

PERTURBATION CLIMATIQUE ET INONDATION DES BAS-FONDS : RISQUE DE TOXICITE FERREUSE ET DE BAISSSE DE LA PRODUCTION RIZICOLE AU SUD-BENIN

CLIMATIC DISTURBANCE AND FLOOD FLOODING: RISK OF FERROUS TOXICITY AND LOWER RICE PRODUCTION IN SOUTHERN BENIN

HOUSSOUKPEVI I. A.^{1,*}, DANSOU J. G.¹, AHOLOUKPE H. N. S.^{1,2};
DAASSI R.¹, AMADJI G. L.¹

1- Unité de recherche Eco-pédologie/Laboratoire Sciences du sol/FSA/UAC

2- Centre de Recherches Agricoles des Plantes Pérennes (CRAPP) de l'Institut National
de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), Tél : (+229 97405973)

(*) Correspondance : E-mail : alladeissiak@gmail.com

(Reçu le 06 Juin 2017 ; Révisé le 15 Juillet 2017 ; Accepté le 24 Juillet 2017)

RESUME

Les inondations, une des conséquences des perturbations climatiques présentent un risque de toxicité ferreuse des sols. La toxicité ferreuse est un stress abiotique qui affecte la production des cultures notamment celle du riz. L'ampleur de la toxicité ferreuse dépend de l'état hydrique du sol. L'étude a évalué l'effet de trois régimes d'inondation des casiers rizicoles (T1 = absence d'inondation ; T2 = Inondation temporaire et T3 = Inondation permanente) sur la production du riz et la toxicité ferreuse dans un sol de bas-fond au Sud-Bénin. Le régime d'inondation a influencé significativement le nombre de talles, la production en paille et en grain de riz. Les parcelles T2 ont donné un rendement en grain de riz ($3,00 \pm 0,29$ t/ha) supérieur à ceux des parcelles T3 ($2,14 \pm 0,2$ t/ha) et T1 ($1,55 \pm 0,15$ t/ha). Les pertes de rendement occasionnées par la toxicité ferreuse sont estimées à 62,83 %. Le régime T3 a créé une condition plus favorable à la toxicité ferreuse néfaste à la production du riz. L'étude a montré qu'un drainage régulier des casiers rizicoles inondés améliore la production du riz dans le bas-fond. D'une manière générale, le drainage peut être suggéré comme technologie de gestion des sols et des eaux pour une meilleure valorisation agricole des bas-fonds afin d'atténuer les effets de la toxicité ferreuse. Il peut être considéré comme une stratégie d'adaptation aux changements climatiques qui provoquent les inondations.

Mots clés : Changements climatiques, Inondation, Toxicité ferreuse, adaptation, Sud-Bénin

ABSTRACT

Flooding, one of the consequences of climatic disturbances present a risk of iron toxicity of soils. Iron toxicity is an abiotic stress which affect crop production especially rice production. The extent of iron toxicity of the soil depends on flooded condition of the soil. The study assessed the effect of three flood regimes (T1 = no flooding, T2 = Temporary flooding and T3 = Permanent flooding of rice traps) on rice production and iron toxicity of lowland soil in South Benin. The flood regime had a significant influence on the number of tillers, straw and rice grain production. T2 plots recorded the highest yield of rice grain (3.00 ± 0.29 t/ha), compared to T3 plots (2.14 ± 0.2 t/ha) and T1 plots (1.55 ± 0.15 t/ha). Yield losses caused by iron toxicity are estimated to 62.83%. T3 created a favorable condition for the appearance of the iron toxicity of the soil harmful to rice production. The study showed that regular drainage of flooded rice traps improves rice production in lowland. In general, drainage can be suggested as a soil and water management technology for better agricultural valorization of lowlands in order to mitigate the effects of iron toxicity. It can be regarded as an adaptation strategy to climate change inducing floods.

Keywords: Climate change, Flooding, Iron toxicity, adaptation, South Benin

INTRODUCTION

Le monde est de plus en plus confronté aux effets des changements climatiques (IPCC, 2001). En Afrique, les catastrophes climatiques (la sécheresse et les inondations) font partie des préoccupations quotidiennes des populations, car le climat ouest-africain est sujet à de fortes variabilités dont les conséquences sont néfastes pour le développement durable (PANA, 2008). Le milieu tropical est confronté depuis des années à une variation du climat se traduisant par une perturbation des cycles des saisons sèches et pluvieuses. Selon l'Institut d'Application et de Vulgarisation en Sciences (IAVS, 2011), cette variation est un bouleversement du climat caractérisé principalement par une augmentation significative de la fréquence et de l'intensité des chocs climatiques (sécheresses, inondations, vagues de chaleur, vents violents). Au Bénin, le diagnostic fait sur les effets des changements climatiques montre que la sécheresse, les pluies tardives et violentes et les inondations sont trois risques climatiques majeurs (AGOSSOU et al., 2012). En effet, le Bénin connaît depuis plus de 40 ans de fortes variabilités climatiques caractérisées par une fluctuation de la période et de la durée des précipitations, une variation de la pluviométrie annuelle, un climat de plus en plus chaud, la sécheresse, la dégradation des sols, des inondations inattendues, des vents violents et la prolifération des maladies et ravageurs (YABI et AFOUDA, 2012). Ces paramètres agroclimatiques présentent des particularités contraignantes pour l'agriculture (MEPN, 2008). Les projections établies par la communauté scientifique internationale donnent la mesure des risques liés aux changements climatiques pour l'agriculture et les écosystèmes. Ces risques sont notamment une baisse du rendement de l'agriculture pluviale de 50 % d'ici à 2020 (IPCC, 2007). Les changements climatiques modifient donc les régimes pluviométriques et affectent les systèmes de production agricole à cause de la non-maîtrise de l'abondance des eaux (inondation) ou des sécheresses. L'agriculture pluviale, qui reste le modèle prédominant au Bénin est soumise aux changements

imprévisibles de la nature, causés par les changements climatiques. Selon YABI (2008), les inondations sont l'une des principales catastrophes climatiques Ouest africaine ; elles entraînent des pertes financières, détruisent les infrastructures, les champs de cultures et sont parfois à l'origine de pertes en vies humaines. Ces inondations dues à une mauvaise répartition dans le temps et dans l'espace de la pluie et aussi de la montée des eaux provoquent le débordement des rivières de leur lit et entraînent une inondation permanente des bas-fonds. L'inondation permanente constitue un risque de toxicité ferreuse des sols des bas-fonds pour ainsi affecter la production des cultures, notamment celle du riz. Les inondations affectent jusqu'à un tiers des superficies de bas-fond pluvial en Afrique Sub-saharienne (AFRICA RICE, 2014). Ces bas-fonds représentent plus de 38% des terres humides totales de l'Afrique subsaharienne et sont largement utilisés pour la riziculture en saison humide (ADRAO, 2008). 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. Au Bénin la riziculture occupe 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 au Bénin (CCR-B, 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. Les 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).

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). Plusieurs signes précurseurs indiquent l'apparition du stress. Il s'agit entre autres des conditions réductrices du fer rencontrées fréquemment dans les sols engorgés provoqués par une inondation permanente (AUDEBERT et FOFANA, 2009), du stade de développement de la plante, d'une forte température et d'une faible disponibilité en tampon redox. Malheureusement dans les conditions actuelles de changements climatiques occasionnant une recrudescence des inondations, la toxicité ferreuse se révèle être l'un des principaux facteurs de stress abiotiques qui contribue à la perte de rendement de la culture du riz à travers le monde (FAO, 2012). Au Bénin, la majorité des bas-fonds du Sud sont exposés aux inondations causées par les perturbations climatiques. Il y a donc une menace sur le développement et la production des cultures du moment où l'inondation permanente peut

entraîner une toxicité ferreuse néfaste à ces cultures. La présente étude vise à évaluer les effets de l'inondation sur la production du riz cultivé sur un sol hydromorphe de bas-fond à toxicité ferreuse au Sud-Bénin.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

L'expérience a été conduite dans le bas-fond d'Awokpa situé dans la commune de Zè au sud du Bénin. La Commune de Zè (comprise entre 6° 32 et 6° 87 de latitude Nord et entre 2° 13 et 2° 26 de longitude Est) est caractérisée par un climat est de type subéquatorial/soudanien avec un régime pluviométrique bimodal dont le cumul enregistré lors de l'année d'expérimentation est de 750,68 mm.

Sol

Les résultats issus de la description d'un profil pédologique du bas-fond ont montré deux horizons (Tableau I) bien distincts.

Tableau I : Description des différents horizons du profil pédologique du bas-fond

Horizons	Couleur	Texture	Structure	Racines	Activité biologique
0-20 cm	Noir tourbeux	Limoneuse	Grumeleuse	Abondantes racines fines, très fine et moyenne	Très intense, terricules de vers de terre
20-32 cm	Brun	Argileuse	Massive faiblement développé, polyédrique subangulaire	Très nombreuses racines fines, très fines et moyennes	Peu intense
Nappe à 32 cm					

Mise en place de l'essai

L'essai a eu lieu de juillet à novembre 2015, durant la campagne de production du riz au Bénin. Le facteur défini pour cette étude est le régime d'inondation des casiers rizicoles. Les

parcelles ont été implantées aux trois niveaux de la toposéquence du bas-fond. Le traitement 1 (T1 = absence d'inondation), constitué des parcelles n'ayant pas subi d'inondation durant toute l'expérimentation est placé en haut de

pende. Le traitement 2 (T2 = Inondation temporaire) est placé à mi- pente. Dans ce deuxième cas, on procède à un drainage régulier (tous les 15 jours) des casiers rizicoles. Les parcelles du troisième traitement (T3 = Inondation permanente) ont été implantées en bas de pente où l'on observe une inondation permanente des casiers rizicoles. Les unités parcellaires correspondent à des casiers rizicoles d'une superficie de 400 m² (20 m x 20 m). Chaque traitement a été répété 4 fois. Pour le contrôle de la variabilité intraparcellaire, des micro-parcelles de 4 m² (2 m x 2m) de superficie ont été implantées à l'intérieur des parcelles. Elles ont été installées sur la diagonale des unités parcellaires. Ce qui correspond à 5 micro-parcelles par unité parcellaire. 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. Cet essai a comporté 12 unités parcellaires avec 60 micro-parcelles d'observation. La variété du riz utilisée est le NERICA L20. Cette variété obtenue par AfricaRice a un cycle de 110 jours (du semis à la maturité), un rendement potentiel de 5-7 t/ha avec en moyenne 15,75 talles par plant. Elle est résistante aux stress abiotiques tels que la sécheresse, la salinité, le froid et la toxicité ferreuse (SIE et al., 2013). La culture a été conduite suivant les techniques culturales recommandées et pratiquées par les producteurs du bas-fond. La préparation du sol, le sarclage, le suivi phytosanitaire et la fertilisation ont été faits de même manière pour toutes les parcelles.

Collecte des données

Dix plants ont été fixés dans les micro-parcelles pour les observations. 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 de la toxicité sur la vitesse de croissance et la hauteur des plants.
- Le nombre de talles a été obtenu par comptage.
- A la récolte, les plants de chaque micro-parcelle ont été fauchés à partir de la surface de la terre. Après séchage et battage, les grains et la paille ont été pesés séparément et le taux d'humidité des grains a été déterminé. Le poids sec a été mesuré après séchage des plants et des grains à l'étuve à une température de 65 °C jusqu'à un poids constant. Ce paramètre a permis d'évaluer l'effet de la toxicité sur les rendements grain et paille.

Analyse chimique de sol

Les échantillons de sol ont été prélevés au niveau des micro-parcelles sur la profondeur 0-30 cm. Les échantillons des 5 micro-parcelles ont été mélangés afin d'avoir un échantillon composite représentatif de la parcelle constituant l'unité parcellaire (Tableau 2). La texture a été déterminée après analyse granulométrique utilisant la méthode de pipette (Robinson, 1949). Les cations échangeables (K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺) ont été déterminés par la méthode de Helmke et Sparks (Helmke et Sparks, 1996). L'azote total (N) est déterminé par la méthode de Kjeldahl (1883). Le taux de matière organique (MO) a été déterminé la méthode d'incinération décrite Bell (Bell, 1964). Le taux de carbone organique (C) a été obtenu en divisant celui de la MO par 1,724. La teneur en phosphore assimilable (P) a été déterminée en utilisant la méthode de Bray 1 (Bray and Kurtz, 1945).

Tableau II : Propriétés physiques et chimiques sur la profondeur 0-30 cm du site d'essai

Propriétés du sol	unité	Haut de pente (T1)	Mi-pente (T2)	Bas de pente (T3)
C	%	2,49±0,4	3,39±0,29	3,91±0,34
N		0,13±0,02	0,19±0,01	0,17±0,01
P	Ppm	24,38±2,97	13,83±2,86	25,89±1,44
C/N	-	19,15	17,84	23
K+	Meq/100g de sol	1,05±0,21	1,35±0,35	0,92±0,19
Mg ²⁺		1,61±0,77	2,85±0,51	2,55±0,8
Ca ²⁺		0,77±0,34	1,43±0,22	1,92±0,2
L	%	14,96±6,61	12,18±2,98	17,57±2,89
A		12,31±3,84	14,57±4,45	9,47±2,93
S		72,16±7,11	72,55±2,62	72,24±3,79

L'analyse a été également faite pour trois couches de sol à savoir 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm de profondeur. Elle a consisté à doser les déterminants édaphiques de la toxicité ferreuse à savoir : pH, Eh (potentiel d'oxydoréduction), le fer ferreux (Fe²⁺) et le fer libre (Fe_{ox}). Les valeurs du pH et de l'Eh ont été déterminées sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre de terrain. Le Fer libre (Fe_{ox}) a été dosé par la méthode de Tamm décrit par DUBOIS (1994). Le Fe²⁺ a été dosé sur échantillon frais selon la méthode décrite par IGNATIEFF (1941).

Analyse statistique

A l'aide du logiciel Statistical Analysis System (SAS version 9.2), une analyse de variance à un facteur qu'est le régime d'inondation a été faite sur les différentes variables testées. Ces variables sont : la hauteur des plants, le nombre

de talles, le rendement en paille et en grain du riz. La séparation des moyennes a été faite par comparaison multiple ajustée par le test de Student Newman Keuls au seuil de 5 %.

RESULTATS

Déterminants chimiques de la toxicité ferreuse du sol

Les parcelles de l'expérimentation sont moyennement acides. Les sols des parcelles T3 ont les plus fortes teneurs en fer bien que pour l'ensemble des sols on remarque une dominance du fer dans le sol (Tableau III). Les sols de haut de pente (T1) ont en moyenne la plus forte valeur de potentiel redox (Eh), suivi de ceux de la mi-pente (T2) et enfin celle de bas de pente (T3).

Tableau III : Propriétés chimiques du sol déterminant la toxicité ferreuse
(valeur moyenne \pm erreur standard)

Trait	Prof	pH	Eh	Fe Total	Fe _{OX}	Fe ²⁺
	Cm		mV		ppm	
T1	00-10	5,95 \pm 0,23	95,51 \pm 17,39	8421,12 \pm 3434,22	5498,99 \pm 342,72	1573,08 \pm 241,10
	10-20	5,59 \pm 0,3	121,38 \pm 25,2	5559,27 \pm 1621,71	5270,51 \pm 913,93	1208,68 \pm 255,45
	20-30	6,04 \pm 0,42	76,07 \pm 19,5	4375,07 \pm 3625,01	3869,88 \pm 2513,30	1063,09 \pm 402,13
T2	00-10	5,98 \pm 0,28	88,36 \pm 16,5	8039,54 \pm 2861,85	3899,61 \pm 685,44	1718,19 \pm 303,33
	10-20	5,85 \pm 0,27	104,22 \pm 15,5	5559,27 \pm 572,37	3214,16 \pm 685,44	1439,32 \pm 238,67
	20-30	6,06 \pm 0,35	81,65 \pm 25,74	3559,27 \pm 953,95	2671,13 \pm 342,72	1283,65 \pm 557,89
T3	00-10	6,02 \pm 0,36	76,62 \pm 20,44	8421,12 \pm 2671,06	3214,16 \pm 799,68	1964,58 \pm 415,81
	10-20	5,94 \pm 0,18	87,59 \pm 9,91	7467,17 \pm 572,37	2757,20 \pm 685,44	1705,05 \pm 182,04
	20-30	6,02 \pm 0,4	83,70 \pm 27,31	6993,49 \pm 5055,93	2442,65 \pm 913,93	1640,87 \pm 403,78

Trait = Traitements ; Prof = Profondeur du sol ; Eh = potentiel redox ; Fe = Fer Total ; Fe_{ox} = Fer libre ; Fe²⁺ = ion ferreux

Effet du régime d'inondation sur la hauteur des plants et le nombre de talles par plant

Les résultats de l'analyse de variance montrent que le régime d'inondation n'a pas un effet

significatif ($P=0,329$) sur la hauteur des plants (Tableau IV). Néanmoins, les plants du régime d'inondation temporaire (T2) ont montré la hauteur moyenne la plus élevée (Figure 1).

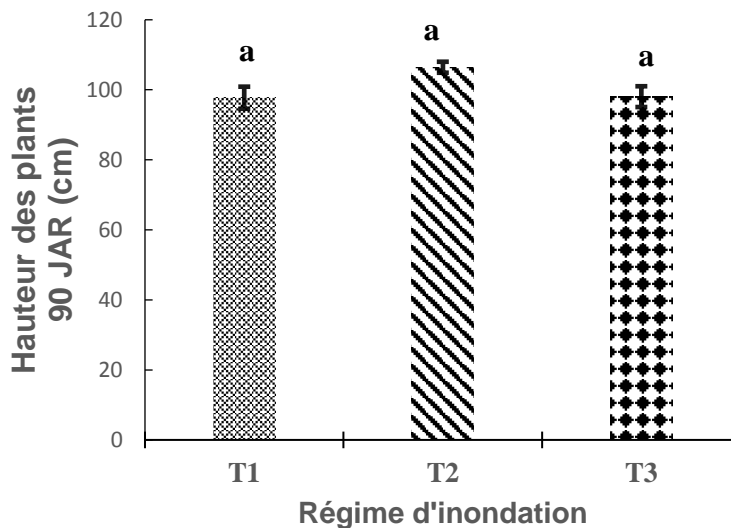


Figure 1: Effet du régime d'inondation sur la hauteur des plants

Les barres représentent les erreurs standards considérant le régime d'inondation. Les barres portant la même lettre alphabétique ne sont pas significativement différentes ($P > 0,05$) selon le test de Student Newman Keuls. T1 = Absence d'inondation, T2 = Inondation temporaire, T3 = Inondation permanente

Le régime d'inondation a une influence très hautement significative ($P < 0,0001$) sur le nombre de talles totales et le nombre de talles fertiles (Tableau IV). La figure 2 montre que les

plants du T2 présentent respectivement les nombres moyens de talles totales et de talles fertiles les plus élevés (Talles totales : $11,41 \pm 0,29$; Talles fertiles : $9,92 \pm 0,28$).

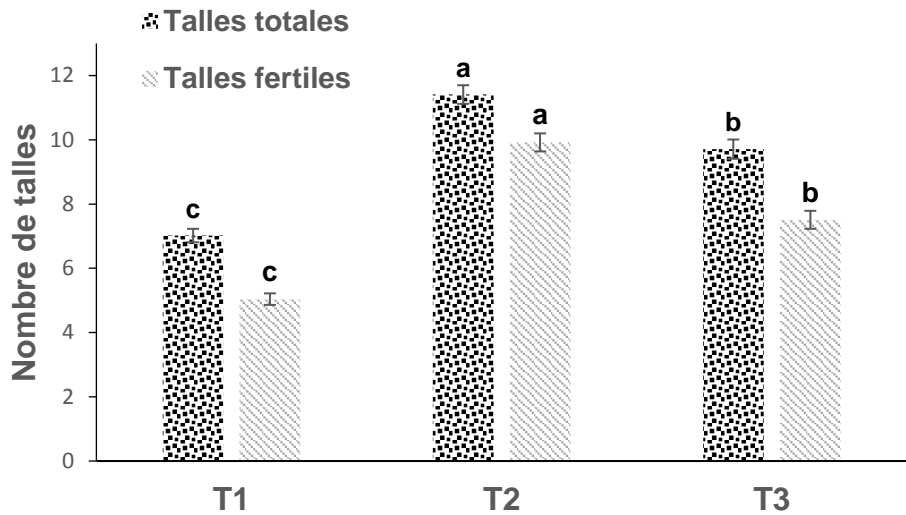


Figure 2: Effet du régime d'inondation sur le nombre de tiges

Tableau IV : Résultats de l'analyse de variance à un facteur (Valeur de F) des paramètres de croissances du riz considérant le régime d'inondation

Source de variation	Degré de liberté	Hauteur	Talles	Talles fertiles
Régime d'inondation	2	1.16 ns	69.05***	95.84***

ns : $P > 0,05$; *** : $P < 0,001$ **Effet du régime d'inondation sur le rendement en pailles et en grains de riz**

L'analyse de la variance montre que le régime d'inondation a une influence très hautement significative ($P < 0,0001$) sur le rendement en paille et en grain du riz dans le bas fond

(Tableau V). Le T2 a donné le rendement en pailles (21 gMS/plant) le plus élevé et le T1 a le plus faible rendement en pailles (Figure 3). Les rendements en grains de riz sont de $1,55 \pm 0,15$ t/ha, $3,00 \pm 0,29$ t/ha et $2,14 \pm 0,2$ t/ha respectivement pour T1, T2 et T3 (Figure 4).

Tableau V : Résultats de l'analyse de variance à un facteur (Valeur de F) des paramètres de production du riz considérant le régime d'inondation

Source de variation	Degré de liberté	Biomasse sèche	Rendement sec
Régime d'inondation	2	42.13***	12.55***

*** : $P < 0,001$

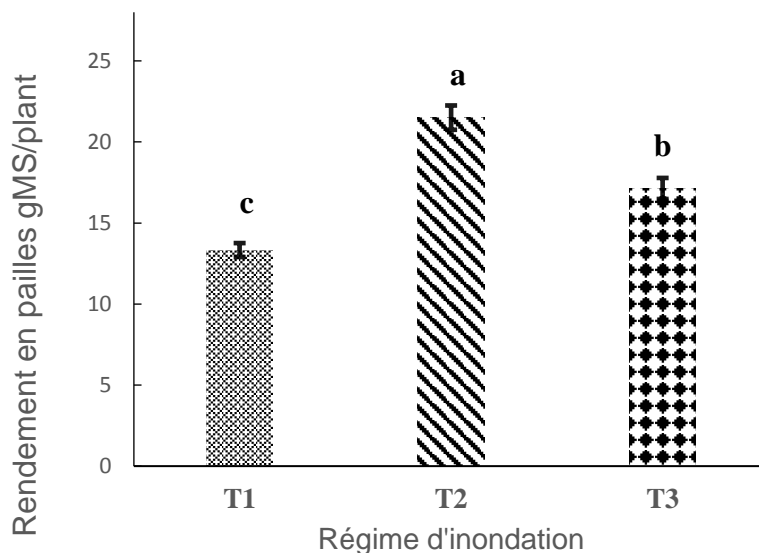


Figure 3: Effet du régime d'inondation sur la production en paille de riz

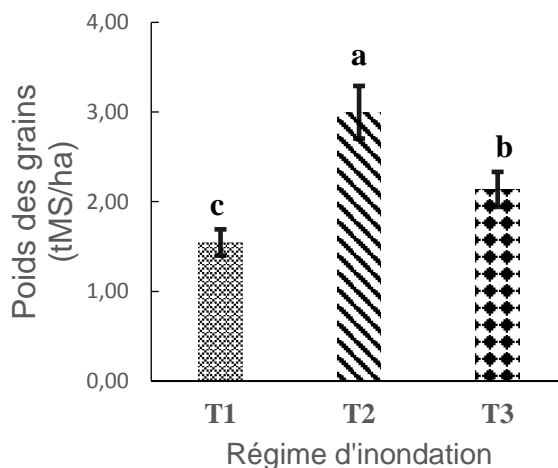


Figure 4: Effet du régime d'inondation sur le rendement en grain de riz

DISCUSSION

Les résultats de la caractérisation chimique du sol montrent que le sol du bas-fond d'Awokpa est moyennement acide d'après l'échelle de pH

définie par MALLOUHI, (1997). En se référant à l'échelle de qualification de l'état de réduction des sols basé sur le potentiel d'oxydoréduction proposé par VIZIER, (1990), le sol du bas-fond a subi une réduction moyenne. Toutefois il faut

signaler que les sols sous inondation permanente sont plus réduits (car présentant de faibles valeurs d'Eh) que ceux des autres régimes d'inondation. Cette situation s'explique par un effet de pente où les casiers en bas de pente sont inondés en permanence (PATRICK et REDDY, 1978). Les résultats de la caractérisation du sol du bas fond permettent de conclure qu'il 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 seuils tolérables de teneur en ions ferreux dans la solution du sol des bas-fonds sont de 10 à 2000 ppm (ADRAO, 2006). S'agissant du fer libre, notre étude a montré un important dépassement de ce seuil supérieur pour tous les régimes d'inondation (tableau 3). Les valeurs de fer libre dans les horizons superficiels du sol étudié témoignent d'une toxicité ferreuse. En effet, selon DIATTA et al., (1998), au-delà d'une concentration de l'ordre de 500 ppm, les symptômes de toxicité ferreuse apparaissent chez le riz. La concentration élevée en fer ferreux 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 ; ce qui a entraîné les fortes teneurs en Fe^{2+} observées au niveau du T3 comparativement aux autres traitements. Cette situation s'explique par les conditions réductrices du fer rencontrées fréquemment dans les sols engorgés provoqués par une inondation permanente augmentant ainsi la quantité du fer ferreux (Fe^{2+}) absorbable par la plante (AUDEBERT et FOFANA, 2009 ; MBONANKIRA, 2014). La faible teneur en Fe^{2+} observée au niveau du T1 est due au positionnement des casiers rizicoles sur la toposéquence. En effet, sur les sols hydromorphes, la migration du fer le long de la toposéquence par lessivage latéral est importante pour l'enrichissement absolu des sols 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 de pente (DIATTA et al., 1998).

Les résultats ont montré que le régime d'inondation a eu une influence significative sur le nombre de talles, la production en paille et en grain de riz. Le T2 a donné les meilleurs paramètres de production (hauteur, nombre de talles) ainsi que le rendement le plus élevé. Ces résultats sont conformes à ceux d'autres auteurs (RAES et al., 2007, WOROUE et al., 2013 et TOURE 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 (ADRAO, 2006). Cette situation peut s'expliquer d'une part par le fait que la combinaison des conditions aérobie et anaérobie dans les sols à toxicité ferreuse 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 T2 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 régime d'inondation n'a pas d'effet significatif sur la hauteur des plants (WOPEREIS et al., 2004). L'effet de la toxicité ferreuse se manifeste également sur les caractéristiques de croissance et de développement tel que la hauteur, le nombre de talles et le nombre de panicules (AUDEBERT 2006). 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 régime d'inondation suivie de drainage (T2) 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 régime ont donné les nombres de talles les plus élevés comparativement aux deux autres régimes d'inondation (T1 et T3). 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 T1, le faible niveau de tallage peut s'expliquer par le niveau de fertilité des sols. En effet il a été démontré que le T1 a été placé en haut de pente, or les sols de ce niveau de la toposéquence présentent 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 régime. Il faut signaler que les rendements obtenus sont largement inférieurs au rendement potentiel de la variété utilisée qui est en moyenne 6 t/ha. Ce qui témoigne de la sévérité de la toxicité ferreuse dans le bas-fond. Les pertes occasionnées par ce stress sont évaluées à 74,16 % pour T1, 50 % pour T2 et 64,33 % pour le T3. Pour tous les traitements confondus, les pertes sont évaluées à 62,83 %.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont permis de dire que l'inondation a une influence sur la production du riz. En effet, l'inondation excessive des casiers rizicoles est une condition favorable à l'apparition de la toxicité ferreuse du sol occasionnant des pertes en grains de riz évaluées à 62,83 %. Cette étude a permis de montrer qu'un drainage régulier des casiers rizicoles inondés améliore le rendement en grain de riz, mais aussi les paramètres de production. D'une manière générale, le drainage peut être suggéré comme technologie de gestion des sols et des eaux pour une meilleure gestion des bas-fonds afin d'atténuer les effets de la toxicité ferreuse. Il peut être considéré comme une stratégie d'adaptation aux changements climatiques induisant les inondations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ABEL G-J. 2009. *Etude sur le développement des filières riz et maraîchage au Bénin*. CTB ; 77 p.
2. ADRAO, 2006. *Toxicité ferreuse dans les systèmes à base riz d'Afrique de l'Ouest, Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO) Cotonou, Bénin*. 196 pp.
3. ADRAO, 2008. *Africa Rice Trends, 2007*. The Africa Rice Center, Cotonou, Benin, 74 pp.
4. AFRICA RICE, 2013. *La science rizicole pour la sécurité alimentaire à travers le renforcement de l'agriculture familiale et l'agro-industrie en Afrique*, 3^{ème} Congrès du riz en Afrique, 21-24 Octobre 2013, Yaoundé (Cameroun). 296p
5. AFRICA RICE, 2014. *Suffisamment de terres, suffisamment d'eau. Article du mois*. [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.
6. AGOSSOU D.S.M., TOSSOU C.R., VISSOH V.P., AGBOSSOU K.E., 2012. Perception des perturbations climatiques, savoirs locaux et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles béninois. *African Crop Science Journal*, 20 : 565 - 588
7. AUDEBERT, A., FOFANA, M., 2009. Rice Yield Gap due to Iron Toxicity in West Africa. *J. Agron. Crop Sci.*, 195, 66–76.
8. 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.
9. BRAY, R.H., KURTZ, L.T., 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59, 39–45.
10. CCR-B, 2012. *Rapport technique d'activités, Mai 2009 – Avril 2012*. Secrétariat Permanent ; 43 p.

11. CHERIF, M., AUDEBERT, A., FOFANA, M., ZOUZOU M., 2009. Evaluation of iron toxicity on Lowland irrigated rice in West Africa. *Tropicultura*, 27, 2:88-92.
12. DIATTA S., AUDEBERT A., SAHRAWAT K.L., TRAORE 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.
13. 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.
14. FAO, 2012. <http://www.fao.org> consulté le 09 nov. 2016.
15. 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.
16. HAEFELE S.M., NAKLANG K., HARNPICHITVITAYA D., JERAKONGMAN S., SKULKHU E., ROMYEN P., PHASOPA S., TABTIM S., SURIYA-ARUNROJ D., KHUNTHASUVON S., KRAISORAKUL D., YOUNGSUK P., 2006. Factors affecting rice yield and fertilizer response in rainfed lowlands of Northeast Thailand. *Field Crops Research*, 98 : 39–51.
17. 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.
18. 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.
19. IAVS, 2011. *Formation aux outils et méthodologies pour l'intégration des changements climatiques dans les politiques et stratégies de sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest*. Ouagadougou, BURKINA FASSO.
20. IGNATIEFF, V., 1941. Determination and behaviour of ferrous iron in soils. *Soil Sci.* 51, 249-263.
21. IPCC, 2001. Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Rapport spécial sur l'évaluation de la vulnérabilité en Afrique. *Island Press*, Washington, 53 p.
22. IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S. D., Qin M., Mannin Z., Chen M., Marquis K. B., Averyt M., Tignor et Miller H.L.], *Cambridge University Press*, United Kingdom and New York, 996 pp.
23. KJELDAHL J., 1883. *A new method for the estimation of nitrogen in organic compound*. *Zeitschrift Fur Analytische Chemie* 22, 366.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. MEPN, 2008. *Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques du Bénin (PANA- Bénin)*. Cotonou. 81p

28. PANA-BENIN, 2008. *Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques au Bénin*. MEPN/UNDP, 81p.
29. 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.
30. RAES D., KAFIRITI E.M., WELLENS J., DECKERS J., MAERTEN A., MUGOGO S., DONDEYNE S., DESCHEEMAER K., 2007. Can soil bunds increase the production of rain-fed lowland rice in South Eastern Tanzania? *Agricultural Water Management* 89, 229–235.
31. ROBINSON G. W., 1949. *Soils: Their origin, constitution and classification*. London. Thomas Murby and Co N.Y.J., Wiley and Sons Inc. 573 p.
32. SIE Y., MOUKOUMBI S., DOGBE B., TOULOU J., AFOKPE P., 2013. *Fiches techniques : Soixante nouvelles variétés de riz de type NERICA* pour la riziculture de bas-fond/irriguée: NERICA-L1 à -L60*.
33. TOURE A., BECKER M., JOHNSON D.E., KONE 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.
34. TSUBO M., BASNAYAKE J., FUKAI S., SIHATHEP V., SIYAVONG P., SIPASEUTH CHAMPHENGSAI M., 2006. Toposequential effects on water balance and productivity in rainfed lowland rice ecosystem in southern Laos. *Field Crops Research*, 97, 209-220.
35. 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*.
- 36; WOPEREIS T.D., PHILIP I., DIAK S., MARCO C., 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 sub-saharienne. Manuel technique*. ADRAO. Cotonou (Bénin), 124p.
37. 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
38. YABI I., 2008. Etude de l'agroforesterie à base d'anacardier et des contraintes climatiques à son développement dans le centre du Bénin. *Thèse de Doctorat unique, LECREDE/ FLASH/ EDP/ UAC, 258p*.
39. YABI I., AFOUDA F. 2012. Extreme rainfall years in Benin (West Africa), *Quaternary International*, 262(7): 39-43.