



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.

GBETO DANSOU G. Jean¹, AMADJI L. Guillaume Lucien² et AHOLOUKPE Hervé³

¹ 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 : gamadij@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

Original submitted in on 3rd November 2016. Published online at www.m.elewa.org on 28th February 2017
<http://dx.doi.org/10.4314/jab.v110i1.4>

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 : Écoulement 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±13,69 et 199,78±13,45 mv avec un pH allant de 4,56±0,16 à 7,79±0,32. La quantité de FeO a varié de 3132±534 à 498±96 ppm et les rendements de 2103±180 à 2854 ±174kg/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 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 ne diminue, plus les valeurs du pH et du Fer ferreux ne 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 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 letter 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 ± 13 , 69 and 199, 78 ± 13 , 45 mv with a pH from 4, 56 ± 0 , 16 to 7, 79 ± 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 water logging : 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 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.

Keywords : dynamic, iron toxicity, shallow, Benin

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). 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-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 régime 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 (Gbeto Dansou, 2015) Il est alors nécessaire de déterminer suivant les modes de répartition 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.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Milieu d'étude : L'étude a été conduite dans le bas-fond d'Awokpa situé dans le département de l'Atlantique (6° et 12°50'N, 1° et 3°40'E) au sud du Bénin. Le sol est hydromorphe avec une forte teneur en limon. La région est caractérisée par deux saisons sèches (décembre à février et août) et deux saisons pluvieuses (Mars à Juillet ; Septembre à Novembre). Le bas-fond est un site aménagé dont une superficie de trente huit hectares est utilisée pour la production semencière de la variété NERICA L20 en saison pluvieuse. C'est une variété peu sensible à la toxicité ferreuse. Cette sensibilité peut s'accroître si la lame d'eau est importante (supérieure à 15 cm) et si l'hydromorphie est prolongée. Le bas-fond présente une topographie qui soumet la culture à trois modes de répartition de l'eau : la répartition de l'eau de haut de pente, celle de mi-pente et celle de bas de pente où l'eau stagne plus longtemps que les deux premières.

Aménagement du site : Il a été réalisé un aménagement sommaire dans le bas-fond qui longe la rivière Awo dont les principaux ouvrages sont : un drain principal pour évacuer les eaux excédentaires que la rivière Awo ne pourra pas évacuer rapidement sans détruire les autres ouvrages du domaine d'aménagement. Le drain principal

rejoint plus loin la rivière Awo en dehors de la zone d'aménagement ; les drains secondaires qui permettent d'évacuer les eaux excédentaires des casiers vers le drain principal ; les diguettes pour ceinturer les parcelles et favoriser le séjour plus long de l'eau dans les casiers. L'équipement de batardeaux sur les diguettes et sur les drains secondaires pour évacuer si nécessaire les eaux excédentaires des casiers vers le drain secondaire ou de remonter les eaux des drains secondaires pour irriguer les casiers. Le fonctionnement de cet aménagement a permis d'avoir trois modes de répartition de l'eau dans le bas-fond selon la toposéquence que sont :

- i) Mode d'écoulement naturel de l'eau sur le bas-fond (EN) qui fonctionne sans aucune modification de l'hydrologie du site et ne concerne que les casiers de haut de pente du bas-fond qui ne sont pas inondés pendant le cycle de développement du riz ;
- ii) Mode d'Inondation suivi de drainage (ID) qui permet d'inonder (15cm de lame d'eau sur le sol) puis de drainer si nécessaire de façon à oxygéner la couche supérieure du sol et concerne les parcelles de mi-pente du bas-fond ;

iii) Mode d'inondation permanente des casiers (IP) où les casiers de bas de pente sont inondés de façon permanente pendant tout le cycle de développement du riz. Le fonctionnement normal de cet aménagement dépend de la survenance des pluies.

Dispositif expérimental : Le dispositif expérimental est un plan factoriel à trois facteurs : répartition de l'eau selon la toposéquence à trois niveaux, blocs à quatre niveaux et l'année à deux niveaux. Les blocs représentent le facteur principal et sont constitués des différentes parties de la pente transversale du bas-fond à savoir le haut de pente, mi- pente et bas de pente. Chaque bloc comporte

trois unités expérimentales correspondant aux trois modes de répartition de l'eau dans le bas-fond qui sont les traitements. Chaque unité expérimentale correspond aux casiers rizicoles ayant une superficie de 400 m² (20 m x 20m). Pour le contrôle de la variabilité intra-parcellaire, des micro-parcelles de 4 m² (2m x 2m) de superficie sont implantées à l'intérieur des parcelles. Elles sont installées sur la diagonale des unités parcelaires. L'expérimentation est conduite pendant deux années correspondant à deux campagnes de production du riz. Le dispositif expérimental se présente comme l'indique la figure 1.

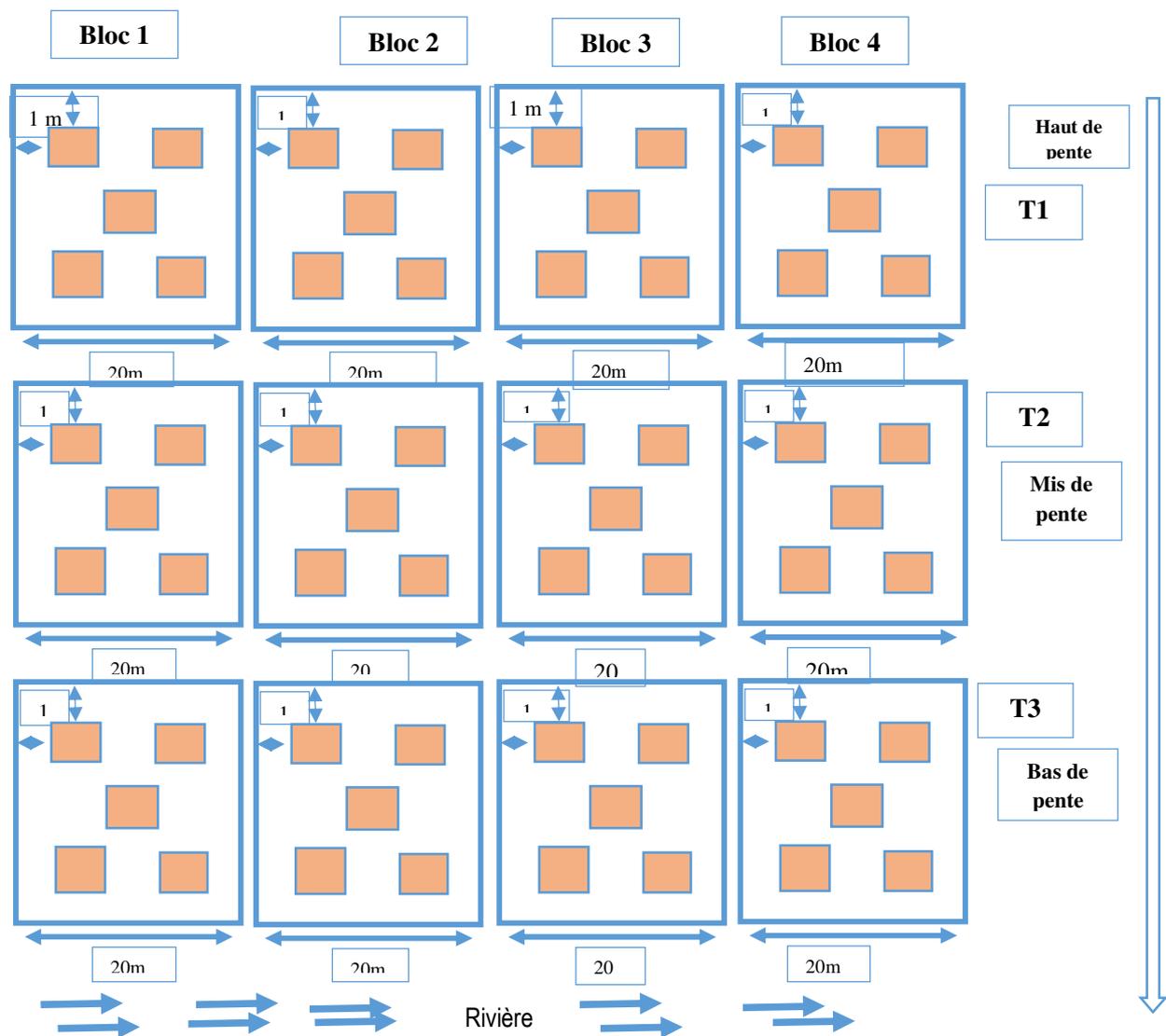


Figure 1 : Dispositif expérimental de conduite de l'essai

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. La granulométrie est déterminée par la méthode internationale à la pipette Robinson. Cette méthode repose sur deux principes : les fractions supérieures à 50 microns sont séparées par tamisages successifs ; les fractions plus fines (argiles et limons) sont déterminées par sédimentations différentielles basées sur la loi de STOKES. Les résultats d'analyses granulométriques obtenus ont été comparés aux valeurs du triangle de texture de JAMAGNE et BETREMIEUX pour la détermination de la classe texturale (SOLTNER, D. 1990). La réaction du sol (pH) est déterminée dans une solution aqueuse de sol dans un rapport 1 / 2.5 par lecture directe au pH-mètre. L'azote est dosé par la méthode KJELDAHL à partir de la micro-distillation du minéralisât de l'échantillon de sol broyé et digéré par l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur à base de sélénium. La micro-distillation est faite par entraînement de la vapeur en présence d'une solution normale de soude. Le distillat recueilli dans de l'acide borique est titré par de l'acide sulfurique en présence d'un indicateur à base de rouge de méthyle. Le carbone est dosé par incinération à 550°C de la matière organique sur le sol broyé et tamisé à 0.2mm. 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 (MATHIEU, C. et PIELTAIN F. ; 2003). Les bases échangeables et la capacité d'échange cationique (CEC) sont déterminées par la méthode Metson. Elle a consisté à extraire ces bases et les protons H⁺ par saturation du complexe argilo-humique à l'aide d'une solution d'acétate d'ammonium tamponnée à pH 7. Il est alors procédé au dosage des cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺) par spectrophotométrie d'absorption atomique. Après cette extraction, l'excès de solution tamponnée est rejeté par lavage du sol à l'éthanol à 95°. L'échantillon est agité en présence d'une solution de Chlorures de potassium qui permet de récupérer en retour l'ammonium préalablement fixé sur le complexe et dont le dosage par distillation permet de déterminer la CEC du sol. Les analyses conduites

pendant les essais sont réalisées selon le dispositif expérimental pendant deux campagnes de production du riz soit pendant deux années. La quantification et l'évaluation de l'évolution de la teneur en fer (fer total, fer libre, fer ferreux et fer ferrique) du sol sous différents traitements et dans le temps sont faites au laboratoire. Elles portent sur des échantillons de sol prélevés au niveau des micro-parcelles. Le prélèvement est fait tous les 15 jours à trois profondeurs à savoir : de 0 à 10cm, de 10 à 20cm et de 20 à 30 cm. Ainsi 2520 échantillons ont été prélevés pendant deux campagnes. Les échantillons de même couche de prélèvement sont mélangés afin d'avoir un échantillon composite par profondeur représentatif de la parcelle. Ainsi par parcelle on obtient trois échantillons de sol issus des prélèvements par micro-parcelle soit 252 échantillons composites pendant le cycle de production du riz et au total 504 échantillons composites pendant les deux années de production. Les données sont collectées tous les 15 jours sur chaque parcelle du repiquage à la récolte. 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 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 traitement), au moyen du

logiciel SAS version 9.2, est effectuée pour voir s'il y a une différence statistiquement significative entre traitements du point de vue des données collectées. Pour cela le modèle mixte sera réalisé afin d'évaluer l'effet du traitement 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.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Pluviométrie : 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 1).

Tableau 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
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.

Évaluation 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.

Tableau 2 Caractéristiques granulométriques et chimiques du sol avant essais

Paramètres granulométriques et chimique	Couche du sol	Sol du bas-fond selon la toposéquence		
		EN	ID	IP
% 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
C (g/kg)	0-10 cm	41,44	52,93	57,38
	10-20 cm	31,26	38,83	44,98
	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
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.

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 3 : 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*répétition	3	6415.300	0.2398
Traitement*répétition	6	73894.001	<.0001
Année*traitement*répétition	6	24224.108	<.0001
Profondeur*répétition	6	2719.417	0.7346
Année*profondeur*répétition	6	164.210	0.9998
Traitement*profondeur*répétition	12	3735.941	0.6327
Année*traitement*profondeur*répétition	12	1281.043	0.9923
CV%		58,76073	

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 régime 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 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.

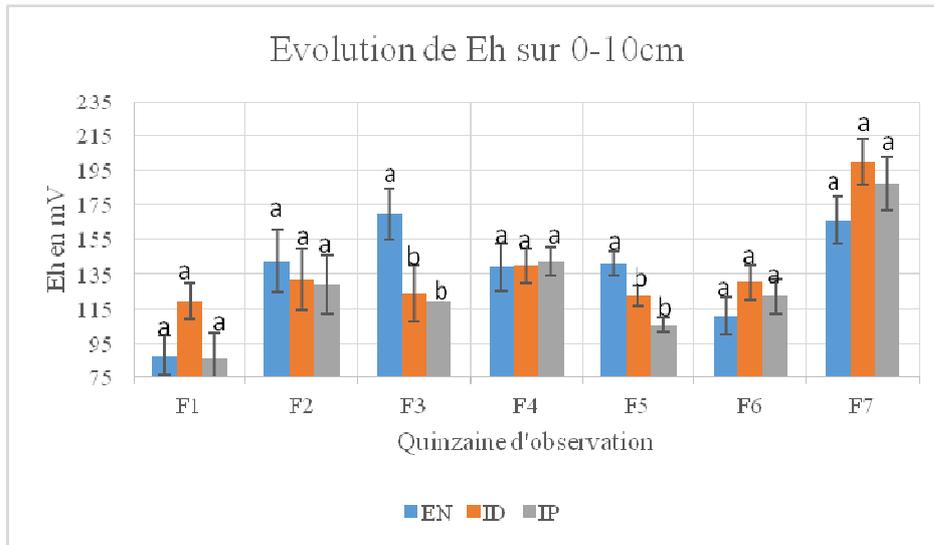


Figure 2 : Évolution du potentiel redox Eh à la profondeur 0-10 cm

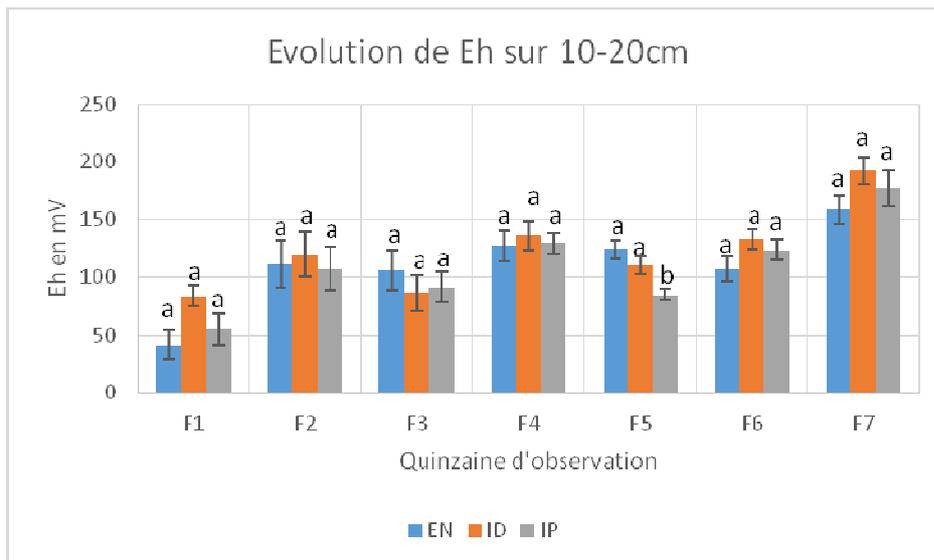


Figure 3 : Évolution du potentiel redox Eh à la profondeur 10-20 cm

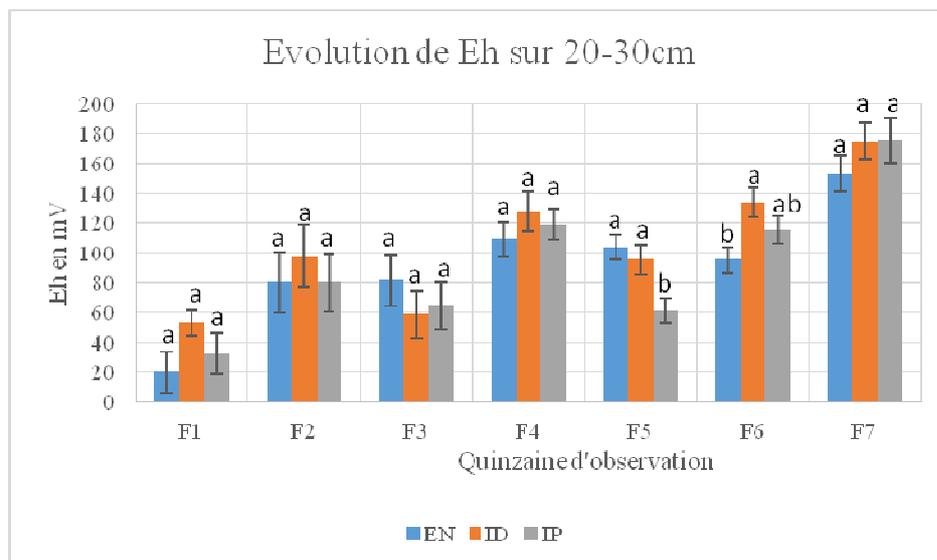


Figure 4 : Évolution du potentiel redox Eh à la profondeur 20-30 cm

Les mesures du potentiel redox 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 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 varie 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. 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.

Effet des traitements 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°5 du traitement statistique des données de pH révèle qu'il existe un effet année et traitement,

Tableau 4 : Effet année, traitement, profondeur et reprise sur le pH

Source	DDL	Carré moyen	Pr > F
Année	1	1549,853673	<.0001
Traitement	2	8,038644	0,0059
Année*Traitement	2	2,853922	0,1610
Profondeur	2	71,010514	<.0001
Année*Profondeur	2	30,891668	<.0001
Traitement * Profondeur	4	0,627602	0,8073
Année*traitement*profondeur	4	0,568265	0,8344
Répétition	3	88,394562	<.0001
Année*répétition	3	1,039846	0,5729
Traitement*répétition	6	17,237147	<.0001
Année*traitement*répétition	6	4,007106	0,0176
Profondeur*répétition	6	0,711168	0,8415
Année*profondeur*répétition	6	0,087517	0,9993
Traitement*profondeur*répétition	12	0,926228	0,8494
Année*traitement*profondeur*répétition	12	0,394425	0,9953
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. 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.

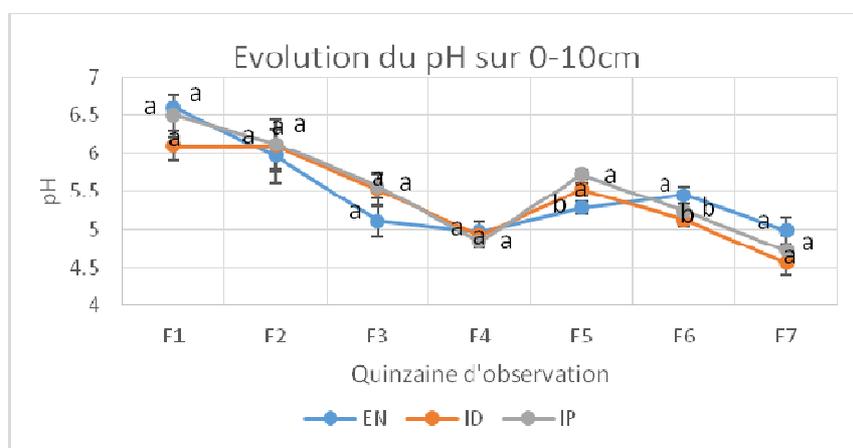


Figure 4 : Évolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 0-10 cm

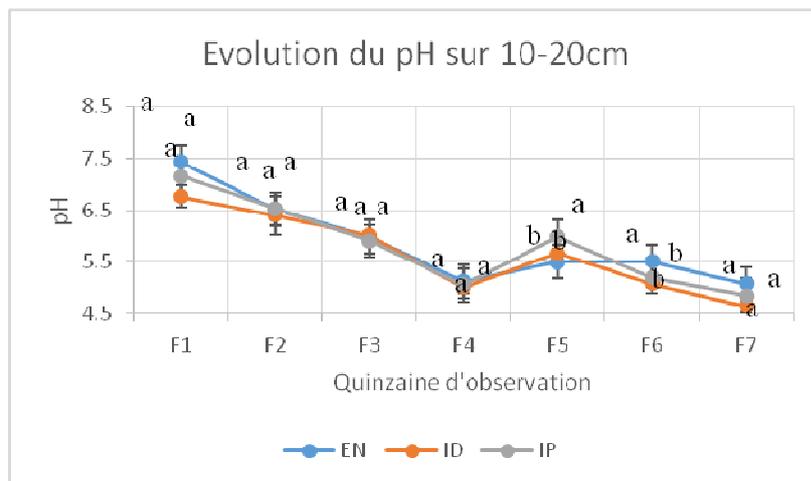


Figure 5 : Évolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 10-20 cm

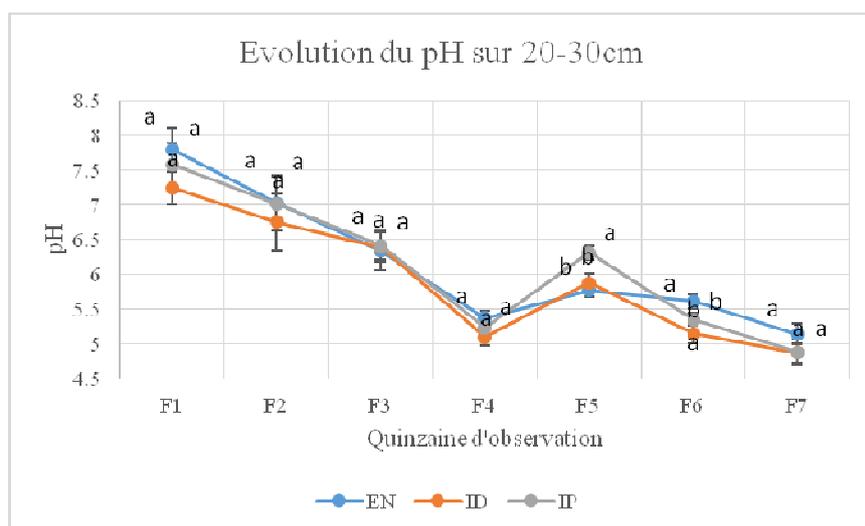


Figure 6 : Évolution de l'acidité active pH eau à la profondeur 20-30 cm

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 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.

Influence du traitement 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.

Tableau 5 : 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 n'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.

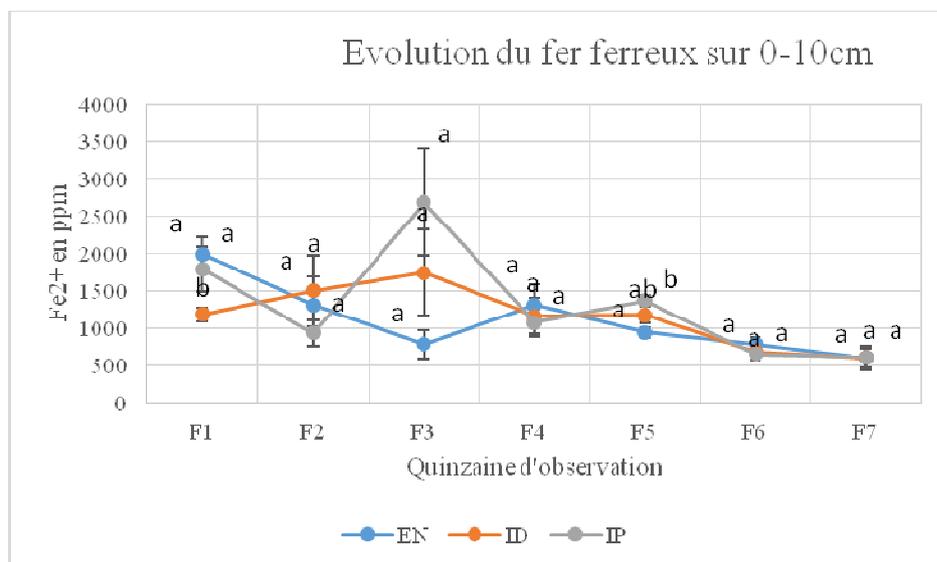


Figure 8 : Teneur en fer ferreux à la profondeur 0-10cm

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).

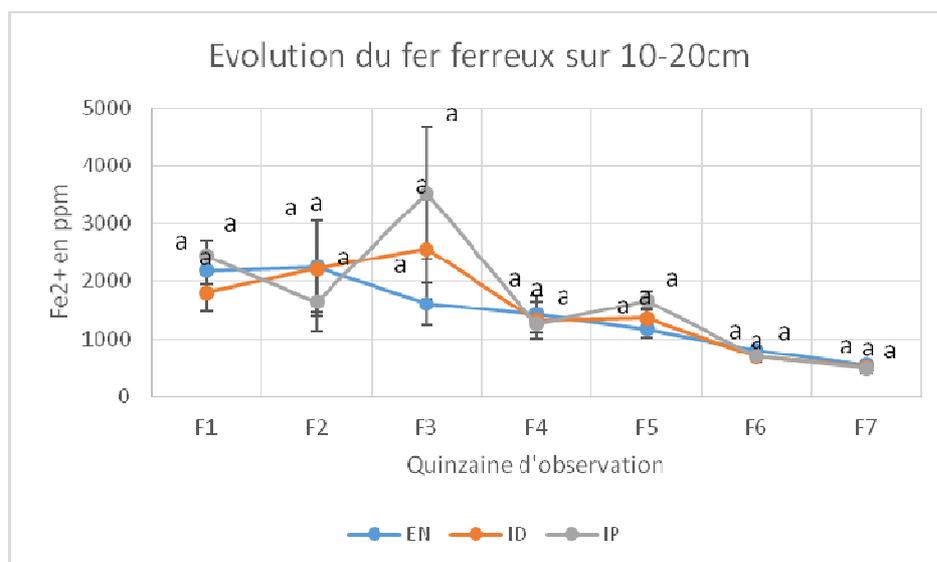


Figure 9 : Teneur en fer ferreux à la profondeur 10-20cm

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.

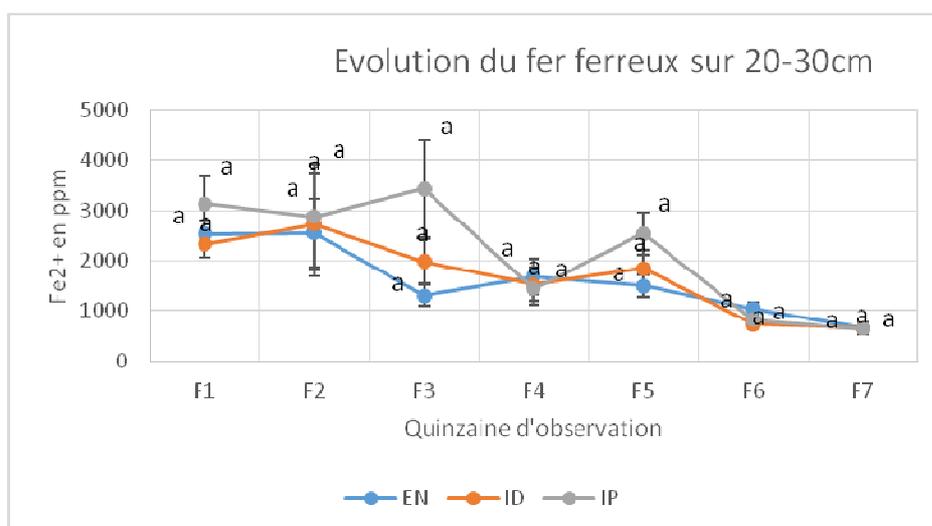


Figure 10 : Teneur en fer ferreux à la profondeur 20-30 cm

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'août) 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 répartitions de l'eau dans le bas-fond d'Awokpa ont eu des effets différents sur le phénomène d'oxydoréduction dans le sol. 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 Fe²⁺ 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 (Fe²⁺) 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 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.).

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 traitements 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 régime à un autre (tableau 6).

Tableau 6 : Effet des traitements sur le tallage des plants

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.

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

Gbeto Dansou et al., J. Appl. Biosci. 2017 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.

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.

Tableau 7 : 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

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.

RECOMMANDATION

Des actions d'amélioration de l'itinéraire technique de conduite de la production du riz s'avèrent nécessaire pour améliorer le rendement des casiers sous écoulement naturel de l'eau. Au niveau de ceux sous inondation permanente pendant la saison des pluies il est encore possible d'améliorer les conditions de production par le curage du lit de la rivière pendant la saison sèche pour

favoriser l'écoulement rapide des eaux et diminuer la hauteur des eaux dans les casiers. Pour mieux exploiter ce type de bas-fond, il faut améliorer l'aménagement pour évacuer rapidement l'excès d'eau qui arrive dans le bas-fond, diminuer la lame d'eau qui séjourne sur le bas-fond et par conséquent empêcher l'installation de l'hydromorphie très réductrice.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce travail remercient les Responsables du Projet de Productivité Agricole en Afrique de l'Ouest (PPAAO) financé par la Banque Mondiale, le Laboratoire des Sciences du Sol de la Faculté des Sciences

Agronomiques de l'université d'Abomey-Calavi pour les analyses faites durant les travaux et les producteurs du bas-fond d'Awokpa qui ont mis à disposition leurs parcelles pendant les deux années d'essai.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abifarin A. O. 1989. *Progress in breeding rice for tolerance to iron toxicity*. In : WARDA Annual Report 1989. Bouaké, Côte d'Ivoire : West Africa Rice Development Association. pp 34-39.
Audebert, A., Narteh, L. T., Kiepe, P., Millar, D. & Beks, B. 2006. *Toxicité ferreuse dans les systèmes à base riz d'Afrique de l'ouest*. ADRAO, Cotonou, Benin, 196 p.

Baize, D. & Girard, M.-C. 2008. *Référentiel pédologique 2008*.
Berthelin & DE Giudici, 1991. *Implication des racines et de la microflore rhizosphère dans l'altération chimique des minéraux du sol*
Boquet & Suavin, 1974. *Solubilisation du fer par deux souches bactériennes en présence de litière de teck*. *Revue d'écologie et de biologie du sol*, 11 (2), P. 187-195.

- Bousserrhine, N., Gasser, U. G., Jeanroy, E. & Berthelin, J. 1999. Bacterial and Chemical Reductive Dissolution of Mn-, Co-, Cr- and Al-Substituted Goethites. *Geomicrobiology Journal*, 16, 245-258.
- Broadbent F.E., 1979. *Mineralization of organic nitrogen in paddy soils*. In : "Nitrogen and rice," Proceed. IRRI, Los Banos, Philippines : 105-118.
- CARDER Atlantique Littoral 2013, 2014, 2015. *Rapport annuel*
- Dommergues & Mangenot, 1970. *Écologie microbienne du sol*
- Ehrlich, H. L. (2002). *Geomicrobiology*, 4eme Edition. Marcel Dekker Publisher, New York, 800 p.
- Gbeto Dansou G., J., Amadji L. G., Glele Kakai L., R., Vissoh V., P., 2015. *Perception locale du phénomène de la toxicité ferreuse et stratégies de lutte au Sud-Bénin (Afrique de l'Ouest) Rev. CAMES-Vol 3*
- Lefebvre-Drouet, E. & Rousseau, M. F. 1995. Dissolution de différents oxyhydroxydes de fer par voie chimique et par voie biologique : importance des bactéries réductrices. *Soil biology and Biochemistry*, 27(8), 1041-1050.
- Lu, W. J., Wang, H. T., Huang, C. Y. & Wolfgang, R. 2002. Communities of iron (II)-reducing bacteria in irrigated Tropical Rice field. *Microbes and environments*. 17(4), 170-178.
- Masajo TM, Alluri K, Abifarin AO and D Jankiram. 1986. Breeding for high and stable yields in Africa. In : *The Wetlands and Rice in Sub-Saharan Africa*. ASR Juo and JA Lowe (Eds). Ibadan, Nigeria : International Institute of Tropical Agriculture. pp 107-114.
- Mathieu C. Pieltain F. 2003. *Analyse chimique des sols Méthodes choisies*
- McBride, 1994. *Environmental chemistry of soils*
- MEDDE GIS Sol. 2013. *Guide pour l'identification et la détermination des sols de zones humides*. p. 63 pages. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol.
- Munch & Ottow, 1980 ; 1983. *Significance of iron and sulphate redox processes in flooded soils for the nutrition of rice*
- Roger PA., 1996. *Biology and management of the flood water ecosystem in rice fields*. International Rice Research Institute, P.O. Box 933, 1099 Manila, and ORSTOM, France.
- Sahrawat, K.L. 1979. Iron toxicity to rice in an acid sulfate soil as influenced by water regimes. *Plant Soil* 51, 143-144.
- Soltner, D. 1990. *Les bases de la production végétale Tome 1 : Réf : 630 sol1*
- Stemmler, S., et Berthelin, J. (2003). Microbial activity as a major factor in the mobilization in the humid tropics. *Europeans journal of soil science* 54(4) 725-733.
- Yao, H., Conrad, R. 1999. Thermodynamics of methane production in different rice paddy soils from China, the Philippines and Italy. *Soil Biology and Biochemistry* 31(3), 463-473.
- Vizier JF 1970. *Étude de l'état d'oxydoréduction du sol et de ses conséquences sur la dynamique du fer dans les sols hydromorphes*