

## SYNERGIES ENTRE RECUPERATION DES EAUX DE RUISSELLEMENT ET FERTILISATIONS MINERALES DANS LES PAYS SAHÉLIENS, POUR ACCROÎTRE LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE, FAIRE FACE À LA CROISSANCE DÉMOGRAPHIQUE, S'ADAPTER AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LIMITER LES ÉMISSIONS DE GES.

## SYNERGIES BETWEEN RUN OFF WATER HARVESTING AND MINERAL FERTILIZATION IN SAHELIAN COUNTRIES, TO IMPROVE FOOD SECURITY, COPE WITH POPULATION GROWTH, ADAPT TO CLIMATE CHANGE AND LIMIT GHG EMISSIONS.

A. DIARRA<sup>(1)</sup>, A. RIEDACKER<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup>Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Rue de la Science, 01 BP 594 Ouagadougou 01, BURKINA FASO.

<sup>2</sup>Institut Oikos, 47 rue Polonceau, 75018 Paris, FRANCE.

Corresponding Authors E-mail: [abdoulaye.diarra@2ie-edu.org](mailto:abdoulaye.diarra@2ie-edu.org) / [a.riedacker@wanadoo.fr](mailto:a.riedacker@wanadoo.fr)

Reçu : 6 Janvier 2017, Accepté : 10 Mars 2017, En ligne : 30 Avril 2017

### RESUME

Au Nord du Burkina Faso les rendements en grain en 1992 du sorgho passèrent de 0,063 t.ha<sup>-1</sup> pour les témoins à 0,976 t.ha<sup>-1</sup> sur zaïs (micro-cuvettes d'environ 0,12 m<sup>3</sup>) avec 65 unités de NPK et 3 t de compost. L'intensité territoriale (IT) par tonne de grain a été divisée par 15,5 en 1992. Mais alors que les précipitations annuelles en 1993 furent seulement inférieures de 10% par rapport à 1992, les rendements des témoins furent divisés par 3 pour les témoins et par 2 sur zaïs. Pour le maïs la production moyenne de 2012 à 2014 est passée de 0,8 t.ha<sup>-1</sup> pour les témoins à 2,215 t.ha<sup>-1</sup> à Yatenga et à 2,88 t.ha<sup>-1</sup> à Bam, avec irrigation complémentaire avec des bassins de 200 m<sup>3</sup> et des fertilisations (155 unités par ha). L'IT<sub>moyenne</sub> est passée de 1,25 ha à 0,45 ha à Yatenga et à 0,35 ha à Bam. Pour le maïs les rendements furent également plus réguliers et plus élevés avec des irrigations complémentaires associées à une fertilisation. L'IT<sub>P65%</sub> (superficie pour une ration supplémentaire calorique annuelle de 162,5 kg de grain) a pu être diminuée dans les mêmes proportions. Les consommations d'énergie, d'eau et les émissions de GES par tonne de produit diminuèrent également.

L'adaptation en Afrique doit donc cibler prioritairement et conjointement la récupération des eaux de ruissellement, par bassins plutôt que par micro-cuvette, afin de sécuriser l'efficacité des apports d'engrais, de mieux valoriser les terres disponibles et les précipitations.

**Mots clés :** Adaptation aux changements climatiques, efficacité de l'utilisation des terres et de l'eau, maïs et du sorgho, Zaïs (cuvettes) et bassin de réception des ruissellements, Sahel, Fertilisation et compost.

### SUMMARY

Are compared here, in the Sahelian regions of northern Burkina Faso, two main run off water harvesting techniques: zaïs pits [micro-cuvettes of about 0.12 m<sup>3</sup>, Fig.2, Roose et al. (1993) and 200 m<sup>3</sup> reservoirs for complementary irrigation of 0.2 ha of land, Fig. 3 Diarra et al. (2016), and the effect of adding fertilizer on territorial intensities (TI<sub>t</sub>), (area, in ha, necessary to get 1 ton of cereal), or per supplementary person deriving 65 % of his calories from grain (TI<sub>SP65%</sub>).

Sorghum yield in 1992 increased from 0.063 t.ha<sup>-1</sup> for controls, to 0.976 t.ha<sup>-1</sup> on zaïs (Fig. 3 and 4) with 65 kg of NPK and 3 t of compost. Yields with

fertilizer alone were higher ( $0.829 \text{ t.ha}^{-1}$ ) than with only 3 t or 1.5 t of compost per ha (respectively  $0.690 \text{ t.ha}^{-1}$  and  $0.317 \text{ t.ha}^{-1}$ ). Yields were however almost divided by 2 in 1993 with only 10.5 % less annual rainfall than in 2012, but with more erratic distribution of rain, in June and August. (Table 1 and 2).

In 2012-2014, average maize yield increased from  $0.8 \text{ t.ha}^{-1}$  with neither fertilizer nor irrigation to  $2.88 \text{ t.ha}^{-1}$  at Bam and  $2.215 \text{ t.ha}^{-1}$  at Yatenga, with complementary irrigation and fertilizer (155 units of NPK/ha). With but fertilizer and no complementary irrigation yields reached only  $1.98 \text{ t.ha}^{-1}$  at Bam, and  $0.955 \text{ t.ha}^{-1}$  at Yatenga. Without complementary irrigation yields decreased dramatically in 2013, in particular at Yatenga where, with only fertilizer, they were below the average yield of maize of that region ( $0.8 \text{ t.ha}^{-1}$ ), (Fig 4 and 5 and table 3). This was due to low rainfall in the middle of July and also in the middle of August.

Complementary irrigation with reservoirs helped therefore to maintain high average yields on fertilized plots much better than with zaïs with more erratic rainfall distribution. This allows also a better and safer payback of fertilizer inputs.

The territorial intensity per additional capita ( $TI_{SP65\%C}$ ) with sorghum decreased in 1992 from 2.58 ha for the control to 0.17 ha with fertilizer and compost (table 2). For maize, it decreased from 0.2 ha to 0.07 ha at Yatenga (table 3).

Despite fertilizer input, energy and GHG budgets were positive in 1992 with zaïs, and during 2012-2014 with maize getting fertilizer and complementary irrigation. And rainfall efficiency increased from  $0.16 \text{ kg .m}^{-3}$  to  $0.44 \text{ kg .m}^{-3}$ . Possible improvements are suggested, and policies and measures to increase land use efficiency by promoting crop production, with both reservoirs and increased mineral fertilisation (Fig. 6), are discussed.

**Keywords:** Adaptation to climate change, Land use efficiency, Crop water efficiency, maize, sorghum yield; zaïs pits, Reservoirs for run off waters, Sahel, Fertilization, Compost.

## 1. INTRODUCTION

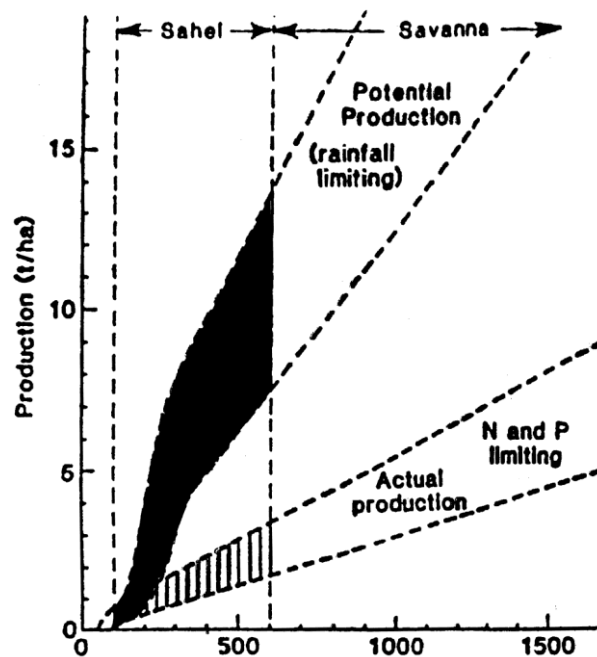
Avec la croissance démographique mondiale attendue d'ici 2050, il faudra, selon la Fao,

augmenter la production alimentaire mondiale d'au moins 60%. En Afrique subsaharienne, avec un milliard d'habitants supplémentaire attendu entre 2000 et le milieu du siècle il faudra au moins la doubler. A cela s'ajoute deux autres contraintes majeures : la nécessité de s'adapter aux changements et aux variabilités climatiques prévus par les modèles des climatologues (5<sup>ème</sup> rapport du GIEC) et celle de réduire fortement les émissions mondiales de GES pour que l'augmentation de la température moyenne du globe reste inférieure à  $+2^\circ\text{C}$ , conformément à l'objectif de l'Accord de Paris sur le climat de 2015. Pour ce second objectif il faudra aussi produire plus de biomasses non alimentaires pour réduire fortement le recours aux énergies fossiles. Et cela tout en évitant de défricher des forêts ou de mettre des prairies en culture, car ces changements d'utilisations des terres augmenteraient fortement les émissions brutes et nettes de GES, réduiraient les potentialités de production de bois ou de fourrage et détérioreraient les services environnementaux de ces milieux. Il faut donc chercher à produire plus de biomasses sur les surfaces déjà en culture, partout où cela est possible, y compris dans les zones semi-arides, afin de produire plus d'aliments, de fourrages et d'autres biomasses, pour permettre aux populations de continuer à vivre sur place, de manière acceptable pour l'environnement local d'une part, et pour l'environnement mondial d'autre part.

Dans cette région, la mobilisation des eaux souterraines est difficile, (OCDE, 2009). Il faut donc valoriser au mieux les eaux de ruissellement.

## 2. MATERIEL ET METHODES

On sait qu'en Afrique de l'Ouest la fertilité des sols est l'une des principaux facteurs limitant de la productivité des herbages (Breeman et de Wit, 1983). Avec des apports suffisant en engrais, d'abord de phosphore -car ces sols sont naturellement très pauvres en cet élément-, d'azote et dans certain cas de chaux (Pierri, 1989), on peut dans tous les cas augmenter les rendements en fourrage et des cultures pour des pluviométries annuelles supérieures à 600 mm (Fig. 1).



**Fig. 1. Les facteurs limitants de la production de matière sèche par ha en Afrique de l'Ouest, au Sahel et dans les zones de savane, sous différents niveaux de précipitation, d'après Breeman et De Wit, 1983).**

**Fig. 1. Limiting factors of dry matter production per ha in West Africa, in the Sahel and in savannahs, under different level of rainfall (Breeman et De Wit, 1983).**

Avant d'apporter des engrais sur les herbages il y a cependant d'autres mesures à prendre pour améliorer la production des herbages souvent dégradés, par exemple des mises en défens temporaires. L'augmentation des rendements en fourrage par des engrais peut néanmoins devenir utile dans certaines zones pour éviter des conflits d'usages des sols entre éleveurs et agriculteurs.

En revanche pour les cultures vivrières dans les zones sahéliennes (avec moins de 600 mm de pluie), la question de l'efficacité des apports d'éléments minéraux, de matières organiques et des diverses techniques culturales et de récupération des eaux pluviales pour augmenter les rendements mérite d'être évaluée dès maintenant. Et cela en tenant compte des variations et de l'irrégularité des précipitations annuelles.

Nous examinons ici la possibilité d'augmenter les productions alimentaires, essentiellement en zones semi-arides (500 à 800 mm de pluie). Dans ces zones, faute de suffisamment d'eau la végétation naturelle présente parfois des bandes alternées, avec et sans végétation, formant ce que l'on appelle des brousses « tigrées ». Les glacis qui se forment entre ces bandes herbacées permettent de concentrer les apports d'eau vers

les bandes herbacées. La végétation sur ces bandes peut ainsi recevoir plus, voire suffisamment d'eau pour assurer sa croissance et une meilleure utilisation de l'eau.

Trois techniques de récupération des eaux de ruissellement avec des apports d'engrais sont donc examinées :

- (1) Celle des "zaïs", (cuvettes d'environ 0,12 m<sup>3</sup>, de 20 à 40 cm de diamètre, de 10 à 15 cm de profondeur, creusées à la pioche, disposées en quinconce, tous les 80 à 100 cm, en rejetant la terre vers l'aval, en croissant, afin de capter les eaux de ruissellement. La surface non travaillée, encroutée, qui sert d'impluvium représente cinq à vingt-cinq fois la surface travaillée (Fig. 2). On peut ainsi modifier artificiellement la répartition des précipitations en concentrant l'eau dans des trous (zaï) auxquels on ajoute de la matière organique ou minérale, ou les deux. On peut aussi, à cette même fin, créer des demi-lunes. On ajoute dans ces trous du fumier ou des pailles cherchées sur d'autres parcelles et des engrais minéraux. Cette matière organique attire les termites (qui ne consomment que la matière végétale morte) et permet de créer des galeries améliorant ainsi la pénétration des

racines et de l'eau. Les tableaux 1 et 2 montrent les résultats d'essais conduits au Burkina Faso avec du sorgho, par Roose et al. (1993). Au Burkina Faso on a comparé des productions sans zaïs avec différents apports dans les zaïs : de l'engrais [65 kg par ha : 35 kg

de N, 20 kg de  $P_2O_5$  et 10 kg de  $K_2O$ ], \*\* et/ou 1,5 et 3 t de compost avec 0,7% de N et 0,05% de  $P_2O_5$  (Roose et al., 1993 ; Reijn et al., 1996) D'autres essais du même type ont été réalisés par Tilahun et al. (2011) en zone de colline en Ethiopie.

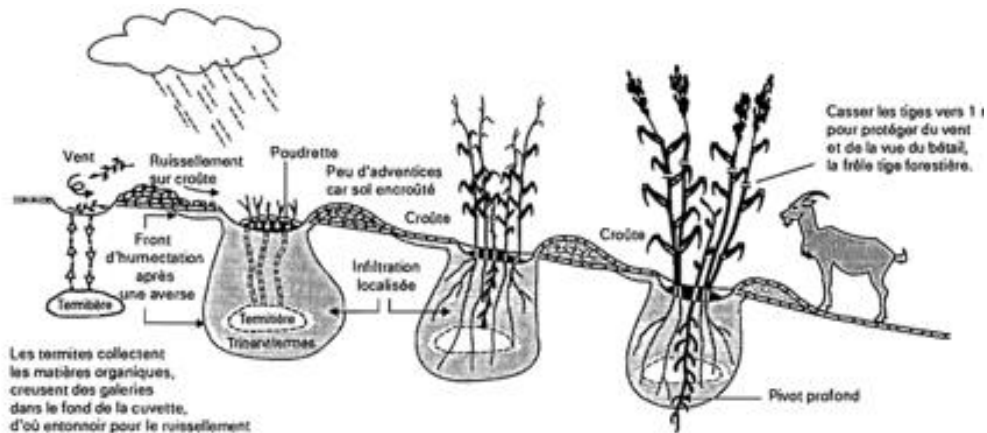


Fig. 2. Les zaïs, représentation schématique de Roose et al. (1993).

Fig. 2. Schematic representation of Zaïs, from Roose et al. (1993).

- (2) Les Récoltes et Répartitions d'Eau de Pluie dans les Parcelles (RREP) ou « In Field Rain Water Harvesting (IFRWH), (Botha et al., 2012) inspirées du mécanisme naturel de la formation des brousses tigrées ;
- (3) Les bassins de stockage d'eau de ruissellement d'environ 200 à 300 m<sup>3</sup>, creusés à même le sol, en tête des parcelles de cultures (Fig. 3, Diarra et al. (2016)). Ces bassins sont des ouvrages individuels d'un ménage, de forme trapézoïdale, imperméabilisés à partir de matériaux locaux comme l'argile et stabilisés avec des moellons. L'eau collectée permet de sécuriser une surface de culture de 0,20 ha et de faire face à une poche de sécheresse allant jusqu'à 3 semaines. Cette méthode a été mise en œuvre, avec chaque fois 15 agriculteurs, sur deux sites situés à Yatenga et Bam, au Nord du

Burkina Faso, en zone sahélienne (pluviométrie comprise entre 500 et 600 mm). Nous disposons ici de parcelles fertilisées et irriguées ( $T_F$ ), dont les productions sont comparées à des parcelles fertilisées, mais ne recevant pas d'irrigation complémentaire ( $T_F$ ) et à des témoins moyens de la région non fertilisé et non irrigué ( $T_0$ ).

Les deux premiers systèmes restent cependant fortement tributaires du niveau et de la répartition des précipitations au cours de la période de végétation. En revanche, la création de bassins de stockage permet d'accumuler l'eau, de pratiquer des irrigations de complément sur de plus longues périodes, en tant que de besoin, et même d'utiliser une partie du surplus d'eau récolté pour du maraîchage, après les cultures vivrières.

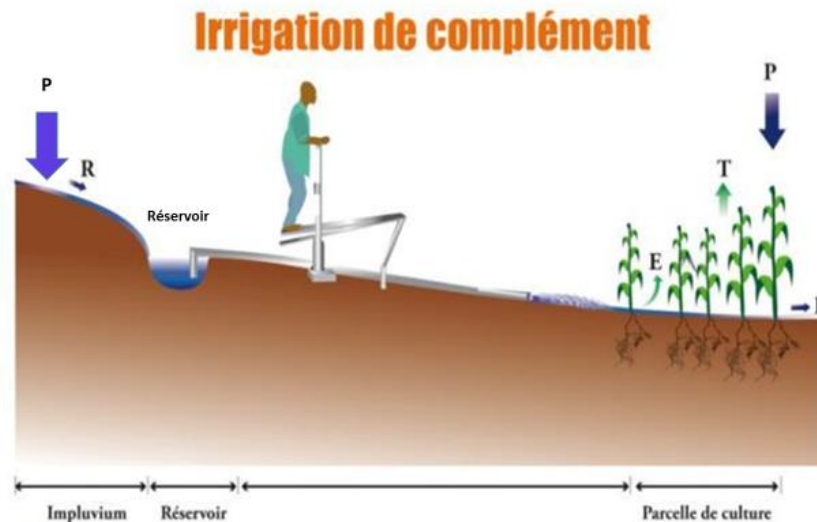


Fig. 3. Schéma de fonctionnement pour l'irrigation de complément proposée par 2 iE. En amont l'impluvium recevant la pluie (P), amenant les eaux de ruissellement (R) vers le réservoir de 200 à 300 m<sup>3</sup>. Puis le pompage à pédale pour l'irrigation de complément vers la parcelle de 0,2 ha. Sont également mentionnées la transpiration (T) et l'évaporation. D'après Diarra et al. (2016).

Fig. 3. Schematic representation of complementary irrigation proposed by 2 iE. The run-off water is harvested by the impluvium and stored in the 200 to 300 m<sup>3</sup> reservoir. From where water is pumped to complement the rainfall on the 0.2 ha plot. (P) for rainfall, (E) for Evaporation and (T) for transpiration. From Diarra et al. (2016).

#### Les principaux critères évalués

##### 1/ Bilans territoriaux

- **L'intensité territoriale** IT (en ha.) pour divers traitements, par tonne de produit ou par service (ration alimentaire couvrant 65% des besoins en calorie par des céréales (IT<sub>PS 65% c</sub> soit 162,5 kg de céréales par personne et par an, Rapport sur la consommation alimentaire en Afrique de l'Ouest 2011) sous forme de mil, sorgho ou maïs, ou 100% des besoins (250 kg de céréales par personne et par an).

- **Le nombre de personnes supplémentaires (PS)** auxquels les gains de rendements, via les divers traitements, permettent d'apporter 65% des calories (PS<sub>65% c</sub>) ou la totalité des calories sous forme de céréales (PS<sub>100% c</sub>).

**2/ Les bilans énergétiques bruts (E<sub>brute</sub>) et nets (E<sub>nette</sub>)** en MJ ou kep (kilo-équivalent pétrole), c'est à dire les consommations d'énergie fossile (E<sub>intransit</sub>) et les gains nets d'énergie, c'est à dire les énergies primaires contenues dans les matières végétales récoltables (grain et paille), moins les énergies fossiles utilisées pour les cultures. (E<sub>nette</sub> = E<sub>brute</sub> récoltable - E<sub>des intrants</sub>).

#### Les ratios utilisés

**Pour l'azote** : Pour l'urée et l'ammonitrate 46 MJ (42 MJ pour la fabrication et 4MJ pour le transport) par kg de N

**Pour le phosphore** : 10,5 MJ à base de fioul par kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

**Pour la potasse** : 8,4 MJ à base de fioul par kg de K<sub>2</sub>O.

**Pour la matière sèche** l'énergie primaire par tonne sèche (à 0% d'humidité) s'élève à 16,8 GJ (0,4 tep) et par tonne sèche à l'air (environ 15% d'humidité) à 15 GJ (arrondi à 0,35 tep).

**Pour la valorisation via l'élevage**, on considère que l'énergie métabolisable est de 0,32 tep par tonne de grain, (~1,88 UFL, Unité Fourragère Lait) et de 0,15 tep par tonne de paille ou de canne séchée à l'air (~0,83 UFL), d'après Beaumont et al. (2007).

**3/ Les bilans pour l'eau** : Productivité de l'eau des cultures (PEC), par exemple en kg de grain par mm de précipitation ou par m<sup>3</sup> d'eau de pluie.

**4/ Les bilans en GES bruts (GES<sub>brut</sub>) et nets (GES<sub>net</sub>)** encore appelés « bilans carbone bruts et nets », exprimés en équivalent CO<sub>2</sub>, c'est dire

pour les ( $GES_{brut}$ ), les émissions de GES dues aux apports d'engrais (et éventuellement aux consommations d'énergies fossiles pour le pompage et les travaux motorisés au champs), et pour le bilan net ( $GES_{net} = GES_{brut} - GES_{évitable}$  via les valorisations des biomasses récoltables) les On n'envisage pas ici de compenser les émissions de GES par des consommations supplémentaires de paille par des ruminant, car il faudrait alors également tenir compte des émissions de méthane de ces derniers, ainsi que les productions de lait, de viande et de peaux.

Les bilans sont calculés selon la méthode du Giec (IPCC 2006). On considère ici que toutes les matières végétales aériennes produites par les cultures sont récoltées et consommées, et qu'il n'y donc pas d'émissions de GES attribuables aux résidus de récoltes. On admet que les transports et extraction d'engrais nécessitent du pétrole (3,5 t de  $CO_2e$  par tep ou 42 GJ, en comptant les dépenses pour l'extraction et le raffinage) et que la fabrication des engrais azotés se fait avec du gaz en consommant 1 tep par tonne de N, émettant 2,4 t de  $CO_2$  par tep en usine et 9,19  $tCO_2e$  au champ sous forme de  $N_2O$ ), soit 11,6 t de  $CO_2e$  par tonne d'azote dans le cas de l'urée [et 20,9  $tCO_2e$  par t de N dans le cas des nitrates, car il y a alors émissions 9,3 tonnes supplémentaires dues au  $N_2O$  généré en usine] (Riedacker 2005 corrigé avec les facteurs d'émissions par défaut de  $N_2O$  des engrais apportés au champ, passés de 1,25% de N apporté avant 2006 à 1% de N apporté en 2006).

#### Pour l'azote

Pour l'urée : 10,08 kg  $CO_2e$  (2,4 kg  $CO_2e$  attribuables au gaz utilisé pour la fabrication, 0,33 kg  $CO_2e$  au transport, 7,35 kg  $CO_2e$  aux émissions de  $N_2O$  au champ) GES par kg de N ;

Pour l'ammonitrate : 14,67 kg  $CO_2e$  GES par kg de N (2,34 kg  $CO_2e$  attribuables au gaz utilisé dans la fabrication, 4,65 kg  $CO_2e$  aux fuites de  $N_2O$  lors de la fabrication, 0,33 kg  $CO_2e$  au transport et 7,35 kg  $CO_2e$  aux émissions de  $N_2O$  au champ).

**Pour le phosphore** : 0,875 kg  $CO_2$  par kg de  $P_2O_5$ .

**Pour la potasse** : 0,7 kg  $CO_2$  par kg de  $K_2O$ .

**Une tep d'énergie primaire (42 GJ) issue de la biomasse renouvelée** convertie en chaleur évite l'émission nette de 3,5  $tCO_2$  en remplaçant du fuel converti avec le même rendement que ce dernier.

1 t de M S (0% d'humidité) permet de produire 0,4 tep d'énergie primaire, 1 t sèche à l'air permet de produire 0,35 tep et d'éviter l'émission de 1,225  $tCO_2$  quand elle remplace du fuel, avec le même rendement de conversion [et 0,615  $tCO_2$  quand elle est convertie avec un rendement 2 fois inférieur à celui du fuel].

### 3. LA FERTILISATION DES ZAÏS

Les tableaux 1 et 2 montrent les résultats.

- Avec des apports de 65 kg d'engrais et 3t de compost par ha ( $T_{5\ F\&C\ 3t}$ ) on obtient les accroissements de productions en grain le plus importants : + 913 kg de grain (contre 63 kg de grain et +2888 kg de paille par rapport au témoin  $T_0$  sans zaïs), soit des augmentations respectivement de 1450 % pour le grain et de 440 % pour la paille.
- L'apport de 65 kg d'engrais minéraux sur les zaïs, *sans apport de compost*, permet d'obtenir une augmentation de rendements presque aussi importante qu'avec le traitement précédent ( $T_{5\ F\&C\ 3t}$ ) : +766 kg de grain par rapport à  $T_0$ , soit seulement 147 kg de grain en moins (-15%) qu'avec engrais et 3 t de compost.
- En revanche le compost tout seul (3t par ha) ne permet d'obtenir que 690 kg de grain, c'est-à-dire 627 kg de plus que pour le témoin, 286 kg de moins qu'en ajoutant de l'engrais au compost, et 139 kg de moins qu'avec les apports de 65 kg d'engrais sans compost.
- En n'apportant que 1,5 t de compost le gain par rapport à  $T_0$  n'est que de 254 kg.

**Tableau 1. Productions en grain et en paille de sorgho sur des sols ferrugineux soumis à divers traitements, notamment de zaïs :** T<sub>0</sub> témoin sans cuvette ; T<sub>1C</sub> avec cuvette ; T<sub>4F</sub> avec cuvette et fertilisation minérale\* ; T<sub>5 F&C3t</sub> avec cuvette et fertilisation minérale et 3t de compost par ha \* ; T<sub>2C1,5t</sub> avec cuvette et 1,5 t de compost par ha ; T<sub>3C3t</sub> avec cuvette et 3 t de compost par ha (d'après Roose et al., 1993).

**Table 1. Grain and straw yield of sorghum on ferruginous soils with different treatments:** T<sub>0</sub> control (no, pits) ; T<sub>1C</sub> with pits; T<sub>4F</sub> with pits and mineral fertilization \* ; T<sub>5 F&C3t</sub> with pits, mineral fertilization and 3 t of compost per ha \* ; T<sub>2C1,5t</sub> with pits with 1,5 t of compost per ha ; T<sub>3C3t</sub> with pits and 3 t of compost per ha (from Roose et al., 1993).

Année/ Year	1992			1993		
Précipitation annuelle - Annual rainfall	706 mm			632 mm		
Traitements -Treatments	Rendements en kg par ha Yield in kg per ha			Rendements en kg par ha Yield in kg per ha		
	Grain Grain	Paille Straw	Total (Grain + paille)	Grain Grain	Paille Straw	Total (Grain + paille)
T <sub>0</sub> Témoin sans cuvette	63	657	720	22	292	314
T <sub>1C</sub> avec cuvette	150	1213	1363	29	375	404
T <sub>4F</sub> avec cuvette et fertilisation minérale*	829	3302	4131	408	2375	2780
T <sub>5 F&amp;C3t</sub> avec cuvette et fertilisation minérale* et 3t de compost** par ha	976	3545	4521	550	3167	3717
T <sub>2C1,5t</sub> avec cuvette et 1,5 t de compost par ha	317	2192	2509	140	1167	1307
T <sub>3C3t</sub> avec cuvette et 3 t de compost par ha	690	1665	2355	257	1542	1799

\* (65 kg d'engrais par ha : 35 kg de N, 20 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 10 kg de K<sub>2</sub>O),\*\* Compost 0,7% de N et 0,05% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

**Tableau 2. Les intensités territoriales (IT), en ha par tonne de grain et les intensités territoriales en ha par ration alimentaire supplémentaire (IT<sub>PS 65%<sub>c</sub></sub> et IT<sub>PS 100%<sub>c</sub></sub>) avec les différents traitements, et superficies à défricher, par personne supplémentaire.** Pour la signification des traitements, cf. tableau 1.

**Table 2. Territorial Intensities in ha per ton of grain (TI) and territorial intensities for food per supplementary capita, with 65% (IT<sub>PS 65%<sub>c</sub></sub>) or 100% (IT<sub>PS 100%<sub>c</sub></sub>) of cereal in the diet, and land to be cleared per additional capita.** For the different treatments see details in table 1.

Traitements et différence entre traitements	Production en grain et intensité territoriale (IT)	Production de paille	Nombre de personnes supplémentaires qu'on peut nourrir sur 1 ha, par rapport au témoin, sans défricher, avec des rations à 65% ou à 100% de céréales		Surface supplémentaire à cultiver par personne supplémentaire (IT <sub>PS 100%<sub>c</sub></sub> et IT <sub>PS 65%<sub>c</sub></sub> ), (après application des améliorations sur l'hectare déjà cultivé)	
	en kg/ha IT en ha	en kg /ha	65% de céréales (162,5 kg/an)	100% de céréales (250 kg/an)	IT <sub>PS 65%<sub>c</sub></sub> (162,5 kg/an)	IT <sub>PS 100%<sub>c</sub></sub> 250 kg/an de céréales
T <sub>0</sub>	63 IT=15,9 ha	657	-	-	2,58	3,97 ha
Gain T <sub>1C</sub> -T <sub>0</sub>	+87		0,53	0,35		

T <sub>1C</sub>	150 IT= 6,67 ha	1.213			1,08 ha	1,66 ha
GainT <sub>4F</sub> - T <sub>0</sub>	+766	+2.645	4,71	3,06		
T <sub>4F</sub>	829 IT=1,2 ha	3.302			0,2 ha	0,30 ha
T <sub>3C3t</sub>	690 IT = 1,45 ha		3,85	2,5	0,24 ha	0,36 ha
T <sub>5 F&amp;C 3t</sub>	976 IT= 1,02 ha	3545	5,61	3,65	0,17 ha	0,26 ha
GainT <sub>5 F&amp;C3t</sub> - T <sub>0</sub>	+913	+2888				
GainT <sub>5 F&amp;C3t</sub> - T <sub>4F</sub>	+ 147	+243	-	-	-	-
GainT <sub>3C3t</sub> - T <sub>4F</sub>	-139	-1637	-	-	-	-

**Bilan de l'efficacité de l'utilisation de l'eau :** L'accroissement de la production de grain en 1992 en zaïs avec des apports d'engrais minéraux et de 3 t de compost, est spectaculaire. En revanche le gain en grain est bien moindre en 1993 : seulement 528 kg (57% du rendement en 1992) ! Et pourtant la pluviométrie annuelle n'avait diminué que de 10,5 %, seulement 74 mm de moins en 1993, qu'en 1992. Mais cette diminution s'est manifestée en Aout ; seulement 185 mm en 1993 contre 255mm en 1992. Par ailleurs la pluviométrie a été plus régulière en 1992 (plus de 40 mm lors de toutes les décades d'Aout) qu'en 1993 (moins de 10 mm lors des 2<sup>èmes</sup> décades de Juin et d'Aout).

Les productivités de grains de sorgho en kg par m<sup>3</sup> d'eau de pluie furent

- pour les témoins (T<sub>0</sub>) de 0,009 kg en 1992 contre 0,0035 kg en 1993
- pour les cuvettes avec apports d'engrais et de compost (T<sub>5F&C3t</sub>) de 0,138 kg en 1992 ( 15 fois plus que pour les témoins T<sub>0</sub>) et de 0,087 kg en 1993 (24 fois plus élevé que pour les témoinsT<sub>0</sub>).

Des apports exclusivement d'engrais minéraux identiques sont deux fois moins bien valorisés en 1993 qu'en 1992. Et les apports identiques d'engrais minéraux et de compost sont 1,8 fois moins bien valorisés en 1993 qu'en 1992.

**Bilans territoriaux :** Le tableau 2 montre qu'avec les témoins il faut presque 2,6 ha pour fournir la ration en grain (65% des calories de la ration alimentaire) d'un habitant et presque 4 ha par per personne pour fournir toute la ration en calories sous forme de céréales.

En revanche, l'augmentation des rendements avec la création de cuvettes et l'apport d'engrais et de 3 t de compost permet de nourrir 5,6 personnes supplémentaires par ha (avec 65% des calories de la ration totale issues des céréales). L'intensité territoriale de la ration alimentaire supplémentaire par habitant (IT<sub>PS 65%C</sub>) est seulement de 0,17 ha pour le meilleur traitement (T<sub>5 F&C 3tc</sub>) soit 15 fois moindre qu'avec le témoin, de 1,95 ha avec 1,5 t de compost sans engrais (T<sub>2C1,5t</sub>) et de 1,42 ha avec 3 t de compost (T<sub>3C3t</sub>). On verra dans la discussion pourquoi les apports de compost furent seulement modérément efficaces.

**Bilans énergétiques :** La consommation d'énergie des engrais est estimée à 1,9 GJ ou 45 kep par ha. Cette dépense est compensable avec 113 kg de MS (ou 166 kg de matière à 15 % d'humidité) convertie en chaleur avec le même rendement que le fuel, ou par 300 kg de paille sèche à l'air convertis par les animaux environ 0,15 kep par kg de paille ou de canne séchée à l'air. C'est à dire très largement compensable par le supplément de paille produit en T<sub>4F</sub> (+ 2,64 t de matière séchée à l'air).



**Bilans de GES :** Avec les ratios indiqués ci-dessus, l'apport de 65 kg d'engrais se traduit par une émission de 0,538 tCO<sub>2</sub>e par ha. Pour compenser ces émissions il faut donc 0,43 t de matière sèche à l'air quand celle-ci est convertie avec le même rendement que le fuel et 0,86 t de matière sèche à l'air quand elle est convertie avec un rendement deux fois moindre. Les gains en matière séchée à l'air sont en 1992 respectivement de 3,801 t pour T<sub>5 F& 3t</sub> et de 3,411 t pour T<sub>4F</sub>. Il reste donc, après compensation des émissions de GES des engrais entre 2,94 et 3,37 t de paille pour T<sub>5 F& 3t</sub> et entre 2,55 et 2,98 t de paille pour T<sub>4F</sub>. Ce qui permet des réductions supplémentaires des émissions de GES, respectivement de 3,67 et 4,21 tCO<sub>2</sub> pour T<sub>5 F& 3t</sub> (le traitement le plus productif), et de 3,18 à 3,72 tCO<sub>2</sub> pour T<sub>4F</sub>, avec seulement des apports d'engrais.

Les essais de Tilahun et al. (2011), en Ethiopie, montrent que la production sur zaïs, avec des apports d'azote, jusqu'à 60 kg par ha, augmente la production des pommes de terre de 500 à 2000% et celle des haricots jusqu'à 250%.

#### 4. RECOLTE ET REPARTITIONS D'EAU DE PLUIE DANS LES PARCELLES (IN-FIELD RAIN WATERHARVESTING)

Des bandes en pente, de 2 m de large, non labourées permettent de récolter et de concentrer l'eau pour 2 lignes de culture séparées par un bourrelet afin de retenir l'eau de drainage et faciliter la pénétration de l'eau. Mais cela permet seulement des gains de production de 34%, peut-être de 50% à long terme pour le maïs et le tournesol. Pour le moment on manque encore de résultats expérimentaux bien documentés.

#### 5. LA PRODUCTION DE MAÏS AVEC DES IRRIGATIONS COMPLEMENTAIRES, AU BURKINA FASO, A L'AIDE DE BASSINS DE RECUPERATION DES EAUX DE RUISSELLEMENT EN ZONES SEMI-ARIDE (Diarra et al. 2016)

L'objectif est ici de réduire la vulnérabilité des paysans sahéliens et d'améliorer la sécurité alimentaire à travers la mise en œuvre de

l'irrigation de complément et de remédier aux inconvénients des zaïs. L'irrigation de complément consiste à apporter de l'eau aux cultures durant les longues poches de sécheresse observées pendant la saison des pluies, grâce à l'eau de ruissellement stockée dans des réservoirs situés à proximité des parcelles de cultures.

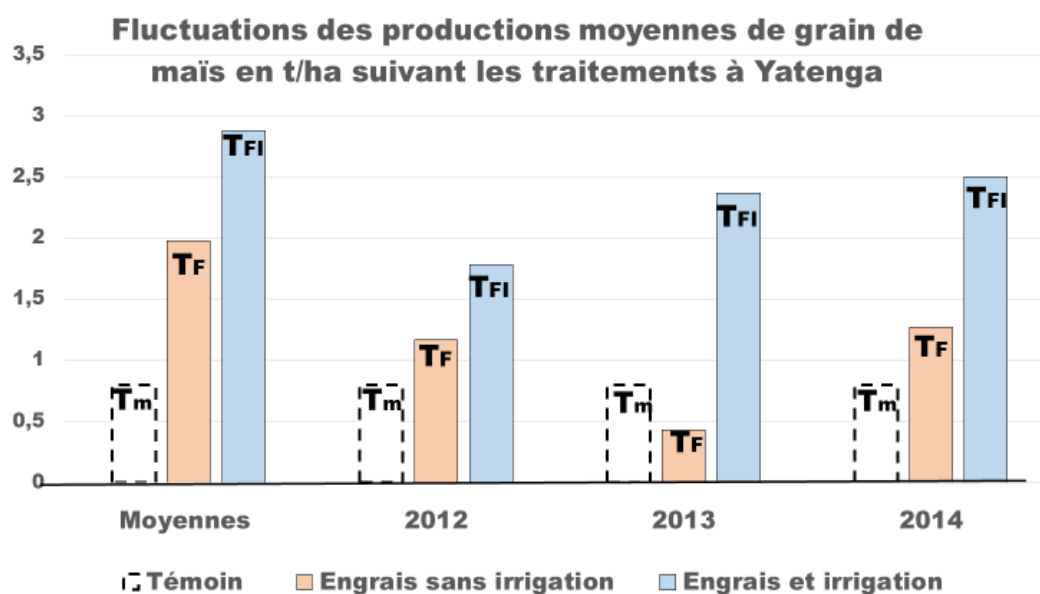
**Résultats** (Figure 4 et 5, tableau N°3) :

**Bilans territoriaux :** Au Yatenga la production moyenne annuelle de grain de maïs par ha lors des trois campagnes est de 2,88 t pour les parcelles recevant une fertilisation minérale et une irrigation complémentaire (T<sub>Fi</sub>), de 0,955 t pour les parcelles fertilisées ne recevant pas d'irrigation complémentaire (T<sub>F</sub>), et de 0,8 t pour les productions moyennes des parcelles (T<sub>0</sub>) ni fertilisées ni irriguées. Le gain moyen en grain par ha de T<sub>Fi</sub> par rapport à T<sub>F</sub> est donc de 1,26 t et celui de T<sub>Fi</sub> par rapport à T<sub>0</sub> de 1,415 t.

A Bam les productions moyennes par hectare sont plus élevées par suite d'une pluviométrie moyenne sans doute meilleure mais non mesurée précisément. L'écart entre T<sub>Fi</sub> et T<sub>F</sub> est de +0,9 t, donc voisin de celui obtenu au Yatenga, mais il est de +2,08 par rapport au témoin T<sub>0</sub>. Les traitements fertilisés recevant une irrigation complémentaire ont alors un rendement 3,6 fois plus élevé que les productions moyennes de maïs de la région ne recevant ni irrigation, ni fertilisation.

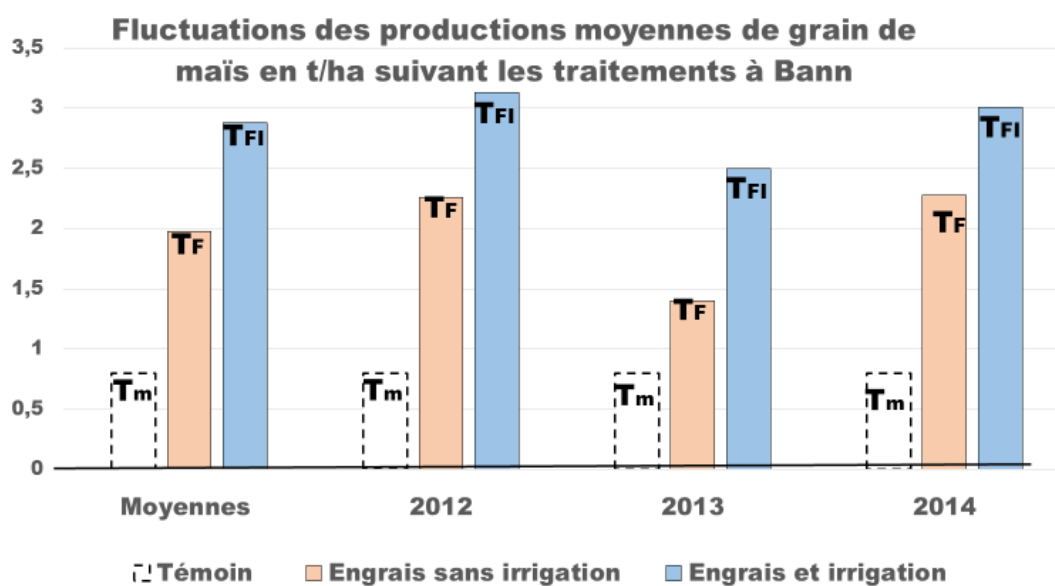
La fig. 4 montre qu'en 2013, à Yatenga, la production des parcelles fertilisées mais non irriguées a été 5,5 fois plus faible que celles des parcelles irriguées en complément et fertilisées. Ceci est sans doute attribuable principalement au fait qu'en Aout les précipitations ont été moindres en 2013 qu'en 2012 (216 mm contre 274 mm) et surtout parce que les périodes presque sans pluies ont été plus longues (du 2/08 au 11/8 et du 13/8 au 18/8/2013).

Les figures 4 et 5 donnent les productions moyennes de grain de maïs, et le tableau 3 montre les productions de grains, de paille et de matière sèche totale des essais à Yatenga et à Bam, en 2012, 2013 et 2014



**Fig. 4. Productions moyennes de grain de maïs (t/ha) à Yatenga en 2012, 2013 et 2014 pour les différents traitements** (T<sub>m</sub> productions moyennes au Nord du Burkina Faso ; T<sub>F</sub> avec fertilisation maïs sans irrigation ; T<sub>FI</sub> avec fertilisation et irrigation complémentaire).

**Fig. 4. Average grain yield of maize (t/ha) at Yatenga in 2012, 2013 and 2014 with different treatments** (T<sub>m</sub> average yield North of Burkina Faso ; T<sub>F</sub> with fertilization but no irrigation ; T<sub>FI</sub> with fertilization and complementary irrigation).



**Fig. 5. Productions de maïs à Bam (cf. légende de la Fig.4).**

**Fig. 5. Maize production at Bam (cf. Fig. 4).**

**Tableau 3. Production de grain et de paille de maïs en t sur 0,2 ha et par ha, à Yatenga, pour différents traitements :**  $T_0$  valeur moyenne pour le Nord du Burkina Faso de parcelles ni fertilisées ni irriguées ( $T_0$  0,8 t de grain par ha, avec un ratio de paille /grain de 1,42) ;  $T_F$  avec fertilisation, mais sans irrigation ;  $T_{FI}$  avec fertilisation et irrigation de complément. Comparaison avec les productions à Bam (d'après Diarra et al. 2016).

**Table 3. Production of grain and straw of maize on 0.2 ha and per ha, at Yatenga, for different treatments:**  $T_0$  average yield in North of Burkina Faso on land neither fertilized nor irrigated (average 0,8 t of grain par ha, with a ratio straw/grain of 1,42);  $T_F$  with fertilization, but no irrigation;  $T_{FI}$  with fertilization and complementary irrigation. Comparison with productions in Bam (from Diarra et al. (2016).

		Campagne 2012		Campagne 2013		Campagne 2014		Moyennes Average	
Traitements Treatments	$T_0^*$	$T_F$	$T_{FI}$	$T_F$	$T_{FI}$	$T_F$	$T_{FI}$	$T_F$	$T_{FI}$
Précipitations annuelles Annual rainfall		498 mm Yatenga		454 mm Yatenga		543 mm Yatenga		498 mm Yatenga	
Production de grains (Grain production) t. 0,2ha <sup>-1</sup>	0,16	0,234	0,356	0,086	0,474	0,254	0,500	0,191	0,443
Production moyenne de grain par ha (Average grain production per ha)	0,8	1,17	1,78	0,43	2,37	1,27	2,50	0,955	2,215
IT en ha (TI in ha)	1,25							1,05	0,45
Production de paille (Straw production) t. 0,2ha <sup>-1</sup>	0,227	0,440	0,700	0,240	0,460	0,340	0,540	0,340	0,566
Productivité des cultures de pluie (Crop water productivity) kg.m <sup>-3</sup>	0,16**	0,234	0,357	0,095	0,522	0,233	0,46	0,192	0,444
IT PS 65% (162,5 kg de céréale par personne) TI SP 65% (162,5 kg per annum and per capita) ha	0,20							0,17	0,07
	Bam								
Production t/ha	0,8	2,26	3,13	1,4	2,5	2,28	3,01	1,98	2,88
IT ha (TI)	1,25							0,50	0,35
IT PS 65% (TI SP 65% ) ha	0,20 ha							0,08	0,06

- Moyenne régionale \*\*Calculé avec la précipitation moyenne de 2012, 2013 et 2014.

L'intensité territoriale par tonne de grain ( $IT_t$ ) diminue avec la fertilisation ; elle n'est que de 84 % par rapport au témoin à Yatenga et de 40% à Bam. En revanche, avec fertilisation et irrigation complémentaire elle n'est que à Yatenga et à Bam seulement égale à 36 % et 28% du témoin. Avec fertilisation et irrigation complémentaire on peut nourrir en moyenne, en céréales (162,5 kg par personne et par an), 2,76 fois plus de personnes par ha à Yatenga et 3,61 fois plus de personne à Bam que sans irrigation complémentaire et sans fertilisation.

#### **Bilan d'efficacité de l'eau à Yatenga :**

Pour la même quantité d'eau de pluie, les témoins ( $T_0$ ) produisent  $0,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , les parcelles seulement fertilisées ( $T_F$ )  $0,955 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , et les parcelles fertilisées avec une irrigation d'appoint ( $T_{FI}$ ),  $2,215 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , soit dans ce dernier cas une efficacité 2,3 fois supérieure à la seule fertilisation ( $T_1$ ), et 2,76 fois supérieure au témoin ( $T_0$ ).

**Bilans énergétiques :** Toutes les parcelles, irriguées ou non, ont reçues 200 kg de NPK (14-23-14) soit 100 unités de  $\text{N-P}_2\text{O}_5$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) et 120 kg d'urée (15-0-0) soit 55,5 unités de N, donc en tout 155,2 unités de NPK par ha. La dépense énergétique est de 4,54 GJ (0,108 tep) par ha. La production supplémentaire de 1,415 kg de grain en  $T_{FI}$  par rapport à  $T_0$ . Ce qui requiert donc 0,076 tep par tonne de grain supplémentaire. Pour compenser cette dépense énergétique il suffit de convertir 217 kg de paille à 15% d'humidité en chaleur avec le même rendement que le fioul, ou 434 kg lorsque ce rendement de conversion est égal à 50% de celui du fuel. Lorsque les animaux convertissent la biomasse du maïs on peut compenser cette dépense énergétique avec 506 kg de paille (avec 0,15 tep par tonne de paille digérée). Or la production de paille de  $T_{FI}$  est supérieure de 1,695 t par ha à celle de  $T_0$ .

**Bilans de GES :** Les émissions dues aux apports d'engrais s'élèvent à  $1,06 \text{ tCO}_2 \text{ ha}^{-1}$ . 1 t paille à 15% d'humidité peut éviter l'utilisation de 0,35 tep évitant l'émission de  $1,225 \text{ t CO}_2$ . Les émissions peuvent donc être compensées avec 0,86 t de paille (à 15% d'humidité) convertie aussi efficacement que le fuel en chaleur, ou avec 1,72 t de paille en cas de conversions deux fois moins efficace que le fuel. Or l'augmentation de production de paille de  $T_{FI}$  par rapport aux témoins  $T_0$  non fertilisé et sans irrigation, est en moyenne

de 1,695 t. Avec une conversion des biomasses supplémentaires de maïs égale à celle du fuel on peut donc compenser les émissions de GES provenant des engrais et avoir encore un supplément d'au moins 0,83 t de paille. Avec un rendement de conversion deux fois moindre à celui du fuel on peut seulement compenser ces émissions.

## **6. DISCUSSIONS ET CONCLUSION**

Il apparaît que les apports d'engrais et la récupération des eaux de ruissellement permettent :

- (1) d'augmenter les rendements, donc de réduire la surface supplémentaire nécessaire pour l'alimentation des habitants supplémentaires, ce qui permet d'éviter ou de moins défricher) ailleurs, lorsque la population augmente;
- (2) d'augmenter l'efficacité des apports d'eau grâce aux apports d'intrants, principalement des engrais et secondairement du compost ;
- (3) d'augmenter les gains nets d'énergie par ha ;
- (4) de compenser les émissions brutes de GES résultant de l'utilisation des engrais minéraux et d'avoir des émissions nettes de GES négatives ou nulles.

**Comparaison des apports de compost et d'engrais :** La faible teneur en azote et en phosphore du compost explique sans doute pourquoi la fertilisation minérale seule donne ici des résultats supérieurs au compost. Selon Leu (2014), président de l'association internationale de l'agriculture biologique (IFOAM), citant Edwards et al. (2011) les rendements moyens des cultures dans la zone du Tigray en Ethiopie auraient été systématiquement légèrement plus élevés avec du compost seul (3,5 t à 15 t /ha !), qu'avec des engrais minéraux seuls. En réalité un examen plus attentif de la publication d'Edwards et al. (2011) montre que les rendements avec la fertilisation minérale seule (100 kg de Di Ammonium de Phosphate et 50 kg d'urée par ha) sont parfois plus élevés qu'avec le compost seul, notamment en zone un peu plus humide (où les apports de composts ont atteint 15t par ha), par exemple pour

l'orge et le Teff, et même pour le blé. Comme il s'agit d'observations et non pas d'expérimentations on ne dispose malheureusement pas de comparaisons équivalentes à celles des essais de Roose et al. (1993), c'est-à-dire au moins d'essais avec du compost et de la fertilisation minérale. On ne dispose pas non plus pour cette publication d'analyses minérales des composts. Cela aurait permis de déterminer les apports de P et de N par ha pour les différents apports de composts. On peut par ailleurs aussi supposer que lorsque les sols sont riches en phosphore, les composts le sont également. Il est en tous les cas dangereux de tirer des conclusions hâtives sans expérimentations rigoureuses.

**Optimisation de la production par des mélanges d'espèces :** Adjahossou et al. (2009) ont montré qu'au Bénin on pouvait encore diminuer l'intensité territoriale par ration alimentaire équilibrée (en calories, en protéines et en lipides,  $IT_{\text{ration alimentaire}}$ ), en mélangeant du maïs avec de l'arachide. Les meilleurs résultats furent obtenus en choisissant des variétés de maïs à port érigé plutôt qu'à port étalé, car celles-ci laissent mieux passer la lumière pour l'arachide. Il est aussi possible que dans ce cas le maïs bénéficie d'une meilleure alimentation en azote et voit sa teneur en matière azotée digestible augmenter. Vanlauwe et al. (2011) montrent aussi que les rendements dépendent à la fois des variétés de maïs et des apports d'engrais et de fumier. Mais en Afrique de l'Ouest la disponibilité en fumier est souvent insuffisante. Des essais complémentaires seraient donc à réaliser pour optimiser les apports d'engrais et les mélanges d'espèces, donc l'utilisation des terres et de l'eau.

**Optimisation de la réduction de l'impact sur le climat :** Nous avons précédemment montré qu'avec un peu plus d'énergie fossile on pouvait tout à la fois améliorer la sécurité alimentaire, moins détériorer le climat et mieux protéger la biodiversité (Riedacker 2008 b). Ici nous avons montré que l'utilisation des engrais permet dans tous les cas de diminuer l'intensité territoriale, d'augmenter productivité de l'utilisation de l'eau, de nourrir plus de personnes par hectare, d'améliorer les bilans énergétiques nets, tout en réduisant les émissions nettes de GES. Ceci doit être souligné, car on dit trop souvent, de manière

erronée, par ignorance ou par malveillance, qu'il ne faut pas apporter d'engrais pour améliorer les bilans énergétiques et de GES des cultures. Dès 1995, dans le second rapport du GIEC, nous avons indiqué qu'il fallait, non pas diminuer l'utilisation des engrais, mais les utiliser efficacement. Et que dans le cas de l'Afrique sub-saharienne il fallait l'augmenter compte tenu du faible niveau des intrants minéraux par rapport aux autres pays, par rapport à la moyenne mondiale (Fig.5) et compte tenu de la pauvreté des sols de l'Afrique de l'Ouest, notamment en phosphore.

**Adaptation au changement climatique :** Les zaïs permettent d'augmenter les rendements, mais de manière irrégulière 1993. Seulement 57% du rendements pour le sorgho en 1993 par rapport à 1992 alors que les précipitations annuelles n'ont diminuée de 10%. Ces irrégularités des rendements, peuvent, indépendamment de la pénibilité du creusement des cuvettes, détourner les agriculteurs de cette pratique, car la valorisation des engrais, donc le retour sur investissement, est trop incertain.

La récupération des eaux de pluies et le stockage de l'eau combinés aux fertilisations permet d'améliorer les rendements de maïs, et en particulier la régularité de ceux-ci, donc de mieux et plus sûrement valoriser le retour sur investissement des apports d'engrais.

**Les politiques publiques :** Il faut s'interroger sur la manière de faire subventionner les travaux, qui sont souvent pénibles, et les intrants. Selon Roose et Rodriguez 1990, (cité dans Roose al. 1993), il faut 300 h de travail pour, le creusement des zaïs, soit environ 3 mois de travail pour une personne pour 1 ha, temps qui pourrait-être diminué de moitié avec un sous solage croisé tous les 80 cm. Le fumier traditionnel, étant rare il faut aussi produire le compost, et disposer des charrettes pour le transport annuel des 3 t de compost et des 10 à 15 t de pierres pour entourer le champ de cordons pierreux au moment de la mise en place des zaïs ! Il faudrait aussi apporter des phosphates calciques broyés pour que le phosphore des engrais ne soit pas insolubilisé par le fer libre des sols ferrugineux.

Il serait intéressant de faire un recensement du nombre d'hectares effectivement traités en zaï dans les différents pays. Cela ne figure pas dans l'ouvrage de Reij et al. (1995). Ces superficies sont-

elles en augmentations, stables, ou diminution ? On ne dit pas non plus combien d'hectares de zaï reçoivent réellement du compost, ni combien de tonnes par ha. Au Niger la dose de fumier recommandée, par exemple par Hassan (1996), est de 0,5 kg par trou (5 à 6 t/ha) à laquelle il faut apporter 50 kg d'urée et 125 kg de phosphate par ha. En réalité de telles quantités ne sont jamais appliquées par les paysans nous dit l'auteur. Combien en appliquent-ils réellement ? Sans doute moins de 1 kg d'engrais, puisque selon les données de la banque mondiale la consommation moyenne d'engrais par hectare au Niger serait à peine de 1 kg (World Bank 2013) ! Fosu et Douchamps (2011) indiquent un potentiel multiplicateur des rendements de 10 avec les zaïs. Mais en réalité sur les 300.000 ha qui seraient traitées de cette manière au Burkina Faso, les augmentations de production qu'ils indiquent n'atteindraient que quelques 80.000 t, soit seulement 267 kg par ha, 3,4 fois moins que dans les essais de Roose et al. (1993) qui ont montré qu'avec des engrais et du compost, la production de sorgho pouvait être augmentée de 913 kg, et être multipliée par 15. Il est donc peu probable que les zaïs reçoivent suffisamment de compost et d'engrais. Une enquête serait à réaliser.

Roose et al. (1993) ont appliqués 65 unités de NPK par ha sur leurs essais de fertilisation, et Diarra et al. (2016) 155 unités de NPK par ha. La plupart des pays africains n'appliquent encore en moyenne que de l'ordre de 10 kg par hectare de terre arable. D'après la Banque mondiale le Burkina Faso n'aurait appliqué en 2013 que 14,3 kg d'engrais par ha de terre arable, concentrés essentiellement sur des cultures de rente, sur le coton et la canne à sucre. (Fig. 6). On est donc encore loin des 50 kg recommandés par le NEPAD en 2006 (IFDC 2006), et a fortiori de la moyenne mondiale, qui était de 120 kg par hectare en 2013. A la différence de l'Afrique, la Chine pourrait réduire ses intrants d'azote de 10 à 30 sans pertes de production, et par conséquent réduire les émissions inutiles de protoxyde d'azote et les fuites de nitrates (Norse et al. 2012).

Liu et al. (2008) indiquent que dans plus de 80% des pays Africains la productivité de l'eau des cultures, notamment du maïs, pourrait être doublée grâce à une meilleure gestion de l'eau et de meilleures fertilisations. En 2012 seulement 0,75 % des surface en maïs du Yatenga, en zone semi-aride, étaient irriguées (Secrétariat général du Burkina Faso 2014).

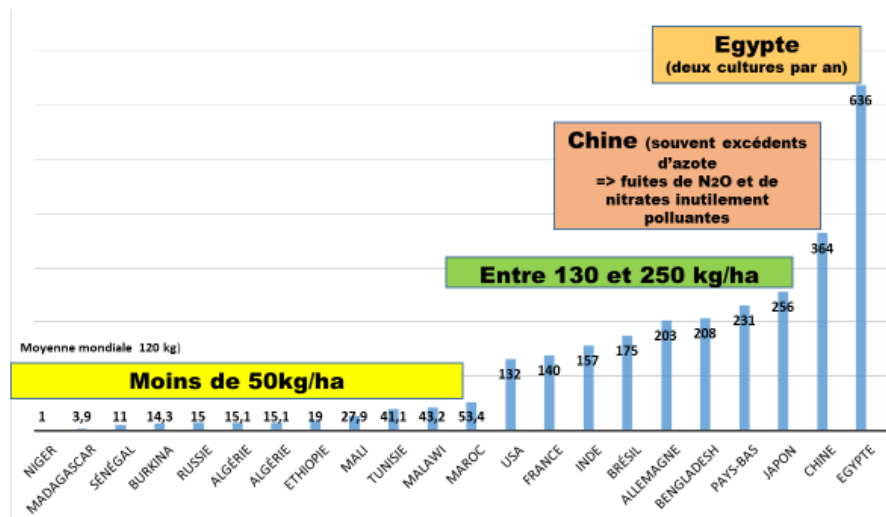


Fig. 6. Consommations moyennes d'engrais en kg par ha de terre arable, en 2013, dans différents pays. (Source Banque mondiale).

Fig. 6. Average use of fertilizer in kg per ha of arable land, in different countries, in 2013 (World Bank data).

Comme l'augmentation des rendements permet de réduire les changements d'utilisation des terres, donc les déforestations et conversions des prairies, (Riedacker, 2008b) il serait utile de déterminer les politiques publiques à instaurer (avances remboursables des engrais avec système

d'assurance en cas d'accidents climatiques, bonifications des prix de l'engrais, crédits, prise en compte dans les NAMAs, crédit carbone dans le cadre de la Convention sur le Climat etc.), via des expérimentations pilotes de politiques publiques. Les \$ 30 milliards que le Maroc souhaite mobiliser

pour l'adaptation de l'agriculture en Afrique dans le cadre de sa présidence de la conférence des Nations Unies pour le Climat avec le Plan 3 A – Afrique Agriculture Adaptation- (UNEP 2016) devrait sans doute être mobilisées à cette fin. L'Occident et les gouvernements Africains se mobiliseront ils enfin pour lutter contre le changement climatique et pour les objectifs du Millénaire en Afrique (Riedacker et Adjahossou 2009).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADJAHOSSOU B. S., D. F. ADJAHOSSOU & V. N. ADJAHOSSOU (2009). Aspects nutritionnels de l'optimisation d'un système de culture associant le maïs et l'arachide au Sud Bénin. *Biol. Chem. Sci.* 3(5): 1141-1150, October 2009 (Available online at <http://ajol.info/index.php/ijbcs> Int. J).
- BAUMONT R., J.P. DUPUY, D. BOTHA J. J., G. KUNDHLANDE & A. SANEWE-BEUKES (2012). A case study of In-Field Rainwater Harvesting in South Africa ([www.fao.org](http://www.fao.org)).
- BREEMAN H. & C. T. DE WIT (1983). Range land productivity and exploitation in the Sahel, *Revue Science* 30 September 1983 vol. 621 N° 4618, pp. 1341-47.
- DIARRA A., H. YACOUBA, S.K. DA SILVEIRIA, M. ZOOM, B. BARBIER, V.C. DOTO, H. GADO & S. FOSSI (2016). Contribution de l'irrigation de complément à la sécurité alimentaire au Sahel, *Cahier des Innovations N°2 Mars 2016 Éditions Sud Sciences et Technologies Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE, Ouagadougou*, 8-11.
- EDWARDS S., T. EGZIABHER & H. ARAYA (2011). Successes and challenges in ecological agriculture. Experiences from Tigray, Ethiopia, dans "Climate change and food resilience in Sub-Saharan Africa", 231—294 ([www.fao.org](http://www.fao.org)).
- FOSU M. & S. DOUXHAMPS (2011). Water for dryland farming with zai: a climate smart response in arid regions, Feuillet distribué à la COP 15 UNFCCC, Durban, ARC. LNR, CSIR, IWWMI, ILRI, IRD 1 page.
- IFDC (2006). Conférence de l'IFDC, Déclaration d'Abuja ([www.ifdc.org](http://www.ifdc.org)).
- IPCC (1995). 2ème Rapport du GIEC, groupe 3 ([www.ipcc.int](http://www.ipcc.int)).
- IPCC (2006). Revised Guidelines for GHG inventories ([www.ipcc.int](http://www.ipcc.int)).
- IPCC (2013). 5<sup>ème</sup> rapport du groupe 1 du GIEC ([www.ipcc.int](http://www.ipcc.int)).
- LEU A. (2014). Ecological approaches for reducing external inputs in farming, *Agroecology for Food Security and Nutrition, Proceedings of the FAO International Symposium 18-19 September 2014, Rome Italy*, 158-173.
- HASSAN A. (1996). Techniques traditionnelles améliorées de plantations en cuvettes dans le département de Tahoua au Niger, dans *Scones et Toulmi*, pp.87-94.
- KABORE N. P., A. OUEDRAOGO, L. SOME & J. MILLOGO-RASOLODIMBY (2015). Les facteurs déterminants de la production de céréales sèches en Zone Soudano-Sahélienne du Burkina Faso, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 11 (1), 214-230.
- LIU J., A. J. N. ZEHNDER & H. YANG (2008). Drops for crops: modelling crop water productivity on a Global Scale, *Global NEST Journal*, Vol 10, N° 3 295-300.
- NORSE D., D. POWLSON & Y. LU (2012). Integrated nutrient management as key contributor to Chinas Low carbone agriculture, Chap 29, p.347-359, *Climate Change Mitigation and Agriculture*, edited by E. Wollenbergn A. Nihart, M. L. Tapio-Bistöm, M. Grieg-Gran, Ed. Earthscan, London.
- OCDE & SAHEL AND WEST AFRICA CLUB (2009). Security implications of climate change in the Sahel [www.oecd.org/swac/climate-change](http://www.oecd.org/swac/climate-change).
- PIERRI C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherches et de développement agricole au sud du Sahara, Ed. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT, 444 p.
- Rapport de synthèse sur la consommation alimentaire en Afrique de l'Ouest (2011) Ressaks, Michigan State, Syngeta Fondation pour l'agriculture durable, 82 pages (accessible sur internet).
- RIEDACKER A. (2005). Les biomasses dans le contexte du changement climatique et du développement durable, pp. 7-60, Chap. 1 du « Guide Biomasses Energie », sous la direction de Y. Schenckel, B. Benabadallah, A. Riedacker et Ph. Girard, Préface de Louis Michel commissaire européenne, Publication de l'IEPF, du CRA de Gembloux et de l'ADEME, Collection Point Repère, N° 4, 389 p.

- RIEDACKER A. (2008a). Reconsidering Approaches for Land Use to mitigate Climate Change and to Promote sustainable development pp. 387-424, Chap.18, in *Global Warming and Climate Change Vol. 1*. Ed. Velma I Grover, Science Publisher 639 pages (accessible sur [www.institut-oikos.org](http://www.institut-oikos.org)).
- RIEDACKER A. (2008b). Un peu plus d'énergie fossile pour la sécurité alimentaire, le climat et la biodiversité, *Liaison Energie -Francophonie*, N° 80 pp. 56-61, Les choix énergétiques mondiaux : entre confiance technologique et préoccupations environnementales, IEPF, Québec.
- RIEDACKER A. & D. F. ADJAHOSSOU (2010). Sécurité alimentaire et changement climatique en Afrique subsaharienne, *Revue Pour*, 3/ 2009 (N°200-203), p 124-132, Défis alimentaires mondial : les politiques face à la faim et à la pauvreté.
- RIEDACKER A., J. M. BOUSSARD, J. RACAPE, F. ADJAHOSSOU, S. ADJAHOSSOU, A. TILAHUN (2015). Africa & Agriculture Increasing Land Use Efficiency for Foodsecurity and Climate (adaptation and mitigation) Afrique & Agriculture / Augmenter l'efficacité territoriale pour la sécurité alimentaire et le climat (adaptation & atténuation), Présentation au Pavillon Africain de la COP 21 Paris 7 Décembre 2015 (accessible via [www.institut-oikos.org](http://www.institut-oikos.org)).
- SECRETARIAT GENERAL DU BURKINA FASO (2014). Annuaire des statistiques agricoles 2012, DGESS, 227 p.
- REIJ C., I SCONES & C. TOULMI (1996). Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique, Ed Karthala, CDS et CTA 351 p.
- ROOSE E., V. KABORE & C. GUENAT (1993). Le zaï : fonctionnement, limites et amélioration d'une pratique traditionnelle africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso) Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIIJ, 2, 1993, 159-173.
- TILAHUN A., S. MESFIN MENZAS & S. BEKELE AWLACHEW (2011). Zaï improves nutrient and water productivity in the Ethiopian Highlands, *Expl. Agric*, 47 (S1), 7-20, Cambridge University Press.
- UNEP (2016). Climate Action News, Novembre 2<sup>d</sup>, 2016.
- VANLAUWE B., J KIHARA, P.CHIVENGE, P. PYPERS, R. COE & J. SIX (2011). Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management, *Plant Soil* 339: 35-50.
- World Bank (2013) Consommations d'engrais par ha (accessible par internet).