpa

A chaque fois que le paramètre Eh est mesuré, le pH l'est également. Le tableau N°6.3 du traitement statistique des données de pH révèle qu'il existe un effet année et traitement.

Figure 6.4: Effet année, traitement, profondeur et reprise sur le pH

Source	DD L	Carré moyen	Pr > F
Année	1	1549,8536 73	<.000 1
Traitement	2	8,038644	0,005 9
Année*Traitement	2	2,853922	0,161 0
Profondeur	2	71,010514	<,000 1
Année*Profondeur	2	30,891668	<,000 1
Traitement * Profondeur	4	0,627602	0,807 3
Année*traitement*profondeur	4	0,568265	0,834 4
Répétition	3	88,394562	<,000 1
Année*répétition	3	1,039846	0,572

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

			9
Traitement*répétition	6	17,237147	<,000
			1
Année*traitement*repetition	6	4,007106	0,017
			6
Profondeur*répétition	6	0,711168	0,841
			5
Année*profondeur*répétition	6	0,087517	0,999
			3
Traitement*profondeur*répétition	12	0,926228	0,849
			4
Année*traitement*profondeur*repetition	12	0,394425	0,995
			3
CV%		21,64022	

Il existe également un effet profondeur et répétition sur le pH comme observé au niveau du potentiel redox. L'étude a montré que les premières mesures du pH de la couche 0-10 cm ont donné une valeur qui est autour de 6 pour tous les 3 traitements (figure4). Le sol s'est progressivement acidifié et a atteint 4,56 à la fin des mesures.

Pendant que l'évolution du potentiel redox avait une tendance ascendante, le pH a quant à lui une tendance baissière. Plus le milieu est réduit, alors le pH du sol sous le riz devient neutre et évolue progressivement vers un sol basique. Plus le milieu de la solution du sol est oxydé, entraînant une augmentation de la valeur du Eh, alors le sol s'acidifie et atteint des valeurs de pH très basses qui pour la couche 0-10 cm varient entre 4,5 et 5.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

A la profondeur 10-20 cm (figure 5), le pH a gardé la même tendance baissière observée qu'au niveau de la couche 0-10 cm (figure 5). Les casiers sous inondation suivie de drainage ont un sol légèrement plus acide que celui des sols des autres modes de répartition des eaux. Les deux premières semaines du mois de septembre ont été très peu pluvieuses pendant les deux années, entraînant un trou de sécheresse favorisant au niveau de tous les traitements une oxydation de la solution du sol au moment de la quatrième mesure du pH et entraînant une baisse sensible des valeurs du pH.

Au début des mesures à la profondeur 20-30 cm (figure 6) le pH est basique atteignant une valeur proche de 8. A cette même profondeur, le pH a atteint ses plus faibles valeurs à la fin des mesures.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

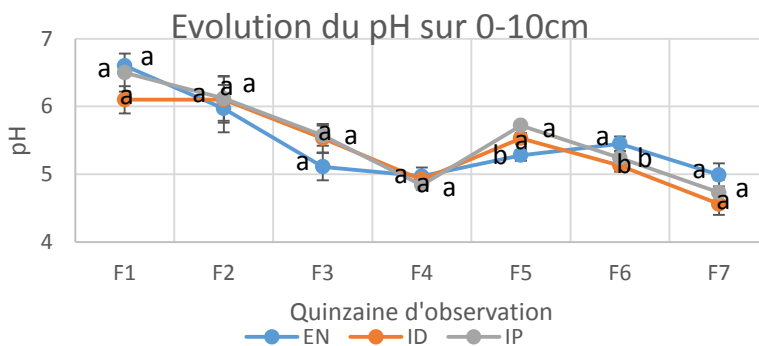


Figure 6.5: Evolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 0-10 cm

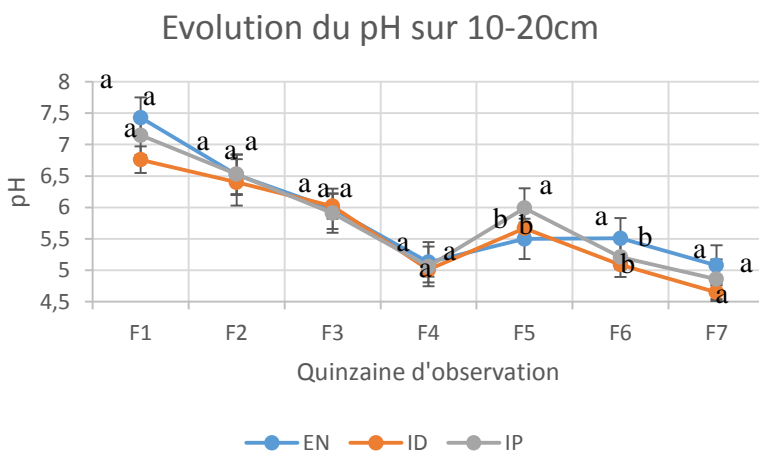


Figure 6.6: Evolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 10-20 cm

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

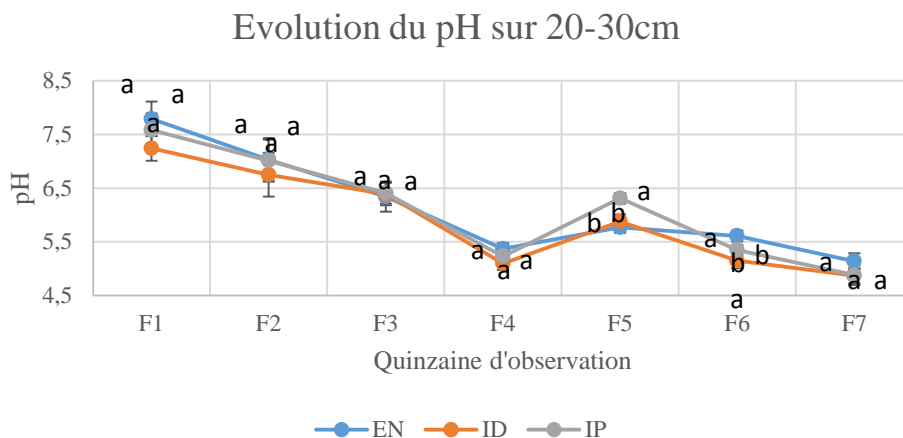


Figure 6.7: Evolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 20-30 cm

D'une manière générale les sols du bas-fond d'Awokpa sont acides. Au début des mesures il a été enregistré au niveau de toutes les couches des pH proches de la neutralité, mais vers la fin des opérations de production les sols se sont acidifiés avec un pH qui est descendu jusqu'à 4,56. Après la chute des valeurs du pH au début de la production rizicole, on a assisté au retour des pluies et à leurs remontées à la cinquième fréquence des mesures, favorisant une différence statistiquement significative des moyennes de pH pour tous les traitements.

Il existe une relation statistiquement significative ($p < 0,05$) et inversement proportionnelle entre les paramètres Eh et le pH.

Les valeurs moyennes de Eh et pH sur la profondeur 0-30 cm de sol révèlent une relation négative entre ces deux variables. Pendant que l'évolution du potentiel redox a une tendance

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

ascendante avec le temps, le pH a quant à lui une tendance baissière. Plus le milieu est réduit, alors le pH du sol sous le riz devient neutre et évolue progressivement vers un sol basique. Plus le milieu de la solution du sol est oxydé, entraînant une augmentation de la valeur du Eh, alors le sol s'acidifie et atteint des valeurs de pH très basses. Ce constat est confirmé par le coefficient de corrélation de Pearson, $R = -0,883$, indiquant une relation significativement négative et très forte entre les deux variables.

6.3.4. Influence du mode d'irrigation sur la dynamique de la teneur en Fer Ferreux dans les sols du bas-fond d'Awokpa

Le tableau 5 du traitement statistique des données de la teneur du sol en fer ferreux révèle qu'il existe un fort effet année et profondeur sur l'accumulation du fer ferreux dans le sol du bas-fond d'Awokpa.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Tableau 6.4: Effet année, traitement, profondeur et reprise sur la teneur en fer ferreux du sol

Source	DDL	Carré moyen	Pr > F
Année	1	202408152.8	<.0001
Traitement	2	4841576.5	0.0281
Année*Traitement	2	1856822.2	0.2526
Profondeur	2	15907156.7	<.0001
Année*Profondeur	2	8266368.0	0.0023
Traitement * Profondeur	4	511986.3	0.8226
Année*traitement*profondeur	4	940864.4	0.5928
Cv%		76,886	

La différence entre les moyennes de la teneur du sol en fer ferreux est statistiquement significative et inversement proportionnelle entre les paramètres Eh et fer ferreux. On constate que plus la valeur de Eh diminue, plus la teneur en fer ferreux du sol est élevée et ce constat est confirmé par un coefficient de corrélation R de Pearson de -0,876 indiquant une relation statistiquement significativement négative et très forte entre les deux variables.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Evolution du fer ferreux sur 0-10cm

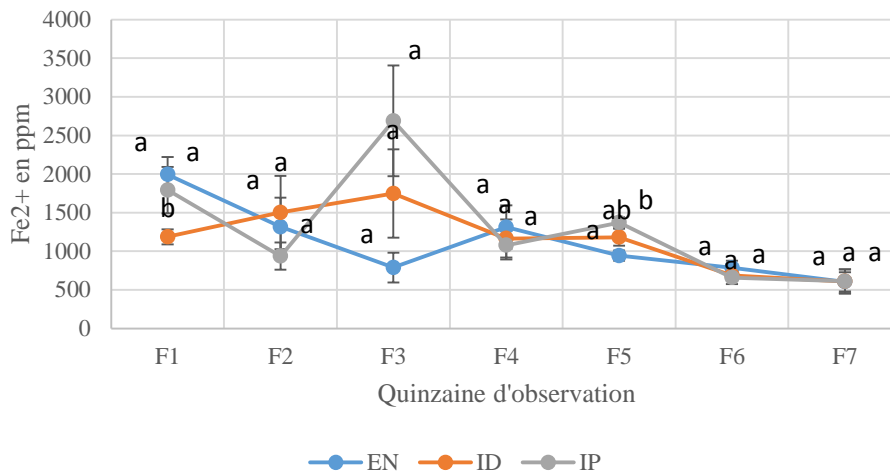


Figure 6.8: Teneur en fer ferreux à la profondeur 0-10cm

A la profondeur 0-10 cm, l'évolution de la teneur en fer ferreux a d'une manière générale connu une tendance baissière pour tous les traitements avec une accumulation plus importante au niveau du traitement : inondation suivie de drainage (figure 7)

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

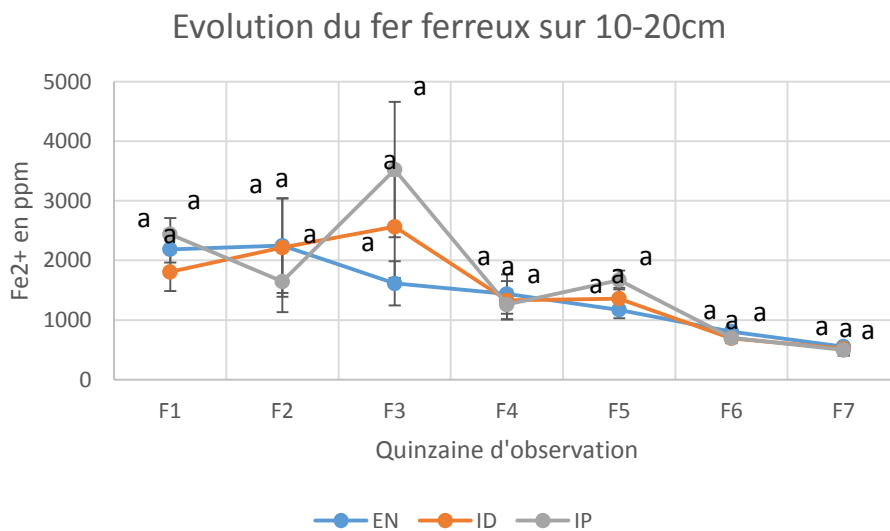


Figure 6.9: Teneur en fer ferreux à la profondeur 10-20cm

La tendance baissière observée au niveau de la couche 0-10 cm est restée la même au niveau de la couche 10-20 cm (figure 9). Toutefois les teneurs du sol en fer ferreux sont plus importantes au niveau de cette couche.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Evolution du fer ferreux sur 20-30cm

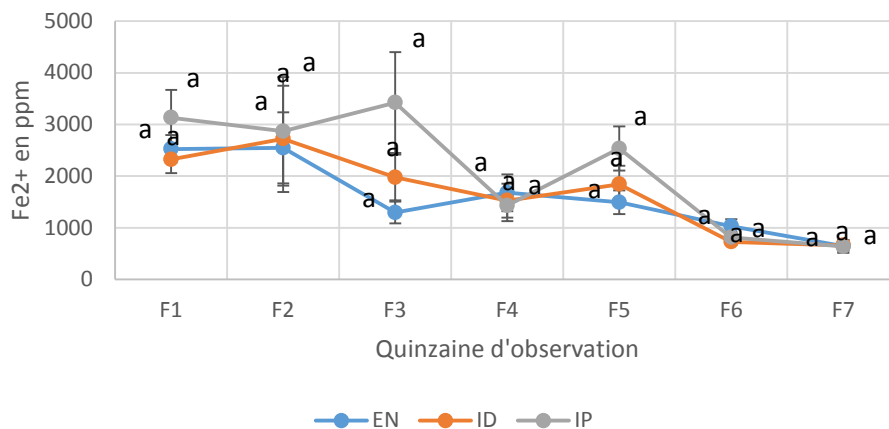


Figure 6.10: Teneur en fer ferreux à la profondeur 20-30 cm

La même tendance baissière est observée au niveau de la couche 20-30 cm avec une forte teneur du fer ferreux au niveau du traitement : inondation permanente.

La teneur en fer ferreux a baissé du début de la production du riz (période de repiquage au mois d'aout) à la récolte (fin mois de novembre début décembre) pour tous les traitements. Cette tendance baissière de la teneur en FeO est conforme au comportement de l'évolution du potentiel redox qui passe des conditions de réduction aux conditions de début d'oxydation. La vidange des casiers sous eau réalisée naturellement par l'arrêt des pluies en novembre avant la récolte du riz, conduit à une reoxydation de fer ferreux en fin de campagne (Sahrawat, 1979) et justifie la baisse considérable de la teneur du sol en fer ferreux enregistrée en fin de production rizicole. Les différentes

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

répartitions de l'eau dans le bas-fond d'Awokpa ont eu des effets différents sur le phénomène d'oxydoréduction dans le sol. Le le traitement 'inondation permanente a la plus forte teneur en fer ferreux et celui de l'écoulement naturel de l'eau a la plus faible teneur. La situation qui fait suivre l'inondation d'un drainage a enregistré une teneur en fer ferreux intermédiaire entre les deux premiers

En milieu naturel comme celui du bas-fond d'Awokpa, la réduction bactérienne du fer ferrique est un phénomène bien connu. Elle est considérée comme le principal facteur de la dissolution des oxydes (*Munch & Ottow, 1980; Munch & Ottow, 1983; Bousserhine 1999; Ehrlich, 2002*) et influence les cycles biogéochimiques de plusieurs éléments. La réduction bactérienne du fer entraîne sa solubilisation et sa mobilité sous forme de Fe^{2+} mais aussi celle du phosphate ainsi que la croissance des plantes. Dans la présente étude, la toxicité ferreuse a été assimilée à sa survenue qui se remarque par des pellicules brunâtres à la surface de l'eau. La toxicité de ce phénomène a été constatée par l'absence de tallage, la formation de faux grains (paddy vide) et le brunissement des feuilles des pieds de riz aux endroits où est constatée la présence des pellicules. La toxicité ferreuse se manifeste dans les rizières lorsque d'importantes quantités de fer (Fe^{2+}) sont mobilisées et accumulées dans la solution du sol, notamment au niveau du bas-fond. Dans le bas-fond d'Awokpa, ce fer peut provenir de la mise en solution in situ, dans le bas-fond, ou du transfert de fer solubilisé des pentes adjacentes du bas-fond en occurrence des collines de latérite qui jouxtent le bas-fond. De ces collines

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

sortent des sources d'eau chargées en fer qui se jettent permanemment dans le bas-fond. Toutefois, des travaux ont mis en évidence l'influence que peut avoir la couverture végétale sur les processus de migrations du fer (**Boquet & Suavin, 1974**). Le bas-fond d'Awokpa étant généralement humide constitue une bonne condition de développement des adventices qui forment des litières qui peuvent aussi libérer directement ou par biodégradation, des acides organiques susceptibles de former des complexes organo-métalliques qui précipitent sous forme d'hydroxyde. De nombreux travaux ont montré que dans les environnements anaérobies comme les sols très hydromorphes, les bactéries ferri réductrices joueraient un rôle important dans la décomposition des matières organiques naturelles (**yao & Conrad, 1999 ; Lu, 2002 ; Stemmler et Bertelin, 2003**).

6.3.5. Effet des différents traitements sur les paramètres de croissance du riz

Effet des traitements sur le niveau de tallage des plants

Cette étude met en évidence l'effet que peuvent avoir les modes d'irrigation sur les paramètres de développement des plants du riz. Le niveau de tallage des plants et leur fertilité ont connu une différence statistiquement significative d'un mode à un autre (tableau 6.2).

Tableau 6.2: Effet des traitements sur le tallage des plants

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Traitement	Nombre total de talles/ plant	Nombre de talles fertiles / plant
EN	8,01±0,35c	6,23±0,36c
ID	11,30±0,32a	9,75±0,31a
IP	9,64±0,31b	7,72±0,30b

L'un des phénomènes pouvant agir négativement sur le niveau de tallage des plants du riz est la toxicité ferreuse qui résulte de l'accumulation excessive du fer ferreux et le niveau de fertilité des sols. Si on se réfère aux figures 7, 8 et 9 on peut dire que le traitement écoulement naturel de l'eau est celui qui a enregistré une faible teneur du sol en fer ferreux. Le tableau N°8 révèle que c'est ce traitement qui a enregistré le plus faible nombre de talles..On peut alors conclure que l'accumulation du fer ferreux ne pourrait être le seul facteur explicatif du taux de tallage des plants du riz dans le bas-fond d'Awokpa. Les résultats d'analyse chimique du sol (tableau 2) montrent que d'une manière générale, les sols du bas-fond d'Awokpa sont peu fertiles malgré leur fort taux de matière organique de 7%. Les casiers sous écoulement naturel de l'eau sont en haut de pente et subissent plus le lessivage et le transport des éléments nutritifs par les eaux de ruissellement venus des plateaux vers les casiers en bas de pente. Ce phénomène n'a pas été spécifiquement pris en compte dans la présente étude.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

6.3.6. Effet de la répartition de l'eau selon la toposéquence du bas-fond sur les paramètres de rendement du riz

La répartition de l'eau dans le bas-fond a non seulement impacté le niveau de tallage des plants du riz mais aussi les paramètres de production. D'une manière générale, il existe une relation entre le tallage des plants et le rendement. Mais de façon spécifique cette relation est corrélée entre le nombre de talles fertiles par plant et le rendement par un coefficient de Pearson R de 0,337. Il existe d'effet année sur les rendements du riz alors que les répétitions (bloc) n'ont aucune influence sur les paramètres de production.

La différence entre les moyennes du poids sec des panicules des traitements est statistiquement significative à 95% (tableau8). Tandis qu'au niveau des rendements cette différence n'est pas significative statistiquement entre le traitement d'inondation permanente et celui d'écoulement naturel de l'eau. Le taux de tallage, le taux de talles fertiles et poids des panicules par plant ont permis d'avoir un rendement dont le poids frais obtenu au niveau des micro-parcelles varie de 2610 à 3500kg/ha soit 2103 à 2854kg/ha.de poids sec. Ce rendement est proche ou légèrement supérieur à celui que rapportent les rapports annuels de 2013, 2014 et 2015 du CARDER Atlantique/Littoral /MAEP du Bénin (3000 kg/ha) de la zone d'étude.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Tableau 6.3: Effet des traitements sur le rendement du riz

Traitement	Poids sec des panicules /plant (g)	Rendement poids sec (kg/ha)
EN	16,98±0,69c	2103,2±180,1b
ID	33,76±1,23a	2854,0±174,1a
IP	21,91±1,33b	2439,7±146,5b

6.4 Conclusion

Cette étude met en évidence l'impact que peut avoir la répartition de l'eau dans le bas-fond selon la toposéquence sur la toxicité ferreuse dans les horizons 0-10, 10-20 et 20-30 cm et l'effet du développement de ce phénomène sur les paramètres de production du riz. Si dans la couche 0-10 cm, la teneur du fer ferreux varie de 1993 à 604 ppm pour tous les traitements alors à la profondeur 20-30 cm cette teneur varie de 3132 à 660 ppm. La tendance d'accumulation du fer ferreux est baissière du début à la fin du cycle de production du riz quelque soit le mode de répartition des eaux dans le bas-fond. Le traitement d'inondation permanente a connu la plus forte concentration du fer ferreux tandis que celui d'écoulement naturel de l'eau a connu la plus faible concentration.

La production a elle aussi réagi aux effets du phénomène de l'oxydoréduction qui pour ce bas-fond est la toxicité ferreuse. Les paramètres de production du riz ont été fortement influencés. Il s'agit notamment du tallage, des talles fertiles et du poids des panicules par plant. Il a été enregistré au niveau du traitement inondation suivi du drainage un rendement 3500kg/ha soit 2854kg/ha de grains secs supérieur à la moyenne de la zone d'étude. Le rendement le plus faible de 2610kg/ha soit 2103kg/ha de grains secs est obtenu au niveau de celui d'écoulement naturel de l'eau. Les casiers sous écoulement naturel de l'eau ont été influencés par le niveau faible de fertilité de sols.

Chapitre 7: Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

7.1 Introduction

Le riz est cultivé dans 117 pays dans le monde et sur plus de 144 millions de fermes emblavant environ 162 millions d'hectare en 2010 (GRiSP, 2013). Il apparaît comme la seconde céréale la plus consommée après le blé et le troisième produit le plus exporté dans le monde après le maïs et le blé (Agnoun *et al.*, 2012). Environ 479,2 millions de tonnes de riz sont produites chaque année pour une consommation humaine moyenne de 468 millions de tonnes (FAO, 2013). La production du Bénin en grain de riz ne représente que 1,42 % de la production totale de riz en Afrique de l'Ouest (FAO, 2013). Selon AfricaRice (2013), le taux d'accroissement national annuel de la production est de 3,2 % alors que celui de la demande est de 5 %. Ce gap contraint le pays à recourir aux importations pour satisfaire une demande nationale en riz constamment en hausse. Avec l'hypothèse que la demande ira en s'accroissant compte tenu de l'urbanisation galopante, il est alors nécessaire de consentir d'énormes efforts pour couvrir les besoins nationaux de cette céréale. Ces besoins nationaux sont satisfaits à peine à 2/3 par la production nationale alors que le pays dispose d'un potentiel important pour la production du riz (MAEP, 2010). En effet, au Bénin, on rencontre plusieurs types

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

de production de riz liés à différents modes d'inondation. Il s'agit du riz pluvial sous le contrôle de la pluviosité, du riz de bas-fond produit dans des conditions d'humidité excessive, du riz irrigué produit dans des casiers rizicoles où la quantité d'eau apportée est partiellement ou totalement maîtrisée. De plus, le Bénin fait partie des pays de l'Afrique de l'Ouest qui disposent d'importantes ressources hydrauliques et hydroagricoles réparties sur l'étendue du territoire national. La superficie totale de terres irrigables est d'environ 322.000 ha dont 117.000 ha sont des plaines inondables et 205.000 ha sont des bas-fonds (DGR/CBF, 2003). Seulement 55.648 ha de bas-fonds sont exploités avec environ 10% des bas-fonds disponibles emblavés pour la riziculture (SNDR, 2010).

La production rizicole de plateau présente une grande incertitude en raison de l'effet combiné des aléas climatiques (sécheresse, mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies) et des menaces liées à la pression parasitaire. Tandis que la riziculture de bas-fonds offre une certaine garantie pour une production intensifiée et durable, grâce à son mode hydrodynamique. La riziculture de bas-fonds se pratique dans tous les départements du Bénin en raison de la présence des bas-fonds sur toute l'étendue du territoire. Dans la plupart des cas, c'est un système de production qui dépend de la survenance des pluies (SNDR, 2010). Elle se pratique dans des bas-fonds qui sont généralement non aménagés avec des rendements encore inférieurs à la moyenne estimée à 3 tonnes à l'hectare. Les sols de ces bas-fonds sont généralement de type hydromorphe et sont caractérisés par des modes hydriques spécifiques : alternances

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

de conditions de saturation et de non-saturation en eau, induites par l'action des processus naturels (excès de pluviométrie, apport complémentaire d'eau en surface ou en profondeur par ruissellement, inondation ou fluctuation du niveau de nappe, drainage interne limité) ou anthropiques (inondation et drainage artificiel), qui déterminent la durée et l'intensité de chaque mode. Les conditions de saturation, si elles sont longues, induisent un manque d'oxygène dans le sol et créent des conditions réductrices, alors que si elles sont courtes et temporaires, elles induisent des alternances de conditions d'oxydation et de réduction dans le sol. Ces sols présentent dans leur morphologie les traces d'engorgement ou de saturation par l'eau appelées « traits d'hydromorphie » (traits rédoxiques, traits réductiques) (Baize et Girard, 1995; MEDDE GIS Sol, 2013).

Dans les bas-fonds, la production du riz de bas-fond est confrontée à plusieurs contraintes dont les principales sont la baisse de la fertilité des sols due à la monoculture de riz et la présence de la toxicité ferreuse (Sahrawat, 2004). Les bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest occupent 30% de l'aire totale de la production rizicole. Cependant, ils sont sous la contrainte du stress de la toxicité ferreuse (ADRAO, 2006). Les inondations affectent jusqu'à un tiers des superficies de bas-fond pluvial en Afrique Sub-saharienne (Africa Rice, 2014). Plus de 60% du riz cultivé dans les bas-fonds sont touchés par la toxicité ferreuse et 10% des champs de cultures de plaine sont même abandonnés (Cherif *et al.*, 2009). Les pertes de rendements en grains dues à la toxicité ferreuse, varient entre 15 et 30 % mais peuvent atteindre dans certains cas 100 % (ADRAO, 2006). En effet, la

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

toxicité ferreuse est une condition provoquée par la réduction microbienne en conditions d'inondation de l'oxyde ferrique insoluble (Fe_2O_3) en oxyde ferreux soluble (FeO) qui peut être absorbé par les plants de riz en quantités excessives. Tous les types de bas-fonds (mangrove, irrigué et pluvial) peuvent en être touchés avec ou sans maîtrise de l'eau (Audebert, 2006a). Outre les symptômes caractéristiques du "bronzing" ou du "yellowing" des feuilles, la toxicité ferreuse se traduit également par une réduction de la croissance du riz (hauteur et tallage), et par une augmentation du taux de stérilité des panicules (ADRAO, 2006).

Afin d'atténuer l'incidence de la toxicité ferreuse sur le riz, plusieurs options de gestion à l'échelle champs ont été proposées aux riziculteurs. Ces options sont relativement liées aux pratiques agronomiques, notamment à la gestion et la maîtrise de l'eau permettant d'empêcher le mouvement du fer provenant des plateaux, le drainage des casiers rizicoles afin d'aérer les sols et débarrasser le sol du fer ferreux, l'utilisation des variétés résistantes, l'utilisation du phosphore et de la silice (Sahrawat, 2004 ; Audebert et Fofana, 2009 ; Chérif *et al.*, 2009). Aussi, la toxicité ferreuse n'est-elle qu'un résultat du phénomène d'oxydoréduction qui varie selon la teneur en eau du bas-fond. Ainsi le mode de répartition de l'eau des casiers rizicoles a une influence sur le phénomène d'oxydoréduction et donc sur la toxicité ferreuse. C'est dans l'optique de mieux cerner l'influence du mode de répartition de l'eau sur ce phénomène que la présente étude intitulée : «*Déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse et production du riz dans un*

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

bas-fond du Sud-Bénin» a été conduite dans le bas-fond d'Awokpa, Commune de Zè au Sud du Bénin. Les principales questions de recherche de cette étude sont les suivantes : Quelle est l'influence du mode de répartition de l'eau sur la variation spatiale et temporelle des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse ? Quel est suivant les modes d'inondation, l'effet de la toxicité sur la production du riz ? Et enfin quelle est suivant le mode de répartition de l'eau, la relation qui existe entre les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse et le rendement du riz ?

7.2 Matériels et Méthodes

7.2.1. Milieu d'étude (voir cadre de l'étude)

7.2.2 Méthodes

➤ *Collecte des données*

Dans le but de faire une caractérisation générale du bas-fond, des prélèvements de sols ont été faits à trois différentes profondeurs (0-10, 10-20, 20-30 cm) dans des casiers rizicoles retenus pour la conduite de l'expérimentation. Ces échantillons ont été séchés à l'air puis tamisés à 2 mm. Ils ont été utilisés pour doser les principales propriétés physico-chimique du sol : pH, Eh, carbone organique (Corg), azote total (Nt), phosphore assimilable (Pass), granulométrie, bases échangeables (K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}), le fer ferreux (Fe^{2+}), le fer libre encore appelé fer extractible à l'oxalate d'ammonium (Fe_{OX}) et le fer total (FeT).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Les données ont été collectées suivant les objectifs spécifiques :

- *Evaluer la variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse du sol*
- *Evaluer l'effet du mode de répartition de l'eau sur ces propriétés chimiques.*

Afin d'atteindre ces deux objectifs, des échantillons de sol ont été prélevés au niveau des micro-parcelles à trois profondeurs à savoir : de 0 à 10 cm, de 10 à 20 cm et de 20 à 30 cm. Les échantillons de même couche de prélèvement ont été mélangés afin d'avoir par profondeur un échantillon composite représentatif de la parcelle. Les données ont été collectées tout au long de la campagne de production du riz. Ces données ont été prises à une fréquence de 15 jours, ce qui donne sept périodes d'observation durant tout le cycle de la culture du riz. Les propriétés chimiques déterminantes de la toxicité ferreuse évaluées sont les suivantes : pH, potentiel redox (Eh), la teneur en fer ferreux (Fe^{2+}), et le fer libre (Fe_{OX}).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse



Figure 7.1: Prélèvement d'échantillons de sol à la tarière

- *Etudier les effets du mode de répartition de l'eau des casiers rizicoles sur la production du riz.*

Pour atteindre cet objectif, les données collectées sont beaucoup plus basées sur les paramètres agronomiques du riz. Pour cela, dix plants ont été fixés dans les micro-parcelles d'observation. Toutes les données ont été collectées sur ces plants. Les paramètres suivants ont été relevés :

- La hauteur du plant : a été mesurée du collet de la plante jusqu'au bout de la feuille la plus longue. Elle a été prise respectivement à 30, 60 et 90 jours après repiquage (JAR). Cette mesure a permis l'évaluation de l'effet du mode de répartition de l'eau sur la vitesse de croissance et la hauteur des plants.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

- Le poids de la biomasse fraîche totale a été pris avec une balance électronique. Le poids sec a été également pris après séchage des plants à l'étuve à une température de 65°C jusqu'à poids constant. Ce paramètre a permis d'évaluer l'effet du mode de répartition toposéquentielle de l'eau sur le rendement en paille.
 - Le nombre de talles a été obtenu par comptage.
 - A la récolte, les plants de chaque micro-parcelle sont coupés, battus et vannés.
- *Etablir la relation entre les propriétés chimiques déterminantes de la toxicité ferreuse du sol et le rendement du riz en fonction des modes de répartition de l'eau*

Les données collectées précédemment ont été utilisées pour l'atteinte de cet objectif.

➤ Techniques d'analyse chimique des sols

- Le potentiel d'oxydoréduction (Eh) et le pH ont été mesurés in situ à l'aide d'un pH-mètre de terrain (Figure 6).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse



Figure 7.2: pH-mètre utilisé pour la mesure in situ

- La teneur en Pass a été déterminée en utilisant la méthode de Bray 1 (Bray and Kurtz, 1945). La solution d'extraction est composée de NH_4F et de HCl . Le filtrat est coloré par le molybdate d'ammonium en présence de l'acide ascorbique et l'intensité de la coloration est déterminée par colorimétrie à la longueur d'onde de 660 nm.
- Le taux de matière organique (MO) a été déterminé par la méthode de Bell (Bell, 1964) qui consiste à sécher le sol sec tamisé et broyé à 0,2 mm à l'étuve à 105°C puis à l'incinérer au four à 550°C. Le taux de carbone

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

organique a été obtenu en divisant celui de la MO par 1,724.

- L'azote total est déterminé par la méthode de Kjeldahl (1883) consistant en une digestion acide suivie d'une micro-distillation. Le sol est traité par l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré en présence d'un comprimé de sélénium (servant de catalyseur). La distillation est faite par entraînement de la vapeur en présence de 50 ml de NaOH 50%. Le distillat est recueilli dans un erlenmeyer qui contient 20 ml d'acide borique (H_3BO_3) et 4 gouttes d'indicateur à base de rouge de méthyle. Le titrage est fait avec l'acide sulfurique (H_2SO_4) 0,1 N.
- Les cations échangeables ont été déterminés par la méthode de Helmke et Sparks (Helmke et Sparks, 1996). Elle consiste à lire les cations au spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA) après extraction avec de l'acétate d'ammonium neutre.
- La texture a été déterminée après analyse granulométrique utilisant la méthode de pipette (Robinson, 1949).
- Le Fer libre a été dosé par la méthode de Tamm décrit par Dubois, (1994). Dans cette méthode, on a procédé à la solubilisation des formes amorphes minérales et organiques du fer par réduction avec l'oxalate d'ammonium à pH=3 à l'abri de la lumière. Ensuite la lecture a été faite au SAA.
- Le Fer total a été dosé par la méthode proposée par Dabin. Il s'agit de la méthode la plus élémentaire pour

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

obtenir une mise en solution de la totalité du fer d'un échantillon de sol. Après une destruction de la matière organique et une attaque à l'acide chlorhydrique concentré, suivi d'une filtration, le fer est dosé par absorption atomique. Ces résultats obtenus sont très voisins de ceux de l'attaque triacide.

- Le fer ferreux a été dosé sur échantillon frais selon la méthode décrite par Ignatieff (1941). En effet, l'extraction du fer ferreux a été faite sur échantillon frais prélevé directement in situ avec du chlorure d'aluminium à 3%. La lecture a été faite au SAA.

➤ *Analyses statistiques des données*

Le tableur Microsoft Excel a été utilisé pour la saisie, le traitement des données et la réalisation des graphes de répartition de l'eau.

- *Evaluer la variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse du sol sous culture du riz.*

La variabilité des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse du sol a été évaluée à l'aide du coefficient de variation (CV) de chaque propriété. Ce coefficient a été calculé avec le logiciel Statistical Analysis System (SAS version 9.2) et a permis de mesurer le degré de variation des propriétés évaluées. Ainsi, une propriété aura une faible variation si son $CV < 15\%$, modérée si $15 < CV < 30\%$ et forte si $CV > 30\%$. Aussi les graphes obtenus à partir du tableur Excel ont permis de

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

voir leur évolution en fonction des profondeurs au cours de la campagne de production du riz.

- *Evaluer l'effet du mode de répartition de l'eau sur les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse du sol sous culture du riz.*

Une analyse de variance à deux facteurs (Fréquence d'observation et Mode de répartition de l'eau) a été effectuée à l'aide du logiciel Statistical Analysis System (SAS version 9.2) afin de voir l'influence de ces facteurs sur les propriétés du sol étudiées. Notons que le facteur Fréquence d'observation a été considéré dans l'analyse de variance afin de voir si la variation observée dans le temps au niveau des propriétés chimiques considérée est significative. La séparation des moyennes a été faite par comparaison multiple ajustée par le test de Student Newman Keuls au seuil de 5 %. Le logiciel MINITAB 17 a été utilisé pour établir la corrélation existante entre les paramètres de sol étudiés. Ensuite une régression simple a été effectuée sur les paramètres qui ont montré une corrélation forte et significative. Cette régression a permis de voir le type de relation qui existe entre ces paramètres.

- *Etudier l'effet du mode de répartition de l'eau des casiers rizières sur la production du riz.*

Une analyse de variance à un facteur mode de répartition de l'eau a été effectuée. Le test de Student Newman-Keuls au seuil de 5% a été utilisé pour la comparaison des moyennes.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

- *Etablir la relation entre les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse et le rendement du riz, en fonction des modes d'inondation*

Une régression multiple a été effectuée à l'aide du logiciel MINITAB 17 afin de voir en fonction des périodes d'échantillonnage, les propriétés édaphiques déterminantes de la toxicité ferreuse qui expliquent le rendement obtenu au niveau de chaque mode de répartition de l'eau. Ensuite les périodes et les propriétés significatives ont été considérées pour faire une régression multiple afin de pouvoir déterminer la relation existant entre elles et le rendement obtenu au niveau de chaque mode.

7.3 Résultats

7.3.1 Caractérisation physico-chimique du site d'expérimentation

Le tableau 2 montre la caractérisation physico-chimique du sol d'Awokpa. Il ressort de l'analyse de ce tableau que les parcelles retenues pour l'expérimentation sont moyennement acides. Ils sont moyennement très riches en K^+ , riches en Mg^{2+} , pauvres en Ca^{2+} . Ils sont très pauvres en Nt. Les sols de bas de pente (sols ayant reçu le traitement IP) ont les plus fortes teneurs en fer bien que dans l'ensemble des sols on remarque une dominance du fer. Ce bas-fond est soumis au phénomène de la toxicité ferreuse. Les sols de haut de pente (EN) ont en moyenne la plus forte valeur d'Eh, suivi de ceux de la mi-pente et enfin celle de bas de pente. Egalement les sols de

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

bas de pente présentent les plus fortes teneurs en C et en Nt. Le rapport C/N est supérieur à 20 quel que soit la position topographique considérée, ce qui traduit que la décomposition de la matière organique est lente dans le bas-fond. Le bas-fond est dans son ensemble riche en phosphore assimilable. Il est dans son ensemble de texture limono-sableuse.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Tableau 7.1: Caractérisation physico-chimique du site d'expérimentation

Profondeur (cm)	Parties de la toposéquence								
	Haut de pente			Mi-pente			Bas de pente		
	00-10	10-20	20-30	00-10	10-20	20-30	00-10	10-20	20-30
pH	5,95±0,23	5,59±0,3	6,04±0,42	5,98±0,28	5,85±0,27	6,06±0,35	6,02±0,36	5,94±0,18	6,02±0,4
Eh (mV)	95,51±1	121,38±	76,07±1	88,36±1	104,22	81,65±	76,62±2	87,59±9,	83,70±2
Fe					5559,2	3559,2		7467,1	
Total (ppm)	8421,12	5559,27	4375,07	8039,54	7±572,3	7±953,9	8421,12	7±572,3	6993,49
	±3434,22	±1621,71	±3625,01	±2861,85	7	5	±2671,06	7	±5055,93
Fe _{ox} (ppm)	5498,99	5270,51	3869,88	3899,61	3214,1	2671,1	3214,16	0±685,4	2442,65
	±342,72	±913,93	±2513,30	±685,44	4	2	±799,68	4	±913,93
Fe ²⁺ (ppm)	1573,08	1208,68	1963,09	1718,19	1439,3	1883,6	1964,58	1705,0	1848,87
	±241,10	±255,45	±405,13	±303,33	7	6	±415,81	4	±533,73
Pass (ppm)	23,66±4	21,74±1	22,81±0	21,92±1	22,63±	21,91±	22,09±0	21,04±	21,74±1,
	,73	,24	,89	,42	1	0,3	,62	1,3	24
%Co rg	4,14±0,74	3,12±1,01	2,57±1	5,29±0,65	3,88±0,97	2,71±0,78	5,73±0,41	4,49±0,51	3,56±0,73
%Nt	0,18±0,0	0,12±0,0	0,09±0,0	0,2±0,0	0,18±0,0	0,12±0,0	0,2±0,0	0,19±0,0	0,17±0,0

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

	04	03	02	9	05	07	3	05	2
C/N	28	26	28,55	26,45	21,55	22,58	28,65	23,63	20,94
	1,05±0,	1,07±0,	1,04±0,	1,35±0,	1,33±0,	1,37±0,	1,00±0,	0,91±0,	0,87±0,1
K+	19	22	22	37	36	33	23	17	8
Mg+	1,63±0,	1,59±0,	1,61±0,	2,77±0,	2,85±0,	2,95±0,	2,75±0,	2,56±0,	2,35±0,8
+	75	79	77	45	53	56	75	83	3
	0,78±0,	0,73±0,	0,81±0,	1,42±0,	1,41±0,	1,47±0,	1,87±0,	1,91±0,	1,99±0,1
Ca++	32	33	37	21	2	25	22	23	5
	15,14±6	14,76±6	14,99±6	11,81±3	12,18±	12,55±	17,20±3	17,59±	17,94±2,
%L	,51	,74	,6	,05	3	2,9	,07	2,7	9
	11,91±3	12,24±3	12,79±4	14,51±4	15,16±	14,06±	9,205±2	9,15±2,	10,06±3,
%A	,38	,75	,41	,05	4,4	4,9	,68	71	4
	72,39±7	72,41±7	71,69±7	72,98±1	71,97±	72,70±	72,89±3	72,55±	71,28±4,
%S	,03	,01	,31	,96	2,8	3,1	,87	3,5	02
Texture									Limon très sableux
				Limon très sableux			Limon sableux		sableux

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

D'une manière générale, le bas-fond d'Awokpa a un sol hydromorphe, limon-sableux à drainage pauvre reposant sur un horizon de sable. Les systèmes racinaires sont assez bien développés et constitués de racines très fines, fines et moyennes. Il a une structure faible dans l'ensemble, à débit polyédrique subangulaire avec des activités biologiques développées dans les deux premiers horizons et avec la présence des terricules de vers de terre. Le sol présente une fertilité en bas de pente plus élevée que celle du haut de pente. Ce bas-fond connaît la recrudescence de la toxicité ferreuse du fait de la teneur élevée en Fe^{2+} . Vu que les propriétés édaphiques sont différentes aux différentes parties de la toposéquence, comment évoluent-elles alors dans le temps et dans l'espace ?

7.3.2. Variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse

Le tableau 3 présente les résultats de la variation spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse. De l'analyse de ce tableau il ressort que le pH a montré une faible variation spatiale lors des fréquences 1, 4, 5 et 6 ($CV < 15$) alors que pour les prélèvements 2, 3, et 7, il présente une variation modérée ($15 < CV < 30$). En ce qui concerne l'Eh, il présente une forte variabilité ($CV > 30$) pour les prélèvements 1, 3, 5 et 6 et une variabilité modérée pour les prélèvements 2, 4 et 7. Le Fe^{2+} a présenté une variabilité modérée pour les fréquences 1 et 5 mais présente une forte variabilité pour les autres prélèvements. Alors que le fer libre a montré une variation

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

modérée seulement au sixième échantillonnage mais une forte variabilité pour les autres prélèvements.

Tableau 7.2: Variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol(CV)

Fréquence	Position topographique	pH	Eh	Fe ²⁺	Fe _{OX}
F1	Haut de pente	9,97	59,17	24,27	30,51
	Mi- pente	7,75	37,49	24,18	37,97
	Bas de pente	8,60	54,19	28,26	51,08
F2	CV	8,96	50,47	27,69	41,73
	Haut de pente	16,73	31,57	35,37	52,16
	Mi- pente	15,47	28,94	40,13	54,02
	Bas de pente	12,70	27,91	41,21	41,81
F3	CV	15,11	29,88	38,99	51,39
	Haut de pente	20,54	45,95	56,27	50,06
	Mi- pente	13,12	34,46	44,53	51,43
	Bas de pente	17,50	55,15	57,86	54,55
F4	CV	17,56	46,27	58,23	51,30
	Haut de pente	15,49	31,77	41,60	31,77
	Mi- pente	11,99	23,40	35,46	40,19
	Bas de pente	8,72	19,31	22,46	42,96
F5	CV	12,38	25,61	33,38	41,13
	Haut de pente	12,43	37,58	22,11	33,37
	Mi- pente	6,16	18,74	12,92	30,79
	Bas de pente	6,34	30,30	19,39	41,77
F6	CV	9,75	33,97	29,66	35,07
	Haut de pente	14,21	42,56	36,53	21,21
	Mi- pente	11,74	26,70	15,35	21,41

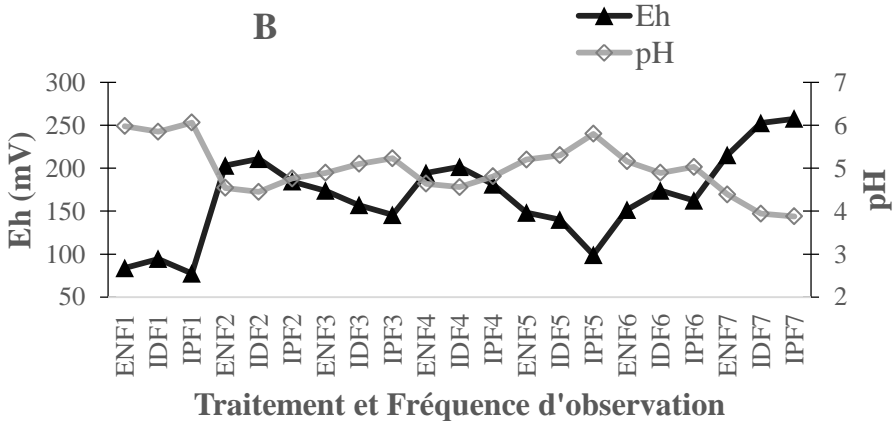
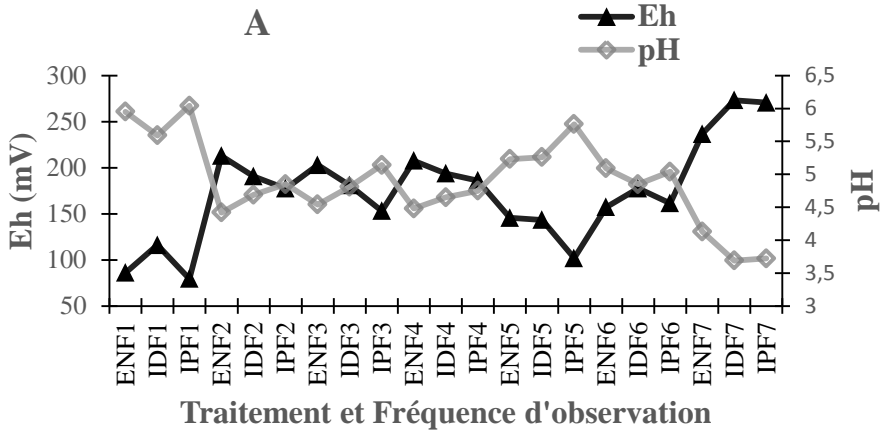
Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

	Bas de pente	13,93	36,43	40,52	39,54
	CV	13,69	35,66	34,84	27,79
F7	Haut de pente	15,17	24,99	39,31	35,31
	Mi- pente	15,12	19,42	38,48	37,00
	Bas de pente	14,87	18,08	24,51	41,08
	CV	16,00	21,88	40,51	37,59

Les figures 7.3 et 74 montrent la variation de ces propriétés en fonction des trois profondeurs étudiées. L'analyse de cette figure indique que ni le pH, ni l'Eh ne présente une stabilité dans le temps. Lorsque le pH augmente l'Eh diminue quels que soient la profondeur et le mode de répartition de l'eau. L'Eh présente une variabilité plus forte que le pH. L'analyse de la figure montre également que les deux paramètres ont montré une tendance croissante lors de la période d'expérimentation. Le pH a présenté une forte variation temporelle au niveau des profondeurs 0-10 et 20-30 cm. Par contre l'Eh a montré une forte variation dans le temps quel que soit la profondeur considérée. Également le fer libre et le fer ferreux ont montré une forte variabilité temporelle dans le temps en considérant toutes les profondeurs (figure 7.4). Mais le fer libre a montré une forte variation comparativement au Fe^{2+} qui a présenté une tendance régressive dans le temps contrairement au fer libre. Les fortes teneurs en fer ont été observées au niveau du mode d'inondation permanente des casiers rizicoles. Les deux formes de Fe ont présenté de faibles variations dans le temps sur la dernière profondeur contrairement aux deux premières profondeurs. Les fortes teneurs en fer ferreux ont été obtenues au niveau du traitement ID. Ces figures complètent les tendances

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

de variation spatiale prouvées par les coefficients de variation. Les propriétés du sol du bas-fond présentent donc une variabilité spatio-temporelle.



Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

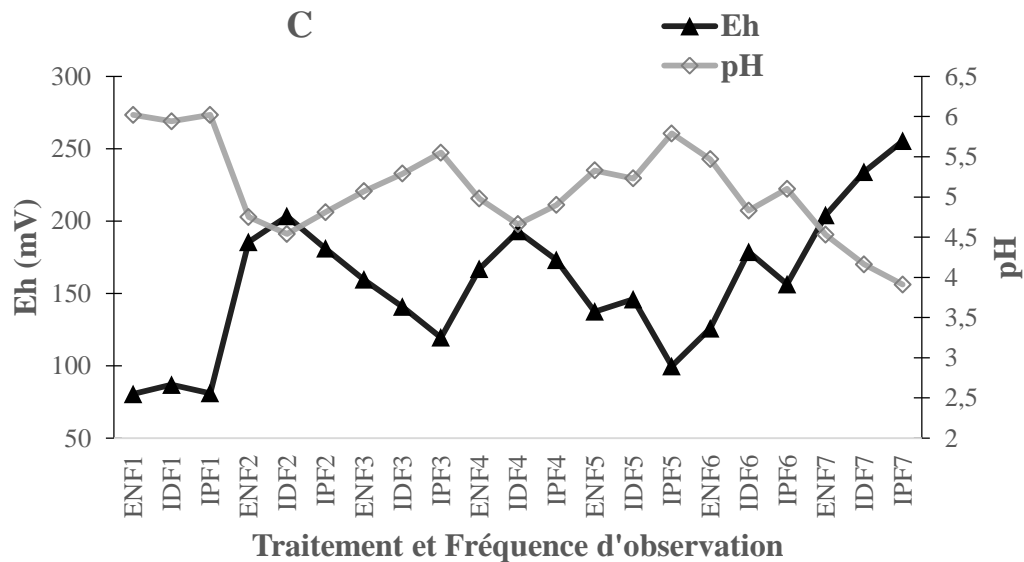
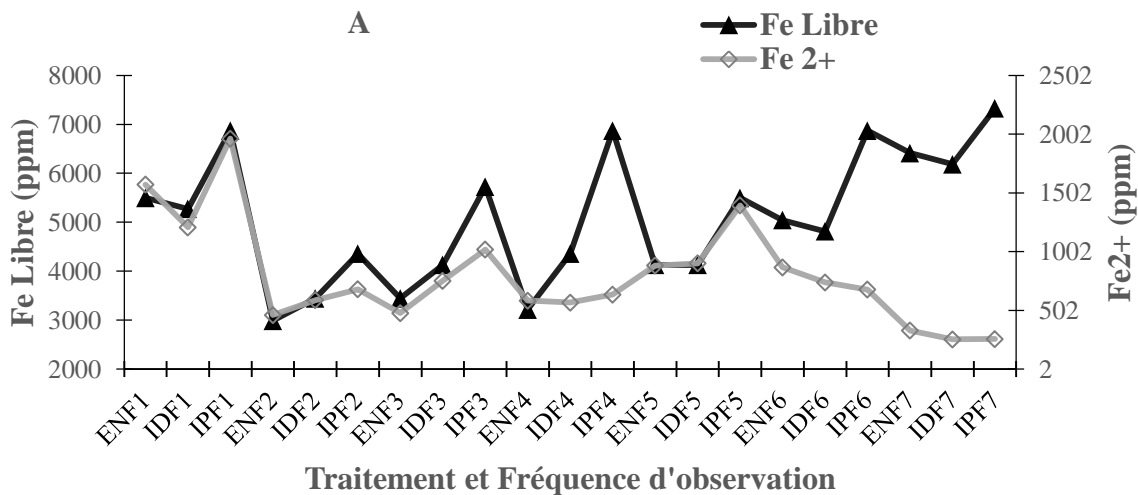
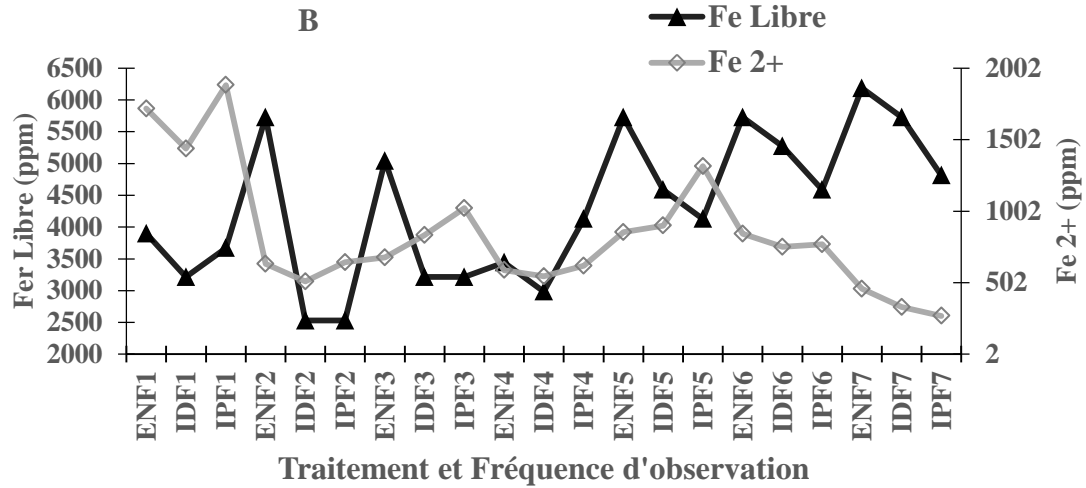


Figure 7.3: Evolution de l'Eh et du pH au cours de la campagne de production (A : Profondeur 00-10, B : 10-20 et C : 20-30 cm)

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse



Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse



Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

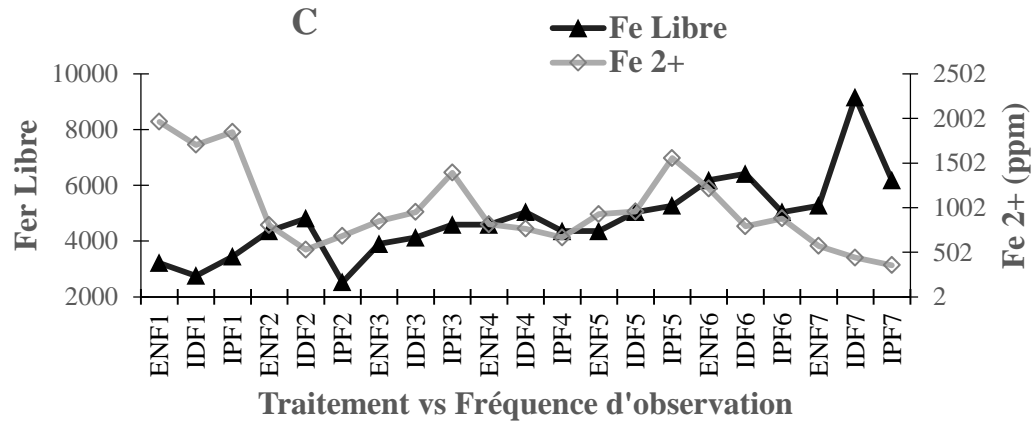


Figure 7.4: Evolution de fer libre et du fer ferreux au cours de la campagne de production (A : Profondeur 00-10, B : 10-20 et C : 20-30 cm)

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Les résultats ont montré une variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques des sols déterminantes de la toxicité ferreuse dans le bas-fond. Le degré de variation d'une propriété est intimement lié à sa position sur la toposéquence. Ainsi on peut conclure que la position des parcelles sur la toposéquence a une influence sur les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse. Etant donné que dans le bas-fond le mode de répartition de l'eau adopté dépend de la toposéquence, quel est alors l'effet du mode de répartition toposéquentielle de l'eau sur les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse ?

7.3.3. Effet du mode de répartition toposéquentielle de l'eau sur les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse

Le tableau 4 présente l'effet du mode de répartition de l'eau sur les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse. Il ressort de l'analyse du tableau qu'au premier échantillonnage, le mode de répartition de l'eau a un effet significatif ($P = 0,03$) sur le pH, Eh, et le fer ferreux ($P=0,04$). Par contre il n'a pas d'effet significatif sur la teneur en fer libre (Annexe 1). A cette période d'observation, le mode ID a présenté la plus faible teneur en Fe^{2+} , et le pH le plus faible. Notons qu'il n'y a également pas de différence entre les profondeurs considérant les trois modes de répartition de l'eau pour le Fe libre (Annexe 5). Considérant le mode EN, l'Eh et le Fe^{2+} ont montré une différence significative entre les profondeurs, alors que pour le traitement ID, le pH et le Fe^{2+} ont montré une différence significative au seuil de 5%. Au deuxième

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

échantillonnage, le mode de répartition de l'eau n'a pas d'effet sur les déterminants de la toxicité ferreuse. De même il faut noter qu'il n'y a pas de différence significative entre les différentes profondeurs ($P > 0,05$) pour toutes les propriétés du sol déterminées. Au troisième échantillonnage, le mode de répartition de l'eau a un effet significatif sur le pH ($P = 0,01$), l'Eh ($P = 0,01$), et le Fe^{2+} ($P = 0,03$). La plus forte teneur en Fe^{2+} et le pH le plus élevé ont été obtenus au niveau du mode IP alors que l'Eh le plus élevé a été remarqué au niveau du mode EN. Au quatrième échantillonnage, le mode de répartition de l'eau a un effet significatif sur le fer libre ($P = 0,04$). La plus forte teneur en fer libre est observée au niveau du mode IP. Notons que, ni le mode de répartition de l'eau ni la profondeur n'ont d'effet significatif sur toutes les autres propriétés. Au cinquième échantillonnage, le mode de répartition de l'eau n'a pas d'effet significatif sur le fer libre. Par contre le mode de répartition de l'eau a un effet très significatif sur le pH ($P < 0,001$), l'Eh ($P < 0,001$), et le Fe^{2+} ($P < 0,001$). Le mode IP a donné le pH le plus élevé et la plus forte teneur en Fe^{2+} . Le mode de répartition de l'eau EN a donné la plus forte valeur d'Eh. Au sixième échantillonnage, le mode de répartition de l'eau a un effet hautement significatif sur le pH ($P = 0,009$) et l'Eh ($P = 0,009$). Le mode EN a donné le pH le plus élevé alors que le mode ID a donné la plus forte valeur d'Eh. Au septième prélèvement, le mode de répartition de l'eau n'a pas d'effet significatif sur le fer libre. Les plus fortes valeurs du pH et du Fe^{2+} sont obtenues au niveau du mode EN alors que celles de l'Eh ont été observées au niveau des modes ID et IP. L'analyse du tableau 4 confirme la

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

variabilité temporelle des déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse étudiés précédemment. En effet, les résultats d'analyse de variance ont montré que la variation des déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse est très significative ($P < 0,001$) dans le temps (Annexe 1).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Tableau 7.3: Effet du mode de répartition de l'eau sur les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse

Fréquences d'observation	Mode de répartition de l'eau	pH	Eh (mV)	Fe ²⁺	Feox
F1 111111	EN	5,99±0,07 ab	83,43±6,37 ab	1751,95±122,74 ab	4204,26±370,27 a
	ID	5,80±0,05 b	99,11±4,79 a	1451,02±101,28 b	3747,29±410,78 a
	IP	6,04±0,06 a	79,29±5,54 b	1898,54±154,87 a	4661,22±687,36 a
	Moy	5,94±0,04 A	87,28±3,28 E	1700,5±78,46 A	4204,26±292,43 C
F2	EN	4,57±0,09 a	200,43±8,16 a	633,30±64,65 a	4356,58±655,96 a
	ID	4,56±0,09 a	201,55±7,53 a	543,28±62,93 a	3594,97±560,60 a
	IP	4,81±0,07 a	180,99±6,52 a	670,32±79,74 a	3138,01±378,72 a
	Moy	4,64±0,05 D	194,32±4,32 B	615,63±40 D	3696±316,61 C
F3	EN	4,83±0,12 b	178,73±10,60	669,17±108,69 b	4128,10±596,60 a

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

		a			
	ID	5,07±0,08 ab	159,54±7,09 ab	846,87±108,86 ab	3823,45±567,61 a
	IP	5,31±0,12 a	139,40±9,92 b	1144,80±191,21 a	4508,90±710 a
	Moy	5,06±0,06 C	159,22±5,49 C	886,94±86,03 C	4153,48±296,89 C
F4	EN	4,70±0,09 a	189,70±7,78 a	662,74±79,58 a	3747,29±343,68 b
	ID	4,62±0,07 a	196,04±5,92 a	626,84±64,17 a	4128,10±78,93 ab
	IP	4,82±0,05 a	180,08±4,48 a	640,95±41,55 a	5118,19±634,71 a
	Moy	4,72±0,04 D	188,61±3,59 B	643,51±35,8 D	4331,19±296,89 C
F5	EN	5,26±0,08 b	143,79±6,97 a	888,82±56,72 b	4737,38±456,38 a
	ID	5,26±0,04 b	143,10±3,46 a	920,54±34,32 b	4585,06±407,55 a
	IP	5,78±0,04 a	100,19±3,91 b	1423,15±79,67 a	4965,87±598,81 a
	Moy	5,44±0,03 B	129,03±3,26 D	1077,51±53,26 B	4762,77±278,36 BC
F6	EN	5,24±0,09 a	144,87±7,96 b	976,07±102,94 a	5651,31±345,97 a
	ID	4,86±0,07 b	176,72±6,09 a	761,33±33,73 a	5498,99±339,82 a

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

	IP	5,06±0,09 ab	160,04±7,52 ab	775,87±90,75 a	5498,99±627,61 a
	Moy	5,06±0,05 C	160,54±4,26 C	837,76±48,64 C	5549,77±257 AB
	EN	4,35±0,08 a	218,63±7,05 b	454,11±51,52 a	5955,96±607,11 a
	ID	3,93±0,07 b	253,31±6,35 a	342,25±38,01 b	7022,21±750,09 a
F7	IP	3,84±0,07 b	261,15±6,09 a	294,52±20,83 b	6108,28±724,34 a
	Moy	4,02±0,04 E	244,36±3,98 A	363,62±24,55 E	6362,15±398,57 A

Les moyennes suivies des mêmes lettres alphabétiques et de même caractère ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$) selon le test de Student Newman-Keuls

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

7.3.4. Corrélation de Pearson entre les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse

De l'analyse du tableau 4, il ressort qu'il y a une corrélation négative, très significative ($P < 0,0001$) et forte ($R = 0,96$) entre le pH et l'Eh. Il y a également une corrélation positive, très significative ($P < 0,001$) et forte ($R = 0,92$) entre le pH et le Fe^{2+} . Le test de corrélation indique également qu'il y a une corrélation négative, très significative ($P < 0,0001$) et forte ($R = 0,94$) entre l'Eh et le Fe^{2+} .

Tableau 7.4: Corrélation entre les différentes propriétés chimiques du sol (valeur de R^2 et significativité)

	pH	Eh	Feox	Fe²⁺
Eh	-0,969***	-	-	-
Feox	-0,132**	0,11ns	-	-
Fe²⁺	0,921***	-0,944***	-0,09ns	-

ns : $P > 0,05$; ** : $P < 0,01$; *** : $P < 0,001$

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

7.3.5. Régression entre les propriétés fortement corrélées

Les figures 7.5, 7.6 et 7.7 présentent les types de relation existant entre les propriétés chimiques du sol étudiées.

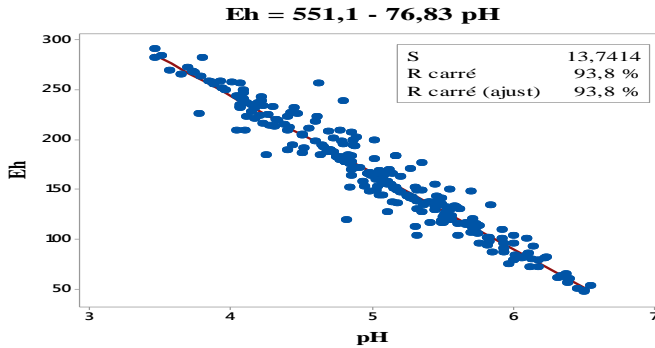


Figure 7.5: Relation entre l'Eh et le pH du sol

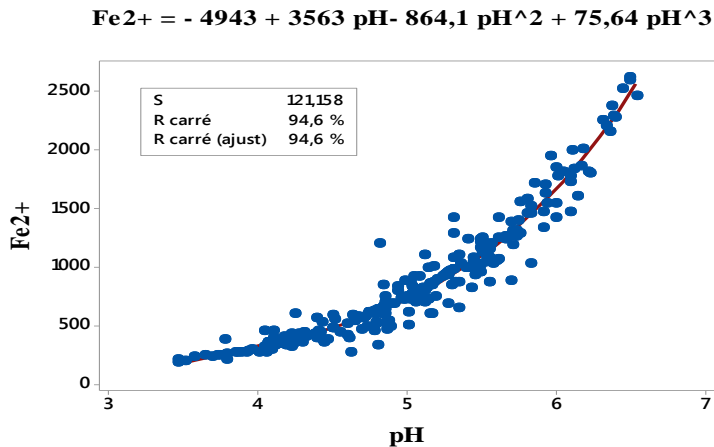


Figure 7.6 : Relation entre Fe²⁺ et pH du sol

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

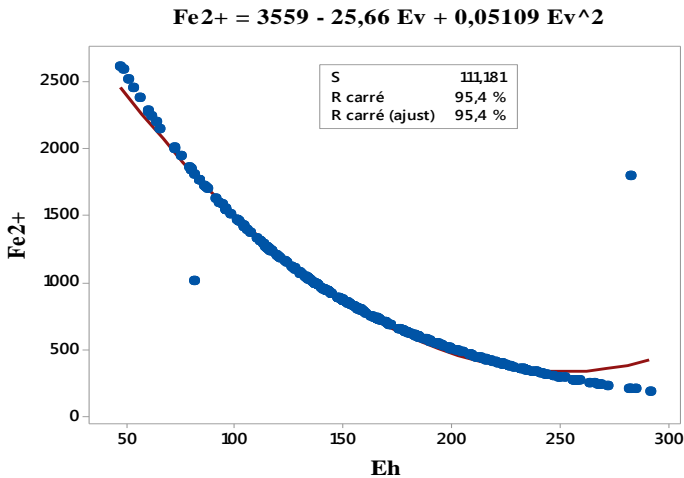


Figure 7.7: Relation en Fe^{2+} et Eh du sol

Les résultats issus de la régression simple montrent qu'il y a une relation linéaire entre le pH et l'Eh et une relation non linéaire (polynomiale) entre le Fe^{2+} et le pH de même que l'Eh et le Fe^{2+} (Figure 10, 11 et 12). Les équations de régression sont significatives et présentent des coefficients de régression élevés ($R^2 > 50\%$).

Les résultats du test de corrélation indiquent qu'une forte valeur de pH conditionne une faible valeur de l'Eh. Cette relation est également observée entre l'Eh et le Fe^{2+} . Aussi pouvons-nous dire qu'une forte valeur du pH induit une forte teneur en Fe^{2+} dans le bas-fond d'Awokpa. Les résultats ont montré que les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse ont significativement varié en fonction du mode de répartition de

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

l'eau et de la période d'échantillonnage dans le bas-fond d'Awokpa. Les résultats ont également montré que le mode IP a donné de façon générale la plus forte valeur du pH, les plus fortes teneurs en Fe^{2+} et en Feox. Le mode ID a donné les plus faibles teneurs en Fe^{2+} . Ainsi le mode de répartition de l'eau a un effet sur les conditions d'oxydation et de réduction du milieu. Donc le mode de répartition de l'eau peut aider à contrôler la teneur en Fe^{2+} du sol pour agir ainsi sur la toxicité ferreuse dans le bas-fond. Quel est alors l'effet du mode de répartition de l'eau sur la production du riz dans cette condition de toxicité ferreuse ?

7.3.6. Effet du mode de répartition de l'eau sur la production du riz

- *Effet du mode de répartition de l'eau sur la hauteur des plants et le nombre de talles par plant*

Les résultats de l'analyse de variance montrent que le mode de répartition de l'eau n'a pas un effet significatif ($P=0,329$) sur la hauteur des plants (Annexe 3). Néanmoins les plants du mode d'inondation suivie de drainage ont montré la hauteur moyenne la plus élevée (Figure 7.8).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

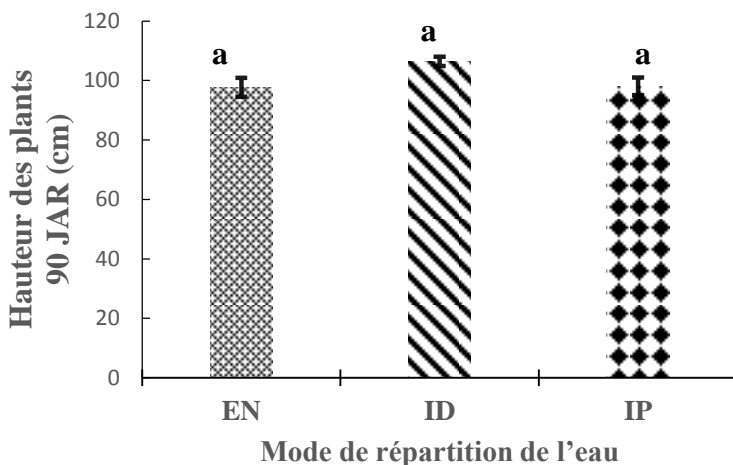


Figure 7.8 : Effet du mode de répartition toposéquentielle de l'eau sur la hauteur des plants

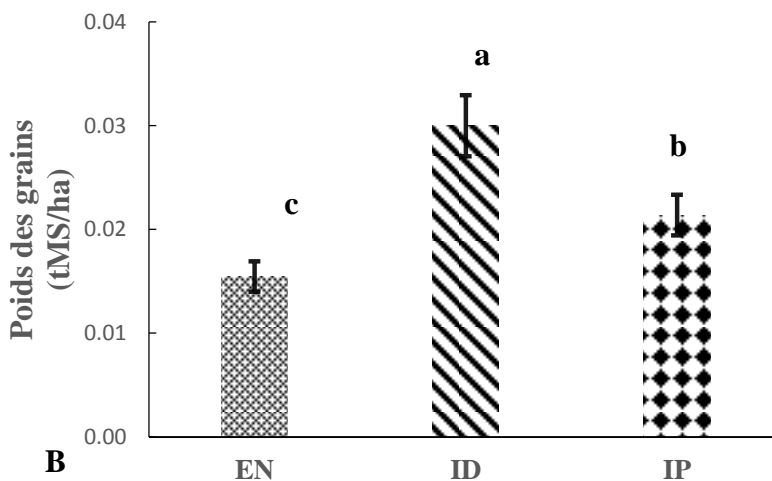
Les barres représentent les erreurs standards considérant le mode de répartition de l'eau. Les barres portant la même lettre alphabétique ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$) selon le test de Student Newman Keuls.

La figure 12 montre l'effet du mode de répartition de l'eau sur le nombre total de talles et le nombre de talles fertiles. De l'analyse de cette figure, il ressort que le mode de répartition de l'eau a influencé très significativement ($P < 0,0001$) le nombre de talles totales et le nombre de talles fertiles (Annexe 3). La figure 12 montre que les plants du mode d'inondation suivie de drainage présentent respectivement les nombres moyen de talles et de talles fertiles les plus élevés ($11,41 \pm 0,29$ et $9,92 \pm 0,28$).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

- *Effet du mode de répartition de l'eau sur la production de paille et de grain de riz*

L'analyse de la variance montre que le mode de répartition de l'eau influence très significativement ($P < 0,0001$) la production en paille et en grain du riz dans le bas-fond. De l'analyse de la figure 13, il ressort que le mode ID a donné la production en paille (21gMS/plant) (Figure 13A) et en grain (2,99±0,29 t/ha) (Figure 13B) les plus élevées.



Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

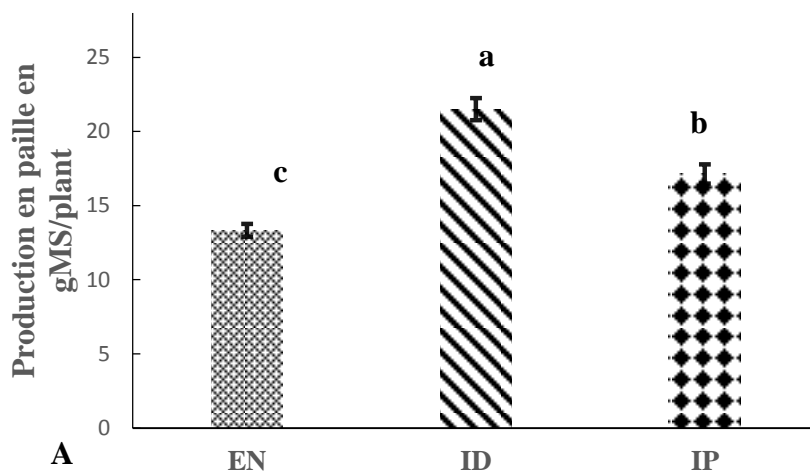


Figure 7.9: Effet du mode de répartition de l'eau sur la production en paille et en grain de riz

➤ *Corrélation entre les paramètres de production du riz*

Il y a une corrélation très hautement significative ($P < 0,0001$), forte et positive entre le nombre total de talles et le nombre de talles fertiles, la production en paille sèche et le rendement en grains (Tableau 7). Il y a également une corrélation forte, positive et très hautement significative ($P < 0,0001$), entre le nombre de talles fertiles et la production en paille sèche et le rendement en grains.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Tableau 7.5:Corrélation entre les paramètres de production du riz (valeur de R² et significativité)

Paramètres	Talles	Talle fertiles	Paille sèche
Talle fertiles	0,96***	-	-
Paille sèche	0,65***	0,66***	-
Rendement en grain	0,59***	0,64***	0,45***

*** : très hautement significatif

Les résultats de cette étude ont permis de dire que le mode de répartition de l'eau et par conséquent la position topographique a une influence sur la production du riz. Le mode ID situé en mi- pente a donné les meilleurs paramètres de production et le meilleur rendement en grains du riz comparativement aux deux autres modes situés respectivement en haut et en bas de pente. Les pertes occasionnées par ce stress sont évaluées à 74,16 % pour EN, 50 % pour ID et 64,33 % pour IP. Pour tous les traitements, les pertes sont évaluées à 62,83 %. Etant donné que le mode de répartition de l'eau a d'influence sur les paramètres édaphiques et sur la production du riz, y a-t-il alors une relation entre les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse et le rendement du riz en fonction de chaque mode de répartition de l'eau ?

- *Relation entre les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse et le rendement en fonction des modes de répartition toposéquentielles de l'eau*

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Les résultats issus des régressions multiples ont montré que bien que la relation existante entre les propriétés édaphiques déterminantes de la toxicité ferreuse et le rendement en grains du riz soit significative ($P < 0,05$) au niveau des modes d'écoulement naturel et d'inondation permanente, cette relation n'est pas forte ($R^2 < 50\%$). Par contre au niveau du mode de répartition de l'eau suivie de drainage des parcelles la relation entre les propriétés édaphiques déterminantes de la toxicité ferreuse et le rendement en grain de riz n'est ni forte ni significative (Tableau 8). Les modèles obtenus ne peuvent pas donc être utilisés pour prédire le niveau de rendement en grains du riz dans le bas-fond d'Awokpa. En effet, de l'analyse du tableau 8, il ressort que la teneur en fer libre du cinquième échantillonnage (celle obtenue le 75JAR) est la propriété du sol déterminante de la toxicité ferreuse qui explique le niveau de rendement obtenu au niveau du mode d'écoulement naturel. A cette date d'observation, les résultats ont montré qu'avec un $R^2 > 50\%$, cette propriété du sol est fortement et très hautement significativement ($P < 0,01$) corrélée avec le rendement en grain obtenu. Alors que pour le mode inondation suivie de drainage, la teneur en Feox et le pH du sol au quatrième échantillonnage (c'est-à-dire 60 JAR) ont expliqué le niveau de rendement observé au niveau de ce mode de répartition de l'eau. A cette période d'observation, ces propriétés ont expliqué fortement ($R^2 > 50\%$) et très hautement significativement ($P < 0,01$) la corrélation avec le rendement en grain obtenu au niveau de ce mode de répartition de l'eau. En ce qui concerne le mode d'inondation permanente, la teneur en Feox du cinquième

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

échantillonnage (75 JAR) explique le niveau de rendement observé au niveau de ce mode. Cette teneur explique de façon significative le rendement en grain de riz ($R^2 > 50\%$).

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Tableau 7.6: Relation entre les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse et le rendement en grain du riz en fonction des modes d'inondation

Mode de répartition de l'eau	Période	Constante	pH	Eh	Fe2+	FeL	R ² ajusté
EN	1	269ns	-	-	0,07ns	-0,056ns	12,67ns
	2	-197,50**	-	-	-	-	99,99**
	3	806,3ns	-164,1ns	-	0,252ns	-0,001ns	23,12ns
	4	670,4ns	-130,8ns	-	0,210ns	-	12,35ns
	5	-486,32**	-	-	-	-0,005**	99,99**
	6	38,6ns	-	-	-	-	99,79ns
	7	263,3*	-	-	-	-	78,63ns
Equation générale		12,6*	-	-	-	-0,005*	26,32*
ID	1	1452ns	-	-	-0,063ns	-	12,67ns
	2	414,83**	-	-	-	-	99,97**
	3	-8ns	58,4ns	-	-	-	4,37ns
	4	138,82**	-8,396*	-	-	0,048***	99,69**
	5	639**	-	-	-	-	91,49*
	6	348ns	25ns	-	-	-	25,58ns

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

	7	-465ns	-	-	-	-	87,27ns
Equation générale		-58ns	17,1ns	-	-	0,006ns	9,20ns
	1	-11860ns	159ns	-	-	-	59,34ns
	2	-7171ns	2041ns	-	-3,731ns	-	83,56ns
	3	-2688*	-	-	-	-	90,14*
	4	11258ns	-	-40,1ns	-6ns	-	48,86ns
	5	-1346,1*	-	-	-	0,039*	99,84*
	6	-490,3ns	-	-	-	0,103*	99,08ns
IP	7	609ns	-100ns	-	-	-	4,57ns
Equation générale		164,4*	-	-	-	0,028*	21,26*

7.4 Discussion

7.4.1. *Caractérisation physico-chimique du bas-fond*

Les résultats de la caractérisation physico chimique du sol montrent que le sol du bas-fond d'Awokpa est moyennement acide après l'échelle de pH définie par Mallouhi, (1997) quel que soit la position des casiers sur la toposéquence. Ces valeurs de pH ne sont pas conformes à celles trouvées dans certains bas-fonds de la sous-région (Guinée, Côte d'Ivoire, Nigéria) où le pH de l'eau a varié entre 5,0 et 5,4 (Audebert, 2006a). Cette différence peut s'expliquer par les antécédents culturels des bas-fonds. De plus le bas-fond était une forêt qui a été détruite pour la production du riz. Ceci expliquerait également les fortes teneurs en Corg et en N total observées. Il faut également souligner que les parcelles d'expérimentation ont été utilisées pendant trois années d'expérimentation, cela pourrait expliquer l'amélioration du niveau d'acidité de ces sols. Également, les sols présentent une fertilité en bas de pente supérieure à celle des sols situés à mi-pente et en haut de pente. Ces résultats corroborent ceux d'Ogeh et Ukodo (2012), et de Babalola *et al.*, (2007). En effet, la tendance du changement et de la différence des propriétés du sol à travers la toposéquence montre que les propriétés du sol diffèrent à ces trois positions. Les auteurs ont observé que les sols du bas de pente étaient plus fertiles que ceux de la pente supérieure. En effet, le pH est une «variable maître» et il régule presque toutes les réactions biologiques et chimiques dans les sols (Brady et Weil, 1996). Ofori *et al.*, (2013) ont montré également que le pH du

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

sol, le carbone et l'azote total ont augmenté dans les sols de bas de pente. Cette différence entre les différentes portions de la toposéquence peut s'expliquer par les processus pédogéniques majeurs qui sont l'altération minérale, le processus d'érosion, l'éluviation-illuviation de l'argile et le processus d'oxydation-réduction. En se référant à l'échelle de qualification de l'état de réduction des sols basée sur le potentiel d'oxydoréduction proposé par Vizier, (1990); cités par Raunet, (1991), le sol du bas-fond a subi une réduction moyenne car $0 \text{ mV} < Eh < 200 \text{ mV}$ pour $500 < Fe^{2+} < 3500 \text{ ppm}$. Toutes fois il faut signaler que les sols de bas de pente sont plus réduits (car présentant de faible valeur d'Eh) que ceux du haut de pente. Cette situation s'explique par l'inondation des casiers rizicoles situés en bas de pente (Patrick et Reddy, 1978). Les résultats de la caractérisation du sol du bas-fond permettent de conclure que le bas-fond est confronté au phénomène de la toxicité ferreuse car les sols sont moyennement acides, réduits et présentent de fortes teneurs en Fe^{2+} (ADRAO, 2006). En effet, les concentrations en ions ferreux dans la solution du sol des bas-fonds peuvent aller de 10 à 2000 ppm (ADRAO, 2006). S'agissant du fer libre, on constate que les sols ont en moyenne une forte concentration en fer libre de 4879,5 ppm (amont), 3261,63 ppm (médiane) et 2804,67 ppm (aval). Les sols de haut de pente sont plus riches en fer libre que les sols de bas de pente. Alors que les sols de bas de pente ont présenté une plus forte concentration en fer ferreux que les sols du haut de pente. Ces valeurs de fer libre dans les horizons superficiels témoignent d'une toxicité ferreuse. En effet, selon Diatta *et al.*, (1998), au-delà d'une concentration de l'ordre de

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

500 ppm, les symptômes de toxicité ferreuse apparaissent chez le riz. Les teneurs moins élevées obtenues dans les horizons en profondeur, s'expliqueraient par la mise en solution in situ dans ces horizons. Cela témoigne de la présence des taches rouges d'oxyde de fer observées dans ces horizons. La concentration élevée dans les horizons de surface, s'expliquerait par le fait que le fer ferrique (Fe^{3+}) entraîné dans le bas-fond (soit par écoulement, soit par ruissellement et érosion des pentes supérieures) a rencontré des conditions d'engorgement en eau et est devenu du fer ferreux (Fe^{2+}) qui reste concentré dans les horizons de surface. Aussi remarquons qu'il n'y a pas une grande variation au niveau de la texture du sol le long de la toposéquence. Cette situation a été rapportée par Obalum *et al.*, (2011), qui ont montré qu'il n'y a pas eu de variations dans la répartition granulométrique entre les sols tout au long de la toposéquence à faible pente.

7.4.2. Variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse

Les résultats ont montré que les propriétés physico-chimiques du sol varient dans le temps et dans l'espace. Le degré de variabilité dépend du paramètre considéré. En effet, le coefficient de variation (CV) du pH du sol parmi les trois positions sur la toposéquence est compris entre 6,16 et 20,54. Tandis que pour l'Eh il varie entre 18,08 et 59,17. Ce qui traduit que les deux paramètres ont montré une variation spatiotemporelle. Cette variation s'explique premièrement par la position des casiers rizicoles sur la toposéquences et

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

deuxièmement par le type de mode de répartition de l'eau rencontré au niveau de la toposéquence. Ces résultats sont similaires à ceux de Morales *et al.*, (2010) qui ont montré que la variabilité spatiale du pH et de l'Eh dans les rizières était loin d'être négligeable à la fois en condition aérobie et anaérobie et que ces deux paramètres ne présentent aucune stabilité temporelle. Nos résultats ont aussi montré que le pH a une dépendance spatiale plus faible que l'Eh. Ces résultats sont contraires à ceux de Morales *et al.*, (2010) qui ont montré que le pH présentait une dépendance spatiale plus forte que l'Eh qui montrait également une tendance à présenter des gammes plus petites de dépendance spatiale. Cette situation pourrait s'expliquer par la méthodologie utilisée pour l'étude. Ces auteurs ont évalué la variabilité à l'aide de la géostatistique. La géostatistique, basée sur la théorie des variables régionalisées, est l'outil principal de l'analyse de la variabilité spatiale. Les résultats obtenus à partir d'une analyse géostatistique dépendent d'un certain nombre de variables telles que la fréquence et le nombre d'échantillonnage, l'espacement et la précision de l'échantillonnage et la sélection des paramètres d'analyse (Journel et Huijbregts, 1978, Webster et Oliver, 1990, Vieira *et al.*, 1997). Une bonne interprétation du semivariogramme et la sélection des modèles appropriés sont très importantes pour le processus d'analyse (Vieira, 2000). Les semivariogrammes calculés peuvent ensuite être utilisés pour produire des cartes de la propriété étudiée par krigeage, une méthode d'interpolation qui donne des estimations non biaisées avec une variance d'estimation minimale. De plus nos résultats

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

ont montré que l'Eh et le pH sont négativement corrélés et confirment les résultats trouvés par Van Breemen (1987) et de Bohrerova *et al.*, (2004). Nous avons également observé que l'Eh et le pH varient en fonction de la profondeur comme l'ont montré d'autres auteurs (Bohrerova *et al.*, 2004; Mansfeldt 2003; Snakin *et al.*, 2001). En outre, la matière vivante dans le sol crée une hétérogénéité significative de l'Eh et du pH à l'intérieur d'un horizon de sol donné (Snakin *et al.*, 2001). L'Eh et le pH présentent également une grande variabilité temporelle, avec un cycle quotidien et de fortes influences saisonnières (Mansfeldt 2003; Snakin *et al.*, 2001). Aussi faut-il souligner que la variabilité du pH et de l'Eh explique aussi la variation des autres paramètres physico-chimiques du sol. En effet, l'Eh et le pH sont des facteurs qui influencent fortement la mobilité de nombreux nutriments dans des environnements chimiques et biologiques complexes (Gambrell et Patrick 1978; Laanbroek 1990). A l'inverse, Eh et pH sont influencés par les différents éléments composant le sol, en particulier ceux ayant une amplitude élevée dans leurs nombres d'oxydo-réduction, tels que N, P ou S, ceci à des concentrations élevées telles que Fe. Prem *et al.*, (2011) rapportent que la variation spatiale des éléments qui sont directement (Fe, Mn) ou indirectement (P) influencés par des processus d'oxydo-réduction est très élevée par rapport à la variation d'Al, qui n'a pas de redox sensible. Eh et pH affectent aussi indirectement la disponibilité de P en affectant la solubilisation des ions métalliques comme oxydes et hydroxydes de Mn, Al et Fe ou de CaCO₃; Ceux-ci se lient aux ions phosphates ou les adsorbent et les rendent indisponibles

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

pour les plantes (Brady et Weil, 2010, Kemmou *et al.*, 2006, Phillips 1998, Sallade et Sims, 1997, Vadas et Sims, 1998).

7.4.3. Effet du mode de répartition de l'eau sur les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse

Les résultats ont montré que le mode de répartition de l'eau a un effet significatif sur les propriétés physico-chimique du sol. Le mode d'inondation permanente a donné les fortes teneurs en fer, les faibles valeurs d'Eh. On a remarqué une augmentation du pH dans le temps et le mode d'iondation permanente a donné le pH le plus élevé. Cette situation est observée par Kashem et Singh, 2001. Les auteurs ont rapporté que le mode de répartition de l'eau dans les rizières a un impact sur le phénomène d'oxydo-réduction du sol. En effet, les inondations affectent considérablement à la fois le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) et le pH, en particulier dans les sols organiques (Kashem et Singh, 2001). Les valeurs de pH ont augmenté, tandis que les valeurs Eh ont diminué, suite aux inondations (Morales *et al.*, 2010, Balakhnina *et al.*, 2010). En effet il a été rapporté que les inondations augmentent le pH des sols acides et diminue le pH des sols calcaires et sodiques. L'inondation des sols en général modère le pH vers une condition de pH neutre, et par conséquent la disponibilité de P est favorisée (Fageria et Baligar 1999 ; Linqvist et Ruark 2011). Les changements qui surviennent après la submersion sont principalement contrôlés par la matière organique et le fer réduit du sol (Narteh et Sahrawat, 1999). Au niveau des bas-fonds, les concentrations en fer dans le sol dépendent des conditions pédologiques,

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

morphologiques et climatiques. Les résultats ont montré que les sols du mode d'inondation permanente ont les fortes teneurs en fers (Fe libre et Fe²⁺). Ces résultats confirment ceux de Diatta. *et al.*, (1998). En effet, selon l'auteur, le fer se présente en général sous la forme ferrique (Fe³⁺) dans les sols du plateau. Cette forme est peu soluble et par conséquent n'est pas assimilable par les plantes. Le fer ferrique est entraîné dans les bas-fonds, soit par écoulement latéral dans les fleuves, soit par ruissellement des eaux de surface (Diatta. *et al.*, 1998). Aussi, l'auteur explique que les sols de bas-fond qui sont mal drainés sont pauvres en oxygène, provoquant ainsi une réduction du fer ferrique en fer ferreux. En milieu engorgé, l'oxygène est présent à des concentrations moins élevées et est épuisé rapidement par la respiration des micro-organismes du sol et par les racines des plantes (Prade *et al.*, 1990). Sous l'effet réducteur de ce milieu engorgé l'ion ferrique Fe³⁺ se réduit en ion ferreux (Fe²⁺), de plus les bactéries présentes dans le milieu mettent en place une respiration anaérobie libérant de grandes quantités d'ions ferreux (Fe²⁺) dans la solution. Cette quantité de fer augmente avec la durée de submersion, atteignant potentiellement des valeurs maximales après l'inondation de la rizière et reste ensuite constant (Sadana *et al.*, 1995). La vidange habituellement réalisée avant la récolte du riz, amène une reoxydation de fer ferreux en fin de campagne (Sahrawat, 2012). C'est ce qui explique les faibles teneurs en fers observées au niveau du mode d'inondation suivie de drainage.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

7.4.4. Effet du mode de répartition de l'eau sur la production du riz

Les résultats ont montré que le mode de répartition de l'eau eu d'influence significative sur le nombre de talles, la production en paille et en grain de riz. Le mode d'inondation suivie de drainage a donné les meilleurs paramètres de production ainsi que le rendement le plus élevé. Ces résultats sont conformes à ceux d'autres auteurs (Raes *et al.*, 2007, Worou *et al.*, 2013 et Touré *et al.*, 2009). En effet, la disponibilité d'eau sur la surface du sol et le drainage à intervalles réguliers induisent un environnement plus propice aux racines du riz, à la disponibilité et à l'accessibilité des nutriments par diffusion et écoulement massique aux racines des plantes dans les conditions de toxicité ferreuse. Cette situation peut s'expliquer par le fait que la combinaison des conditions aérobie et anaérobie dans les sols toxiques du fer a permis l'oxydation du fer ferreux présent dans la solution du sol en fer ferrique. Cette forme n'étant pas absorbable par la plante, a permis le bon développement des plants dans cette condition. D'autre part le fait que les parcelles du mode ID soient situées à un niveau topographique plus élevé que celui de l'inondation permanente, il y a lessivage des éléments du sol. Ce qui conduit à une élimination du fer du sol, réduisant ainsi l'effet de la toxicité ferreuse. Toutefois il faut signaler que le mode de répartition de l'eau n'a pas d'effet significatif sur la hauteur des plants (Wopereis *et al.*, 2004). Selon Audebert (2006), l'effet de la toxicité ferreuse se manifeste sur les caractéristiques de croissance et de développement tel que la hauteur, le nombre de talles et le

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

nombre de panicules. Ces deux dernières font partie des composantes du rendement. Malgré que le nombre de talles soit affecté (car inférieur au nombre de talles potentiel de la variété), on peut dire que le mode d'inondation suivie de drainage a permis d'atténuer les effets de la toxicité ferreuse dans le bas-fond. En effet, les résultats ont montré que les plants qui ont poussé au niveau de ce mode ont donné les nombres de talles les plus élevés comparativement aux deux autres modes de répartition de l'eau. L'inondation permanente des casiers couplée avec l'importance de la lame d'eau (supérieur à plus de 10 cm) aurait eu pour effet de réduire le tallage (Wopereis *et al.*, 2004). Au niveau du mode d'écoulement naturel, le faible niveau de tallage peut s'expliquer par le niveau de fertilité des sols de ce mode. En effet il a été démontré que le mode d'écoulement naturel a été placé en haut de pente, or les sol de ce niveau de la toposéquence présente un niveau de fertilité faible par rapport aux deux autres positions (Homma *et al.*, 2003; Tsubo *et al.*, 2006; Haefele *et al.*, 2006). Ainsi au niveau de cette partie de la toposéquence, le faible niveau de fertilité couplé avec le stress de la toxicité ferreuse expliquerait le rendement obtenu au niveau de ce mode. Il faut signaler que les rendements obtenus sont largement inférieurs au rendement potentiel de la variété utilisée qui est en moyenne 5-7 t/ha. Malgré que la variété utilisée soit tolérante à la toxicité ferreuse, elle a montré des symptômes de cette toxicité selon les traitements. Une variété sensible allait mieux montrer les symptômes et les dégâts de la toxicité ferreuse.

7.5 Conclusion

Les résultats de la présente étude ont permis de dire que les producteurs du riz du bas-fond d'Awokpa sont confrontés au problème de toxicité ferreuse. Les propriétés physico-chimiques des sols du bas-fond présentent une forte variabilité spatio-temporelle. Le niveau de fertilité des sols diminue suivant la toposéquence c'est-à-dire que les sols situés en haut de pente sont moins fertiles que ceux situés en bas de pente. Les résultats de cette étude permettent de conclure que le mode de répartition de l'eau a une forte influence sur la dynamique des déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse étudiés et a permis d'atténuer les effets de la toxicité ferreuse au niveau des casiers rizicoles situés en mi-pente. En effet, les fortes teneurs en fer ferreux ont été observées au niveau du mode d'inondation permanente des casiers rizicoles alors que les plus faibles valeurs ont été observées au niveau du mode d'inondation suivie de drainage. Cette situation s'explique par une oxydation périodique du fer ferreux en fer ferrique qui est une forme de fer qui n'est pas absorbable par la plante. Aussi le mode d'inondation suivie de drainage a donné non seulement le meilleur rendement en grain de riz mais aussi les meilleurs paramètres de production. D'une manière générale, le mode de répartition de l'eau permet d'atténuer les effets de la toxicité ferreuse surtout pour les producteurs qui ont des parcelles situées au niveau de la mi-pente. Cette forme de technologie de gestion des sols et des eaux est fondamentale pour une meilleure gestion des bas-fonds afin d'atténuer les effets de ce stress abiotique commun à presque tous les bas-fonds du Bénin.

Chapitre 7 : Analyse des déterminants édaphiques de la production du riz en condition de toxicité ferreuse

Vu les effets du mode de répartition de l'eau aussi bien sur la réduction de la concentration en fer ferreux et sur la production du riz nous recommandons pour une production durable dans le bas-fond ce qui suit :

- La poursuite de l'essai pour quantifier la teneur en fer accumulée dans la biomasse sèche. Ce travail permettra de confirmer et de justifier le comportement des plants de riz au niveau de chaque mode ;
- La poursuite de l'essai en utilisant une variété non tolérante à la toxicité ferreuse. Ce travail permettra d'une part de mesurer l'impact de la toxicité ferreuse sur les plants de riz dans le bas-fond et d'autre part d'apprécier le niveau d'amélioration apportée par le mode de répartition de l'eau ;
- Reconduire la même expérimentation dans un autre bas-fond à toxicité ferreuse mais en utilisant la géostatistique pour apprécier la variabilité spatio-temporelle des propriétés physico-chimiques du sol ;
- L'association au mode de répartition de l'eau, la fertilisation minérale spécialement l'azote et le phosphore afin d'améliorer la production du riz dans le bas-fond.

TROISIEME PARTIE
DISCUSSION ET
CONCLUSION GENERALES

Troisième partie : Discussion et Conclusion générale

Chapitre 8: Discussion et Conclusion générale

8.1 Discussion générale

La production rizicole de plateau présente une grande incertitude en raison de l'effet combiné des aléas climatiques (sécheresse, mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies) et des menaces liées à la pression parasitaire. Tandis que, la riziculture de bas-fonds offre une certaine garantie pour une production intensifiée et durable grâce à son mode hydrodynamique. La riziculture de bas-fonds se pratique dans tous les départements du Bénin en raison de la présence des bas-fonds sur toute l'étendue du territoire. Dans la plupart des cas, c'est un système de production qui dépend de la survenance des pluies (SNDR, 2010).

La présente étude s'est spécifiquement centrée sur l'effet des modes de répartition des eaux du bas-fond selon la toposéquence sur le phénomène de la toxicité ferreuse dans les sols rizicoles du sud du Bénin et sur la dynamique des paramètres physicochimiques dans les conditions d'hydromorphie réductrice et très réductrice. Il s'agit notamment du potentiel redox, du pH, de la température, de la réduction du fer ferrique

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

en fer ferreux et de la libération dans la solution du sol du phosphore assimilable, de l'ammonium et du nitrate.

Avant la mise en place des essais, il a été conduit une étude pédologique dont les résultats ont permis de conclure que le bas-fond d'Awokpa a un sol acide, hydromorphe et limono-sableux à drainage pauvre reposant sur un horizon de sable. Les systèmes racinaires sont assez bien développés et constitués de racines très fines, et moyennes. Il a une structure faible dans l'ensemble, à débit polyédrique sub-angulaire avec des activités biologiques développées dans les deux premiers horizons et avec la présence des terricules de vers de terre.

Cette étude a montré que le potentiel redox diminue avec la profondeur du sol et que l'humidité est généralement restée excessive pendant tout le cycle de production du riz et a favorisé le développement d'un milieu de réduction qui a conduit à la baisse du potentiel redox qui varie entre 29 et 188 mv. Ces résultats confirment ainsi les observations de **Vizier, (1970)** qui situe la valeur du Eh entre 100 et 175 mv après deux mois de submersion permanente. Alors que **Patrick et Reddy, 1978** disent que c'est quelques jours après l'inondation, lorsque le potentiel redox du milieu devient inférieur à 180-150 mV que la réduction du fer ferrique Fe^{3+} commence.

Pendant que l'évolution du potentiel redox avait une tendance ascendante, le pH a quant à lui une tendance baissière. Plus le milieu est réduit, alors le pH du sol sous le riz devient neutre et évolue progressivement vers un sol basique. Plus le milieu de la solution du sol est oxydé, entraînant une augmentation de la

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

valeur du Eh, alors le sol s'acidifie et atteint des valeurs de pH très basses qui pour la couche 0-10 cm et 10-20 cm varient entre 4,5 et 5.

Les valeurs moyennes de Eh et pH sur la profondeur 0-30 cm de sol révèlent une relation négative entre ces deux variables. Pendant que l'évolution du potentiel redox a une tendance ascendante avec le temps, le pH a quant à lui une tendance baissière. Plus le milieu de la solution du sol est oxydé, entraînant une augmentation de la valeur du Eh, alors le sol s'acidifie et atteint des valeurs de pH très basses confirmant Audebert A. (ADRAO, 2006) qui dit que quand le Eh est inférieur à 50 mv le pH varie entre 6 et 7 mais quand il varie entre 100 et 125 mv alors la valeur du ph varie entre 5 et 6. Ce constat est confirmé par les résultats de la présente étude qui situe le coefficient de corrélation de Pearson, $R = -0,883$, indiquant une relation significativement négative et très forte entre les deux variables.

La température a varié de 27,7 à 29,7°C et est en moyenne de 28,5 °C pendant la période de la culture du riz. La température joue un rôle très important dans les phénomènes de dégagement du CO₂, de la nitrification et de l'ammonification. Le pouvoir ammonificateur et nitrificateur croit avec l'accroissement de la température (C. MOREAUX, 1967). Broadbent, (1979) a conclu que le processus de minéralisation est affecté par la température du sol, le mode hydrologique, la sécheresse suivie par la saturation en eau du sol, la nature et la quantité de la matière organique et la teneur en argile.

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

D'après GROS (1977), il existe un équilibre permanent entre les divers états du phosphore dans le sol. Ainsi la matière organique, à son tour, libère du phosphore dans la solution du sol après minéralisation. L'équilibre le plus rapide et le plus important existe entre le phosphore dissout dans la solution du sol et le phosphore échangeable, et on estime que ces deux dernières formes représentent la réserve alimentaire en phosphore (DUTHIL, 1976).

Il ressort de la présente étude que la teneur en phosphore a une tendance baissière pendant la production du riz. Pendant la première quinzaine de jours après le repiquage, la teneur en phosphore est élevée. On assiste à une baisse constante jusqu'à la fin de la période de production. Le plus faible taux est constaté à la phase de fructification du riz. Le mode d'inondation suivie de drainage a enregistré la plus faible teneur en phosphore assimilable pendant la période de production. On peut conclure que la dynamique du phosphore dans les sols du bas-fond sous le riz est intimement liée aux différentes phases de développement du riz et au mode de répartition de l'eau.

Quant à la forte teneur en carbone des fractions dans les sols inondés et semi inondés plusieurs travaux de recherche ont permis d'expliquer l'accumulation de la matière organique. Sahrawat,(2004) a montré que la décomposition de la matière organique à travers les processus de respiration et de fermentation en anaérobiose est métaboliquement moins efficace et conduit à des décompositions lentes des substrats organiques, et partant, à une accumulation nette de ces

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

composés organiques (Axt et Walbridge, 1999; Craft, 2001). Lors de la submersion, l'oxygène est rapidement épuisé et le rôle d'accepteur d'électrons pour l'oxydation du carbone par les microorganismes anaérobies, facultatifs ou obligatoires, est pris en charge par d'autres éléments dissous dans la solution (NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , CO_2) ou présents sous forme solide comme le manganèse (MnO_2) réduit en Mn^{2+} ou le fer ferrique [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] réduit en fer ferreux (Fe^{2+}).

Les sols étudiés, avec une teneur en carbone organique compris entre 2,5% et 5,7% peuvent être considérés comme très riches en carbone organique totale selon la synthèse réalisée par Boyadgiev, (1980). Cette teneur moyenne de C n'est pas significative suivant les trois modes de répartition de l'eau. Cette matière organique est plus associée aux sables (50-2000 μm) qu'aux particules argilo-limoneuses ($\text{Ø} < 50 \mu\text{m}$).

Notre étude a prouvé que le sol hydromorphe du bas-fond émet du CO_2 dans l'atmosphère sous les trois modes d'inondation. Ces résultats informent sur l'intensité de l'activité microbienne qui régit la dynamique de la matière organique. La parcelle rizicole à écoulement naturel d'eau a favorisé un dégagement de CO_2 plus important que celui observé pour les deux autres modes. Ces résultats concordent avec ceux de Brito *et al.*, (2010) qui avaient obtenu des valeurs similaires de dégagement dans un sol à texture fine sous la canne à sucre en Sao-Polo au Brésil.

La forte émission de CO_2 dans le sol à inondation naturelle peut s'expliquer par les conditions aérobies qui s'y

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

règnent. Le sol humide et oxygéné a facilité une minéralisation rapide de composés organiques accumulés dans le sol. La mise en culture sur des sols exondés provoque une minéralisation de la matière organique du sol (Djegui,1992). Les quantités maximales de carbone dégagées sous forme de gaz carbonique ont été observées dès les premiers jours d'incubation. Plusieurs facteurs peuvent être à la base de ce dégagement important de CO₂ obtenu dans les parcelles rizicoles à écoulement naturel de l'eau. Il s'agit de la température du sol, de la biomasse microbienne, des types de microorganismes et leurs métabolismes, qui n'ont pas été prises en compte dans la présente étude. Chevallier *et al.*, (2016) ont montré que les émissions de CO₂ ont augmenté avec la température dans les sols calcaires du Nord-ouest de Tunisie. Les valeurs de CO₂ dégagé sous le traitement T1 sont corrélées positivement avec la quantité de carbone organique disponible et montre une forte minéralisation dans les sols à écoulement naturel. Le rapport C/N sur les sols du traitement T1 est plus faible que sur les sols du T2 et du T3 ; ce qui montre ainsi que la minéralisation de la matière organique est meilleure sur T1 comparativement aux T2 et T3.

Dans le cas cette étude la toxicité ferreuse a eu de sérieux impacts sur les paramètres de croissance et de rendement malgré le cultivar utilisé. La variété NERICA L20 est peu sensible à la toxicité ferreuse. Cette variété a sa résistance limitée quand le niveau d'eau est important dans le bas-fond. Ses limites ont été appréciées au cour de la présente étude. Il s'agit du tallage (nombre de talles formées et celles fertiles par plant), de

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

l'accumulation de la biomasse, du poids des panicules par plant, et du poids de 1000 grain de paddy qui ont été négativement influencés au niveau des traitements où il a été enregistré une forte teneur en fer ferreux dans la solution du sol. Ces résultats confirment ceux d'autres travaux (**Abraham et Pandey, 1989**) qui concluent que dans le cas d'une toxicité ferreuse se produisant pendant le stade plantule, le développement des plants de riz est arrêté et le tallage extrêmement limité. La toxicité ferreuse pendant les stades végétatifs entraîne une réduction de la hauteur et une réduction de matière sèche (**Abu et al., 1989**), la biomasse aérienne étant plus affectée que la biomasse racinaire (**Fageria et al., 1988**). La formation de talles et la proportion de talles productives peuvent être sévèrement réduites (**Cheema et al., 1990**).

La densité des plants a été fortement réduite du repiquage à la phase de fructification. Les difficultés de la réalisation des conditions de production du riz ont conduit à la manifestation du phénomène de la toxicité ferreuse qui dans le cas de la présente étude a eu des effets négatifs sur les paramètres de production et également sur les rendements. La densité moyenne des plants à la phase de fructification est de 46% pour tous les traitements. Cette étude n'a pas pu établir le lien qui existe entre la densité des plants et les phénomènes étudiés (oxydo-réduction, en occurrence la toxicité ferreuse).

La moyenne des rendements de paddy par traitement est :

- Traitement d'écoulement naturel : 2,474 t/ha
- Traitement d'inondation suivie de drainage : 3,775 t/ha

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

- Traitement d'inondation permanente : 3,198 t/ha.

Les comptes de production ont révélé que :

- les charges de la main d'œuvre liées à l'exécution des opérations culturales sont très élevées et représentent 76 % des charges variables
- la marge brute de production dans le bas-fond est positive avec un indice de rentabilité qui varie de 0,77 à 1,54.

8.2 Conclusion générale et suggestions

8.2.1. Conclusion générale

Le phénomène d'oxydo-réduction est fortement influencé par les différents modes de répartition de l'eau dans un bas-fond. Il agit non seulement sur les paramètres physiques et chimiques du sol, mais également sur les paramètres de croissance et de rendement. Les profils pédologiques réalisés dans le bas-fond ont mis en évidence la présence d'un sol limono-sableux à drainage pauvre reposant sur un horizon de sable, qui d'une manière générale est acide. Les profils ont une structure faible dans l'ensemble, à débit polyédrique subangulaire avec des activités biologiques développées dans les deux premiers horizons. On note également la présence des terricules de vers de terre et des systèmes racinaires assez bien développés et constitués de racines très fines, fines et moyennes.. Le sol présente une fertilité en bas de pente plus élevée que celle du haut de pente.

La dynamique des paramètres chimiques est sérieusement influencée par le phénomène d'oxydo-réduction qui dans son évolution fait apparaître la toxicité ferreuse qui est un phénomène très toxique pour la production du riz. Dans le cas de cette étude le phénomène d'oxydo-réduction n'est pas seulement nocif pour la production du riz mais il est aussi bénéfique dans la minéralisation de l'azote organique en développant les phénomènes d'ammonification et de nitrification. C'est également au cours du développement de ce phénomène que le phosphore assimilable est libéré. La

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

production rizicole a souffert de la présence de la toxicité ferreuse mais a bénéficié de la présence permanente du phosphore assimilable, de l'ammonium et du nitrate. Les populations locales du Sud-Bénin perçoivent le phénomène de la toxicité ferreuse comme :

- la manifestation du fer dans l'eau avec l'effet du soleil,
- la survenance d'une pellicule rougeâtre ou violâtre en surface de l'eau.

Elles lient ce phénomène au comportement des plants du riz et à leur productivité dans les zones infestées de la toxicité ferreuse

Cette étude est également consacrée à l'influence des modes de répartition de l'eau sur le statut de la matière organique et sur la capacité du dégagement du dioxyde de carbone dans le bas-fond rizicole d'AWOKPA. Elle a permis de comprendre le comportement de la matière organique du sol dans différentes conditions de submersion du sol en eau. Les résultats de cette étude ont révélé que :

- Le stock de carbone organique est plus élevé dans le mode d'écoulement naturel de l'eau malgré sa faible teneur en carbone organique du sol comparativement au mode d'inondation suivie de drainage et le mode d'inondation permanente.
- Les concentrations en C des fractions organiques grossières sont significativement supérieures à celles des fractions organiques fines et organo-minérale et ce suivant tous les trois modes.

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

- Le dégagement du CO₂ sur les sols rizicoles à écoulement naturel de l'eau est élevé (7,63 mg.m⁻².h⁻¹) comparativement aux sols soumis au mode d'inondation suivie de drainage (4,2 mg.m⁻².h⁻¹) et d'inondation permanente (1,54 mg.m⁻².h⁻¹).
- Les sols à écoulement naturel de l'eau respirent mieux et leur matière organique se minéralise plus rapidement que dans les sols à inondation permanente et à inondation suivie de drainage
- Le mode d'inondation suivie de drainage est le meilleur mode de gestion de l'eau dans le bas-fond pour une production de riz satisfaisante.

Les résultats ont montré une variabilité spatio-temporelle des propriétés chimiques des sols déterminantes de la toxicité ferreuse dans le bas-fond. Le degré de variation d'une propriété est intimement lié à sa position sur la toposéquence. Ainsi on peut conclure que la position des parcelles sur la toposéquence a une influence sur les propriétés chimiques du sol déterminantes de la toxicité ferreuse.

Les résultats du test de corrélation indiquent qu'une forte valeur de pH conditionne une faible valeur de l'Eh. Cette relation est également observée entre l'Eh et le Fe²⁺. Aussi pouvons-nous dire qu'une forte valeur du pH induit une forte teneur en Fe²⁺ dans le bas-fond d'Awokpa. Les résultats ont montré que les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse ont significativement varié en fonction du mode de répartition de l'eau et de la période d'échantillonnage dans le bas-fond d'Awokpa. Les résultats ont également montré que le mode IP a

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

donné de façon générale la plus forte valeur du pH, les plus fortes teneurs en Fe^{2+} et en Feox. Le mode ID a donné les plus faibles teneurs en Fe^{2+} . Ainsi donc le mode de répartition de l'eau a un effet sur les conditions d'oxydation et de réduction du milieu. Donc le mode de répartition de l'eau peut aider à contrôler la teneur en Fe^{2+} du sol pour agir ainsi sur la toxicité ferreuse dans le bas-fond.

Cette étude a permis de dire que le mode de répartition de l'eau et par conséquent sa position topographique ont une influence sur la production du riz. Le mode ID situé en mi- pente a donné les meilleurs paramètres de production et le meilleur rendement de 3,775 t/ha en grains du riz comparativement aux deux autres modes situés respectivement en haut et en bas de pente. Ce rendement dans le bas-fond rentabilise les activités de production avec un indice de rentabilité de 1,54.

Dans un environnement de toxicité ferreuse, il y a un risque de 50 % pour qu'un cultivar ait un rendement en grain entre 70 et 45 % du rendement potentiel (7 tonnes dans les conditions normales). Les pertes occasionnées par ce stress dû à la toxicité ferreuse sont évaluées à 65 % pour EN, 47 % pour ID et 54 % pour IP ; ainsi, pour tous les traitements, les pertes sont évaluées en moyenne à 53 %.

8.2.2. Suggestions

D'une manière générale, beaucoup de travaux de recherche se sont intéressés à la riziculture. Il a été clarifié les problèmes variétaux et déterminé les itinéraires techniques de production

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

du riz. Très peu d'études se sont intéressées aux phénomènes qui se produisent dans le sol sous le riz. Il se développe dans le bas-fond rizicole un certain nombre de phénomènes déterminants pour la production du riz. Une méconnaissance de ces phénomènes ne peut que ralentir le processus d'intensification de la production rizicole. Au Bénin et surtout dans sa partie australe il y a beaucoup de bas-fonds jugés improductifs parce que les producteurs ne connaissent pas le mécanisme de leur mise en valeur. La présente étude donne des indications sur les principaux paramètres qui régissent le bas-fond et présente quelques démarches techniques d'amélioration de la production. IL ressort des résultats de cette étude que le bas-fond est un lieu par excellence de production rizicole dans lequel se développe certains phénomènes dont le plus important est l'oxydoréduction. C'est ce phénomène qui génère d'autres appelés la toxicité ferreuse, le dégaement du dioxyde de carbone, du méthane et du sulfure d'hydrogène qui sont néfastes pour l'environnement. Pour améliorer la production actuelle du bas-fond, il faudra :

- Curer la rivière Awo pour favoriser l'écoulement rapide des eaux et baisser le niveau de la nappe phréatique au niveau des sols de bas de pente. Cette action permettra de rendre tout le bas-fond exploitable pendant toute l'année. Les producteurs auront la possibilité de réaliser de deux cycles de production en une année.
- Curer les principaux drains d'évacuation des eaux arrivant dans le bas-fond pendant la crue pour un drainage rapide des eaux vers l'aval du bas-fond.

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

- Renforcer les diguettes de captage des eaux au niveau des casiers en haut de pente pour que les plants de riz ne rentrent pas dans la situation de stress au cours des poches de sécheresse
- Renforcer les chevaliers pour empêcher le débordement des eaux de la rivière dans le bas-fond
- Exiger des producteurs un respect de l'itinéraire technique de production du riz dans les conditions de bas-fond menacés par la toxicité ferreuse.

Pour atténuer les effets néfastes de l'exploitation du bas-fond, il faudra :

- Planter en haut de pente des arbres à croissance rapide supportant l'humidité excessive de profondeur pour remplacer la couverture végétale détruite au cours de l'aménagement du bas-fond. Ces arbres joueront plus tard le rôle de séquestreurs de dioxyde de carbone dont la quantité dégagée par hectare et par an est 55,72kg.

Pour bénéficier des potentialités du bas-fond, il faut que les chercheurs poursuivent les travaux de :

- Détermination de la cause de la perte de plus de 50% des plants du riz avant la phase de fructification
- Poursuite des travaux de détermination du dégagement des autres gaz dont les effets sont aussi nocifs pour l'environnement (méthane, sulfure d'hydrogène et autres)

Chapitre 8 : Discussion et Conclusion générale

- Mise en place du logiciel qui permettra de prédire la production du riz à partir de quelques paramètres de la solution du sol. Ceci éviterait de ne plus reprendre tous les travaux effectués dans le cas de cette étude pour juger des potentialités de production du bas-fond
- Sensibiliser les producteurs sur l'adoption de la technique de l'inondation suivie du drainage qui s'est révélée la plus réductrice de la nuisance du phénomène de la toxicité ferreuse

Références bibliographiques

- Abdoul, K.C., 2006. Test et développement des variétés de riz tolérantes à la toxicité ferreuse en basse guinée. Dans : Audebert, A., Narteh, L.T., Kiepe, P., Millart, D., Beks, B., (eds) Toxicité ferreuse dans les systèmes à base riz d'Afrique de l'ouest, Africa Rice Center (WARDA), pp 68-81.
- Abel G-J. 2009 Etude sur le développement des filières riz et maraîchage au Bénin. CTB ; 77 p.
- Abiassi E.H. et Eclou S.D., 2006. Etude sur les instruments de régulation de simportations du riz au Bénin, Cotonou, Fédération des Unions de Producteurs du Bénin, 85p.
- Abu M.B., Tucker E.S., Harding S.S., Sesay, J.S., 1989. Cultural Practices to Reduce Iron Toxicity in Rice. International Rice Research Newsletter.
- Adégbidi, A. ; Gandonou E. ; Padonou E. ; Océni H. ; Mègnanglo M. ; Maliki R. (2000). *Etude des filières des intrants agricoles au Bénin* (engrais minéraux, produits phytosanitaires, semences, matériels et équipements agricoles, compost), Rapport final, GTZ ; MDR, 70p.
- Adegbola P.Y., et Singbo A.G., 2005 Impact de l'importation du riz sur la compétitivité et la rentabilité de la production nationale au Bénin, PAPA/INRAB, Porto- Novo. 12pp.

Références bibliographiques

- ADRAO 2002. Toxicité ferreuse dans les bas-fonds : la rouille du riz. Dans : ADRAO. Points saillants des activités. Rapport annuel 2001-2002. ADRAO, Bamako.
- ADRAO 2006. Toxicité ferreuse dans les systèmes à base riz d'Afrique de l'Ouest. Cotonou, Bénin. 196 p.
- ADRAO, 1997. Rapport annuel d'activité. 18p
- ADRAO, 2001. Rapport annuel d'activité. 20p
- ADRAO, 2002. NERICA: le riz, source de vie. BOUAKE, ADRAO, 8p.
- ADRAO, 2002. Toxicité ferreuse dans les bas-fonds : la rouille du riz. Dans : ADRAO. Points saillants des activités. Rapport annuel 2001-2002. ADRAO, Bamako. P.29-37.
- ADRAO, 2003. Rapport annuel d'activité. 12p
- ADRAO, 2007. Rapport annuel d'activité. 15p
- Adu J. K., Oades J. M., 1978. Physical factors influencing decomposition of organic materials in soil aggregates. Soil Biol. Biochem., 10 : 109-115.
- Africarice, 2013. La science rizicole pour la sécurité alimentaire à travers le renforcement de l'agriculture familiale et l'agro-industrie en Afrique, 3ème Congrès du riz en Afrique, 21-24 Octobre 2013, Yaoundé (Cameroun). 296p.
- Africarice, 2014. Suffisamment de terres, suffisamment d'eau. Article du mois.

Références bibliographiques

[Http://www.africarice.org/warda/adrao/story-land-water.asp](http://www.africarice.org/warda/adrao/story-land-water.asp).

Consulté le 20-juil 2016.

AGBOSSOU, K. E. & DANVI, C. C. 1995. Etude pour le montage d'un programme de recherche/ développement sur la gestion de l'eau dans les bas-fonds du Département de l'Atacora. RAMR/INRAB. 51p

Agnoun, Y., Sié, M., Djedatin, G., Dramé, K. N., Toulou, B., Ogunbayo, S. A., Sanni, K. A., Tia, D., Ahanchédé, A., Vodouhè, R. S., Ndjiondjop, M. N., 2012. Molecular Profiling of Interspecific Lowland Rice Progenies Resulting from Crosses between TOG5681 and TOG5674 (*Oryza glaberrima*) and IR64 (*Oryza sativa*). *International Journal of Biology* 4,(3) 19-28.

Aholoukpè H. S. N., Amadji G. L., Blavet D., Chotte J. L., Deleporte P. Dubos B., Flori A., Jourdan C., 2016. Effet de la gestion des feuilles d'élagage du palmier à huile sur le stock de carbone et les propriétés physico-chimiques du sol dans les palmeraies villageoises du Bénin. *Biotechnol.Agron. Soc. Environ.* 20(2):171–82.

Aholoukpè N. S. H., 2013. Matière organique du sol et développement du palmier à huile sous différents modes de gestion des feuilles d'élagage. Cas des palmeraies villageoises du département du Plateau au Bénin. Thèse de doctorat : Université d'Abomey-Calavi (Bénin).

Albergel J.(Ed.), Lamachère J.M. (Ed.), Lidon B. (Ed.), Mokadem A. (Ed.), Van Driel W. (Ed.), 1993. Mise en

Références bibliographiques

- valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. Rapport final d'un projet CORAF-R3S.
- Al-Khafaf S., Wierenga P. J., William B. C., 1977. Flotation method for determining root mass in soil. *Agr. J.*, 69 (6) : 1.025-1.026.
- Amador, J.A., Gorres, J.H., 1997. Spatial and Temporal Variability of Phosphorus Retention and Release in Riparian Forest Soils and Relationship to Soil U. S. Department of the Interior Geological Survey pp 29.
- Ambler J. R., Young J.L., 1977. Techniques for determining root length infected by vesicular arbuscular mycorrhizae. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 551-556.
- Angladette, A., 1966. Le riz; les techniques agricoles et productions tropicales. G-P. Maisonneuve et Larose. Paris, France. 930p
- Annabi M., Haithem B., Kawther L., 2009. Statut organique et respiration microbienne des sols du nord de la Tunisie. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment* 13(3):401–8.
- Arraudeau, M., 1998. Le riz irrigué. Editions G-P. Maisonneuve et Larose. Paris (France). 321p
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J., Jayet P., Soussana J., Stengel P., Bureau D., 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre (stocker du carbone dans les sols agricoles de France?).

Références bibliographiques

- Asubonteng, O.K., 2001. Characterization and evaluation of inland valley water- sheds for sustainable agricultural production: case study of semi-deciduous forest zone in the Ashanti Region of Ghana. *Tropics* 10, 539–554.
- Audebert A 2006b. La toxicité ferreuse : les conditions environnementales et les symptômes. Dans : Audebert A, Narteh LT, Kiepe P, Millart D, Beks B (eds) Toxicité ferreuse dans les systèmes à base riz d’Afrique de l’ouest, Africa Rice Center (WARDA).
- Audebert A. et Fofana M. 2009. Rice Yield Gap due to Iron Toxicity in West Africa. *J. Agron. Crop Sci.* 195, 66–76.
- Audebert A. et Sahrawat K.L. 2000. Mechanisms for iron toxicity tolerance in lowland rice. *J. Plant Nutr.* 23:1877-1885.
- Audebert A., 2006a. Diagnostic du risque et approche de gestion de la toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizicoles. In Toxicité Ferreuse dans les Systèmes à base riz d’Afrique de l’Ouest, Centre du riz pour l’Afrique (ADRAO) Cotonou, Bénin. Cirad-CA UPR Rizicultures: France Montpellier ; pp 6 -17.
- Audebert, A. 2006a. Diagnostic du risque et approches de gestion de la toxicité ferreuse dans les bas-fonds rizicoles. Dans : Audebert, A., Narteh, L.T., Kiepe, P., Millart, D., Beks, B., (eds) Toxicité ferreuse dans les systèmes à base riz d’Afrique de l’ouest, Africa Rice Center (WARDA), pp 6-17.

Références bibliographiques

- Axt J.R. Walbridge M.R., 1999. Phosphate removal capacity of palustrine forested wetlands and adjacent uplands in Virginia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1019–1031.
- Babalola, T.S., Fasina, A.S., Tunku, P., 2007. Relationship Between Soil Properties and Slope Position in a Humid Forest of South Western Nigeria. *Agricultural Journal* 2(3): 370–374.
- Bachelier G., 1968. Les sucres dans le sol et leur dosage global. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 4 (1) : 9-22.
- Bachelier G., Ganivelli R., 1966. Dosage global des glucides du sol par les méthodes calorimétriques à l'anthrone et à l'orcinol. *Cah. ORSTOM., sér. Pédol.*, 4 (3) : 97-103.
- Bacyé B., Feller R., Moreau C., 1998. Décomposition d'une poudrette de fumier incorporée dans un sol sableux de versant et un sol argilo-limoneux de bas-fond en milieu soudano-sahélien. *Etude et Gestion Des Sols* 5(2):83–92.
- Bagachi, D. K., Banik, P. et Sasma, T. 1995. Selection of appropriate technologies for upland rice growing on the Bihar plateau, India. In *Lives in Fragile Ecosystems*, International Rice Research Institute, Los Banos, The Philippines, pp.127-134
- Baize, D., Girard, M.C., 1995. *Référentiel Pédologique*. AFES/INRA. INRA Editions, 332 p.
- Balakhnina, T.I., Bennicelli, R.P., Stepniewska, Z., Stepniewski, W., Fomina, I.R., 2010. Oxidative damage and antioxidant defense system in leaves of *Vicia faba* majorl.

Références bibliographiques

- Cv.Bartomduring soil flooding and subsequent drainage. *Plant Soil* 327:293–301
- Banville J. L., 2009. Caractérisation des stocks de carbone de 5 types de formations végétales dans un secteur du bassin versant de la rivière eastmain, baie james.” *Mémore de maitrise en géographie : Université du Québec à Montréal.*
- Bationo A., Christianson C., Baetghen W. Mokwunye A., 1998. A farm level evaluation of fertilizers.Use and planting density for pearl, mil and production in Niger. 28p.
- Becker, M., Asch, F., 2005. Iron toxicity in rice-conditions and management concepts. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168:558-573.
- Becker, M., Johnson, D.E., 2001. Improved water control and crop management effects on lowland rice productivity in West Africa. *Nutrient Cycling in Agro- ecosystems* 59, 119–127.
- Bell, D.F., 1964. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in noncalcareous soils. *Journal of Soil Science* 15: 84-92.
- Bernoux M., Arrouays D., Cerri C., Volkoff B., Jolive C. 1998.Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties. *Soil Sci. soc. Am. J.* 62 : 743-749.
- Berthelin J., 1982. Processus microbiens intervenant dans les sols hydromorphes en régions tempérées. Incidences sur la pédogenèse. *Pédologie Grand*, 32, 3(3), 313-328.

Références bibliographiques

- Berthelin J., DE Giudici P., 1991. Processus microbiens et physico-chimiques liés à la biodisponibilité des nutriments dans la rhizosphère du riz: Cas des rizières de bas fond à Madagascar. In Bas-fonds et riziculture-Thème III, ed. CIRAD, Actes du Séminaire. Antananarivo, Madagascar, 273-283.
- BERTON, S. 1988. La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits et micro-barrages en Afrique de l'Ouest. Dossier n° 12 C F/GRET/ACCT. 474p
- Bilgo A., 2005. Statut organo-minéral et biologique des sols dans les systèmes culture-jachère naturelle de courte durée ou améliorée à *Andropogon gayanus* Kunth. Cas de Bondoukuy en zone sud soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat Unique en Sciences Biologiques Appliquées, Option Biologie et Ecologie Végétales, Université de Ouagadougou, 177 p.
- Bocquier G. (1971). Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Cahier O.R.S.T.O.M., série Pédologie, 9(4).
- Bode, K., Döring, O., Lüthje, S., Neue, H.U., Böttger, M., 1995. The role of active oxygen in iron tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Protoplasma* 184: 249-255.
- Boeken, G.B., 1971. Etude agro-botanique des rizsauvages au Sénégal, PNUD/FAO, P.7.

Références bibliographiques

- Bohrerova, Z., Stralkova, R., Podesvova, J., Bohrer, G., Pokorny, E., 2004. The relationship between redox potential and nitrification under different sequences of crop rotations. *Soil Till Res* 77:25–33
- Bongiovanni M. D., Lobartini J. C., 2006. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro- and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma*, 136(3-4), 660-665.
- Boyadgiev T.G. 1980. Création d'un service des sols. Haute-Volta. Etat des connaissances des sols. AG : DP/UPV/74/007 - Rapport technique 1. PNUD/FAO, Rome, 1980, 33 p.
- Brady, N.C. et Weil, R.R., 1996. Nature and properties of soil 13th Edition, Macmillan Publishing Company, p 88
- Brady, N.C., et Weil, R.R., 2010. Elements of the nature and properties of soils. Pearson Education International, New Jersey
- Bray, R.H., Kurtz, L.T., 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59, 39–45.
- Brito L. F., José M. J., 2010. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. *Bragantia* 19–27.
- BROWERS, M. 1970. Etude morpho-pédologique de reconnaissance pour l'implantation des périmètres irrigués : région de Bagré-Sud. IRAT, Montpellier pp5-37.

Références bibliographiques

- Bruckert S., 1979. Séparation des complexes organo-minéraux et des matières organiques libres par tamisage dans l'eau. Application aux sols à complexes argilo-humiques floclés. Ann. Univ. Besançon, bèxne sér. Biol. Vég, 20: 3-7.
- Cambardella C.A. et Elliott E.T., 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic fraction. Geoderma, 56, 449-457.
- Cantrell, R.P., 2002. Water wise rice production. In: Bouman B.A.M., Hengsdijk H., Hardy B., Bindraban P.S., Tuong T.P. and Ladha J.K. (Eds). Proceedings of international workshop on water wise rice production. IRRI Los Banos, Phillipines pp 356
- Carloni, A. (2001). *Global Farming System Study: Challenges and priorities to 2030, Regional Analysis, Sub-Saharan Africa*, FAO, 29p.
- CCR-B, 2012. Rapport technique d'activités, Mai 2009 – Avril 2012. Secrétariat Permanent ; 43 p.
- Celerier J., 2008. Caractérisation moléculaire et dynamique de la matière organique de compost (déchetts verts/biodechetts) dans un sol. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées, Poitiers: 333p.
- Chaussod R., 1996. La qualité biologique des sols : Evaluation et implications. Étud. Gestion Sols, 3, 261- 277.

Références bibliographiques

- Cherif M, Sorho F, Fofana M, Bomisso EL, Koné D, Zouzou M., et Audebert A. The effect of iron toxicity on the yield and yield components of rice
- Cherif Mamadou et al, 2010. Production de matière sèche, rendement et composantes du rendement en grains du riz cultivé en condition de toxicité ferreuse
- Chérif, M., Audebert, A., Fofana, M., Zouzou, M., 2009. Evaluation of iron toxicity on Lowland irrigated rice in West Africa. *Tropicultura*, 27, 2:88-92.
- Chevallier T., 1999. Dynamique et déterminants du stockage du carbone dans un vertisol sous prairie (Martinique).” Thèse de doctorat : Université de Montpellier 2.
- Chevallier T., Laurent C., Salwa H., Tahar G., 2016. Temperature dependence of CO₂ emissions rates and isotopic signature from a calcareous soil. *Journal of Arid Environments* 135:132–39. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.08.002>).
- Chombart de Lauwe, J. ; Poittevin, J. Triel, J. C. (1969). *Nouvelle gestion des exploitations agricoles*. Ed Dunod Paris, 280p.
- Chow A. T., Tanji K. K., Gao S.D., Dahlgren R. A., 2006. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biology et Biochemistry*, 38, 477-488.

Références bibliographiques

- Christensen B. T., 2001. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science* 52(3):345–53.
- Clément M. F., 2011. La matière organique du sol : essentielle, tous en conviennent, mais qui en fait le bilan ? Communication personnelle à la conférence MAPAQ Outaouais, 10 février 2011. 10p
- Cole V., Cern C., Minami K., Mosier A., Rosenberg N., Sauerbeck D., 1996. Agricultural options for mitigations of greenhouse gas emissions. In *impacts adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. contribution of working group 1/ to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, (R. T. Watson, M. C. Zinyowera and R. H. Moss, Eds), Cambridge University Press, New York, pp. 745-771.
- CPCS (Commission de pédologie et de cartographie des sols), 1967. *Classification des sols*. Paris Grignon : Laboratoire de géologie-pédologie de l'ENSA.
- Craft C. B., 2001. Biology of wetland soils. In *Wetland Soils: Their Genesis, Hydrology, Landscape and Separation into Hydric and Nonhydric Soils* (J. L. Richardson and M. J. Vepraskas, Eds.), CRC Press, Boca Raton, FL., 107–135.
- Craswell E. T., Lefroy R. D. B., 2001. The rôle and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 61 : 7-18.

Références bibliographiques

- d'Annunzio R., Conche S., Damien L. D., Saint-Andre L., Richard J. R., Barthès G.B., 2008. Pairwise comparison of soil organic particle-size distributions in native savannas and Eucalyptus plantations in Congo. *Forest Ecology and Management*, 255:1050–1056.
- Daane, J. Mongbo, R. Schamhart, R. (1989). *Méthodologie de recherche socioéconomique en milieu rural africain*, UNB / LUW / SVR Abomey-Calavi, 290p.
- Dabin B., 1971. Etude d'une méthode d'extraction des matières humiques du sol. *Sci. du sol*, 1 : 47-63.
- Danvi C. et Assigbé P., 2003. Développement de la riziculture au Bénin : contraintes, atouts et perspectives. Ministère de l'Agriculture de l'Élevage et de la Pêche (MAEP) pp 1-22.
- De Dorlodot, S., Lutts, S., Bertin, P., 2005. Effect of ferrous iron toxicity on the growth and mineral composition of an interspecific rice. *J. Plant Nutr.* 28: 1-20.
- Dembélé, Y., 1995. Modélisation de la gestion hydraulique d'une retenue d'inondation: application au périmètre rizicole de Mogtédo (Burkina Faso). Thèse de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes (France) 156 p.
- Dembélé, Y., 2004. Cours d'inondation! Hydraulique agricole Institut du Développement Rural (IDR), Bobo (Burkina Faso), 28p .
- DGR/CBF, 2003. Inventaire et mise en valeur des bas-fonds au Bénin, 70p.

Références bibliographiques

- Diatta S., Audebert A., Sahrawat K.L., Traoré S., 1998. Lutte contre la toxicité ferreuse dans les bas-fonds. Acquis de l'ADRAO dans la zone des savanes en Afrique de l'Ouest. Aménagement et mise en valeur des bas-fonds au Mali, 21-25/10/96, Sikasso, Mali, CIRAD CA. pp 363-371.
- Diatta S., Siband P., 1998. Evolution des sols sous culture continue: le cas des sols rouges ferrallitiques du sol de Sénégal. In Soil Fertility Management in West African Land Use Systems: Proceeding of Regional Workshop held at Niamey, Niger, 4-8 March 1997, ed. G. Renard, Neef, A., Becker, K., et Von oppen, M. Margraf Verlag, Weikerheim, Allemagne, 221-229.
- Diatta, S., Audebert A., Sahrawat K.L., et Traoré S., 1998. Lutte contre la toxicité ferreuse dans les bas-fonds. Acquis de l'adrao dans la zone des savanes en Afrique de l'Ouest. Aménagement et mise en valeur des bas-fonds au Mali, 21-25/10/96, Sikasso, Mali, CIRAD-CA. Pp 363-371.
- Diatta, S., Sahrawat, L.K., 2006. La toxicité ferreuse du riz en Afrique de l'ouest. Criblage de variétés tolérantes et rôle de N, P, K et Zn. Dans : Audebert A, Narteh, L.T., Kiepe, P., Millart, D., Beks B (eds) Toxicité ferreuse dans les systèmes à base riz d'Afrique de l'ouest, Africa Rice Center (WARDA), pp 82-89.
- Diels J., Vanlauwe B., Van der Meersch M.K. , Sanginga N., Merckx R., 2004. Long-term soil organic carbon dynamics in a subhumid tropical climate: 13C data in mixed C3/C4

Références bibliographiques

- cropping and modeling with ROTHC. *Soil Biology & Biochemistry* 36 : 1739–1750.
- Djegui N., 1992. Matière organique et azote dans les sols cultivés sur terres de barre (Bénin). Thèse de docteur: Institut national polytechnique de toulouse.
- Djégui, N. 1976. A study on the effect of density and date of planting in irrigated rice, The sis of the degree of Ingeneer Agronom, University Ibadan Faculty of Agriculture and forestry, Faculté des Sciences Agronomiques, Université Nationale du Bénin, 164pages.
- Document AIR (Année Internationale de Riz), 2004. Secrétariat de l'Année Internationale du Riz Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 30 pages.
- Dommergues Y., Mangenot F., 1970). Troisième Partie: Influence du milieu édaphique sur la microflore. Chapitre III - Le facteur eau. Cie Masson & Editor, Paris, 796 p.
- Doorenbos, J., Kassam A. H., 1987. Réponse des rendements à l'eau. Bulletin d'inondation et drainage n033, FAO, Rome (Italie), 235p.
- Dubois, J.P., 1994. Dosage des formes amorphes de Fe, Al, Si, Mn (méthode de "Tamm"). Méthodes analytiques "SOL" de l'iate-Pédologie de l'epfl.
- Duchaufour P., Jacquin F., 1966. Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composes humiques. Bull. E.N.S.A. Nancy, 8 (1) :3-24.

Références bibliographiques

- Dugas W. A., 1993. Micro meteorological and chamber measurements of CO₂ flux from bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 67, 1-2, 115-128
- Ethan S., Odunze A.C., Abu S.T., Iwuafor E.N.O., 2011. Effect of water management and nitrogen rates on iron concentration and yield in lowland rice. *Agric. Biol. J. N. Am.*, 2(4): 622 - 629.
- Fageria, N. K., et Baligar V. C., 1999. Growth and nutrient concentrations of common bean, lowland rice, corn, soybean, and wheat at different soil phon an Inceptisol,” *Journal of Plant Nutrition*, vol. 22, no. 9, pp. 1495–1507.
- Fageria, N.K., Santos, A.B., Barbosa Filho, M.P., Guimarães, C.M., 2008. Iron toxicity in lowland rice. *J. Plant Nutr.* 31, 1676–1697.
- FAO 2001. Annuaire statistique; www.fao.org
- FAO2004. Production year book, Vol.58.Rome.
- FAO, 2000. Guide d'identification des contraintes de terrain à la production de riz.
- FAO, 2013. La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture : Mettre les systèmes alimentaires au service d'une meilleure nutrition. Rome. Disponible en ligne sur <http://www.fao.org/> consulté le 01 nov. 2015
- FAO, 2016. Réunion des réseaux de santé et de production animale de la Région CEDEAO (19-23 sept. 2016, Abuja, Nigeria).Bureau régional de la FAO pour l'Afrique.

Références bibliographiques

<http://www.fao.org/africa/events/detail-events/fr/c/434019/> Consulté le 26 décembre 2016.

- FAO., 1998. Base de référence mondiale pour les ressources en sols. Rapport sur les ressources en sols du monde n°84. Rome : FAO
- FAO., 2000. Production et productivité agricoles dans les pays en développement. In: La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, p :243-286.
- FAO., 2017. Des quatre coins du monde, leçons d'agriculture intelligente face au climat.
- FAO., 2017. L'agriculture intelligente face au climat. <http://www.fao.org/climate-smart-agriculture/fr/>. Consulté le 28 janvier 2017.
- Faurès J. M., Sonou M., 2000: Les aménagements hydro-agricoles en Afrique. Situation actuelle et perspectives. In : Textes des communications du Colloque International « Eau-Santé - Ouaga 2000 ». Impact sanitaire et nutritionnel des hydro-aménagements en Afrique. Ouagadougou (Burkina-Faso), 21-24 novembre 2000, 8p.
- Feller C., 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Cah.ORSTOM, Sér. Pédol. XVII(4):339-46.
- Feller C., 1994. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèse de doctorat, Institut de

Références bibliographiques

- géologie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, Collection TDM, Vol.144, 393p.
- Feller C., Beare M. H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69–116.
- Feller C., Bernhardt-Reversat F., Garcia J. L., Pantier J.J., Roussos S., Van Vliet-Lanoe B., 1983. Etude de la matière organique de différentes fractions granulométriques d'un sol sableux tropical. Effet d'un amendement organique (compost).” *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M.* XX(3):223–38.
- Feller C., Burtin G., Gerard B., Balesdent J., 1991a. Utilisation des résines sodiques et des ultrasons dans le fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. Intérêts et limites. *Science Sol*, 29, 2, 77-93.
- Feller C., et Fritsch E., 1991. Effet de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'ouest, en particulier), XXVI (1) : 25-36.
- Feller C., François C., Villemin G., Portal J.M., Toutain F., Morel J.L., 1991b. Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 2, 1491- 1497.
- Francois C. (1988) Devenir à court terme de différentes formes d'azote (urée, végétaux, sol) dans un ferrisol (Martinique). Caractérisation de N - organique par fractionnement

Références bibliographiques

- granulométrique. Etude avec 15N. Thèse Doctorat, Université Nancy 1, 135 P + Annexes.
- Frisque M., 2007. Gestion des matières organiques dans les sols cultivés en Région wallonne. Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire, Université Libre de Bruxelles. 102 p.
- Fukai, S., et Basnayake, J., 2001. Increased lowland rice production in the Mekong region. ACIAR proceedings no. 101. ACIAR, Canberra, Australia. 1-327.
- Gambrell, R.P., Patrick, W.H., 1978. Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments. In: Hook DD, Crawford RM (eds) Plant life in anaerobic environments. Ann Arbor Science, Ann Arbor, pp 375-423
- Gaoue, F.S., 2016. Gestion intégrée de la toxicité ferreuse avec la silice et les variétés de riz dans les bas-fonds rizicoles au Bénin. Mémoire pour l'obtention de Master professionnel en Sciences et techniques de production végétale option Gestion durable de la fertilité des sols tropicaux. Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) Université d'Abomey Calavi (UAC) pp 95.
- Gbèto Dansou, J.D., Guillaume, A.L., Romain, G.K.L., Pierre, V., 2015. Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégies de lutte au sud-bénin (Afrique de

Références bibliographiques

- l'ouest). *Sci. La vie, la terre Agron. REV. CAMES* 03, 47–54.
- Gheysens, S., 2009. Impact du silicium sur l'expression de la toxicité ferreuse chez le riz cultivé (*Oryza sativa* L.). Mémoire présenté en de l'obtention du grade de Bio-ingénieur. Université Catholique de LOUVAIN. Faculté d'Ingénierie Biologique, Agronomique et Environnementale 111 pp.
- GIEC 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Watson, R. T.; and the Core Writing Team (Eds)]. Cambridge University Press, Cambridge et New York.
- Glèlè Kakai R., Sodjinou E., Fonton N. 2006. Conditions d'application des méthodes statistiques paramétriques : application sur ordinateur. Bibliothèque Nationale, Bénin, 86 p
- Glissmann K., Conrad R., 2002. Saccharolytic activity and its role as a limiting step in methane formation during the anaerobic decomposition of rice straw in rice paddy soil. *Biol. Fert. Soils* 35: 62–67.
- Gloser J., Tesarova M., 1978. Litter, Soil and root respiration measurement. An improved compartmental analysis method. *Pedobiol.*, 18 (1) : 76-81.

Références bibliographiques

- Grinand C., Rajaonarivo A., Pajot V., Bernoux M., Albrecht A., Feller C., 2008. Estimation des stocks de carbone dans les sols malgaches. *Terre malgache*. 115-120p
- GriSP, 2013. *Rice almanac*, 4th edition. Los Banos (Philippines): International Rice Research Institute. 283 p. disponible sur <http://library.cgiar.org/bitstream/handle/10947/3085/grisp%202013%20Annual%20Report.pdf?Sequence=1>
Consulté le 23/10/2015.
- Guedes, Filho., O., Vieira, S.R., Chiba, M.K., Nagumo, C.H., Dechen, S.C.F., 2010. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 34, 1–14.
Doi:10.1590/S0100-06832010000100001
- Guide pratique pour la gestion intégrée de la production du riz irrigué : Amélioration de la production de riz en Afrique de l'Ouest en réponse à la flambée des prix des denrées alimentaires (Juillet 2011)
- Haefele, S.M., Naklang, K., Harnpichitvitaya, D., Jerakongman, S., Skulkhu, E., Romyen, P., Phasopa, S., Taptim, S., Suriya-arunroj, D., Khunthasuvon, S., Kraisarakul, D., Youngsuk, P., 2006. Factors affecting rice yield and fertilizer response in rainfed lowlands of Northeast Thailand. *Field Crops Research* 98, 39–51.
- Hao R. j., Li Z. p., Che Y. p., 2011. Differences in Organic C Mineralization Between Aerobic and Submerged

Références bibliographiques

- Conditions in Paddy Soils of Southern Jiangsu Province, China. *Agricultural Sciences in China*, 10, 1410-1418.
- Helmke, P.A., Sparks, D. L., 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. In: Sparks D. L. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. SSSA Book Series No. 5.* SSSA and ASA, Madison, WI, 551-574 pp.
- Henrichs S. M., 1995. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis-a comment. *Marine Chemistry*, 49, 127-136
- Heur, S. et Miezian, K.M.2003. Accessing hybrid steril It yin *O. glaberrima**O.sativa* hybrid progenies by PCRmarker analysis and crossing with wide compatibility varieties. *Threor Appli Genet.*, 107,902-909.
- Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., Young, I.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant Soil* 321:117–152
- Hirsch R.2001. Le riz en Guinée ou la difficulté de concilier autosuffisance et lutte contre la pauvreté. Note rédigée à l'issu d'une mission de deux (2) semaines effectuée en avril/mai 2001.11p.
- Hodomihou N. R., 2009. Fonctionnement hydrologique et gestion intégrée de la toxicité ferreuse d'un bas-fond rizicole de niaouli dans la commune d'Allada. Mémoire de DESS/AGRN, option : Aménagement Rural et Gestion des écosystèmes aquatiques. Faculté des Sciences

Références bibliographiques

- Agronomiques (FSA). Université d'Abomey-Calavi (UAC).
- Hodomihou N. R., Agbossou K. E., Amadji L.G., Nacrao B.H., 2011. Effets de différentes doses de phosphate naturel sur la réduction de la toxicité ferreuse des sols du bas-fond de Niaouli au sud Bénin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5(6): 2278-2290, December 2011. ISSN 1991-863
- Holmer M., 1999. The effect of oxygen depletion on anaerobic organic matter degradation in marine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48, 383-390
- Homma, K., Horie, T., Shiraiwa, T., Supapoj, N., Matsumoto, N., Kabaki, N., 2003. Toposequential variation in soil fertility and rice productivity of rainfed lowland paddy fields in mini-watershed (Nong) in Northeast Thailand. *Plant Production Science* 6, 147–153.
- Ignatieff, V., 1941. Determination and behaviour of ferrous iron in soils. *Soil Sci.* 51, 249-263.
- Igue, A. M., 2011. Impact de l'aménagement du bas-fond de Gankpétin sur la fertilité des sols et la production du riz et du gombo au centre du Bénin
- INRAB2000. Rapport annuel 8pp
- IPCC. (Intergovernmental panel on climate change) 2013. Summary for policymakers: climate change 2013: the physical science basis. In Stocker TF et al. (eds) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment

Références bibliographiques

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
Cambridge University Press, Cambridge.
- Irebrul, G., 2004. Rizicultures asiatiques, enjeu écologique et économique à l'aube du XX^{ème} siècle. 5p.
- ITAB, Alvarez G., Chaussod R., Cluzeau D., Godden B., Metzger L., Nicolardot B., Parat J.,
- Jacq V.A. et al, 1991, Les risques de toxicités ferreuse et sulfureuse en rizières inondées: symptômologie, écologie et prévention
- Jacquot, M. et Courtois, B.1983 Le riz pluvial Mais on neuve et Larose. France
- Jansen B., Nierop K. G. J., Verstrateten M., 2003. Mobility of Fe (II), Fe (III) and Al in acidic forest soils mediated by dissolved organic matter: influence of solution pH and metal/organic carbon ratios. *Geoderma* 113: 323–340.
- Jean-François Vizier 1988 la toxicite ferreuse dans les sols de rizieres : importance du probleme causes et mecanismes mis en jeu consequences pour l'utilisation des sols Saint-Paul lez Durance: ORSTOM, 13 pp
- Jean-François ViZIER Étude du fonctionnement des milieux saturés d'eau : Une démarche physico-chimique *Cah. ORSTOM, sér.Pédol., vol. XXV, n "4, 1989-1990 : 431-442*
- Jenkinson D. S., Powlson D. S., 1976. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil: VA method for

Références bibliographiques

- measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8: 209–213.
- Jensen L. S., Mueller T., Tate K. R., Ross D. J., Magid J. Nielsen N. E., 1996. Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods. *Soil Biology et Biochemistry* 28, 1297-1306.
- Jeyanny V., Wan R. K., Siva K. B., Arifin A., Kamarul H. M., 2014. Carbon stocks in different carbon pools of a tropical lowland forest and a montane forest with varying topography. *Journal of Tropical Forest Science* 26(4): 560–571 26(4):560–71.
- Jones, M. P., Dingkuhn, M. Aluko, G. K. et Semon, M. 1997. Interspecific *O. sativa* L. x *O. glaberrima* S. progenies in upland rice improvement. *Euphytica*, 92, 237-246.
- Jorgensen R. N., Jorgensen B. J., Nielsen N. E., 1998. N₂O emission immediately after rainfall in a dry stubble field. *Soil Biology et Biochemistry* 30, 545-546.
- Journel, A. G., et Huijbregts, C. J., 1978. Mining geostatistics. Academic Press. London.
- Kashem, M.A., Singh, B.R., 2001. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, ph and solubility of Cd, Ni and Zn. *Nutr Cycl Agroecosys* 61:247–255
- Kaurichev, I.S., et Shishova, V.S., 1967. Oxidation reduction conditions of coarse textured soils of the Meschera lowland. *Sov Soil Sci+* 5:636–646

Références bibliographiques

- Kemmou, S., Dafir, J.E., Wartiti, M., Taoufik, M., 2006. Seasonal variations and potential mobility of sediment phosphorus in the Al Massira reservoir, Morocco. *Water Qual Res J Can* 41:427–436
- Khalil K., Renault P., Mary B., 2005. Effects of transient anaerobic conditions in the presence of acetylene on subsequent aerobic respiration and N₂O emission by soil aggregates. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 1333-1342.
- Kilian, J. et TEISSER, J. 1972. Méthodes d'investigation pour l'analyse et le classement des bas-fonds dans quelques régions de l'Afrique de l'Ouest : proposition de classification d'aptitudes des terres à la riziculture. *Agron. Trop*, vol. 28 (2) pp156-172
- Kima, F., 1993. Evaluation des variétés améliorées de riz dans 3 zones agro-écologiques du Burkina Faso (Douna – Karfiguela – Valléedukou). Mémoire de fin d'études, diplôme d'Ingénieur en Développement Rural, option: agronomie. Institut du Développement Rural du Burkina Faso.
- Kjeldahl, J., 1883. A new method for the estimation of nitrogen in organic compound. *Zeitschrift Fur Analytische Chemie* 22, 366.
- Koch, B., Khosla, R., Frasier, W.M., Westfall, D.G., et Inman, D., 2004. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones, *Agronomy Journal*, vol. 96, no. 6, pp. 1572–1580.

Références bibliographiques

- Koffi, 1980. Genetic diversity of indigenous rice in Africa. In Rice in Africa. *AgronTrop*, 4,402-414.
- Konnon D., Sotondji S., Adidehou Y. A., (2014). Rapport de l'étude d'état des lieux de la filière riz au Bénin en 2014. P97
- Kristensen E., Ahmed S. I., Devol A. H., 1995. Aerobic and anaerobic decomposition of organic matter in marine sediment: Which is fastest? *Limnology and Oceanography*, 40, 1430-1437.
- Küsel K., Drake H. L., 1999. Microbial turnover of low molecular weight organic acids during leaf litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 107–118
- Laanbroek, H. J., 1990. Bacterial cycling of minerals that affect plant growth in waterlogged soils: a review. *Aquat Bot* 38:109–125
- Ladha, J. K., Wade, L., Dobermann, A., Reichardt, W., Kirk, G. J. D., et Piggin, C., 1998. Rainfed Lowland Rice: Advances in Nutrient Management Research. IRRI, Manila, Philippines. 1-304.
- Lamey, H. A., Ruthenberg, H., Scobie G.M., Seetha ramann R. et Will H. 1980. Semences et plants. Edition AaTEC–Doc.
- Lavigne D.P.H., Boucher L., Vidal L., 1996. Les bas-fonds en Afrique tropicale humide : stratégies paysannes, contraintes agronomiques et aménagements" in Pichot et al eds. Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les

Références bibliographiques

- tropiques humides, actes du séminaire international, CIRAD, pp. 148-161
- Lavigne-Delville, P. 2002. Aménager les bas-fonds : l'exemple de l'Afrique de l'Ouest. In Memento de l'agronome. CIRAD-GRET. Ministère des Affaires étrangères. pp 297-317
- Lavigne-delville, P., 1996. Logiques paysannes d'exploitation des bas-fonds en Afrique soudano-sahélienne : quelques repères pour l'intervention In Aménagement et mise en valeur des bas-fonds au Mali. Bilan et perspectives nationales. Intérêt pour la zone de savane ouest-africaine. Acte de séminaire 21-25 Octobre 1996 Sikasso (Mali), 77-95.
- Lennartz, B., Horn R., Duttman, R., 2009. Ecological safe management of terraced rice paddy landscapes, *Soil & Tillage Research*, vol.102, no. 2, pp.179–192.
- Linquist, B., et Ruark, M., 2011. Re-evaluating diagnostic phosphorus tests for rice systems based on soil phosphorus fractions and field level budgets,” *Agronomy Journal*, vol.103, no. 2, pp.501– 508.
- Liu M., Dannenmann M., Lin S., Saiz G., Yan G., Yao Z., Pelster D. E., Tao H., Sippel S., Tao Y., Zhang Y., Zheng X., Zuo Q., Butterbach-Bahl K., 2015. Ground cover rice production systems increase soil carbon and nitrogen stocks at regional scale. *Biogeosciences* 12(15):4831–40.

Références bibliographiques

- Liu, X., Xu, J., Zhang, M., Si, B., Zhao, K., 2008. Spatial variability of soil available Zn and Cu in paddy rice fields of China,” *Environmental Geology*, vol.55, no.7, pp. 1569–1576.
- Macías, F., Camps, Arbestain, M., 2010. Soil carbon sequestration in a changing global environment. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 15:511–529.
- MAEP, 2010. Règlement technique de la production, du contrôle de la qualité, de la certification et du conditionnement des semences de riz. Cotonou, Bénin, 25p.
- Majerus V. 2006. Toxicité ferreuse chez le riz africain (*Oryza glaberrima* Steud.) : synthèse de ferritine et gestion du stress oxydatif. Thèse de doctorat de l’UCL. 272 pp.
- Maji, T., Singh, B. N. et Akenova, M. E. 2001. Vegetative stage drought tolerance in *O. glaberrima* Steud and *O. sativa* L. and relationship between drought parameters. *Oryza*, 38, 17-23.
- Mallouhi, N., 1997. Interprétation de l’analyse de sol et principales caractéristiques de certaines substances organiques et de composts, UNB/FSA, PAFTA, coopération française, 22p.
- Manlay R. J., Feller C., Swift M.J., 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119 : 217–233.

Références bibliographiques

- Mansfeldtt, 2003. In situ long-term redox potential measurements in a dyked marsh soil. *J Plant Nutr Soil Sci* 166:210–219.
- Marc Lacharme, 2001. *Mémento Technique de Riziculture*
- Mathieu C., Pieltain F., 2003 : *Analyse chimique des sols. Méthodes choisies. Editions Technique et documentation. Londres-Paris-New York. 387p.*
- Mbonankira, J.E., 2014. *Silicon alleviation of ferrous iron toxicity in rice: a physiological and genetic approach, Thèse de Doctorat, Louvain-la-Neuve: UCL, 215 pp.*
- Mc. Gill W. B., Shields J. A., Paul E. A., 1975. Relation between carbon and nitrogen turnover in soil organic fractions of microbial origin. *Soil Biol. Biochem.*, 7 : 57-63.
- MEDDE GIS Sol, 2013. *Guide pour l'identification et la détermination des sols de zones humides. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol. 63p.*
- Mengel K., Kirkby E. A., 1978. Iron. In *Principles of plant nutrition Intern. Potash Inst.* : 425-439.
- Miyagawa, S., Kuroda, T., 1988. Effects of environmental and technical factors on rice yield in rain-fed paddy fields of Northeast Thailand. *Jpn. J. Crop Sci.* 57: 773-781.
- Moeskops B., Sukristiyonubowo B. D., Sleutel S., Herawaty L., Husen E., Saraswati R., Setyorini D, De Neve S., 2010. *Soil microbial communities and activities under intensive*

Références bibliographiques

- organic and conventional vegetable farming in West Java, Indonesia. *Applied Soil Ecology* 45: 112–120.
- Mooroman, F. R. et Von Breemen, N. 1979. Rice: Soil Water and Land. IRRILosBanosPhilippines, 185p.
- Morales, L. A., Vazquez, E. V., Paz-Ferreiro, J., 2011a. Spatial and temporal variability of Mehlich-1 extractable Fe, Mn and Zn over a rice field as a function of lime amendment, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol.25, no.8, pp. 1039–1048.
- Morales, L.A., Paz-Ferreiro, J., Vieira, S.R., Vázquez, E.V., 2010. Spatial and temporal variability of Eh and ph over a rice field as related to lime addition. *Bragantia* 69, 67–76. Doi:10.1590/S000687052010000500008.
- Morales, L.A., Vazque, E.V., Paz-Ferreiro, J., 2011b. Influence of liming on the spatial and temporal variability of Mehlich- 1 extractable Fe in a rice field, *Journal of Geochemical Exploration*, vol.109, no. 1–3, pp.78–85.
- Morel R., 1989. Les sols cultivés. Lavoisier, France, 373 p.
- Moritsuka, N., Yanai, J., Umeda, M., Kosaki, T., 2004. Spatial relationships among different forms of soil nutrients in a paddy field, *Soil Science and Plant Nutrition*, vol.50, no.4, pp. 565– 573.
- Nadwa S. M., 2001. Soil organic carbon (SOC) management for sustainable productivity of cropping and agro-forestry systems in Eastern and Southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61 : 143–158.

Références bibliographiques

- Narteh, L.T., et Sahrawat, K.L., 1999. Influence of flooding on electrochemical and chemical properties of West African soils. *Geoderma* 87,178-207.
- Nguyen kha. Duchaufour, P. 1969. - Note sur l'état du fer dans les sols hydromorphes. *Science du Sol*, 1 :97-110.
- Nguyen kha. Duchaufour, P., 1963. - Note sur le rôle du fer dans les complexes argilo humiques. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 256, pp. 2657-2660.
- Nicolardot B., Chaussod R., Catroux G., 1982. Revue des principales méthodes disponibles pour mesurer la biomasse microbienne et ses activités. *Science Du Sol* 4:253–61.
- Nyamangyoku I. O., Bertin P. 2013. Mechanisms of resistance to ferrous iron toxicity in cultivated rices: *Oryza sativa* L., *Oryza glaberrima* Steud and interspecific hybrids. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(10), 2570-2591.
- Nyamangyoku O. 2006. Ferrous iron toxicity: mechanisms of resistance and impact on nutrients elements at the vegetative stage in cultivated rice (*Oryza sativa* L., *Oryza glaberrima* Steud and interspecific hybrids). Thèse Université catholique de Louvain
- Nyamangyoku, O., 2006. Ferrous iron toxicity: mechanisms of resistance and impact on nutrients elements at the vegetative stage in cultivated rice (*Oryza sativa* L., *Oryza*

Références bibliographiques

- glaberrima Steud and interspecific hybrids). Thèse Université catholique de Louvain.
- Oades J.M., 1988. The retention of organic matter in soil. *Biogeochemistry* 5: 35–70.
- Obalum, S. E., John, C., Nwite, J. O., et Charles, A. I., 2011. Variations in Selected Soil Physical Properties with Landforms and Slope within an Inland Valley Ecosystem in Ashanti Region of Ghana. *Soil and water research* (2): 73–82.
- Ofori, E., Atakora, E.T., et Antwi, B. O., 2013, Relationship between Landscape Positions and Selected Soil Properties at a Sawah Site in Ghana *African Journal of Agricultural Research* 8(27): 3646–52.
- Ogeh, J., et Ukodo., E., 2012. Profile Distribution of Physical and Chemical Properties in Soils of a Toposequence in Benin, Rainforest of Nigeria. *Nigerian Journal of Basic and Applied Science* 20(1): 68–72.
- Oka,H.(1955), Phylogenetic differentiation of cultivated rice tillering and elongation rates, culuman do ther characters in rice varieties. In: Response to temperature–phylogenetic differentiation of cultivated rice.*Jap.J.Breed*4:213-221.
- Osada,A. (1975). Some characteristicsinphotosynthetic activityof leavesof indica rice varieties *Rice in Asia.Asso.Ofjap.Agr.Sci. Soc.* P 210-222.

Références bibliographiques

- Ottow, J.C.G., Prade, K., Bertenbreiter, W., Jacq, V.A., 1993. Iron toxicity mechanisms of flooded rice (*Oriza sativa L.*) In Senegal and Indonesia. In : Raunet, M. (ed) Bas-Fonds et Riziculture. CIRAD-CA, Montpellier, France. Pp 231-241.
- Ouedraogo, M. 1987. Caractéristiques morpho-structurales et hydrologiques du bas-fond de Nahirindio (Province de la Bougouriba, Burkina-faso). Université de Ouagadougou. pp1-35.
- Pallo F. J., Asimi S., Assa A., Sedogo P. M., Sawadogo N., 2006. Statut de la matière organique des sols de la région sahélienne du burkina faso. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement 13(1):289–304.
- Pallo F. J., Sawadogo P N., Nabsanna P. Z., Sedogo P. M., 2009. Statut de la matière organique des sols de la zone nord- soudanienne au Burkina Faso. Biotechnol.Agron. Soc. Environ. 13(1):139–42.
- Patrick, W. H. Jr., Reddy, C.N., 1978. Chemical changes in rice soils. In : Soils and rice. Manila, Philippines : International Rice Research Institute. Pp. 361-379.
- Pernes j., Berthaudj.,Besançonj., Combesd., Leblancj. M., Loudm.,Savidany. Et second G., (1984). Gestion des ressources génétiques des plantes:Monographies.Tome I. Edition Lavoisier, 212 p.

Références bibliographiques

- Phillips, I. R., 1998. Phosphorus availability and sorption under alternating waterlogged and drying conditions. *Commun Soil Sci Plant* 29:3045–3059.
- Ponnamperuma F. N., 1972. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy* 24, 29-96.
- Post W.M. et Kwon K. C., 2000. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential, *Global Change Biology* (6): 317–328.
- Powers J. S., Schlesinger W. H., 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of north-eastern Costa Rica. *Geoderma* 109 (3–4): 165– 190.
- Prade, K., Ottow, J. C. G., Jacq, V. A., Malouf, G., et Loyer, J.Y., 1990. Relationships between the properties of flooded rice soils and iron toxicity in Lower Casamance (Senegal) Studies, review and summary of previous work. *Cahiers ORSTOM, Serie Pedologie*. IRD, Montpellier, France. pp. 453-474.
- Prem, M., Hans, C., H., Bruun H., B., 2011. Temporal and Spatial Variation of Iron , Manganese and Phosphorus in a Wetland Soil. Thèse de Master, Université de Copenhague, Faculté des Sciences de la Vie, Copenhague, Danemark, pp 82.
- Pritchard D. T., Brown N. J., 1979. Respiration in cropped and fallow soil. *Journal of Agricultural Science* 92, 45-51.

Références bibliographiques

- Purseglove, J.W. (1975). Tropical crops: Monocotyle dans vol1 and 2.Pp181-198.ELBS edition, London, Longman.
- Raes, D., Kafiriti, E.M., Wellens, J., Deckers, J., Maerten, A., Mugogo, S., Dondeyne, S., Descheemaeker, K., 2007. Can soil bunds increase the production of rain-fed lowland rice in South Eastern Tanzania? *Agricultural Water Management* 89, 229–235.
- Rajot J. L., 1992. Dissolution des oxydes de fer (hématite et goethite) d'un sol ferrallitique des Llanos de Colombie par des bactéries ferri-réductrices. Implications sur le jaunissement des matériaux pédologiques rouges. Thèse de doctorat en Géomicrobiologie, Université de Nancy I. Nancy, 193
- Raskin I., Kende H., 1984. Effect of submergence on translocation, starch content and amylolytic activity in deep-water rice.*Planta*, 162, (6) : 556-559.
- Raunet, M. 1985. Bas-fonds et riziculture en Afrique Approche structurale comparative. *Agronomie Tropicale*. Vol. 40 (3). pp1-200
- Raunet, M. 1991. Structure et fonctionnement d'un bas-fond rizicultivé sur les hautes terres de Madagascar. CIRAD, Montpellier, France. 35p
- Reboul, C. (1976). Mode de production et système de culture et d'élevage. In : *Economie rurale n°112* ; pp. 55 – 65.

Références bibliographiques

- Recous S., Robin D., Darwis D., Mary B., 1995. Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biol Biochem* 27, 1529-1538.
- Roberts W. P., Chan K. Y., 1990. Tillage-induced increases in carbon dioxide loss from soil. *Soil and Tillage Research* 17, 143-151.
- Robinson, G. W., 1949. *Soils : Their origin, constitution and classification*. London. Thomas Murby and Co N.Y.J., Wiley and Sons Inc. 573 p.
- Rodrigo A., Recous S., Neel C., Mary B., 1997. Modelling temperature and moisture effects on C-N transformations in soils: comparison of nine models. *Ecol Model* 102, 325-339.
- Roger P. A., Joulian C., 1998. Environmental impacts of rice cultivation in rice quality a pluridisciplinary approach. *Cahier options méditerranéennes*, vol 24 n°3. 11-18
- Rossi J., Govaerts A., De Vos B., Verbist B., Vervoort A., Poesen J., Muys B., Deckers J., 2009. Spatial structures of soil organic carbon in tropical forests—A case study of Southeastern Tanzania. *Catena* 77 (2009) : 19–27.
- Ruthenberg, H. (1980). *Farming Systems in the Tropics*, Clarendon Press, Oxford, Third edition, pp. 1-18, pp. 184-211
- Sabiene, N., Kusliene, G., Zaleckas, E., 2010. The influence of land use on soil organic carbon and nitrogen content and redox potential. *Zemdirbyste* 97:15–24.

Références bibliographiques

- Sadana, U.S., Chahal, D. S., et Abadia, J., 1995. Iron availability, electrochemical changes and nutrient content of rice as influenced by green manuring in a submerged soil. *Iron nutrition in soils and plants. Develop. Plant Soil Sci.* 59, 105-109.
- Sahrawat K. L., 2004. Organic matter accumulation in submerged soils.” *Advances in Agronomy* 81(3):169–201.
- Sahrawat K. L., 2010 a. “Nitrogen mineralization in lowland rice soils : the role of organic matter quantity and quality.” *Archives of Agronomy and Soil Science* 56(3):37–41.
- Sahrawat, K. L., 2012. Soil Fertility in Flooded and Non-Flooded Irrigated Rice Systems. *Archives of Agronomy and Soil Science* 58(4): 423–36.
- Sahrawat, K., 2004. Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients. *Journal of Plant Nutrition* 27:1471-1504.
- Sahrawat, K.L., 2010 b. Managing iron toxicity in lowland rice: the role of tolerant genotypes and plant nutrition. *Global science books. Plant stress*, 4 (2): 70-75.
- Salducci X., et al. 2002. Activités biologiques et fertilité des sols. Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles. *État et Activités Biologiques Des Sols de La Commission « Agronomie – Systèmes de Production » de l’ITAB.* 1–27.
- Sallade, Y.E., Sims J.T., 1997. Phosphorus transformations in the sediments of Delaware's agricultural drainageways: II.

Références bibliographiques

- Effect of reducing conditions on phosphorus release. *J Environ Qual* 26:1579–1588
- Schink B., 1997. Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61, 262-&.
- Second, G. (1987). Relations évolutives chez le genre *Oryza* et processus de domestication des riz. Thèse d'Etat, Université Paris VI, Orsay Col. Etudes et thèses. ORSTOM, Paris, 1985.
- Sedogo M. P., 1993. Evolution des sols ferrugineux lessives sous culture: incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse de doctorale : Université nationale de Côte d'Ivoire.
- Sedogo P.M., Lompo F., Ouattara B., 1994. Le carbone et l'azote dans les différentes fractions granulométriques d'un sol ferrugineux tropical: effets de quatre types d'amendements organiques. *Sci. et Tech. Sér. Sci. Nat.* 21, (1): 114-124.
- Segalen, P. 1964. Le fer dans les sols. Initiations - Documentations techniques. ORSTOM. PARIS. 150p.
- Segda Z., 2006. Gestion de la fertilité du sol pour une production améliorée et durable du riz (*Oryza sativa* L.) au Burkina Faso. cas de la plaine irriguée de Bagré. Thèse de doctorat : Université de Ouagadougou.
- Sié, M., Moukoumbi, Y., Dogbé, S., Toulou, B., Manful, J., Afokpé, P., 2012. *Fiches techniques : Soixante nouvelles*

Références bibliographiques

variétés de riz de type NERICA pour la riziculture de bas-fond/irriguée: NERICA-L1 à -L60.

- Simmonds, M., B., Plant, R.E., Pena-Barragan J. M., van Kessel C., Hill J., Linquist B. A., 2013. Underlying causes of yield spatial variability and potential for precision management in rice systems, *Precision Agriculture*, vol.14, no.5, pp. 512–540.
- Smirnoff N., Crawford R.M.M., 1983. Variation in the structure and response to flooding of root aerenchyma in some wetland plants. *Annals of Botany*, 51 (2) : 237-249.
- Snakin, V. V., Prisyazhnaya, A. A., Kovacs-Lang, E., 2001. Soil liquid phase composition. Elsevier Science B.V, Amsterdam.
- SNDR, 2010. Stratégie Nationale pour le Développement de la Riziculture au Bénin. MAEP.Décembre 2010.26 p.
- Sowden F.J., Morita H., Levesque M., 1978. Organic nitrogen distribution in selected peats and peat fractions. *Can. J. Soil Sci.*, 58 : 237-249.
- Stein, R.J., Duarte, G.L., Spohr, M.G., Lopes, S.I.G., Fett, J.P., 2009. Distinct physiological responses of two rice cultivars subjected to iron toxicity under field conditions. *Ann. Appl. Biol.* 154: 269-277.
- Sun M. Y., Wakeham S. G., Lee C., 1997. Rates and mechanisms of fatty acid degradation in oxic and anoxic coastal marine sediments of Long Island Sound. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 341-355.

Références bibliographiques

- Tagawa, T., Hiero, K. and Kabota, F., (2000). A specific feature of nitrogen utilization efficiency in leaf photosynthesis in *O. glaberrima* Steud. *J. crop Sci.*, 69, 74-79.
- Tardy Y., 1993. Pétrologies des Latérites et des Sols Tropicaux. Masson, Paris, 459 p.
- Tete K. E., 2014. Dynamique intra-annuelle de la minéralisation du carbone organique dans les sols minéraux hydromorphes et à l'échelle du versant agricole. Thèse de doctorat : Université Européenne de Bretagne.
- Theaka diouf. 1988 Programmes d'agrophysiologie du riz
- Theng G., 1987. Clay-humic interactions and soil aggregate stability. In : P. Rengasamy (ed), Soil structure and aggregate stability. Seminar Proceedinds. Institute of Irrigation and Salinity Research, Tatura, Australia. pp. 32-37.
- Touré, A., Becker, M., Johnson, D.E., Koné, B., Kossou, D.K., Kiepe, P., 2009. Response of lowland rice in agronomic management under different hydrological regimes inland valley of Ivory coast. *Field Crops Research* 114, 304–310.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S., Wade, M.K., Uehara, G., Sudjadi, M., 1987. Spatial Variation of Soil Properties and Rice Yield on Recently Cleared Land. *Soil Science Society of America Journal*, v.51, p.668-674.
- Trolldenier G., 1977. Mineral nutrition and reduction processes in the rhizosphere of rice. *Plant and Soil*, 47 : 193-202.

Références bibliographiques

- Truswell A.S., (2002). Cereal grains and coronary heart disease. *Eur. J. clin Nutr.* (2002), Jan ; 56(1), pp 1-14.
- Tsubo, M., Basnayake, J., Fukai, S., Sihathep, V., Siyavong, P., Sipaseuth C. M., 2006. Toposequential effects on water balance and productivity in rainfed lowland rice ecosystem in southern Laos. *Field Crops Research* 97, 209–220.
- Uren N. C., 1982. Chemical reduction at root surface. *J. of Plant nutr.*, 5 (4-7) : 515-520.
- Vadas, P.A., Sims, J.T., 1998. Redox status, poultry litter, and phosphorus solubility in Atlantic Coastal plain soils. *Soil Sci Soc Am J* 62:1025–1034.
- Van Breemen, N., 1987. Effect of redox processes on soil acidity. *Neth J Agr Sci* 35:271–279.
- Van Der Vorm P. D. J., Van Diest A., 1979. Aspects of the Fe and Mn nutrition of rice plants. I. Iron and Manganese uptake by rice plants, grown under aerobic and anaerobic conditions. *Plant and Soil!*, 51 : 233- 246.
- Varallyay, G. 2010. The impact of climate change on soils and on their water management. *Agronomy Research*, 8, 385-396.
- Vieira, S.R., 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54.

Références bibliographiques

- Vieira, S.R., Nielsen, D.R., Biggar, J.W., Tillotson, P.H., 1997. The scaling of semivariograms and the kriging estimation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, p.523-533.
- Vizier J. F., 1990. Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau. Une démarche physico-chimique. *Cah.ORSTOM*, sér. Pédol., 25(4): 431- 442
- Vizier J. F., De Giudici P., Raunet M., 1990. Physical and chemical study of lowland soils on the highlands in Madagascar: Consequences for rice culture. *Agronomie Tropicale* 45, 171-178.
- Vizier J.F. 1978. - Étude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cah. ORSTOM, s{r. Pédol.*, XVI, 1 : 23-41.
- Vizier J.-F. 1990, Etude physico-chimique des sols d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar : conséquences pour la riziculture
- Vizier, J. F., 1990. Etude du fonctionnement des milieux saturés d'eau : Une démarche physico-chimique. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol. Vol. XXV, n° 4, 1989 : 431-442.
- Vo Dinh Quang, Tang Van Hai, E Tombo Kanyama, Je Dufey. 1996 Effet combinés de l'aluminium, du fer, et du phosphore sur l'absorption d'ions et le rendement du riz (*Oryza sativa* L) en solution nutritive. *Agronomie, EDP Sciences*, , 16 (3), pp.175-186. <hal-00885786>

Références bibliographiques

- Volkoff B., Paul F., Dubroeuq D., Viennot M., 1999. Estimation des stocks de carbone des sols du Bénin. *Etude et Gestion Des Sols* 6(2):115–30.
- Von de Kammer, F., Thöming, J., Förstner, U., 2000. Redox buffer capacity concept as a tool for the assessment of long-term effects in natural attenuation / intrinsic remediation. In: Schüring J, Schultz HD, Fischer WR, Böttcher J, Duijnsveld WHM (eds) *Redox: fundamentals, processes and applications*. Springer-Verlag, Berlin, pp 189– 202.
- Wade, L. J., Fukai, S., Samson, B. K., Ali, A., Mazid, M. A., 1999. Rainfed lowland rice: physical environment and cultivar requirements. *Field Crops Res.* 64: 3-12.
- Wang W.J., Dalal R.C., Moody P.W., Smith C.J., 2003. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biol. Biochem.* 35: 273–284.
- Watanabe H., Futakuchi K., Jones M. P. et Sobambo B. A., (2004). Grain protein content of Africa rice (*Oryzaberrima* (Steud.)) lines and Asian rice (*Oryza sativa* (L.)) varieties in West Africa. *Oryza* 41 (1 et 2): pp 35-38
- Webster, R., Oliver, M.A., 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford: oxford university press, 316p.

Références bibliographiques

- Witt C., Cassman K. G., Olk D. C., Biker U., Liboon S. P., Samson M. I., Ottow J. C. G. 2000. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems. *Plant Soil*, 225, 263–278, 2000.
- Wopereis et al., 2008. Manuel technique, Curriculum APRA-GIR
- Wopereis, Toon, D., Philip, I., Diak, S., Marco, C., et Mariee-JO, D., 2004. Curriculum d'apprentissage participatif et recherché action (ARPA) pour la gestion intégrée de la culture de riz de bas-fond (GIR) en Afrique subsaharienne. Manuel technique. ADRAO. Cotonou (Bénin), 124p.
- Worou, O.N., Gaiser, T., Saito, K., Goldbach, H., Ewert, F., 2013. Spatial and temporal variation in yield of rainfed lowland rice in inland valley as affected by fertilizer application and bunding in North-West Benin. *Agric. Water Manag.* 126, 119–124. Doi:10.1016/j.agwat.2013.04.007.
- www.fao.org/story/fr/item/47219/icode consulté le 30 janvier 2017
- www.fao.org/story/fr/item/47219/icode. Consulté le 30 janvier 2017.
- Yanai, J., Choung, K.L., Kaho, T., Iida, M., Matsui, T., Umeda, M., Kosaki, T., 2001. Geostatistical analysis of soil chemical properties and rice yield in a paddy field and

Références bibliographiques

- application to the analysis of yield-determining factors. *Soil Science and Plant Nutrition*, v.47, p.291-391.
- Yang, J., Hu, Y.M., Bu, R.C., 2006. Microscale spatial variability of redox potential in surface soil. *Soil Sci* 171:747–753.
- Yémadjè P. L., Chevallier T., Philippe D., 2016. Effect of biomass management regimes and wetting-drying cycles on soil carbon mineralization in a sudano-sahelian region. *Journal of Arid Environments* 127:1–6.
- Yoshida, (1981). Genetic study of the genus *Oryza*. I. Crossability and chromosomal affinity among 17 species. *Seiken Jiho* 11 : 1-11.
- Yoshida, S and Parao, F.T.(1976). Climatic influence on yield and yield components of low lands rice in the tropics. In *Rice Res Inst Climate and rice*, pp471-4.
- Zeppenfeld, T. T. et Vlaar, J. C. J. 1990. Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest. Synthèse préliminaire de l'état des connaissances. CIEH. Ouagadougou. 201p
- Zhao, Y., Xu, X., Darilek, J. L., Huang, B., Sun, W., Shi, X., 2009. Spatial variability assessment of soil nutrients in an intense agricultural area, a case study of Rugao County in Yangtze River Delta Region, China,” *Environmental Geology*, vol.57, no.5, pp. 1089–1102.
- Zhou S, Xiangfu S., 2014. La perspective d'une production de riz à faible émission de carbone est-elle réaliste? Enseignements tirés de la chine. *Cta* 1–8.

ANNEXES

Annexes

Annexes

Annexe 1: Résumés des articles publiés

*Science de la vie, de la terre et agronomie REV. CAMES - VOL.03 NUM.01. 2015 * ISSN 2424-7235*

Titre : Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégies de lutte au Sud-Bénin (Afrique de l'Ouest)

Résumé

La présente étude a évalué les perceptions locales de la toxicité ferreuse au niveau du bas-fond rizicole. A l'aide d'un questionnaire administré aux exploitants du bas-fond d'Awokpa au Sud-Bénin, des données qualitatives et quantitatives relatives aux perceptions de la toxicité ferreuse et sur les conditions actuelles de la mise en valeur du site ont été collectées. Les perceptions des populations d'Awokpa de la toxicité ferreuse se résument aux résultats de l'effet de l'eau sur du fer contenu dans le sol (38,5%), de l'accumulation de l'eau (38%), du soleil sur le fer dans l'eau (3%), du fer ruisselé de l'amont (2%) et 19% des producteurs qui n'arrivent pas à l'expliquer. Les anciens producteurs de riz pour la consommation et les jeunes producteurs de semences perçoivent la toxicité ferreuse comme étant l'effet du fer ruisselé de l'amont et qui sous l'effet du soleil donne la toxicité ferreuse. Par contre, pour les jeunes producteurs de riz de consommation, elle est l'effet de

Annexes

l'accumulation de l'eau. Les anciens producteurs de semence la perçoivent comme le résultat de l'effet de l'accumulation de l'eau sur du fer contenu dans le sol. En outre, il ressort qu'il n'y a pas une différence significative au seuil de 5% entre les rendements en riz paddy des parcelles victimes ou non de la toxicité ferreuse à cause du drainage que subissent les parcelles infestées. L'utilisation raisonnée des engrais pourraient être préconisées pour l'atténuation de la toxicité ferreuse.

Mots clés : Toxicité ferreuse, Perception locale, Bas-fond, Bénin

Title: Local perceptions of the ferrous toxicity phenomenon and strategies overcoming it in the south-Benin (West-Africa).

Abstract

The present survey assessed the local perceptions of ferrous toxicity phenomenon in the rice growing shallows. With the help of a questionnaire managed with the farmers of the shallows of Awokpa in the South-Benin qualitative and quantitative data related to the perceptions of the phenomenon and on the conditions of the farming of the site were collected. The perceptions of the ferrous toxicity were results of the effect of water on iron contained in soil (38.5%), of the water accumulation (38%), of the sun on iron in water (3%) and of iron streamed from the uphill (2%). On the other hand, 19% of the producers are unable to explain the ferrous toxicity phenomenon. The old producers of rice for consumption and the young producers of seeds discern the ferrous toxicity as being the effect of iron streamed from the uphill and that gives under the effect of the sun. On the other hand, for the young producers of consumption rice, the ferrous toxicity is the effect of the water accumulation. The old producers of seeds think that it is the result of the effect of the water accumulation on iron contained in soil. While studying the farming practices, it comes out that the ferrous toxicity is an uncertain phenomenon in the shallows of Awokpa and that there is not a meaningful difference in the doorstep of 5% between the parcels victims or no of the ferrous toxicity because of the drainage that the infested parcels undergo.

Key words: Ferrous toxicity, Local Perception, Shallow, Benin.

Titre : Dynamique de Fer ferreux (FeO) du sol de bas-fond en fonction de la répartition de l'eau selon la toposéquence au sud du Bénin : Phénomène de la toxicité ferreuse et production du riz

GBÈTO DANSOU G. Jean, AMADJI L. Guillaume Lucien et AHOLOUKPE Hervé³¹ Université d'Abomey-Calavi : Faculté des Lettres des Arts et des Sciences Humaines ; Tél: +229 95 98 91 91/ 96459191; 02 BP: 473 Porto-Novo, Bénin ; E-mail: jgdansou@gmail.com

² Université d'Abomey-Calavi ; **UR : Eco-Pédologie / LSS / FSA** Tél: +229 95 05 84 04/ 97 03 65 72 ; 01 BP: 526 Cotonou, Bénin ; **UAC** E-mail: gamadji@yahoo.fr

³ Centre de Recherches Agricoles Plantes Pérennes CRAPP/INRAB, Tél +229 96 72 04 04, BP 01 Pobé, Bénin, Email : aholoukpeherve@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Objectif: La présente étude évalue la dynamique de la teneur du sol en (FeO) dans le bas-fond, mesure les conditions de développement du riz sur des sols immergés et établit les relations qui existent entre les paramètres de production et l'évolution de l'accumulation du (FeO) en fonction des répartitions de l'eau selon la toposéquence dans les casiers rizicoles.

Méthodologie et résultats: Trois traitements ont été testés sur les parcelles : Ecoulement naturelle de l'eau, inondation suivie de drainage, inondation permanente. Le prélèvement du sol est fait aux profondeurs 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm. Des échantillons composites ont été constitués par profondeur et un total de 504 échantillons de sol ont été analysés pour l'étude. Les mesures du potentiel redox (Eh) et du pH sont réalisées sur le site par le pH letter pc228 mais l'évaluation de la teneur du sol en (FeO) et son dosage, sont réalisés au laboratoire au spectromètre à absorption atomique. Le rendement du riz est calculé en rapportant la production de riz paddy à l'ha. Une analyse de la variance à trois facteurs est effectuée, au moyen du logiciel SAS version 9.2. Le potentiel redox a varié entre $32,25 \pm 13,69$ et $199,78 \pm 13,45$ mv avec un pH allant de $4,56 \pm 0,16$ à $7,79 \pm 0,32$. La quantité de FeO a varié de 3132 ± 534 à 498 ± 96 ppm et les rendements de 2103 ± 180 à 2854 ± 174 kg/ha au poids sec.

Conclusions et application des résultats: Le bas-fond présente deux types d'hydromorphie : l'hydromorphie moyennement réductrice et l'hydromorphie très réductrice. L'effet conjugué

Annexes

des conditions de réduction et de la dynamique de la teneur du sol en fer ferreux a permis d'apprécier et de mesurer leurs impacts sur les paramètres de production du riz. Il existe une relation statistiquement significative ($p < 0,05$) et inversement proportionnelle entre les paramètres Eh, Fer ferreux et pH. On constate que plus la valeur de Eh diminue, plus les valeurs du pH et du Fer ferreux sont élevées. Le traitement d'inondation suivie de drainage présente un fort tallage avec un taux de fertilité de 86,5% des talles et un meilleur rendement en grain de riz (2854kg/ha) est le plus recommandable pour la valorisation du bas-fond par la production rizicole

Mots clés : Dynamique, Toxicité ferreuse, Bas-fond, Bénin

ABSTRACT

Objectives: This study assesses the dynamics of soil content in FeO of the shallows, measure the rice growth's conditions in submerged soils and establishes the relationship between production parameters and the FeO accumulation's evolution.

Methodology and Results: Three treatments were tested on the plots. Composite samples were made by depth and a total of 504 soil samples were analyzed for the study. The redox potential (Eh) and pH measurements are carried out at the site by pH meter pc228; The evaluation of the FeO content and its determination are carried out in the laboratory using an atomic absorption spectrometer. The statistical analysis is performed using the software SAS 9.2. The redox potential varies between $32,25 \pm 13,69$ and $199,78 \pm 13,45$ mv with a pH from $4,56 \pm 0,16$ to $7,79 \pm 0,32$. FeO's amount varies from 3132 ± 534 to 498 ± 96 ppm and the yields from 210 ± 18 à 285 ± 17 g/m².

Conclusions and application of the results: The shallow presents two types of waterlogging: One slightly reductive and the second very reductive. The reduction conditions and the dynamics of the soil's content in ferrous iron were used to measure and evaluate the effect of irrigation scheme on rice's growth parameters. There is a statistically significant ($p < 0,05$), inversely proportional relationship between the parameters Eh, ferrous iron and the pH. It is found that more the value of Eh decreases, more the pH values and ferrous iron increase. This is confirmed by the Pearson's correlation coefficient R, -0.8757 and -0.8830 indicating a strong relation between the three

Annexes

variables. The flooding treatment followed by drainage showed strong tillering with a fertility rate of 86.5% of tillers and performance (2854kg/ha) is the more recommended scheme in the shallow.

Key words: Dynamic, Iron toxicity, Shallow, Benin.

Annexes

Annexe 2: Effet des traitements sur les paramètres du sol déterminants de la toxicité ferreuse
Paramètres du sol

Fréquence d'observation	Mode répartition de l'eau	Profondeur	pH	Eh(mV)	FeLibre	T°C
F1	EN	0-10	5,95±0,1 2a	86,08±10, 14b	5498,99±8,4 8a	27,37±0, 37a
		10-20	5,98±0,1 4a	83,77±12, 31a	3899,62±456 ,96a	27,31±0, 36a
		20-30	6,02±0,1 3a	80,46±11, 09a	3214,17±575 a	27,35±0, 38a
		Moy	5,99±0,0 7AB	83,43±6,3 7AB	4204,26±370 ,27A	27,34±0, 21A
	ID	0-10	5,59±0,1 1b	116,05±9, 22a	5270,51±7,6 5a	27,21±0, 48a
		10-20	5,85±0,1 0a	94,39±8,5 8a	3214,17±437 ,51a	26,93±0, 45a
		20-30	5,94±0,0 6a	86,91±5,6 1a	2757,20±437 ,51a	26,90±0, 43a

Annexes

	Moy	5,80±0,0 5B	99,11±4,7 9A	3747,29±410 ,78A	27,01±0, 26A
IP	0-10	6,04±0,1 3a	79,38±11, 54b	6869,89±509 ,83a	26,92±0, 46a
	10-20	6,06±0,0 9a	77,44±7,7 3a	3671,13±228 ,48a	26,77±0, 41a
	20-30	6,02±0,1 1a	81,04±9,6 5a	3442,65±646 ,24a	26,86±0, 42a
	Moy	6,04±0,0 6A	79,29±5,5 4B	4661,22±687 ,36A	26,85±0, 24A
	Moyenne générale	5,94±0,0 4V	87,28±3,2 8Z	4204,26±292 ,43X	26,97±0, 15Z
EN	0-10	4,42±0,1 6a	212,89±13 ,50a	2985,69±456 ,96a	29,07±0, 45a
	10-20	4,54±0,1 8a	202,88±15 ,23a	5727,48±151 5,58a	29,00±0, 45a
	20-30	4,75±0,1 6a	185,53±13 ,67a	4356,58±987 ,15a	28,99±0, 44a
	Moy	4,57±0,0	200,43±8,	4356,58±655	29,02±0,
F2					

Annexes

		9A	16A	,96A	25A
ID	0-10	4,69±0,1 7a	190,61±14 ,85a	3442,65±834 ,30a	28,92±0, 40a
	10-20	4,45±0,1 6a	210,74±13 ,95a	2528,72±646 ,24a	28,92±0, 39a
	20-30	4,54±0,1 2a	203,30±10 ,09a	4813,55±120 9,02a	29,01±0, 43a
	Moy	4,56±0,0 9A	201,55±7, 53A	3594,97±560 ,60A	28,95±0, 23A
	0-10	4,85±0,1 5a	177,34±12 ,78a	4356,58±373 ,11a	28,68±0, 24a
IP	10-20	4,76±0,1 3a	184,6±11, 22a	2528,72±646 ,24a	28,53±0, 26a
	20-30	4,81±0,1 2a	180,98±10 ,25a	2528,72±527 ,65a	28,74±0, 26a
	Moy	4,81±0,0 7A	180,99±6, 52A	3138,01±378 ,72A	28,65±0, 14A
Moyenne générale		4,64±0,0 5Y	194,32±4, 32W	3696±316,61 X	28,88±0, 13X

Annexes

F3	EN	0-10	4,54±0,2 3b	202,88±19 ,19a	3442,65±646 ,24a	28,72±0, 32a
		10-20	4,89±0,2 0a	173,79±16 ,96a	5042,03±150 9,83a	27,32±1, 29a
		20-30	5,07±0,2 2a	159,53±18 ,43a	3899,62±875 ,02a	28,59±0, 28a
		Moy	4,83±0,1 2B	178,73±10 ,60A	4128,10±596 ,60A	28,21±0, 45A
	ID	0-10	4,81±0,1 7ab	180,94±14 ,76ab	4128,10±125 8,38a	28,36±0, 25a
		10-20	5,10±0,1 2a	156,96±10 ,45a	3214,17±942 ,05a	28,22±0, 24a
		20-30	5,29±0,1 2a	140,72±9, 93a	4128,10±942 ,05a	28,30±0, 24a
		Moy	5,07±0,0 8AB	159,54±7, 09AB	3823,45±567 ,61A	28,29±0, 14A
	IP	0-10	5,14±0,1 8a	153,08±15 ,23b	5727,48±199 1,86a	28,57±0, 16a
		10-20	5,23±0,2	145,56±17	3214,17±575	28,38±0,

Annexes

		0a	,13a	a	17a
	20-30	5,55±0,2	119,56±18	4585,06±437	28,45±0,
		2a	,96a	,51a	15a
	Moy	5,31±0,1	139,40±9,	4508,90±710	28,46±0,
		2A	92B	A	09A
	Moyenne générale	5,06±0,0	159,22±5,	4153,48±296	28,35±0,
		6X	49X	,89X	17Y
		0-10	4,48±0,1	207,68±13	3214,17±575
			6a	,98a	b
					476a
		10-20	4,64±0,1	194,45±13	3442,65±373
			6a	,53a	,11a
					45a
		20-30	4,98±0,1	166,97±11	4585,06±685
			4a	,81a	,44a
					44a
		Moy	4,70±0,0	189,70±7,	3747,29±343
			9A	78A	,68B
					25A
		0-10	4,65±0,0	193,67±7,	4356,58±34,
			8a	23a	30ab
					31a
		10-20	4,56±0,1	201,52±9,	2985,69±456
			1a	76a	,96a
					28a

F4

Annexes

	20-30	4,66±0,1 6a	192,92±13 ,28a	5042,03±942 ,05a	29,64±0, 29a
	Moy	4,62±0,0 7A	196,04±5, 92A	4128,10±78, 93AB	29,55±0, 17B
IP	0-10	4,75±0,0 8a	186,02±7, 00a	6869,89±258 ,38a	30,15±0, 37a
	10-20	4,81±0,0 9a	181,06±7, 46a	4128,10±780 ,41a	30,16±0, 36a
	20-30	4,90±0,1 0a	173,17±8, 86a	4356,58±834 ,30a	30,10±0, 34a
	Moy	4,82±0,0 5A	180,08±4, 48A	5118,19±634 ,71A	30,13±0, 20AB
	Moyenne générale	4,72±0,0 4Y	188,61±3, 59W	4331,19±296 ,89X	30,01±0, 12U
EN	0-10	5,23±0,1 4b	145,68±12 ,26a	4128,10±780 ,41a	30,28±0, 22b
	10-20	5,20±0,1 5b	148,24±12 ,55a	5727,48±589 ,93a	30,24±0, 24b
	20-30	5,33±0,1	137,46±11	4356,58±913	30,39±0,
F5					

Annexes

		4b	,90a	,93a	27a
ID	Moy	5,26±0,0 8B	143,79±6, 97A	4737,38±456 ,38A	30,305±0 ,14B
	0-10	5,26±0,0 6b	143,33±5, 71a	4128,10±685 ,44a	30,43±0, 25b
	10-20	5,30±0,0 7b	140,06±6, 20a	4585,06±437 ,51a	30,47±0, 26ab
	20-30	5,23±0,0 7b	145,93±6, 29a	5042,03±013 ,25a	30,52±0, 24a
	Moy	5,26±0,0 4B	143,10±3, 46A	4585,06±407 ,55A	30,47±0, 14B
	0-10	5,76±0,0 6a	101,87±5, 30b	5498,99±509 ,83a	31,16±0, 24a
	10-20	5,80±0,0 7a	98,98±6,5 8b	4128,10±575 a	31,07±0, 30a
	20-30	5,79±0,1 0a	99,72±8,4 4b	5270,51±987 ,15a	31,02±0, 27a
	Moy	5,78±0,0 4A	100,19±3, 91B	4965,87±598 ,81A	31,08±0, 15A

Annexes

	Moyenne générale	5,44±0,0 3W	129,03±3, 26Y	4762,77±278 ,36WX	30,63±0, 09V	
	EN	0-10	5,09±0,1 7a	157,25±14 ,6a	5042,03±228 ,48a	28,20±0, 36b
		10-20	5,16±0,1 6a	151,59±13 ,89a	5727,48±791 ,48a	28,13±0, 33b
		20-30	5,47±0,1 4a	125,76±12 ,37b	6184,44±646 ,24a	28,22±0, 35b
		Moy	5,24±0,0 9A	144,87±7, 96B	5651,31±345 ,97A	28,18±0, 19B
	ID	0-10	4,85±0,1 2a	177,59±10 ,68a	4813,55±589 ,93a	28,92±0, 26ab
		10-20	4,89±0,1 2a	173,91±9, 94a	5270,51±373 ,11a	28,79±0, 32ab
		20-30	4,83±0,1 3b	178,66±11 ,49a	6412,92±575 a	28,87±0, 32ab
		Moy	4,86±0,0 7B	176,72±6, 09A	5498,99±339 ,82A	28,86±0, 17A
F6	IP	0-10	5,04±0,1	161,39±14	6869,89±642	29,34±0,

Annexes

		8a	,99a	,32a	26a	
	10-20	5,03±0,1	162,38±12	4585,06±437	29,16±0,	
		5a	,86a	,51a	26a	
	20-30	5,10±0,1	156,34±11	5042,03±685	29,17±0,	
		4ab	,67ab	,44a	26a	
	Moy	5,06±0,0	160,04±7,	5498,99±627	29,22±0,	
		9AB	52AB	,61A	14A	
	Moyenne générale	5,06±0,0	160,54±4,	5549,77±257	28,70±0,	
		5X	26X	VW	11XY	
		0-10	4,13±0,1	236,61±12	6412,92±312	28,91±0,
			5a	,41b	,53a	31b
	10-20	4,39±0,1	215,20±11	6184,44±987	28,97±0,	
		4a	,82b	,15a	25b	
	20-30	4,53±0,1	204,08±11	5270,51±055	29,02±0,	
		4a	,85b	,32b	25b	
	Moy	4,35±0,0	218,63±7,	5955,96±607	28,96±0,	
		8A	05B	,11A	15B	
F7	ID	0-10	3,69±0,1	273,31±9,	6184,44±538	29,61±0,
			1b	70a	,37a	37ab

Annexes

IP	10-20	3,94±0,1 2b	252,61±10 ,01a	5727,48±875 ,02a	29,70±0, 42ab
	20-30	4,16±0,1 4ab	234,01±11 ,86ab	9154,71±865 ,02a	29,47±0, 36ab
	Moy	3,93±0,0 7B	253,31±6, 35A	7022,21±750 ,09A	29,59±0, 22A
	0-10	3,72±0,1 3b	270,59±11 ,22a	7326,85±107 9,7a	30,13±0, 27a
	10-20	3,88±0,1 2b	257,57±10 ,40a	4813,55±156 0,83a	29,95±0, 28a
	20-30	3,91±0,1 2b	255,29±10 ,23a	6184,44±105 5,3ab	29,94±0, 25a
	Moy	3,84±0,0 7B	261,15±6, 09A	6108,28±724 ,34A	30,01±0, 15A
	Moyenne générale	4,02±0,0 4Z	244,36±3, 98V	6362,15±398 ,57V	29,51±0, 11W

Annexe 3: Résultats d'analyses de sol

Annexes

Analyse granulométrique et chimique du sol

Nom du profil	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
N°	323	3234	3234	3234	3234	3234	3234	3234	3234	3235	3235	3235
Enregistrement	41	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2
Horizon												
Profondeur	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -
cm	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Refus %												
(mm)												
0 - 2 μ	1,72	0,98	1,98	1,72	1,71	2,20	1,47	1,71	2,43	2,22	1,72	1,94
(Argile)%	0	1	0	8	3	9	4	5	8	4	0	3
2 - 20 μ	4,66	4,41	8,66	9,62	8,56	11,0	8,59	7,84	10,7	5,68	6,63	9,95
(Limon fin)	9	5	2	5	3	46	8	2	27	4	3	7
%												
20 - 50 μ	4,48	4,23	6,17	9,24	5,87	7,30	6,83	6,82	7,48	5,93	4,95	7,22
(Limon	2	8	7	0	2	5	9	2	9	1	3	7
grossier)%												

Annexes

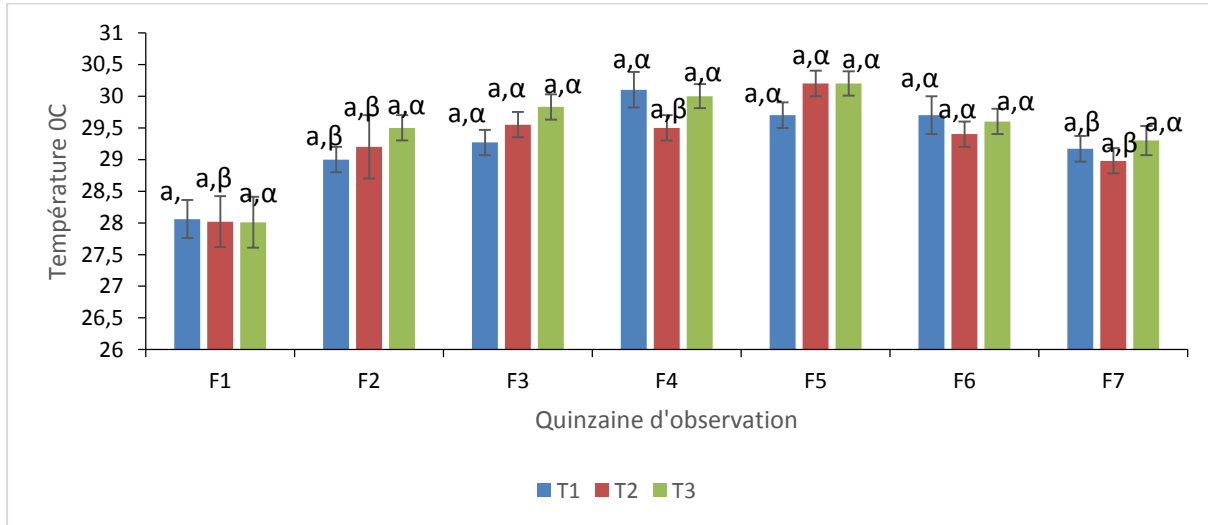
50 - 200 µ	30,3	29,6	37,0	34,3	40,0	31,6	36,4	37,2	37,8	35,9	46,5	24,2
(Sable fin) %	31	93	03	65	25	89	60	43	91	83	02	07
200 – 2000 µ	58,7	60,6	46,1	45,0	43,8	47,7	46,6	46,3	41,4	50,1	40,1	56,6
(Sable grossier) %	99	72	79	42	27	52	30	78	55	78	93	66
C %	2,45	2,92	8,99	2,60	9,23	8,26	2,61	4,14	4,83	2,15	3,77	4,94
	0	1	8	4	1	6	5	8	4	0	0	5
N %	0,33	0,29	0,61	0,18	0,66	0,67	0,25	0,46	0,44	0,21	0,44	0,26
	2	3	2	7	0	2	9	3	4	5	1	1
C/N	7,37	9,95	14,6	13,8	13,9	12,3	10,1	8,96	10,8	9,98	8,55	18,9
	3	5	99	94	90	03	15	3	86	2	6	68
M. O. %	4,22	5,03	15,5	4,49	15,9	14,2	4,50	7,15	8,33	3,70	6,49	8,52
	3	5	13	0	14	50	9	2	5	6	9	6
pH_{eau} (1/2,5)	4,37	3,73	3,97	4,16	4,11	3,79	4,36	4,27	5,02	5,09	4,21	4,06
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
pH_{KCl} (1/2,5)	3,59	3,60	3,77	3,69	3,66	3,72	3,75	3,64	4,44	4,38	3,60	3,73
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca⁺⁺	1,57	1,31	8,05	1,23	5,08	5,11	1,11	2,37	2,85	2,03	1,77	2,23
éch .méq/100g	4	8	4	5	5	8	2	3	2	7	2	1

Annexes

Mg⁺⁺éch.mé	0,47	0,40	2,32	0,45	1,28	1,10	0,27	0,54	0,88	0,70	0,52	0,70
q/100g	1	2	3	4	7	1	7	0	1	2	2	5
K⁺	0,10	0,09	0,52	0,45	0,26	0,24	0,12	0,17	0,17	0,10	0,11	0,11
éch.méq/100g	1	7	8	3	0	0	7	6	9	2	3	4
Na⁺	0,19	0,18	0,33	0,26	0,58	0,29	0,19	0,25	0,21	0,27	0,19	0,19
éch.méq/100g	2	0	3	9	8	9	8	0	8	9	2	1
Som. cations	2,33	1,99	11,2	2,41	7,22	6,75	1,71	3,33	4,13	3,12	2,59	3,24
méq/100g	8	7	39	1	0	8	4	9	0	0	8	1
CEC	6,80	4,60	31,5	7,20	24,4	27,3	8,20	15,7	13,1	7,10	13,2	12,0
méq/100g	0	0	00	0	00	00	0	00	00	0	00	00
%V=S/T *100	34	43	36	33	30	25	21	21	32	44	20	27
P_{ass}.Bray I	1	3	2	5	5	3	3	3	5	2	3	3
ppm												

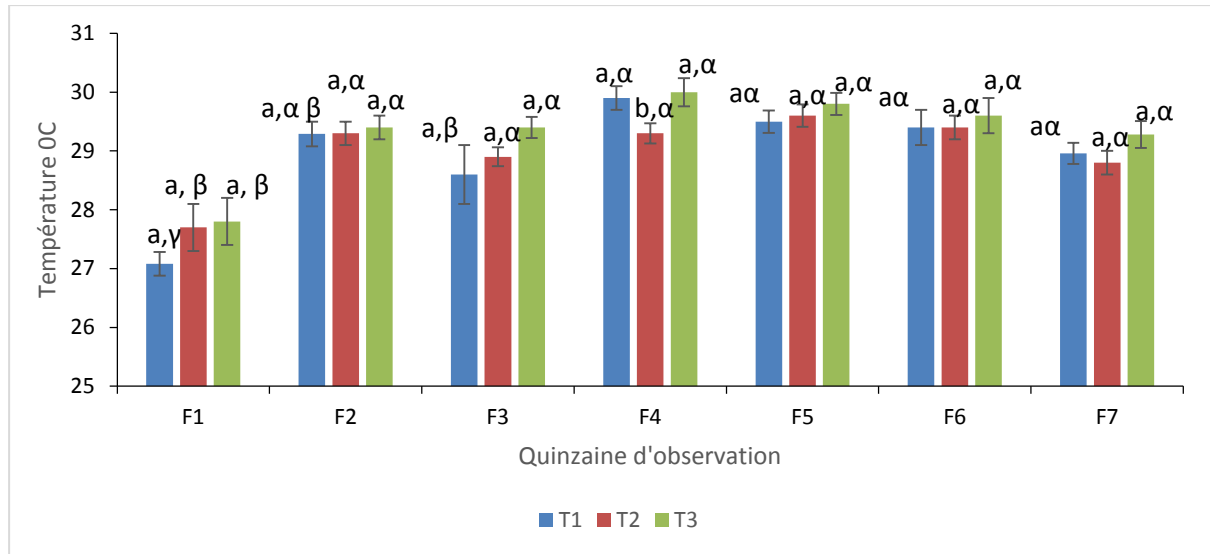
Annexes

Annexe 4: Dynamique de la température dans les sols de bas-fond



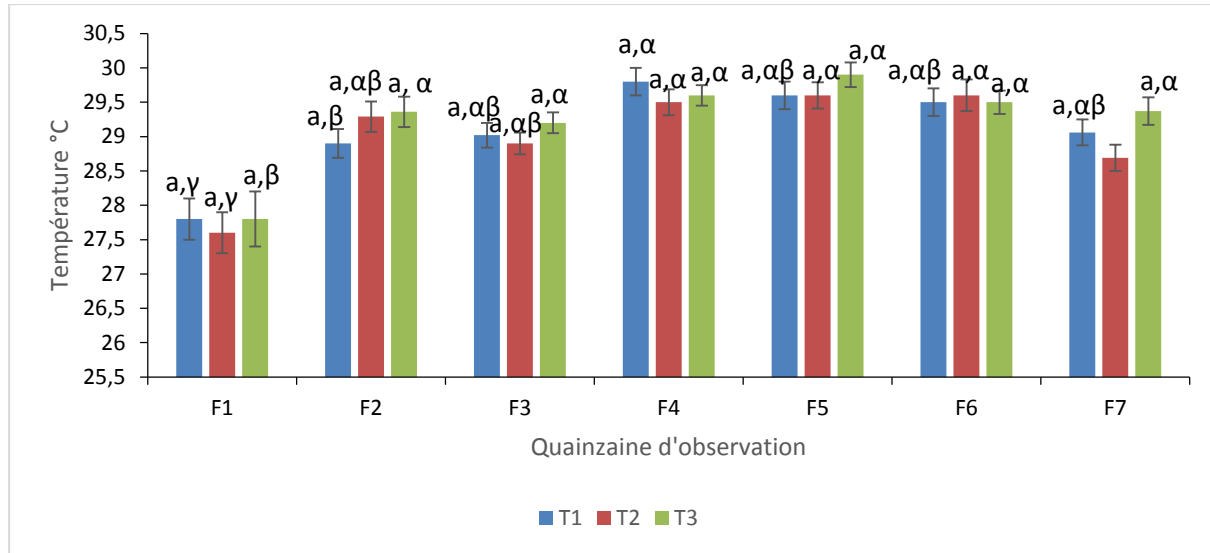
Dynamique de la température du sol à la profondeur 0-10cm

Annexes



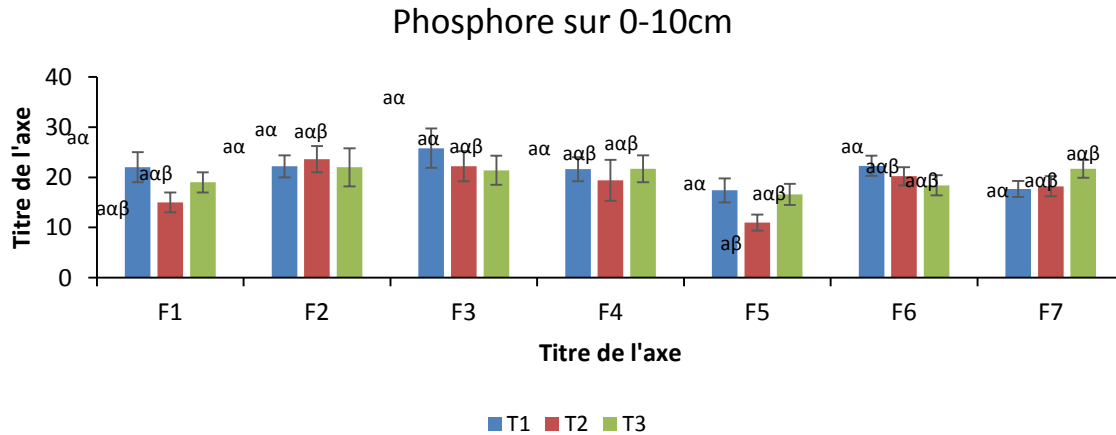
Dynamique de la température du sol à la profondeur 10 - 20 cm

Annexes



Dynamique de la température du sol à la profondeur 20 -30 cm

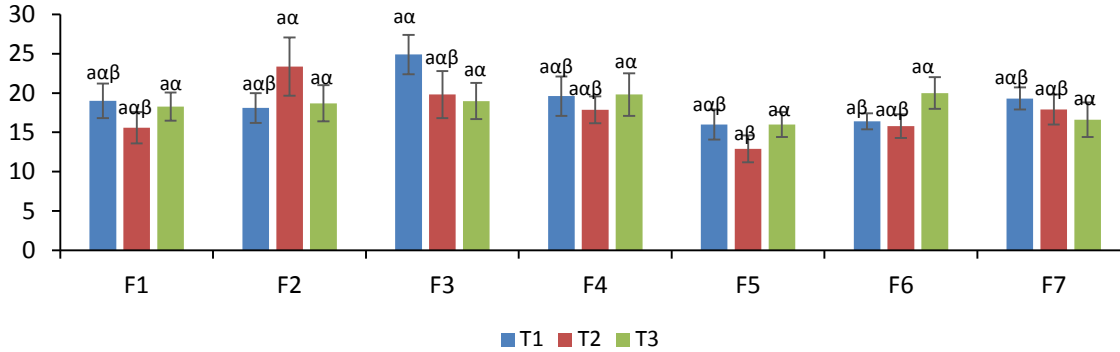
Annexe 5: Dynamique du phosphore assimilable dans les sols de bas-fond



Teneur phosphore assimilable dans la solution du sol de la couche 0-10 cm

Annexes

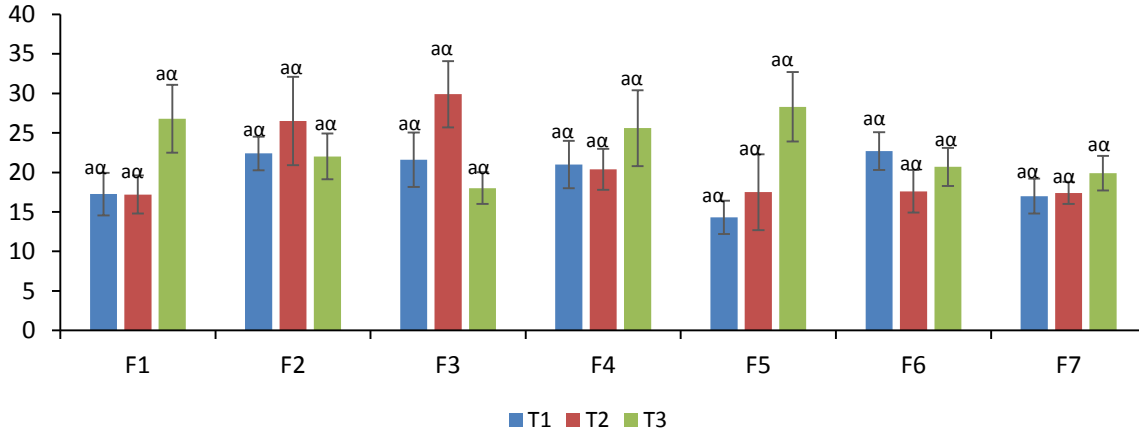
Phosphore sur 10-20cm



Teneur phosphore assimilable dans la solution du sol de la couche 10-20 cm

Annexes

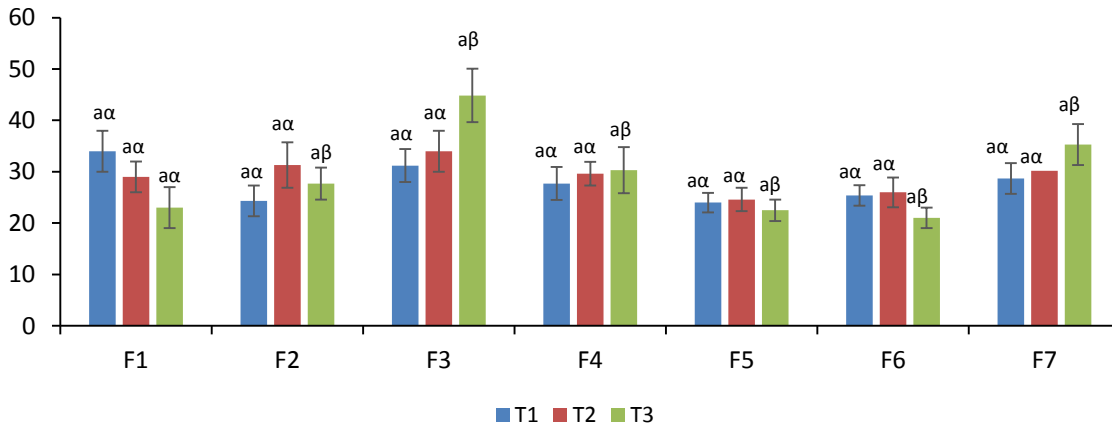
Phosphore sur 20-30cm



: Teneur phosphore assimilable dans la solution du sol de la couche 20-30 cm

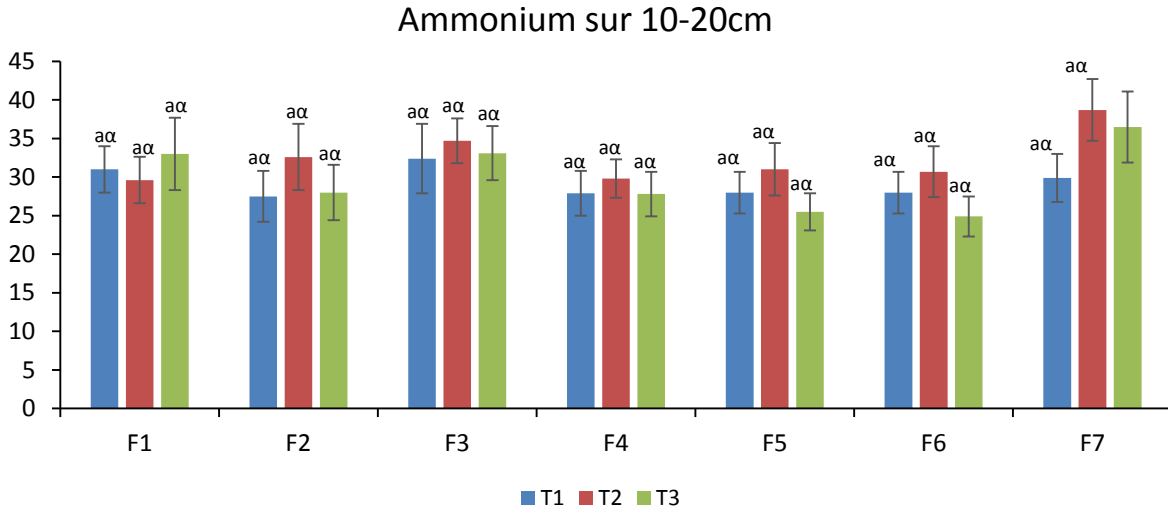
Annexe 6: Dynamique de l'ammonium dans les sols de bas-fond

Ammonium sur 0-10cm



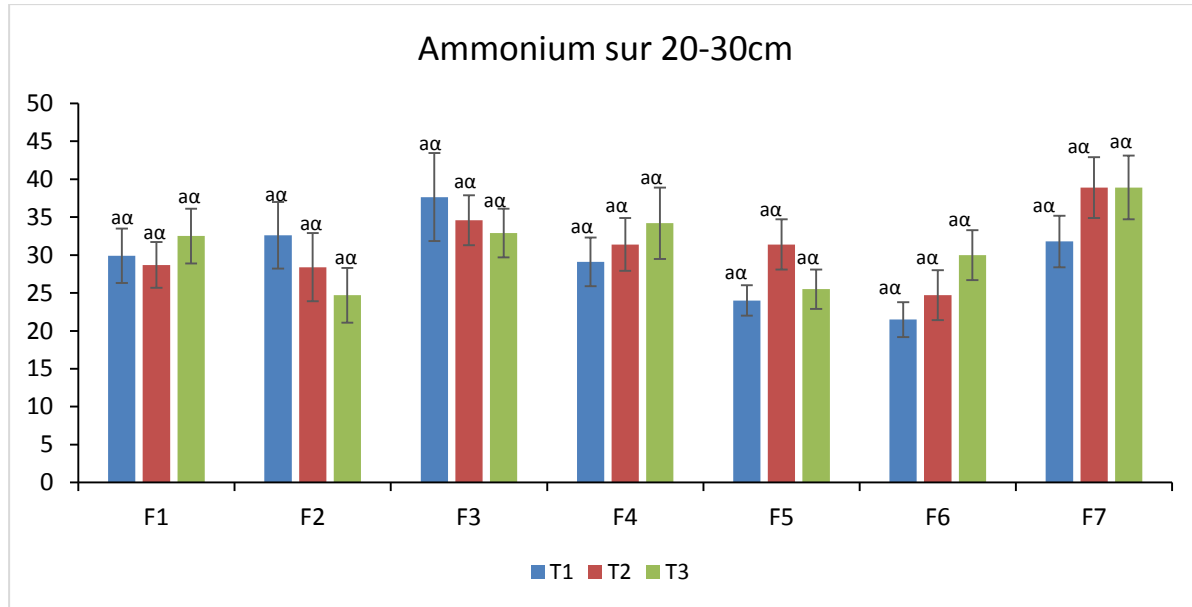
Teneur en ammonium dans la solution du sol de la couche 0-10 cm

Annexes



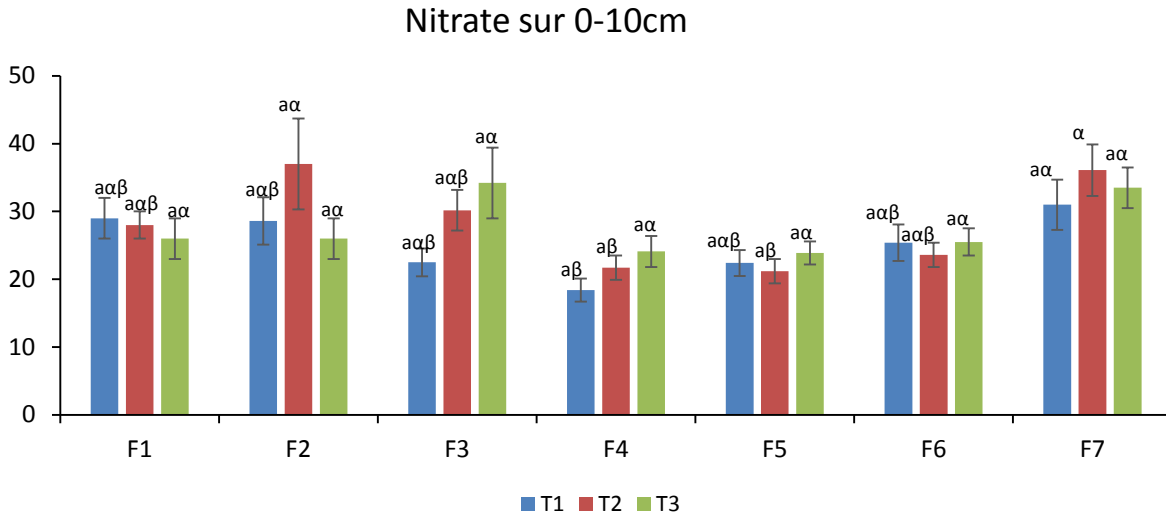
Teneur en ammonium dans la solution du sol de la couche 10-20 cm

Annexes



Teneur en ammonium dans la solution du sol de la couche 20-30 cm

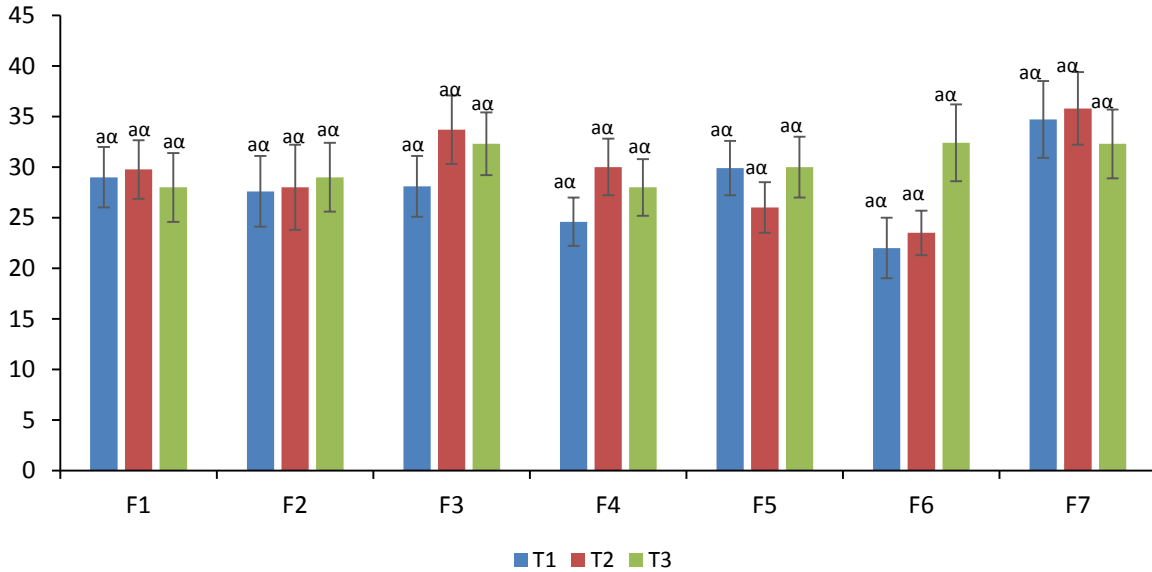
Annexe 7: Dynamique du nitrate dans les sols de bas-fond



Teneur en nitrate dans la solution du sol de la couche 0-10 cm

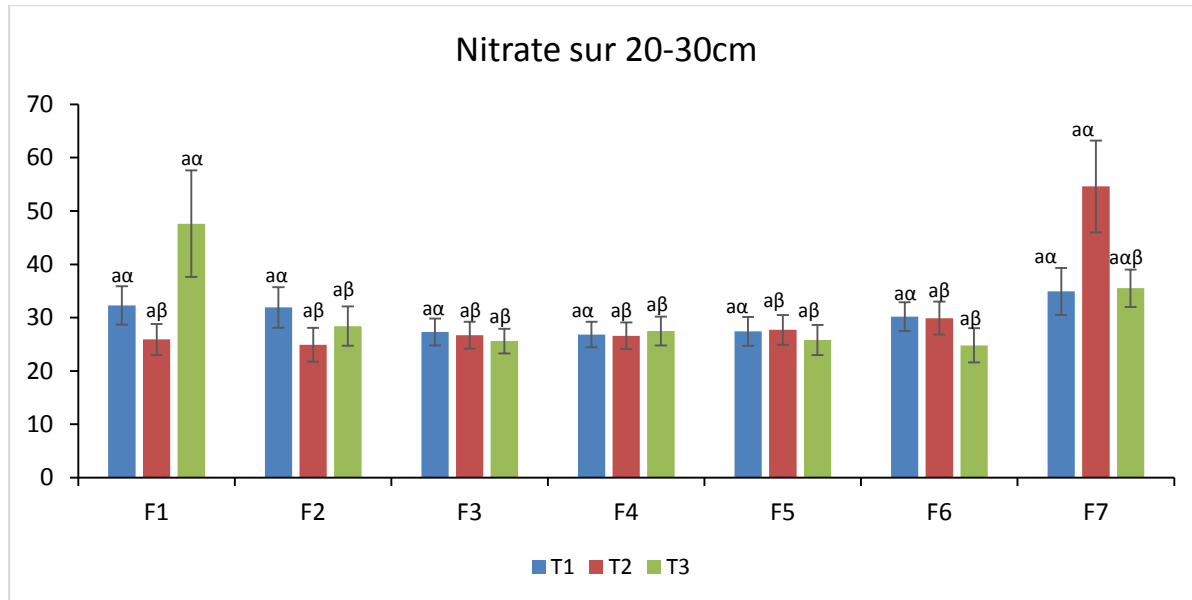
Annexes

Nitrate sur 10-20cm



Teneur en nitrate dans la solution du sol de la couche 10-20 cm

Annexes



Teneur en nitrate dans la solution du sol de la couche 20-30 cm:

Annexes

Annexe 8: Résultats de l'analyse de la variance à deux facteurs (valeurs de F) paramètres physico-chimiques du sol

Résultats de l'analyse de la variance à deux facteurs des paramètres physico-chimiques

Source de variation	Degré de liberté	pH	Eh	T	Fe L	Fe ²⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Pass
		Echantillonnage 1							
Mode d'irrigation	2	3,46*	3,46*	1,07ns	1,41ns	2,97*	0,11ns	0,85ns	0,26ns
Profondeur	2	1,06ns	1,06ns	0,12ns	14,56***	0,97ns	0,38ns	0,42ns	0,57ns
Echantillonnage 2									
Mode d'irrigation	2	2,38ns	2,38ns	0,79ns	1,48ns	0,83ns	0,72ns	0,08ns	5,70*
Profondeur	2	0,41ns	0,41ns	0,05ns	0,12ns	0,51ns	1,54ns	2,73ns	0,52ns
Echantillonnage 3									
Mode d'irrigation	2	4,53*	4,53*	0,22ns	0,28ns	2,59*	0,15ns	0,78ns	2,29*
Profondeur	2	4,46*	4,46*	1,18ns	0,23ns	1,17ns	1,19ns	1,54ns	0,14ns
Echantillonnage 4									

Annexes

Mode d'irrigation	2	1,70ns	1,70ns	3,91*	2,41ns	0,08ns	0,01ns	0,67ns	3,18ns
Profondeur	2	2,43ns	2,43ns	0,02ns	2,41ns	2,01ns	0,32ns	2,55ns	0,38ns
Echantillonnage 5									
Mode d'irrigation	2	23,94***	23,94***	7,53***	0,14ns	22,80***	2,44*	1,23ns	0,30ns
Profondeur	2	0,06ns	0,06ns	0,03ns	0,10ns	1,04ns	1,11ns	2,36ns	0,90ns
Echantillonnage 6									
Mode d'irrigation	2	4,78**	4,78**	8,74***	0,04ns	2,12ns	0,75ns	0,17ns	1,39ns
Profondeur	2	0,72ns	0,72ns	0,13ns	0,60ns	1,75ns	1,78ns	0,09ns	0,57ns
Echantillonnage 7									
Mode d'irrigation	2	12,47***	12,47***	8,24***	0,72ns	5,60*	1,67ns	2,51ns	0,78ns
Profondeur	2	5,26**	5,26**	0,05ns	1,04ns	6,49*	0,21ns	0,98ns	0,69ns

ns : $P > 0,05$; ** : $P < 0,01$; *** : $P < 0,001$

Annexes

Source de variation	pH	Eh	T	Fe L	Fe 2+	NH4+	NO3-	Pass
Mode d'irrigation	12,00***	12,44***	3,37*	0,36ns	7,63***	1,02ns	0,53ns	0,80ns
Profondeur	10,58***	10,11***	0,82ns	3,84*	7,56***	1,02ns	0,15ns	1,11ns
Fréquence	161,81***	159,44***	78,53***	9,30***	63,43***	7,75***	4,24***	9,13***

Annexes

Annexe 9: Résultats de l'analyse de variance à un facteur (Valeur de F) des paramètres de croissances du riz considérant le mode d'irrigation

Résultats de l'analyse de variance à un facteur des paramètres de croissances du riz

Source de variation	Degré de liberté	Hauteur	Vitesse de croissance	Talles	Talles fertiles	Longueur des racines
Mode d'irrigation	2	1.16 ns	0,93 ns	69.05***	95.84***	57.98***

ns : $P > 0,05$; ** : $P < 0,01$; *** : $P < 0,001$

Annexes

Annexe 10: Résultats de l'analyse de variance à un facteur (Valeur de F) des paramètres de production du riz considérant le mode d'irrigation:

Résultats de l'analyse de variance à un facteur des paramètres de production du riz

Source de variation	Degré de liberté	Biomasse sèche	Panicule sèche	Rendement sec	Longueur de panicule
Mode d'irrigation	2	42.13***	42.18***	12.55***	14.67***

ns : $P > 0,05$; ** : $P < 0,01$; *** : $P < 0,001$

Annexes

Annexe 11: Interprétation des résultats d'analyses physico - chimiques du sol d'Awopka.

Résultat d'analyse de l'Azote et de la Matière organique

Eléments	Très pauvre	Pauvre	Moyen	Riche	Très riche
% N Total	Moins que 0.5%	0.5 à 1	1 à 1.5	1.5 à 2.5	Plus que 2.5%
Matière organique - Acides humiques	Moins que 1%	1 à 2	2 à 3	3 à 4	Plus que 4%

Résultat d'analyse des bases échangeables

Bases échangeables	Très pauvre	Pauvre	Moyen	Riche	Très riche
Ca	Moins que 1méq/100g	1 à 2.3	2.3 à 3.5	3.5 à 7	Plus que 7
Mg	Moins que 0.4méq/100g	0.4 à 1	1 à 1.5	1.5 à 3	Plus que 3
K	Moins que 0.1méq/100g	0.1 à 0.2	0.2 à 0.4	0.4 à 0.8	Plus que 0.8

Annexes

Somme des bases, CEC et taux de saturation

	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Somme des bases	Moins que 2méq/100g	2 à 5	5 à 10	10 à 15	Plus que 15
CEC	Moins que 5méq/100g	5 à 10	10 à 25	25 à 40	Plus que 40
Saturation	Moins que 15%	15 à 40%	40 à 60%	60 à 90%	90 à 100%

: Rapports Mg, Ca, Na, C, N

	Trop faible	Satisfaisant	Un peu fort	Trop fort
Mg éch./Ca éch. (pour mille)	Moins que 0.1	0.1 à 0.8	0.8 à 1.5	Plus que 1.5
Na éch./Ca éch. (pour mille)	*	Moins que 0.1		Plus que 0.1
C/N (pour mille)	Moins que 10	10 à 20	*	Plus que 20

Annexes

Acidité du sol

	Extrême ment acide	Très fortemen t acide	Forteme nt acide	Moyenneme nt acide	Faibleme nt acide	Neutr e	Légèr ement alcali n	Moyenne ment alcalin	Forteme nt alcalin
pH	Inférieur à 4.5	4.5 à 5.0	5.1 à 5.5	5.6 à 6.0	6.1 à 6.5	6.6 à 7.3	7.4 à 7.8	7.9 à 8.4	8.5 à 9

Caractéristiques physiques du bas –fond par traitement

Caractéristiques Physiques.	Couche Du sol	Sol des traitements		
		Ecoulement naturel	Inondation suivi de drainage	Inondation permanente
% Sable	0-10 cm	73,12	66,06	76,06
	10-20 cm	73,92	73,13	70,59
	20-30 cm	76,65	68,27	73,10
% Limon	0-10 cm	10,83	22,84	9,29
	10-20 cm	11,84	11,86	12,48
	20-30 cm	15,28	20,46	15,90
% Argile	0-10 cm	15,30	10,75	14,20

Annexes

	10-20 cm	13,74	14,15	16,35
	20-30 cm	7,48	10,58	10,33
Densité apparente (g/cm ³)	0-10 cm	1,58	0,50	0,32
	20-30 cm	1,58	0,26	0,34
	20-30 cm	1,58	0,26	0,34

Annexes

Annexe 12: Résultats des tests de comparaison des rendements moyens des trois modes

Vérification des conditions d'applications du test d'ANOVA

	Kolmogorov-Smirnova	Shapiro-Wilk	Bartlett's	Levene
Statistique	0,137	0,68	3,07	0,67
Probabilité liée au test	0,20	0,362	0,215	0,533
Conclusion	La distribution suit une loi normale	La distribution suit une loi normale	Il y a égalité des variances	Il y a égalité des variances

Test d'ANOVA

Rendement en tonne par ha	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	5,854	2	2,927	6,564	0,017
Intra-groupes	4,013	9	0,446		
Total	9,868	11			

Annexes

Test de structuration de moyenne de Newman-Student-Keuil

Modes d'irrigation	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
Ecoulement naturel	4	1,9501	
Inondation permanente	4	2,6643	2,6643
Irrigation suivi de drainage	4		3,6536
Signification		0,165	0,066
Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.			

Annexes

Annexe 13: Calcul des charges variables totales pour la production d'1 ha de semences de riz
Charges variables totales

Activités	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)
A- intrants			
Achat Herbicide : Glycel	4 L	5000	20.000
Herbicidage total	12 parcelles	500	6.000
Achat de semence	5 Kg	1200	6.000
Achat engrais NPK	8 kg x 12 parcelles = 96 kg soit 2 Sacs de 50 kg	14000	28.000
Achat Herbicide : HERBEXTRA ou TRIPLO	4 L	5000	20.000
Herbicidage sélectif	12 parcelles	500	6.000
Achat engrais UREE	4 kg x 12 parcelles = 48 kg soit 1 Sacs de 50 kg	14000	14.000

Annexes

Total A			100.000
B- Main d'œuvre occasionnelle			
Curage des drains	-	200 F / m	50.000
Curage de cours d'eau	-		60.000
Labour	12 parcelles	2500	30.000
Plannage	12 parcelles	1500	18.000
Pépinière	-	-	2.500
Mise en boue	10 L	650	6.500
Autres coûts liés à la mise en boue	2	2500	5.000
Epannage en fumure d'entretien	12 parcelles	200	2.400
REPIQUAGE	12 parcelles	2500	30.000
Chasse aviaire	40 jours	1500	60.000
Récolte	12 parcelles	2500	30.000
Battage	12 parcelles	500	6.000
Vannage	12 parcelles	500	6.000
Sarclage :	12 parcelles x 3	1500	54.000
Epannage en fumure de fonds	12 parcelles	200	2.400
Total B			362.800
C-Transport			

Annexes

Déplacement	-	-	1.000
Déplacement achat de semences (BOHICON)	-	5000	5.000
Déplacement	-	-	500
Total C			6.500

Annexes

Annexe 14: Compte de production au niveau des modes de répartition de l'eau

Compte de production au niveau du mode d'écoulement naturel

Rubriques	P1	P4	P7	P10	Ensemble
Rendement en Kg/ha	1587,2	2321,1	1791,3	2100,8	1950,1
Prix de vente du kg en FCFA	400	400	400	400	400
Recette totale en FCFA	634860	928420	716520	840300	780025
Charges variables totales en FCFA	558000	558000	558000	558000	558000
Marge Brute (MB=R -CV)	76860	370420	158520	282300	222025
Ratio MB/CV	0,13	0,66	0,28	0,51	0,40

Annexes

Compte de production au niveau du mode d'inondation suivie de drainage

Rubriques	P2	P5	P8	P11	Ensemble
Rendement en Kg/ha	3012,6	3465,8	4156,1	3980,0	3653,6
Prix de vente du kg en FCFA	400	400	400	400	400
Recette totale en FCFA	1205020	1386300	1662420	1591980	1461430
Charges variables totales en FCFA	593000	593000	593000	593000	593000
Marge Brute (MB=R -CV)	612020	790300	1069420	998980	867680
Ratio MB/CV	1,03	1,3	1,80	1,68	1,46

Annexes

Compte de production au niveau du mode d'inondation permanente

Rubriques	P3	P6	P9	P12	Ensemble
Rendement en Kg/ha	1499,9	3902,1	2614,6	2640,5	2664,2
Prix de vente du kg en FCFA	400	400	400	400	400
Recette totale en FCFA	599940	1560820	1045820	1056200	1065695
Charges variables totales en FCFA	558000	558000	558000	558000	558000
Marge Brute (MB=R -CV)	41940	1002820	487820	498200	518180
Ratio MB/CV	0,08	1,79	0,87	0,89	0,91

Annexes

Annexe 15: Résultats des tests de comparaison des marges nettes des trois modes

Vérification des conditions d'applications du test d'ANOVA

	Kolmogorov-Smirnova	Shapiro-Wilk	Bartlett's		Levene
Statistique	0,138	0,925	3,07		0,67
Probabilité liée au test	0,20	0,334	0,215		0,533
Conclusion	La distribution suit une loi normale	La distribution suit une loi normale	Il y a égalité des variances		Il y a égalité des variances

Annexes

Test d'ONAVA des marges nettes en fonction des modes

Rendement en tonne par ha	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
Inter-groupes	6,664E+11	2,000E+00	3,332E+11	4,67	0,041
Intra-groupes	6,422E+11	9,000E+00	7,135E+10		
Total	1,309E+12	1,100E+01			

Test de structuration de moyenne de Newman-Student-Keuil

Modes d'irrigation	N	Sous-ensemble pour alpha = 0.05	
		1	2
Ecoulement naturel	4	-93516,6667	
Inondation permanente	4	192153,3333	192153,3333
Irrigation suivi de drainage	4		483721,6667
Signification		0,165	0,157
Les moyennes des groupes des sous-ensembles homogènes sont affichées.			

Annexes