

Détermination de la dose et fréquence d'irrigation efficiente du blé tendre dans un système de rotation après le riz sur sol hydromorphe « *Danga* », en zone Office du Niger, Mali

Brahima TRAORE^{1*}, Sekou Sala GUINDO¹, Brehima TANGARA¹, Mahamane Halidou MAIGA², Oumarou GOITA¹ et Bandiougou DIAWARA¹

¹ *Institut d'Economie Rurale du Mali, BP 258, Rue Mohamed V Quartier du Fleuve Bamako, Mali*

² *Institut de Pédagogie Universitaire, sis à Kabala, BP E475, Bamako Mali*

* Correspondance, courriel : brahimat.traore@yahoo.fr

Résumé

Des insuffisances sur la conduite agronomique et la gestion de l'eau dans la production du blé existent en zone Office du Niger (ON). La présente étude a été conduite à la sous station de Kogoni en zone Office du Niger pendant les saisons froides 2020-2021 et 2021-2022. L'objectif de ce travail est d'analyser les caractéristiques des paramètres de base de la gestion technique de l'eau d'irrigation gravitaire du blé en rotation avec le riz, en vue de contribuer à l'amélioration de la production de cette culture en zone Office du Niger. Les paramètres de la plante, du sol et du climat du site ont été déterminés pour mieux caractériser les paramètres de l'irrigation du blé. Les analyses ont été faites à l'aide logiciel Statistix pour la comparaison des moyennes au seuil de 5 %. Les apports d'eau pratiques net et brut obtenus pendant le cycle du blé sont respectivement de 3000 m³/ha et 5000 m³/ha. Le rendement moyen de blé est de 5280kg/ha avec la variété E 29 dans la fréquence 10 jours d'arrosage. Une telle gestion efficiente de l'irrigation du blé peut contribuer à minimiser les remontées capillaires pouvant favoriser la dégradation par alcalinisation des sols sous irrigation liée à une nappe phréatique sub-affleurante.

Mots-clés : *irrigation, besoins en eau, rotation riz-blé, Office du Niger, Mali.*

Abstract

Determination of the dose and frequency of efficient irrigation of soft wheat in a rotation system after rice on hydromorphic soil “Danga”, in the Office du Niger zone, Mali

Inadequacies in agronomic and water management practices for wheat production exist in the Office du Niger zone. The present study was conducted at the sub-station of Kogoni in the Office du Niger zone during the cold seasons 2020-2021 and 2021-2022. The objective of this work is to contribute to the improvement of the production and productivity of soft wheat in the Office du Niger zone. Plant, soil and climate parameters of the site were determined to better characterize the parameters of wheat irrigation. The practical net and gross water inputs obtained during the wheat cycle are 3000 m³/ha and 5000m³/ha respectively. The average yield of wheat is (5280kg/ha) with the variety E 29 in the frequency 10 days of watering. An Excel data base was used for data entry and control. Analyses were carried out using Statistix SPSS software for comparison of means at the 5 % threshold. Efficient technical management of wheat irrigation in this way can help to minimize capillary rise, which can lead to soil degradation due to alkalization under irrigation linked to a sub-flush water table.

Keywords : *technical irrigation, water requirements, rice wheat rotation, Office du Niger, Mali.*

1. Introduction

Le blé est l'une des céréales la plus consommée au Mali avec une demande en consommation qui atteint actuellement 365 000 tonnes par an, alors que la production locale ne dépasse guère 45 000 tonnes [1], soit moins de 15 % des besoins de consommation. Les rendements sont relativement bas (1,5 à 2 tonnes/ha en moyenne) par rapport au potentiel des nouvelles variétés vulgarisées (4 à 6 tonnes/ha), à cause de la faible maîtrise des techniques culturales liée surtout aux apports d'eau d'irrigation en fonction des types de sol [1]. En 2020, environ 357 000 tonnes de blé grain et 27700 tonnes de farines ont été importées pour une valeur monétaire d'environ 69 milliard FCFA [2]. Le déficit en blé a été exacerbé par : la fermeture des frontières en 2020 en raison de la crise sanitaire (COVID 19) et la guerre en Ukraine (2022) qui ont déclenché un ralentissement des échanges commerciaux entre les pays. Cependant, le Mali a le potentiel d'augmenter la superficie de blé jusqu'à 300 000 ha qui peuvent être exploités pour accroître la production nationale de blé au cours des prochaines années. Par conséquent, il est physiquement possible et économiquement faisable pour le Mali de cultiver plus de blé et de transformer le secteur pour augmenter les revenus des agriculteurs et des autres parties prenantes, créer des emplois pour les jeunes et les femmes et atteindre une plus grande autosuffisance en blé d'ici 2025 [3]. Au vu des potentialités ci-dessus mentionnées, les efforts du gouvernement sont actuellement orientés essentiellement vers la satisfaction des besoins nationaux avec comme priorité une volonté politique engagée d'élargir la production du blé dans la zone de l'Office du Niger, principale zone de production rizicole. Cette zone connaît actuellement la dégradation des sols par alcalinisation, sodisation /salinisation [4] et les pénuries d'eaux pour irriguer les parcelles de riz aussi bien en saison sèche et pluvieuse [5]. Comme conséquence, nous constatons une baisse de la production rizicole.

Cette baisse de production serait liée en partie : (i) à la proximité de la nappe phréatique de la surface du sol (environ 2 m pendant toute l'année) favorisant des remontées capillaires et des dépôts de sels à la surface du sol et (ii) à une insuffisance d'eau à la parcelle pour le contrôle des sels [5]. L'Office du Niger, au cours de ces dernières années, encourage les agriculteurs à faire la rotation du riz avec des cultures moins consommatrices d'eau telles que, les cultures maraichères et le blé. Ainsi, l'introduction du blé dans le système a été proposée comme une alternative de lutte contre la dégradation des sols et la gestion efficace de l'eau dans ce système de riziculture par le gouvernement pour augmenter la production et la productivité agricole du blé et de l'eau [4]. Les travaux effectués sur l'évaluation multi locale de variétés prometteuses du blé tendre au Mali ont montré que certaines variétés peuvent donner des rendements de plus 3500 kg/ha en milieu paysan [6]. La valeur boulangère et la qualité technologique des grains des variétés de blé tendre en diffusion au Mali sont bonnes avec une teneur en protéine supérieure à celui de la norme internationale qui est de 11 % [6]. Cependant peu de travaux de rotation riz-blé ont été effectués sur les doses et fréquences d'irrigation du blé. Les besoins en eau du blé ont été estimé à 4500 à 6500 m³/ha [7, 8]. Les résultats obtenus dans le cadre de la détermination des besoins en eau du blé sous irrigation gravitaire dans le cercle de Diré au Mali, ont montré qu'il faut une consommation d'eau de 5000 m³/ha en 10 ou 12 irrigations par campagne [9]. Il ressort des travaux effectués en zone Office du Niger, qu'avec une consommation d'eau nette de 3000 m³/ha (brute de 4500 m³/ha) en 10 irrigations, la production est de 3391 kg/ha en blé [10]. Ses résultats sont issus de l'expérimentation d'une seule année (campagne). Ce qui ne saurait les confirmer. Il s'agira à travers cette étude de mettre au point des technologies efficaces de gestion technique de l'eau dans un système de succession culturale riz-blé en zone Office du Niger. Ainsi l'objectif est de déterminer les doses et fréquences d'irrigation et leurs effets sur des variétés de blé tendre en Zone Office du Niger (Mali). Cela permettrait d'assurer la diversification des cultures à l'Office du Niger et contribuer l'autosuffisance alimentaire au Mali.

2. Matériel et méthodes

2-1. Site de l'étude

Les essais ont été installés sur sol hydromorphe *Danga'* à la sous-station de Kogoni (14°43'20" de latitude nord et 6°01'46" de longitude ouest), dans la zone de production agricole du Kouroumari à l'Office du Niger (**Figure 1**). Les sols "*Danga'*" sont les plus dominants avec 56 % par rapport aux autres types de sols rizicoles en zone Office du Niger [11].

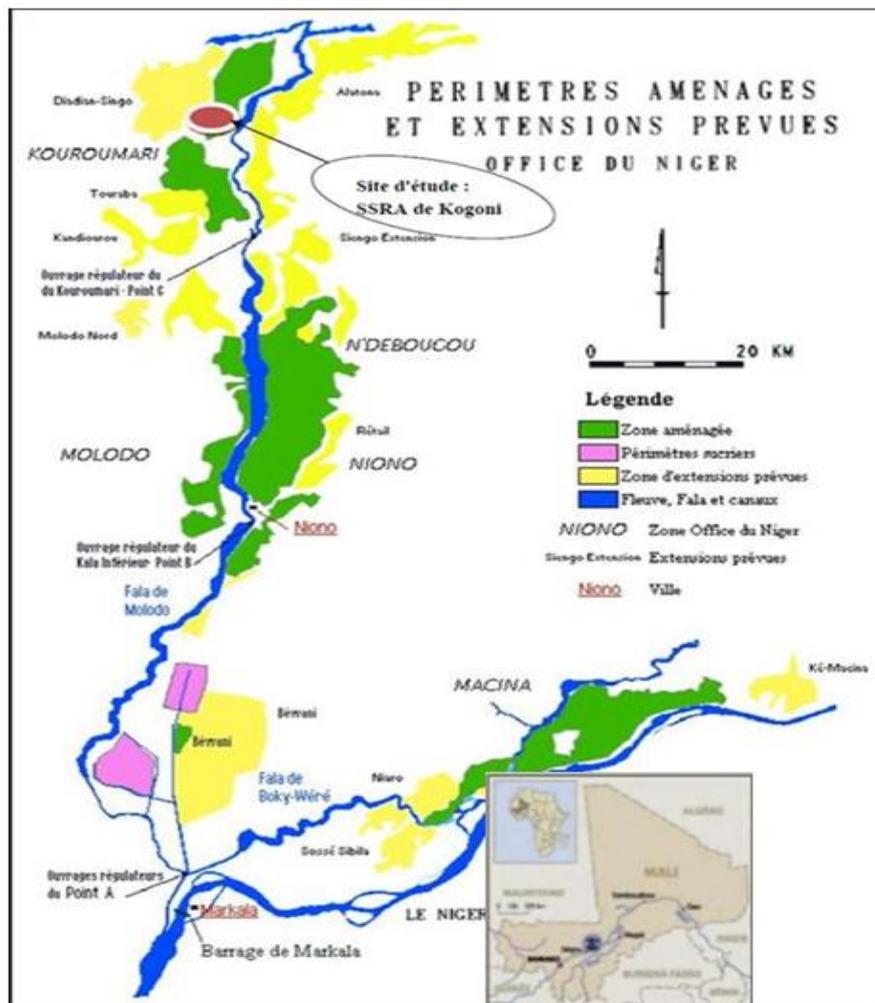


Figure 1 : Carte de localisation du site d'étude au sein des périmètres de l'Office du Niger (source : Touré, 1997)

2-2. Caractérisation du site d'étude

Trois opérations ont été conduites pour caractériser le site d'étude. Il s'agit : (i) de l'acquisition de données climatiques (Evapotranspiration potentielle ETP), (ii) de la détermination de paramètres physiques du sol du site (type de sol et densité apparente d_a) et (iii) de la détermination des paramètres hydrodynamiques du sol du site (perméabilité à saturation du sol K_s , taux d'humidité, réserves en eau).

2-2-1. Acquisition de données climatiques

Le climat est l'un des facteurs qui influe le plus sur la quantité d'eau que la plante perd par évapotranspiration [7]. Les données climatiques de 2019 à 2021 axées sur la zone d'étude sont issues du site de la NASA [25].

Elles concernent, les températures, la pluviométrie, les humidités relatives, l'évapotranspiration potentielle, la vitesse du vent et l'insolation. Ces paramètres ont été utilisés pour l'évaluation des Besoins en Eau du blé à travers la **Formule** :

$$BE = ETM = Kc \times ETP \quad (1)$$

ETM: besoins en eau de la culture (mm); *Kc*: Coefficient cultural de la culture (sans unité);
ETP: Evapotranspiration Potentielle de la culture (mm).

2-2-2. Détermination des paramètres physiques du sol

2-2-2-1. Détermination du type de sol

Un échantillon de sol est prélevé au centre de chaque parcelle élémentaire dans l'horizon [20 - 30] cm correspondant à la zone maximale explorée par le système racinaire du blé. Ces échantillons au nombre de neuf (9) ont été analysés. Les analyses ont porté sur la détermination de la granulométrie du sol (pourcentage d'éléments minéraux constitutifs du sol) aboutissant à la connaissance du type de sol en plaçant ces pourcentages d'éléments minéraux dans le triangle Textural de PIPELINE.

2-2-2-2. Détermination de la densité apparente (*da*)

En pratique, connaissant le type de sol, des recherches bibliographiques ont permis de déduire la densité apparente du sol des parcelles expérimentales.

2-2-3. Détermination des paramètres hydrodynamiques du sol

2-2-3-1. Détermination de la perméabilité du sol

La perméabilité *K* (m/s) est déterminée par le calcul de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. Dans ce travail, la méthode de PORCHET a été adoptée pour mener le test en raison de sa facilité pratique de mise en œuvre [10]. Pour cela, un trou cylindrique de 50 cm de diamètre et de 1 mètre de profondeur environ a été creusé à l'aide d'une tarière au milieu de chacun des trois traitements parcelaires *T* du dispositif expérimental. Après l'avoir rempli d'eau, on note la variation du niveau de l'eau en fonction du temps. On note également la hauteur *h1* de l'eau à l'instant *t1* et la hauteur *h2* à l'instant *t2*. Soit *r* le rayon du trou (m); la vitesse d'infiltration *K* (m/s) est donnée par la **Formule** :

$$K = \frac{r}{2(t_2 - t_1)} \times \log \frac{(h_1 + \frac{r}{2})}{(h_2 + \frac{r}{2})} \quad (2)$$

où, *r* : rayon du trou (m); *h1* et *h2* : hauteurs de la colonne d'eau (en m) au temps *t1* et *t2*; *t1* et *t2* sont pris après 60 mn en moyenne pour s'éloigner de la période correspondant à la saturation propre du terrain.

2-2-4. Taux d'humidité et réserves en eau du sol

Pour la détermination du taux d'humidité et des réserves en eau du sol), la méthode gravimétrique a été utilisée en raison de la disponibilité du matériel utilisé et sa facilité de mise en œuvre [10]. Pour cela, le sol des parcelles expérimentales a été irrigué à leur capacité au champ (HCR). Une fosse pédologique de 1 m de longueur sur 1 m de largeur et 0,6 m de profondeur a été réalisée au milieu de chacun des traitements T1, T2, T3. Chaque traitement correspond à une fréquence d'irrigation (T1 = fréquence d'irrigation de 15 jours,

T2 = fréquence d'irrigation de 10 jours et T3 = fréquence d'irrigation de 7 jours). Dans chaque fosse, des prélèvements d'échantillons de sol sont faits à 40 cm (correspondant à la profondeur maximale explorée par les racines du blé en pleine végétation) à raison d'un échantillon par horizon de [0 - 10], [10 - 20], [20 - 30] et [30 - 40] cm. Ces prélèvements d'échantillons sont faits à l'aide de cylindres métalliques qui est enfoncé lentement dans le sol à l'aide d'un marteau (**Figure 2**) ci-dessous. On obtient ainsi des échantillons de sol non remaniés. Ces échantillons prélevés sont pesés *in-situ* à l'aide d'une balance électronique et ensuite ensachés et transportés au laboratoire du Centre Régional de Recherche Agronomique de l'Institut d'Economie Rurale (IER) de Niono où ils sont portés à l'étuve pendant 48 heures à 105°C pour mesurer leurs poids secs. L'humidité pondérale (en %) est alors calculée par la **Formule** :

$$H_p = \frac{(\text{poids de sol humide} - \text{poids de sol sec})}{(\text{poids de sol sec})} \times 100 \quad (3)$$

L'estimation de l'humidité au point de flétrissement permanent (HPF) a été déduite de l'humidité à la capacité de rétention (HCR) avec

$$HPF = \frac{1}{2} \quad (4)$$

La connaissance de tous ces paramètres a permis d'évaluer au niveau des couches du sol, la Réserve en eau Utilisable (RU) et celle Facilement Utilisable (RFU) par la culture. Les **Formules** suivantes ont permis de les calculer :

$$RU = da \times (HCR - HPF) \times Z \quad (5)$$

et

$$RFU = \alpha \times RU \quad (6)$$

où, *RU* : Réserve en eau Utilisable par la culture (en mm) ; *RFU* : Réserve en eau Facilement Utilisable par la culture (en mm) ; $0,5 \leq \alpha < 1$ (la valeur 2/3 est la plus couramment utilisée) ; *da* : densité apparente du sol (1,2 à 1,6) ; *HCR* : humidité pondérale du sol à la capacité de rétention ou capacité au champ (en %) ; *HPF* : humidité pondérale du sol au point de flétrissement (en %) ; *Z* : profondeur de la couche de sol explorée par les racines de la culture (en dm).

Cette méthode gravimétrique a été toujours utilisé 24 heures avant chaque irrigation pour déterminer la réserve en eau du sol (R_{sol}) induite par l'irrigation d'avant (jour *j-1*) en vue de la prendre en compte dans les besoins en eau d'irrigation du jour *j*.



Figure 2 : Prélèvement d'échantillon de sol non remanié à l'aide de cylindre

2-3. Dispositif expérimental

Le dispositif installé est un factoriel avec comme facteur principale les variétés de blé et facteur secondaire les fréquences d'irrigation (T1 = fréquence d'irrigation de 15 jours, T2 = fréquence d'irrigation de 10 jours et T3 = fréquence d'irrigation de 7 jours) en trois répétitions (T1R1, T1R2, T1R3 ; T2R1, T2R2, T2R3 ; T3R1, T3R2, T3R3). Sur l'ensemble des campagnes expérimentales (2020-2021 et 2021-2022), le dispositif global est resté le même, sauf que le matériel végétal (12 variétés de blé) a été réduit à six (6) variétés de blé sélectionnées qui se sont montrées agronomiquement performants sur la base du rendement pendant la dernière campagne 2021-2022. Dans chaque Répétition R de parcelle élémentaire, les variétés de blé sont semées en ligne continue. Les parcelles élémentaires sont séparées de 0,40 m et la distance entre les lignes de semis est de 0,20 m. La superficie élémentaire pour chaque variété est de : 4 m × 2,5 m, soit 10 m².

2-3-1. Matériel végétal utilisé et conduite agronomique de la culture du blé

Le matériel végétal utilisé dans les expérimentations est le blé tendre en contre saison après la culture du riz pendant la saison des pluies. La variété de riz utilisée (**Figure 3A**) est le DKA1 qui est une variété précoce de 90 à 100 jours. Quant au blé tendre (**Figure 3 B et C**), douze variétés (12) ont été utilisées dont onze (11) de cycle moyen (95 - 120 jours) comparées au témoin de cycle court (90 jours) pendant la première campagne d'expérimentation (2020 - 2021).

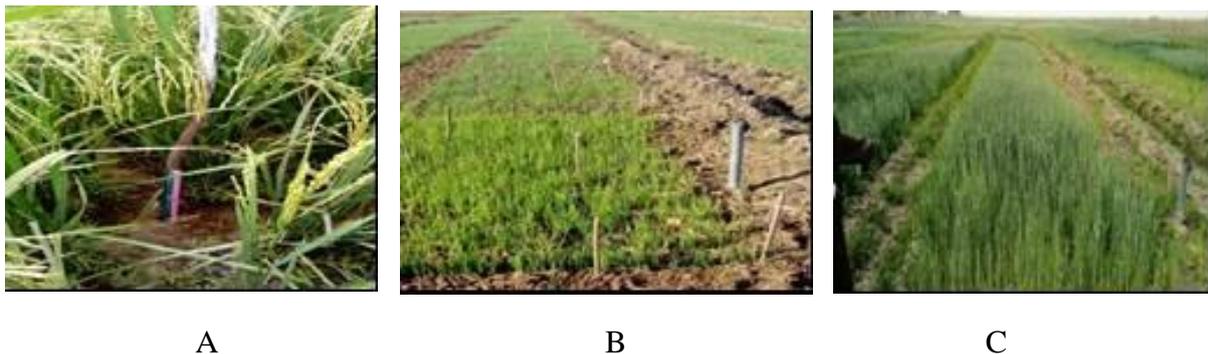


Figure 3 : Parcelles d'essais en riz (A) et en blé début tallage (B) équipées de réglettes et de piézomètre (hiver 2020) ; figure (C) plants de blé au stade épiaison [10]

Pendant la deuxième campagne d'expérimentation (2021-2022), les six meilleures variétés de blé qui se sont bien comportées sur les douze (12) ont été sélectionnées et reconduite en essai (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Liste des six (6) variétés de blé soumises aux différentes fréquences d'irrigation à la sous station de Kogoni (campagne 2021 - 2022)

N°	Entrée	Variétés
1	E 14	2/8/VEE'S/7/CEBECO148/3/RON/CHA//BB/NOR67/5/HK/38MA
2	E 17	NORMAN
3	E 18	WEAVER/WL3928//SW 89.3064/3/KAUZ//MON/CROW'S'
4	E 22	KAUZ'S/SERI/3/KAUZ//KAUZ/STAR
5	E 29	ZAKIA-5
6	E49	REYNA-19

Le semis du blé a été fait en ligne continue à la dose 120 kg de semences par hectare. L'écartement entre les lignes est de 20 cm. La date de semis pour la campagne (2020 - 2021) était le 19 décembre et le 21 décembre

pour la campagne (2021-2022). Par rapport à la fertilisation, la fumure organique a été apportée comme engrais de fond à la dose de 10 t/ha. A la levée des plants, le DAP a été appliqué à la dose de 100 kg/ha. L'urée a été apportée à la dose de 150 kg/ha en deux fractions, dont 75 kg au tallage et 75 kg à l'initiation paniculaire.

2-3-2. Réseau hydraulique et pilotage des irrigations

L'irrigation est de type gravitaire, et les parcelles élémentaires sont irriguées indépendamment les unes des autres. Des mesures de hauteur d'eau et de temps d'irrigation faites sur la prise de la rigole d'arrosage au moment des irrigations, ont permis d'évaluer des Besoins Brutes d'irrigation (BB) pour satisfaire les apports pratiques d'eau aux parcelles élémentaires ou Besoins Net d'irrigation (BN), permettant ainsi d'évaluer l'Efficiencia E du réseau d'irrigation en place par la **Formule** :

$$E = \frac{BN}{BB} \times 100 \quad (7)$$

où, E : Efficiencia du réseau d'irrigation (en %) ; BN : Besoins Net d'irrigation a la parcelle (en mm) ; BB : Besoins Brutes d'irrigation en tête de la prise de la rigole d'arrosage (en mm).

Avant chaque irrigation, à la veille (24 h avant chaque irrigation) le taux d'humidité du sol est déterminé par la méthode gravimétrique au niveau de chaque Traitement parcellaire. Les échantillons de sol prélevés in situ ont permis de déterminer le pourcentage d'humidité initiale au temps t (Ht) par la **Formule** :

$$H_t = \frac{(\text{poids de sol humide} - \text{poids de sol sec})}{(\text{poids de sol sec})} \times 100 \quad (8)$$

L'estimation de l'humidité au point de flétrissement permanent (HPF) est déduite de l'humidité initiale (Ht) avec $HPF = \frac{1}{2} H_t$ [11]. La connaissance de tous ces paramètres a permis d'évaluer la Réserve en eau Utile à l'instant t (RU_t) qui correspond à la Réserve en eau sol (R_{sol}) à cet instant avant l'irrigation [12]. La **Formule** suivante permet de déduire RU_t.

$$RU_t = \frac{da}{100} (H_t - H_{pfp}) \times Z_r \quad (9)$$

avec, RU_t : Réserve Utile en eau du sol (R_{sol}) à l'instant t (en mm) ; da : densité apparente du sol ; H_t : pourcentage (%) humidité initiale du sol ; H_{pfp} : pourcentage (%) humidité du sol au point de flétrissement permanent ; Z_r : profondeur d'enracinement du blé dans les conditions de sol Limono-sableux (Danga) (en mm).

Les Besoins Théoriques [12] de chaque irrigation (en mm/fréquence d'irrigation) sont calculées par la **Formule** :

$$B_{th} = ETM - P_{eff} - R_{sol} \quad (10)$$

B_{th} : Besoins Théoriques en eau à apporter par irrigation (en mm) ; ETM : Besoins en eau du blé (mm), avec $ETM = K_c \times ETP$; K_c : coefficient cultural du blé et ETP (en mm) : Evapotranspiration Potentielle ; P_{eff} : la pluie efficace, soit $(0,8 \times P)$, avec P : pluie (en mm) ; R_{sol} : Réserves en eau du sol (en mm).

Dans le cadre du pilotage des irrigations, ces Besoins Théoriques en eau d'irrigation, calculés à la veille de chaque irrigation ont été pris comme références pour être apportés en pratique sur toutes les parcelles élémentaires.

2-4. Mesures piézométriques

Un transect de trois (3) piézomètres (**Figure 3 B**) est installé à 2,5 m de profondeur à travers les parcelles d'essai à raison d'un piézomètre par traitement T correspondant aux fréquences (7 jours, 10 jours et 15 jours). Des campagnes de mesures de la profondeur de la nappe, faites sur ces piézomètres à l'aide d'une sonde électrique de type 010 munie d'un ruban de 50 m de longueur, ont permis d'apprécier la dynamique de la nappe phréatique. Ces mesures ont été effectuées pendant le cycle cultural du riz (précédent cultural) et pendant la culture du blé.

2-5. Analyse des données

Une base de données a été élaborée avec le logiciel Excel pour la saisie et le contrôle des informations. Les analyses des données ont été faites avec le logiciel Statistix pour la comparaison des moyennes au seuil de 5 %.

3. Résultats

3-1. Type de sol

Les résultats de l'analyse texturale et granulométrique du sol des parcelles expérimentales sont consignés dans le **Tableau 2**. Ces résultats montrent une quantité importante de limon fin (moyenne de 67 %), une moyenne de 30 % de sable, et une très faible quantité d'argile (moyenne de 3 %). Ces pourcentages d'éléments minéraux, placés dans le triangle de texture confirment que les sols des parcelles expérimentales sont de type Limono Sableux (*Danga*). Ces sols possèdent une bonne capacité de rétention d'eau [10]. La densité apparente (d_a) des sols limono-sableux (*Danga*) a été considérée pour le calcul des taux d'humidité et des réserves en eau du sol des parcelles expérimentales [10]. Elle varie de 1,2 à 1,6 soit une moyenne de 1,4.

Tableau 2 : Texture et granulométrie du sol des parcelles expérimentales

N° laboratoire	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	T1	T1	T1	T2	T2	T2	T3	T3	T3
Spécification demandeur	point N1 [20-30] cm	point N1 [20-30] cm	point N1 [20-30] cm	point N2 [20-30] cm	point N2 [20-30] cm	point N2 [20-30] cm	point N3 [20-30] cm	point N3 [20-30] cm	point N3 [20-30] cm
% Sable (0,05-2,0 mm)	30	33	27	23	24	23	29	22	20
% Limon fin (0,002-0,05 mm)	64	65	71	73	72	73	69	74	78
% Argile (< 0,002 mm)	6	2	2	4	4	4	2	4	2

3-2. Perméabilité à saturation K_s : taux d'infiltration

Le **Tableau 3** donne les valeurs des vitesses de perméabilité à saturation (taux d'infiltration) du sol des traitements parcellaires. Les valeurs sont peu variables avec une moyenne de $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s, correspondant à 2,08 mm/h, soit 0,05 m/j. Ces valeurs montrent que ces sols sont peu perméables à imperméables et correspondent bien aux caractéristiques des sols Limoneux à Limono-sableux.

Tableau 3 : Perméabilité du sol des parcelles des traitements expérimentaux

Lieux de mesure	Perméabilité à Saturation du sol (Ks)		Classe de perméabilité
	Ks (m/s)	Ks (mm/h)	
T1R1 :15j	3,16.10 ⁻⁷	1,1376	Imperméable
T1R2 : 15j	5,35.10 ⁻⁷	1,926	Imperméable
T1R3 :15j	7,52.10 ⁻⁸	0,27072	Imperméable
Moyenne Freq 15j	3,09.10⁻⁷	1,11144	Imperméable
T2R1 : 10j	1,70.10 ⁻⁷	0,612	Imperméable
T2R2 :10 j	2,98.10 ⁻⁷	1,0728	Imperméable
T2R3 :10j	7,60.10 ⁻⁸	0,2736	Imperméable
Moyenne fréq 10 j	1,8.10⁻⁷	0,6528	Imperméable
T3R1 :7j	4,18.10 ⁻⁷	1,5048	Imperméable
T3R2 :7j	1,80.10 ⁻⁶	6,48	Peu perméable
T3R3 :7j	1,52.10 ⁻⁶	5,472	Peu perméable
Moyenne Fréq 7 j	1,23.10⁻⁶	4,4856	Peu perméable

3-3. Statut hydrique et réserves en eau du sol des traitements parcelaires

Le **Tableau 4** résume les valeurs moyennes des réserves en eau du sol des parcelles élémentaires soumises à des fréquences d'irrigation de 7 jours, 10 jours et 15 jours. Après la culture du riz irrigué de saison d'hivernage, ces réserves en eau du sol sont en moyenne de 57,62 mm d'eau. Ces réserves en eau ont permis de réduire les doses de pré-irrigation de 16 %, soit 84 mm en moyenne sachant que ces sols en monoculture de riz demandent une dose de pré-irrigation de 100 mm environ. Les valeurs moyennes des paramètres hydrodynamiques du sol des parcelles expérimentales varient peu d'une fréquence d'irrigation à l'autre. Elles sont en moyenne de 58 mm environ pour les réserves en eau du sol après la culture du riz, de 53 mm pour les R_{sol} avant chaque irrigation et de 230 mm pour les Réserves Utiles (RU).

Tableau 4 : Récapitulatif des caractéristiques des réserves moyennes en eau du sol des parcelles expérimentales (campagne 2020-2021 à 2021-2022)

Paramètres hydrodynamiques	Parcelles élémentaires			Valeur moyenne des réserves en eau du sol
	T3	T2	T1	
Valeurs moyennes des réserves en eau du sol après la culture du riz (mm)	53,03	64,44	55,35	57,62
Reserve moyenne en eau du sol (R _{sol}) avant chaque irrigation (mm)	62	55	43	53,33
Réserves Utiles en eau du sol (RU) (mm)	244,28	234,00	212,85	230,40
Réserves Facilement Utilisables en eau dans le sol (RFU) (mm)	162,85	156,18	141,9	154

T3 : Parcelles élémentaires recevant des irrigations pour une fréquence de 7 jours

T2 : Parcelles élémentaires recevant des irrigations pour une fréquence de 10 jours

T1 : Parcelles élémentaires recevant des irrigations pour une fréquence de 15 jours

3-4. Besoins en eau théoriques et pratiques nettes du blé

Les paramètres caractéristiques de l'irrigation des variétés de blé pour les trois (3) fréquences d'irrigation (7 jours, 10 jours et 15 jours) sont consignés respectivement dans les **Tableaux 5 et 6**. Pour la pré-irrigation du sol, il faut 84 mm d'eau d'irrigation en moyenne pour porter les sols limono-sableux de type *Danga* à leur capacité au champ après une culture de riz. Les Besoins nets en eau du blé sont en moyenne de 520 mm

pendant toute la campagne culturale. Après le riz de saison d'hivernage, les apports d'eau pratiques varient en moyenne de 204 mm pour une fréquence d'irrigation de 15 jours à 420 mm pour 7 jours de fréquence d'irrigation tandis que des apports de 301 mm sont enregistrés pour 10 jours de fréquence d'irrigation. En moyenne, les apports pratiques d'irrigation sont de 308 mm pour un nombre total de 9 dans la campagne culturale du blé. En somme, plus les fréquences d'irrigation sont courtes, plus les apports d'eau pratiques sont importants, plus le nombre d'irrigations au cours de la campagne est élevé.

Tableau 5 : Récapitulatif des besoins en eau (théoriques et pratiques) du blé et du nombre d'irrigations en fonction des fréquences d'irrigation à la sous station de Kogoni, zone de production agricole du Kouroumari (Office du Niger) (campagne 2020-2021 et 2021 - 2022).

Paramètres	Fréquence d'irrigation de 7 jours	Fréquence d'irrigation de 10 jours	Fréquence d'irrigation de 15 jours
Apport d'eau pour Pré-irrigation (mm)	80,81	84	86,33
Besoins Net en eau du blé/ETM (mm)	521	514	514
Besoins Théoriques Irrigation pour la RFU (mm) = RFU-Peff-Rsol	1412	910	595
Apports d'eau pratiques nets y compris la Pré-irrigation (mm)	416	301	204
Nombre total d'irrigations	14	9	6

3-5. Conduite agronomique et Pilotage des irrigations du blé

Les résultats d'analyse des deux campagnes (2020-2021 et 2021-2022) ont portés sur l'effet des fréquences d'irrigation (7, 10 et 15 jours) sur les variétés de blé. La vérification de la normalité et de l'homogénéité des données a été effectuées par le test de SHAPIRO-WILK. Les résultats d'analyse de variance portent sur le rendement du blé et l'efficience de l'irrigation.

3-5-1. Effets des fréquences d'irrigation sur le rendement du blé

Les résultats d'analyse sont consignés dans le **Tableau 6**. Pour le rendement grains, l'analyse a montré une différence significative ($P = 0,018$) entre les fréquences d'irrigations (7 jours, 10 jours et 15 jours) au seuil de 5 %. La fréquence d'irrigation 10 jours a enregistré le meilleur rendement (5280 kg/ha) et celle de 15 jours le plus faible rendement (4001 kg/ha). Par rapport au facteur variété, la différence est hautement significative ($P = 0,007$) pour le rendement grain. La variété E17 a enregistré le meilleur rendement (5232 kg/ha). Le bas rendement est obtenu avec la variété E37. Par rapport à l'interaction entre fréquence d'irrigation et variété aucune différence significative n'est observée pour les paramètres rendement (kg/ha).

Tableau 6 : Moyenne de rendement, (2020 -2021) à la SRA de Kogoni

Paramètres	Rendement (kg/ha)
7 jours	4333 B
10 jours	5280 A
15 jours	4001 B
Facteur2 (F2) : Variétés blé	
E9	3935 AB
E11	5151 A
E14	4091 AB
E17	5232 A
E18	4481 AB
E22	4822 AB
E23	4484 AB
E24	4650 AB
E29	4394 AB
E37	3384 B
E46	4408 AB
E49	4222 AB
Coefficient de variation (CV) %	26,63
Probabilités	
F1	0,018 *
F2	0,007**
F1*F2	0,51

3-5-2. Variation de l'efficience (efficacité) des paramètres agronomique et hydrauliques en fonction des fréquences d'irrigation sur le blé

L'analyse révèle que la fréquence d'irrigation de 10 jours est plus efficiente (46 % en moyenne) par rapport aux autres fréquences de 7 et 15 jours (**Tableau 7**). Cette fréquence étant confirmée encore une fois de plus comme la plus efficiente pour l'irrigation du blé, doit être conseillée aux acteurs de la production du blé tendre après la culture du riz sur sols limono-sableux.

Tableau 7 : Analyse des moyennes de l'efficience (efficacité) des paramètres (agronomiques et hydrauliques) et variétés de blé à la SRA de Kogoni

Variétés	Fréquences d'irrigation		
	7 jours	10 jours	15 jours
E 14	29,41 B	47,01 A	32,79 B
E 17	29,41 B	42,24 A	32,79 B
E 18	29,41 B	47,01 A	32,79 B
E 22	29,41 B	47,01 A	32,79 B
E 29	29,41 B	47,01 A	32,79 B
E 49	29,41 B	47,01 A	32,79 B
CV	20,9		
Probabilité	0,04		

3-6. Dynamique de la nappe phréatique en rapport avec l'irrigation du blé

L'évolution de la nappe phréatique dans les parcelles de blé (**Figure 4**) montre une baisse graduelle du niveau de la nappe phréatique du semis à la récolte. Le niveau de la nappe varie en moyenne de 0,53 m à 0,75 m du semis à la récolte par rapport au Terrain Naturel (TN), soit une profondeur moyenne de 0,64 m pendant toute la campagne culturale du blé. Ce qui contribue à la réduction de la dégradation des sols sous irrigation par engorgement, asphyxie et salinisation.

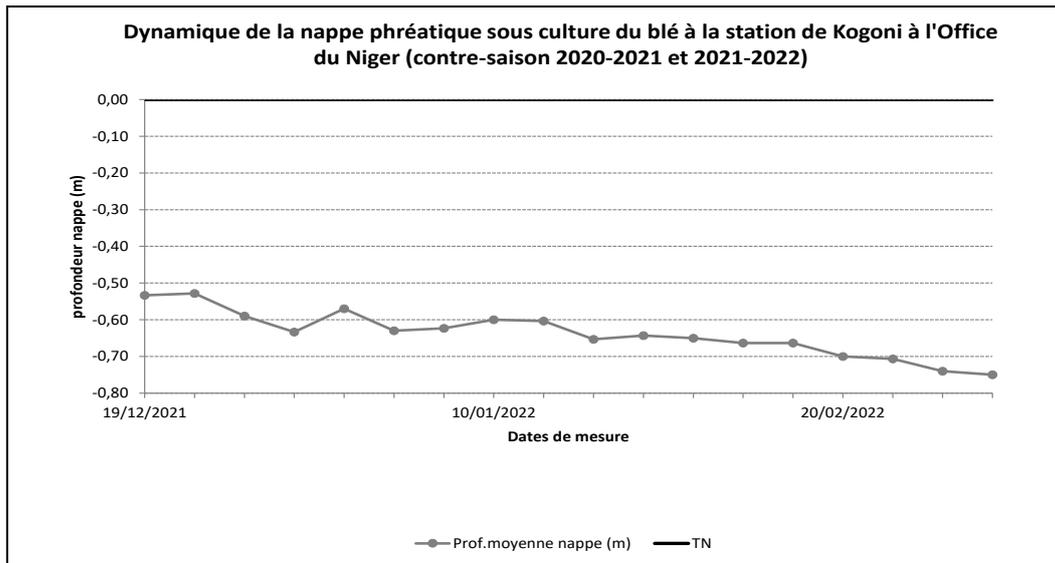


Figure 4 : Évolution moyenne du niveau de la nappe phréatique sous culture de blé à l'Office du Niger (contre-saison 2020-2021 et 2021 - 2022)

4. Discussion

4-1. Caractérisation physique et hydrodynamique des sols

Les résultats de l'analyse granulométrique du sol montrent que celui-ci est de type limoneux à tendance sableuse, appelé "*Danga*" en appellation vernaculaire [10]. Au Mali, les sols légers sont plus favorables à la culture du blé [13]. En zone Office du Niger, les sols limoneux (*Danga*) peuvent être adaptés à la culture du blé à condition d'éviter l'engorgement [11]. Les terres limoneuses bien structurées et assez riches en substances nutritives sont les meilleures terres à blé [8]. Dans le sud de l'État Algérien, les sols légers à forte proportion de sable fin sont considérés meilleurs, alors qu'en Tunisie, ce sont les sols limoneux très finement sableux qui sont propices à la culture du blé [15]. En somme, le blé nécessite un sol bien préparé et ameubli sur une profondeur de 12 à 15 cm pour les terres battantes (limoneuses en générale) ou 20 à 25 cm pour les autres terres [16].

4-2. Perméabilité à saturation K_s : taux d'infiltration

Les valeurs de perméabilité du sol des différentes parcelles sont peu variables avec une moyenne de 2,08 mm/h, correspondant à $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s, soit 0,05 m/j d'eau infiltrée ce qui montre dans l'ensemble un sol peu perméable à tendance imperméable, qui caractérise bien les sols limoneux. En approchant ces valeurs de perméabilité à la texture (ordre de grandeur), le type de sol dans les parcelles des trois fréquences d'irrigation (7 j, 10 j et 15 j) sont imperméables (0,36 mm/h, 10^{-7} m/s, 0,00864 m/j) à peu perméables (3,6 mm/h, 10^{-6} m/s, 0,0864 m/j) [10]. Les sols limoneux possèdent une bonne capacité de rétention de l'eau et sont considérés comme des sols imperméables [10].

4-3. Conduite agronomique et pilotage des irrigations du blé

Les bonnes pratiques agronomiques et une irrigation appropriée avec une fréquence d'irrigation de 10 jours, le blé tendre sur sol limono-sableux (*Danga*) donne en général le meilleur rendement (moyenne de 5280 kg/ha) avec des niveaux de consommation d'eau nette pratique de 308 mm (3080 m³/ha) pour un besoin brut en eau

d'irrigation de 4732 m³/ha en neuf (9) irrigations y compris la pré-irrigation. Les résultats des essais ont montré qu'avec la variété E29 : ZAKIA-5, les rendements sont en moyenne de 4399 kg/ha. Cette fréquence d'irrigation de 10 jours est aussi montrée comme la plus efficace (46 %) dans l'amélioration des paramètres agronomiques (rendement surtout) et hydrauliques (consommations d'eau, nombre d'irrigation et productivité de l'eau d'irrigation). L'analyse des résultats montre également une interaction entre les fréquences d'irrigation et les variétés sur la productivité du blé. Les résultats de l'études sur l'efficiences d'utilisation de l'eau calculée sur la base de la quantité totale d'eau pratique (reçue) ont varié de 5,82 kg à 8,35 kg produit par mm d'eau. Cette étude a été menée dans les conditions d'irrigation de complément ou irrigation d'appoint avec utilisation de variétés à cycles moyens de 120 jours environs [18]. L'irrigation d'appoint a un effet sur le rendement et l'efficacité [19]. Ils concluent qu'avec la variété de blé Rajae, l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour le rendement en grains, varie selon le régime hydrique (quatre irrigations) et a été le plus efficace avec 12,61 Kg/mm/ha. [20] mentionne que l'efficacité de l'eau d'irrigation d'appoint est très fluctuante et semble curieusement sur le long terme, peu tributaire du déficit pluviométrique de la campagne. Elle varie de 2,10 kg de grain/m³ à 2,26 kg/m³, contre 0,53 et 1,03 kg/m³ pour l'efficacité de l'eau de pluie en Bour. Les rendements en grains et en paille sont aussi la résultante des interactions qui s'établissent entre le sol, le climat, les techniques culturales tout au long du cycle de la culture [21]. L'irrigation d'appoint améliore le rendement en grain de 15,28 %, 71,32 %, 125,26 % en plusieurs irrigation et à différents stades de développement du blé [22]. L'analyse révèle que la fréquence d'irrigation de 10 jours est plus efficace (46 % en moyenne) par rapport aux autres fréquences de 7 et 15 jours et permet ainsi une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation pour la conduite de la culture du blé. Les fréquences de 7 jours et 15 jours sont presque dans la même plage (29,5 % et 32 %). Dans les périmètres rizicoles de plusieurs pays, l'efficacité de l'irrigation est faible et varie entre 25 et 48 % [23].

4-4. Dynamique de la nappe phréatique en rapport avec les irrigations du blé

Pendant toute la campagne culturale du blé, la nappe phréatique qui était affleurante, voir au-dessus du terrain naturel des parcelles au moment de la riziculture [5] a baissé graduellement pour être en moyenne à 0,64 m de profondeur par rapport à la surface du sol. La culture du blé contribue de ce fait à la réduction de la dégradation des sols sous irrigation par engorgement, asphyxie et salinisation d'autant plus que cette remontée de la nappe à la surface du sol pendant la riziculture affecte les propriétés physiques (structure et aération du sol), physico-chimiques (alcalisation/salinisation) et biologiques des sols [24].

5. Conclusion

Les besoins bruts en eau du blé sont d'environ 500 mm (5000 m³/ha) et les besoins nets en eau pour l'irrigation du blé sur sol limono-sableux (*Danga*) en zone Office du Niger sont de l'ordre de 3000 à 3100 m³/ha en 9 irrigations sur un cycle cultural de 90 jours du blé. Ces besoins ont été fractionnés et administrés en doses et fréquences d'irrigation de 7, 10 et 15 jours en fonction du stade de développement du blé. La fréquence d'irrigation de 10 jours donne le meilleur rendement quel que soit la variété de blé tendre cultivé. La fréquence d'irrigation de 10 jours est plus efficace (46 % en moyenne) par rapport aux autres fréquences de 7 et 15 jours. Les stratégies d'irrigation devraient désormais être basée sur la maximisation de l'efficacité d'utilisation de l'eau en considérant les variétés et les fréquences de 10 jours. La culture du blé dans des systèmes irrigués de l'Office du Niger où la nappe phréatique est sub-affleurante, favoriserait la baisse du niveau de la nappe et contribue de ce fait à la réduction de la dégradation des sols sous irrigation par engorgement, asphyxie et salinisation.

Références

- [1] - O. GOITA et al, Note Technique sur le blé au Mali, (2008) 8 p.
- [2] - FAOSTAT [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. (23 mai 2023)
- [3] - O. GOITA et al, Technologies pour la Transformation de l'Agriculture en Afrique (TAAT) blé phase I, (2020/2021) 10 p.
- [4] - S. S. GUINDO, "Effet d'une rotation blé-riz de courte durée sur les propriétés physique et chimiques du sol et les rendements à l'Office du Niger au Mali", Thèse unique, Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (U.S.T.T.B), (2018) 171 p.
- [5] - B. TANGARA, Conséquences du développement des cultures de contre-saison sur l'irrigation et la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (Mali), Thèse unique, Université de Bamako, (2011) 180 p.
- [6] - GOITA et al, Diagnostic sur les contraintes phytosanitaires liées à la conservation du blé, IER, (2017) 20 p.
- [7] - DOORENBOS *et al*, Les besoins en eau des cultures, Bulletin d'irrigation et de drainage n°33, FAO, Rome, (1987) 235 p.
- [8] - T. MOSCAL, La culture du blé en zone Ouest Sahélienne, Saint Louis Sénégal, (1975) 63 p.
- [9] - TOURE, Estimation des besoins en eau du blé dans la zone de Diré au Nord du Mali, (2000)
- [10] - B. TRAORE, Détermination des quantités d'eau nécessaires à l'irrigation gravitaire du blé sur sol hydromorphe à gley oxydé (Danga) à la Sous Station de Kogoni en Zone Office du Niger (Mali), Mémoire DEA, ISFRA-Bamako, (2016) 54 p.
- [11] - B. KEÏTA & al, Etude morpho pédologique du Kala inférieur (1/20000), Institut d'Economie Rurale Bamako, (1991)
- [12] - A. IBRAHIM, Cour générale d'agriculture, Zie Ouagadougou, (1994) 132 p.
- [13] - BOUTHIBA et DEBAEKE, Besoin en eau des différentes variétés de blé en conditions semi- aride, symposium agriculture durable, Rabat, Maroc, 14-16 mai (2009)
- [14] - QUATTAR et AMEZIANE, Effet de l'irrigation d'appoint en fin de cycle du blé (ou grossissement du grain), (1989) 55 p.
- [15] - KHANFIR, Caractérisation morphologique et analytique de quelques sols de la Tunisie du nord axe mejez el bab —oued zarga-beja-lafargue, (2001) 102 p.
- [16] - B. TRAORE, Effets de pratiques de gestion de la fertilité sur le sol et sur le rendement du mil en zone semi-aride en 5ème région au Mali Thèse unique, Université de Bamako Mali, (2009)
- [17] - AMBRI et LAHLOU, Irrigation d'appoint et efficacité d'utilisation de l'eau en zone semi-aride, Cas du blé Mémoire de 3ème cycle, Agronomie, IAV Hassan II. Rabat, (1998)
- [18] - EL A. DAROUIA et A. BOUKROUTE, Effet de l'irrigation d'appoint sur le rendement d'une culture de blé tendre (*Triticum aestivum* L), Variété Rajae au Maroc Oriental, (2011) 7 p.
- [19] - A. HOUSSA et al, Rapports annuel de la campagne agricole, Domaines Agricoles Royaux, Comparaison Irrigué/Bour, Non publiés, (1991 et 1996)
- [20] - LAHOUEL, Contribution à l'étude de l'influence de la salinité sur le rendement des céréales (cas de l'orge) dans la région de Hemadna à Relizan, (2014) 104 p.
- [21] - CHENAFI et al, Valorisation des apports d'appoint d'eau sur blé dur *Triticum Durum* en zone semi-aride, Effets variété et stade d'appoint, In : Proceedings : Premier Séminaire international sur l'Environnement et ses problèmes Connexes, (2011) 10 p.
- [22] - S. H. WALKER, Causes of high water losses from irrigated rice fields, field measurements and results from analogue and digital models. *Agric. Water Manage*, 40 (1999) 123 - 127
- [23] - AICHA, Caractérisation des eaux d'irrigation et leur influence sur la salinité du sol dans la région de Ouargla, mémoire, master académique, (2020) 87 p.
- [24] - BRIGGS et al : <http://www.energycodes.gov> consulté septembre, (2020)