

# RETENTION ET DISPONIBILITE DU PHOSPHORE APORTE A QUELQUES SOLS DU SAIS<sup>1</sup>

Y. Moujahid<sup>2</sup>, N. Sefrioui<sup>3</sup>, A. Azzaoui<sup>2</sup> et S. Bouhlassa<sup>4</sup>

## RESUME

Dans le but d'asseoir la carte de la fertilité phosphatée des sols, il est essentiel de caractériser qualitativement et quantitativement les réactions physico-chimiques qui ont lieu dans les solutions des sols suite à un apport d'engrais phosphaté ou à une exportation par la plante. Les aspects qualitatif et quantitatif de ces réactions sont étroitement liés à la nature et la quantité des engrais phosphatés apportés, aux caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols et à l'espèce végétale utilisée.

Trois sols fersiallitiques (1, 2 et 8), deux sols calcimagnésiques (3 et 5), trois vertisols (4, 7 et 9) et un sol peu évolué (6) de la région du saïs ont été utilisés. La rétention du phosphore apporté sous forme de  $KH_2PO_4$  par ces sols est déterminée par différence des concentrations en phosphore des solutions initiales et après 24 heures d'agitation à la température ambiante. Les rendements en matière sèche du blé tendre <Achtar> correspondants aux apports de 0, 20, 40 et 60 mg de phosphore sous forme de  $KH_2PO_4$  par Kg des sols 1, 2, 3, 4 et 5 ont été quantifiés 9 semaines après le semis de 15 graines dans deux Kilos de terre fine sous-serre.

L'adsorption du phosphore (P) aux sols étudiés est mieux décrite par l'isotherme de Langmuir pour les concentrations initiales en P comprises entre 0.5 et 30 mg/l. Les capacités maximales d'adsorption du P aux sols étudiés varient entre 59.3 mgP/Kg du sol fersiallitique sableux (2) et 451.5 mgP/Kg du vertisol (7). La capacité maximale d'adsorption du phosphore est hautement corrélée à la teneur des sols en argile et en matière organique. Le phosphore est plus énergétiquement adsorbé aux vertisols et aux sols calcimagnésiques qu'aux sols fersiallitiques. Trois types de sites d'affinités différentes vis à vis du phosphore interviennent dans la réaction d'adsorption.

Le rendement en matière sèche du blé tendre <Achtar> a augmenté de 50%, 52% et 56% dans le sol brun calcaire (3) par l'apport de 20, 40 et 60 ppm de P et de 30%, 32% et 33% dans la rendzine (5). L'analyse de la variance au logiciel SAS a montré que la réponse du blé tendre à l'apport croissant du phosphore est non significative dans le sol fersiallitique non calcaire (1) et le vertisol (4). Cependant, l'apport croissant du phosphore a entraîné une diminution du rendement en matière sèche dans le sol fersiallitique sableux (2). Les teneurs de ces sols en phosphore assimilable déterminé à la méthode Olsen sont de 15 ppm (sol1), 16 ppm (sol2), 10 ppm (sol3), 24 ppm (sol4) et 15 ppm (sol5). Les concentrations en phosphore des solutions initiales de ces sols sont de 0.065 mg/l (sol1), 0.338 mg/l (sol2), 0.030 mg/l (sol3), 0.048 mg/l (sol4) et 0.045 mg/l (sol5). La réponse du blé tendre à l'apport phosphaté est hautement corrélée à la teneur des sols en calcaire total et négativement corrélée aux concentrations en phosphore des solutions initiales des sols.

**Mots clés:** Sol, Phosphore, Adsorption, Argile, Calcaire total, Blé tendre, P-Olsen, P-CaCl<sub>2</sub>

## INTRODUCTION

La caractérisation de la fertilité phosphatée des sols a été essentiellement basée sur l'étude de la relation entre la quantité de phosphore des sols supposée assimilable par la plante à un instant donné et la réponse de cette plante à l'apport croissant du phosphore sous serre et au champ. Les réactions physico-chimiques que subit le phosphore apporté au sol créent un nouvel état de fertilité phosphaté du sol. Ces réactions sont étroitement liées aux caractéristiques physiques, chimiques et

biologiques des sols, à la nature et la quantité des engrais apportés et à l'espèce végétale utilisée.

L'objectif de ce travail est d'étudier la relation entre les paramètres d'adsorption du phosphore aux différents types de sols de la région du saïs et certains paramètres de disponibilité du phosphore des sols qui sont le phosphore soluble dans une solution de 0.01M CaCl<sub>2</sub>, le phosphore extrait à la méthode Olsen et la réponse du blé tendre à l'apport phosphaté sous-serre.

## MATERIEL ET METHODES

### Matériel

L'étude a porté sur neuf sols du plateau du saïs et sont numérotés de 1 à 9.

- (1) Sol fersiallitique argileux, Ain Taoujdate
- (2) Sol fersiallitique sableux, Ain Taoujdate
- (3) Sol brun calcaire, Meknès
- (4) Vertisol de la ferme de l'E.N.A.
- (5) Rendzine de la ferme de l'E.N.A.
- (6) Sol peu évolué sur marne, Oued Beht

1. cet article a été publié dans la revue HTE n° 118 (2001). Il a été repris par Y. Moujahid, auteur principal de l'article, pour apporter une rectification à l'ordre des auteurs mentionné dans la précédente édition, tout en procédant à de légères modifications.

2. Laboratoire des Sciences du Sol, Centre Régional de la Recherche Agronomique du Saïs et Moyen Atlas, Meknès

3. Département du Milieu Physique, Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat

4. Département de chimie, Faculté des Sciences, Rabat

- (7) Vertisol, Bouderbala
- (8) Sol fersiallitique, même site que (1), mais les parcelles et les dates de prélèvement sont différentes, Ain Taoujdate
- (9) Vertisol, Douyet

Les prélèvements ont porté sur l'horizon de surface (0-20 cm). Les échantillons sont séchés à l'air ambiant, broyés et tamisés à 1mm et 2mm.

**METHODES DE CARACTERISATION PHYSIQUE ET CHIMIQUE DES SOLS**

La granulométrie (Densimètre), calcaire total (Calcimètre Bernard), le pH dans l'eau, la matière organique (Walkley-Black), calcaire actif (Draineau-Galet), le phosphore assimilable (méthode Olsen) et le phosphore soluble dans une solution de 0.01M CaCl2.

**Rétention du phosphore par les sols**

5 g de sol broyé et tamisé à un 1 mm sont mis en suspension dans 100 ml de CaCl2 0.01M contenant du phosphore sous forme de KH2PO4 à des concentrations variant entre 0 et 50 mg/l. Trois gouttes de toluène sont ajoutées à chaque suspension. Après agitation va et vient pendant 24 heures à la température ambiante, les suspensions sont filtrées et dosées en phosphore par colorimétrie en présence du mélange sulfo-molybdique. Les quantités de phosphore retenues par les sols correspondent à la différence des concentrations en P des solutions initiales (Cpi) et à l'équilibre (Cpe).

**Essai sous serre**

Pour les sols 1, 2, 3, 4 et 5, 2Kg de terre fine est mise dans des pots de volume égal à 1.6 dm<sup>3</sup>. Les apports en phosphore sous forme de KH2PO4 sont de 0, 20, 40 et 60 mgP/Kg de sol.

La fertilisation de base est:

- N: 200 ppm, sous forme de NO<sub>3</sub>-NH<sub>4</sub>
- K: 200 ppm, sous forme de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- Cu: 5 ppm, sous forme de CuSO<sub>4</sub>
- Zn: 10 ppm, sous forme de ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O
- Mn: 10 ppm, sous forme de MnSO<sub>4</sub>
- Fe: 7 ppm, sous forme de FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O

Tous les éléments apportés sont préparés en solution et ajoutés aux sols avant le semis de 15 graines de blé tendre

<Achtar>. Les sols sont maintenus à 80% de la capacité de rétention avec irrigation à l'eau distillée. Une semaine après la levée, le nombre de plante est réduits à dix. Neuf semaines après le semis, la partie aérienne des plantes est récoltée, séchée à 65°C et pesée.

**RESULTATS ET DISCUSSION**

**Caractéristiques physique et chimique des sols**

Les teneurs des sols en calcaire total (C.T.) varient entre 0 (sol fersiallitique 2 et vertisol 4) et 33% (sols

calcimagnésiques 3 et 5). Les vertisols (4, 7, 9) présentent les teneurs en argile les plus élevées, 54%, 56% et 56% respectivement. Les pH des sols varient entre 6.9 et 8.5. Les teneurs des sols en matière organique (M.O.) varient entre 0.9% et 3.3%. Les teneurs de ces sols en phosphore assimilable déterminé à la méthode Olsen (P-Olsen) varient entre 10 ppm (sol brun calcaire 3) et 24 ppm (vertisol 4). Les concentrations en P de leurs solutions initiales (P-CaCl2) sont comprises entre 0.030 mgP/l (sol brun calcaire 3) et 0.338 mgP/l (sol fersiallitique sableux 2) (voir tableau 1).

Tableau1: Caractéristiques physiques et chimiques des sols

Sols	Argile %	Limon %	Sable %	C.T %	C.A. %	M.O. %	pH	P-Olsen ppm	P-CaCl2 Mg/l
1	26	16	44	12	7	2.2	8.5	15	0.065
2	10	5	89	0	0	0.9	8.3	16	0.338
3	50	10	4	33	18	3.0	8.0	10	0.030
4	56	26	16	0	0	2.4	6.9	24	0.048
5	35	19	11	33	18	2.8	8.0	15	0.045
6	31	25	27	17	5	2.5	8.0	10	0.025
7	59	19	17	7	3	3.3	7.8	18	0.030
8	31	8	38	18	8	2.2	8.0	12	0.035
9	54	16	8	22	12	1.8	0.1	11	0.048

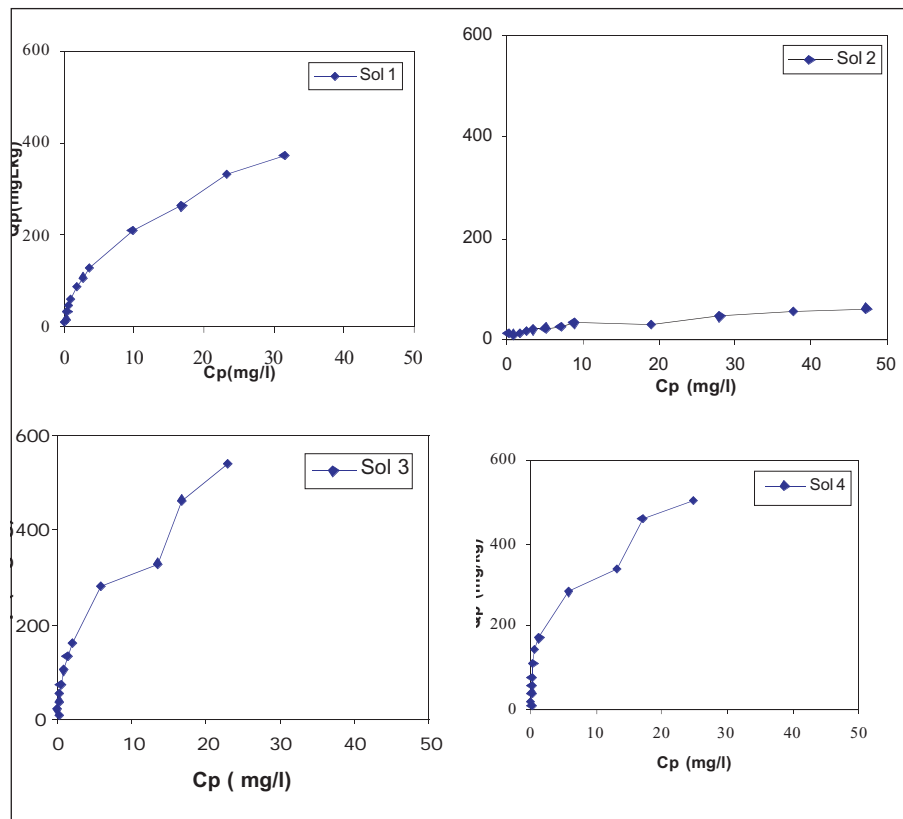
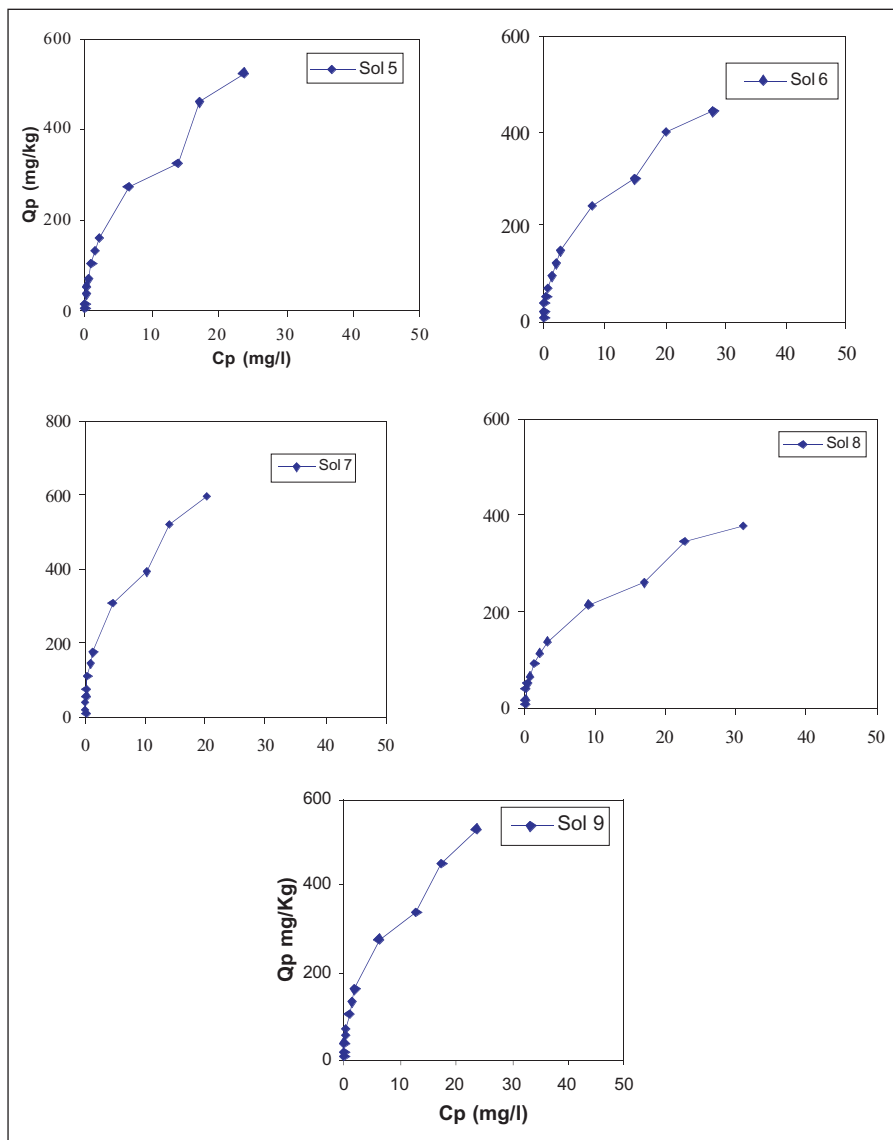


Figure 1 : Isothermes de rétention du phosphore par les sols 1, 2, 3 et 4



**Figure 2 :** Isothermes de rétention phosphore par les sols 5, 6, 7, 8 et 9

Sols	r (F) (0.5-50)mg/l	r (F) (0.5-30)mg/l	r (L) (0.5-50)mg/l	r (L) (0.5-30)mg/l
1	0.99	0.99	0.97	0.98
2	0.92	0.89	0.97	0.98
3	0.97	0.95	0.96	0.99
4	0.97	0.95	0.98	1.00
5	0.99	0.98	0.97	0.99
6	0.98	0.96	0.97	0.98
7	0.97	0.96	0.98	0.99
8	0.98	0.97	0.98	0.99
9	0.97	0.96	0.97	0.99

F : Freundlich

L : Langmuir

**Tableau2:** Coefficients de corrélation des formes linéaires des équations de Freundlich et Langmuir pour les intervalles des Cpi de (0.5-50) mg/l et (0.5-30) mg/l des sols étudiés

### Rétention du phosphore par les sols

Les quantités de phosphore retenues par les différents types sols ( $Q_p$  en mgP/Kg de sol) correspondent aux différences des concentrations en P des solutions initiales ( $C_{pi}$  en mg/l) et après 24 heures d'agitation ( $C_{pe}$  en mg/l).

A l'exception du sol fersiallitique sableux (2), les isothermes de rétention du P par les sols étudiés présentent un aspect hyperbolique. Cette tendance pourrait être expliquée par des isothermes d'adsorption de type Langmuir pour l'intervalle des  $C_{pi}$  compris entre 0 et 30 mgP/l. Le maximum d'adsorption apparaît vers la valeur de  $C_{pi}$  de 20 mgP/l. Ces isothermes présentent un point d'inflexion à la concentration initiale en P égale à 30 mg/l. Ce point d'inflexion est légèrement plus marqué pour les deux sols calcimagnésiques (3 et 5) et pourrait être expliqué par une réaction autre que l'adsorption et qui pourrait être une précipitation. Holford et al., 1974 ont rapporté que la rétention du P par les sols est dominée par le mécanisme d'adsorption pour les  $C_{pi}$  inférieures à 10-3M (31 mgP/l) et que pour des  $C_{pi}$  supérieures à cette valeur, il y a précipitation. L'affinité de rétention du P par les vertisols (4,7 et 9) est très élevée pour les faibles  $C_{pi}$  (0 - 10 mg/l). En effet, pour une valeur de  $C_{pi}$  égale à 10 mg/l, plus de 80% de P en solution est retenu par les vertisols. Cependant, le sol fersiallitique sableux n'a retenu que 12% du P apporté en solution.

Isothermes d'adsorption de Freundlich et Langmuir

Les coefficients de corrélation des régressions simples des formes linéaires des isothermes de Freundlich et Langmuir pour tout l'intervalle des  $C_{pi}$  (0.5-50 mg/l) et pour l'intervalle des  $C_{pi}$  égal à (0.5-30 mg/l) sont présentés dans le tableau 2. Ces valeurs montrent que la rétention du P par les sols est une adsorption qui est mieux décrite par la loi de Langmuir pour l'intervalle des  $C_{pi}$  compris entre 0.5 et 30 mg/l.

Forme linéaire de l'équation de Freundlich:

$\ln Q_p = \ln A + 1/n \ln C_p$  A et n sont des constantes positives

### Forme linéaire de l'équation de Langmuir:

$C_p/Q_p = C_p/Q_{pmax} + 1/W Q_{pmax}$   
 $Q_{pmax}$ : capacité maximale d'adsorption du P aux sols

W: Constante liée à l'énergie d'adsorption du P

Ouchtoubane, 1980 et Ratim, 1987 ont montré que l'adsorption du P par les sols de la région de Meknès suit la loi de Langmuir pour l'intervalle des concentrations initiales en P de (0-16) mg/l. Bache et Williams, 1971; Aquino et Hanson, 1987; Azzaoui, 1987 ont choisis l'intervalle des C<sub>pi</sub> compris entre 0 et 10 mg/l pour l'étude de l'adsorption du P dans les sols choisis.

Boukhal, 1989 a montré que la rétention du P par les sols du Gharb, Settatt, Tadla et Zaer pour les C<sub>pi</sub> compris entre 0 et 37 mg/l est une adsorption de type Langmuir.

Les capacités maximales d'adsorption du P aux sols varient entre 59.3 mg/Kg pour le fersiallitique sableux(2) et 451.5 mg/Kg pour le vertisol de Bouderbala (7) (voir tableau 3). En utilisant l'équation de Langmuir, Ouchtoubane, 1980 a montré que les sols du plateau de Meknès et les sols salins de Midelt ont des Q<sub>pmax</sub> comprises entre 230 et 440 mgP/Kg. Boukhal, 1989 a rapporté que les sols du Gharb, Settatt, Tadla et Zaer ont trouvé des Q<sub>pmax</sub> qui varient entre 62 et 520 mgP/Kg et que les sols sableux de Zaer ont des Q<sub>pmax</sub> les plus faibles

Le phosphore est énergétiquement adsorbé aux vertisols et aux sols calcimagnésiques. Boukhal, 1989 a trouvé pour des sols du Gharb, Settatt, Tadla et Zaer des valeurs de W comprises entre 0.06 l/mg et 0.87 l/mg. Holfford et al., 1974 ont présenté des valeurs de W comprises entre 1.40 l/mg et 4.85 l/mg.

La capacité maximale d'adsorption du P aux sols est hautement corrélée à leurs teneurs en argile (Tableau 4).

Boukhal, 1989; Moughli et al., 1993 ont montré que l'adsorption du P aux sols du Gharb, Settatt, Tadla et Zaer n'est significativement corrélée qu'à leurs teneurs en argile. Une constatation analogue a été rapportée par Sen Gupta

Sols	Q <sub>pmax</sub> (mg/kg)	W (l/mg)
1	301.1	0.402
2	59.3	0.478
3	377.5	0.600
4	378.7	1.090
5	375.8	0.627
6	334.8	0.526
7	451.5	0.747
8	290.1	0.520
9	381.0	0.654

**Tableau 3:** Valeurs des constantes de Langmuir (Q<sub>pmax</sub> et W) des sols

r	C.T.	C.A.	Argile	M.O	P-Olsen	P-CaCl <sub>2</sub>
Q <sub>pmax</sub>	NS	NS	0.78**	0.62*	NS	- 0.91**
W	NS	NS	0.73*	NS	0.71*	NS

NS : non significatif

\* : significatif à 5%

\*\* : significatif à 1%

**Tableau4:** Coefficients de corrélation des régressions simples (r) des constantes d'adsorption de Langmuir (Q<sub>pmax</sub> et W) en fonction de quelques caractéristiques des sols

Apports de P (ppm)	Sol1	Sol2	Sol3	Sol3	Sol5
0	13.5ab	11.3c	6.0e	12.2abc	9.4d
20	14.2a	11.3c	11.8bc	13.4ab	13.5ab
40	14.4a	11.2c	12.5abc	14.4a	13.9ab
60	14.4a	10.5cd	13.7ab	13.9ab	14.0ab
Rend. Rel. %	93.3	100.0	43.7	84.3	67.2
P-Olsen ppm	15	16	10	24	15
P-CaCl <sub>2</sub> mg/l	0.065	0.338	0.030	0.048	0.045

**Tableau5:** Rendements moyens en matière sèche (M.S.) en g/pot pour les 4 apports de P et pour les 5 sols, Rendements relatifs, P-Olsen et P-CaCl<sub>2</sub>

et Cornfield, 1963 pour des sols calcaires. La constante liée à l'énergie d'adsorption du P aux sols (W) est significativement corrélée aux teneurs des sols en argile et en P-Olsen.

Pour des C<sub>pi</sub> comprises entre 0.5 et 10 mg/l et pour les sols 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9, les tracés des formes linéaires des isothermes de Langmuir ne sont pas des droites, mais des portions de droites qui correspondent à l'adsorption du P par des sites d'affinités différentes.

### REPONSE DU BLE TENDRE A L'APPORT PHOSPHATE SOUS-SERRE

L'analyse de la variance par la méthode ANOVA du SAS a montré que la réponse du blé tendre aux apports de P est hautement significative pour les deux sols calcimagnésiques (3 et 5) (voir tableau 5).

Les sols 1,2 et 5 ont présentés la même teneur en P-Olsen (15,16)ppm. Le BT n'a répondu à l'apport croissant de P que

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Aquino, B.F. and R.G. Hanson, 1984. Soil phosphorus supplying capacity evaluated by plant removal and available phosphorus extraction. *Soil Sci. Amm.J.* 48: 1091-1096
2. Azzaoui, A., 1987. Extractable phosphorus and fertilizer requirement for wheat grown on Moroccan calcareous soils. Master of science. University of Missouri Columbia. USA.
3. Bache, B.W. and E.G., Williams, 1971. Phosphate sorption index for soils. *J. of Soil Science.* Vol.22, No3.
4. Boukhal, A., 1989. Etude de la capacité tampon du phosphore et la disponibilité du phosphore pour la plante. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle. DSS.I.A.V.Hassan II. Rabat.
5. Bounif, M., 1987. Contribution à l'étude des normes d'interprétation des résultats d'analyse du sol en P disponible: Cas du blé tendre Nesma 149. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle, DSS. I.A.V. Hassan II. Rabat.
6. Cate, R.B. et L.A., Nelson, 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil sci.Soc. Am. Proc.* 35: 658 - 660.
7. Holford, I.C.R., R.W.M., Wedderburn and G.E.G. Mattingly, 1974. A Langmuir tow surface equations as a model for phosphate adsorption by soils. *J.Soil Sci.* 25: 242-254.
8. Moughli, L., D.G., Westfall, A., Boukhal, 1993. Use of adsorption and buffer capacity in soil testing for phosphorus. *Soil Sci. Plant Analy.*, 24. 1993.
9. Ouchtoubane, B. 1980. Utilisation des isothermes de Langmuir et Freundlich pour décrire l'adsorption des phosphates dans les sols de Meknès et Midelt. MFE, E.N.A. Meknès.

dans la rendzine (5) qui a présentée un P-CaCl<sub>2</sub> le plus faible par rapport aux sols 1 et 2.

Azzaoui, 1987 a rapporté un seuil critique en P-CaCl<sub>2</sub> égal à 0.1 mg/l pour des sols calcaires de la Chaouia.

Le sol brun calcaire (3) dont les valeurs de P-Olsen et P-CaCl<sub>2</sub> sont les plus faibles a présenté les augmentations relatives des rendements en M.S. les plus élevées et dont les valeurs sont de 50%, 52% et 56% pour les apports de 20, 40 et 60 ppm de P respectivement.

L'apport phosphaté au sol fersiallitique (2) dont le P-Olsen est de 16 ppm, mais une concentration de P en solution initiale la plus élevée (0.338 mg/l) a entraîné une diminution de son rendement en M.S. de 8%.

La réponse du blé tendre à l'apport phosphaté n'est significativement corrélé qu'à la teneur des sols en calcaire total. Soltanpour et al., 1986 ont montré que les sols calcaires en surface ont tendance à répondre à l'apport phosphaté.

# ELEMENTS DE REFERENCE POUR LE RAISONNEMENT DES EPANDAGES MECANIKES D'ENGRAIS

A. Aït Houssa<sup>1</sup>, A. Zari<sup>2</sup> & M. El Midaoui<sup>1</sup>

## RESUME

On présente les éléments de référence obtenus dans le cadre des recherches appliquées, réalisées dans les Domaines Agricoles sur les épandages mécaniques d'engrais. Ces éléments montrent qu'un épandage raisonné, prenant en compte le triple souci de la productivité, du coût économique et du respect de l'environnement, requiert:

- un engrais de qualité (non souillé, de densité homogène, de granulométrie serrée), mélangé de préférence en tête de parcelle en cas de «bulk blending»;
- l'application des règles élémentaires d'attelage épandeur/tracteur (stabilité, hauteur, horizontalité de l'appareil);
- l'adoption d'une vitesse d'avancement du tracteur compatible avec les caractéristiques du terrain (en pente, plat, motteux, meuble,...), et les impératifs de confort et de sécurité conducteur/matériel ;
- le respect d'une largeur de travail optimale spécifique à chaque type d'engrais afin d'obtenir une meilleure uniformité d'épandage.

## 1. INTRODUCTION

Malgré que l'épandage mécanique d'engrais ait été introduit au Maroc depuis fort longtemps, les conditions de sa réussite, dans le contexte propre du pays, n'ont jamais fait l'objet d'études spécifiques. Sur le terrain, la situation donne l'impression que toute la problématique de l'épandage est réduite à sa seule facette mécanique sur la maîtrise des réglages du distributeur. Même pour l'utilisateur bien averti (les Domaines Agricoles en sont un exemple), dès lors que les prescriptions de la notice d'emploi, telle qu'elle a été élaborée par le constructeur, sont scrupuleusement respectées (attelage, prise de force, largeur, débit, ...), l'épandage est considéré comme étant bien fait et il n'y a pas à s'en soucier.

Or, le Maroc n'est pas fabricant d'épandeurs mais importe du matériel dont l'étalonnage a été fait (en Europe), avec des engrais qui n'ont pas forcément les mêmes caractéristiques que ceux fabriqués sur place. D'autre part, un bon réglage n'est pas la seule condition de réussite de l'épandage. Encore faut-il maîtriser toutes les étapes qui le précèdent (choix de l'engrais, façon de le stocker, de le transporter,

de le mélanger, ...), pour qu'elles ne soient pas des sources primaires d'hétérogénéité, susceptibles d'affecter la qualité de l'opération.

L'homogénéité de l'épandage est très dépendante de la qualité de l'engrais utilisée. Une granulométrie et une densité serrées, une bonne coulabilité du produit dans la trémie et dans le mécanisme de dosage, sont autant de propriétés physiques d'une bonne homogénéité d'épandage [Cemagref, 1997; Destain et al., 1986 ; Tissos et al., 1995]. Une granulométrie trop étalée, une densité irrégulière, la présence d'un taux de poussière ou d'agglomérats de reprise en masse élevé, sont par contre des facteurs défavorables à un épandage uniforme.

Faute de temps, aux Domaines Agricoles, on en était également resté au stade des idées des années durant et très peu de données ont été recueillies sur le sujet. En 2003, la décision a été finalement prise de reprendre cette question des épandages à la base, en vue d'établir les règles agronomiques de travail pour la société. Le but de cet article est de faire profiter l'utilisateur des premiers éléments complets obtenus dans le cadre de ces essais de normalisation interne.

## II. PRODUITS ET MATERIELS UTILISES

### II.1. Produits testés

Deux groupes d'engrais ont été testés dans les essais réalisés pour l'essentiel en hall, au Domaine de Itto Aomar (Région de Meknès):

- les engrais fabriqués par l'Office Chérifien des Phosphates (OCP) : le super triple phosphate (TSP), le sulfophosphate d'ammoniaque (ASP), le phosphate mono-ammonique (MAP), le phosphate di-ammonique (DAP) et le 14-28-14C ;
- les engrais importés de l'étranger (EIE): sulfate d'ammoniaque 21% (SA), l'ammonitrate 33,5 (AM.), la perlurée 46 (Ur), le superphosphate normal pulvérulent (SSPp), le chlorure de potasse compacté (KCLc), le sulfate de potasse pulvérulent (SKp) et le sulfate de potasse compacté (SKc),

Les trois principales caractéristiques physiques des engrais testés (densité d, diamètre médian  $D_{50}$ , étalement granulométrique EG) sont présentées dans le tableau 1.

### II.2. Matériels testés

Les essais ont été réalisés avec l'épandeur centrifuge monodisque

1. Département d'Agronomie, Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès-Maroc.

2. Ingénieur stagiaire, Domaines Agricoles du Gharb, Route Dar Belamri, Sidi Slimane-Maroc.

**Tableau 1.** Caractéristiques physiques des engrais testés

Engrais	TSP	ASP	MAP	DAP	14-28-14 C	SA	Ur	AM	SSPp	KCLc	SKp	SKc
d	1,17	1	0,95	1,07	1,08	1,1	0,82	1,05	1,02	1,15	1,52	1,42
D <sub>50</sub>	2,1	2,5	-	1,75	2,5	-	0,6	1,5	-	3,1	-	2,6
EG	1-2,7	1,8-3,3	-	1,1-2,8	1,5-3,0	-	0,1-1,6	1 à 2	-	2,1- 4,6	-	1,3 - 4,3

*d*: densité (kg/dm<sup>3</sup>); *D*<sub>50</sub>: diamètre médian (mm); *EG* : Etalement granulométrique (mm)

de marque Nardi ( SP500). C'est un appareil de conception générale très simple. Il est constitué d'une trémie en forme de cône, d'une capacité de 500 kg, d'un système d'alimentation et de dosage par gravité (volet réglable) et d'un système de projection animé par la prise de force (disque muni de 4 pales identiques orientables).

Quelques essais complémentaires ont été réalisés avec le bidisque Sulky DR 650 (épandeur porté, trémie de 650 kg de capacité, système d'alimentation et de dosage par trappe réglable, système d'éjection formé d'un double disque animé par la prise de force) et à l'épandeur pneumatique Nodet-Gougis DP112 (épandeur porté, trémie de 850 kg de capacité, rampe d'une largeur de travail de 12 m équipée de 12 tubes en PVC espacés de 0,75 m) [Nodet-Gougis, 1986 ; Sulky, 2002].

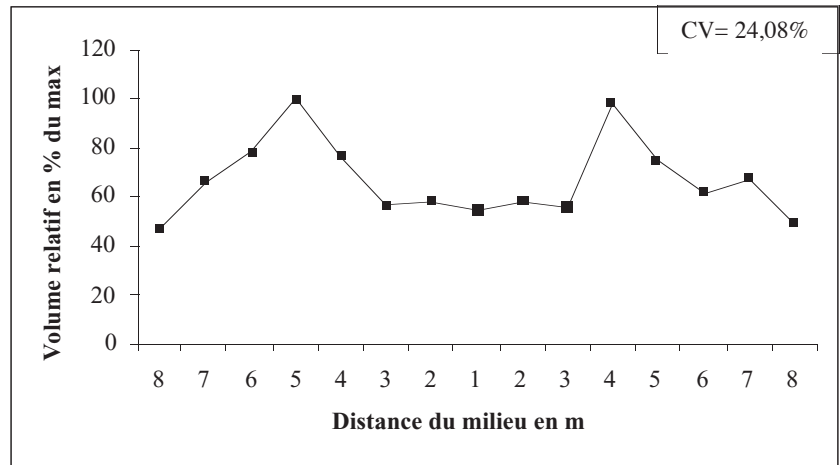
Pour l'étude des vitesses, deux types de tracteur ont été également testés : le New Holland TS90 (2RM, moteur de 4 cylindres, puissance P = 72 ch.) et le Deutz Dx 4.57 (4RM, moteur de 4 cylindres, puissance P = 95 ch.).

### III. RESULTATS ET DISCUSSION

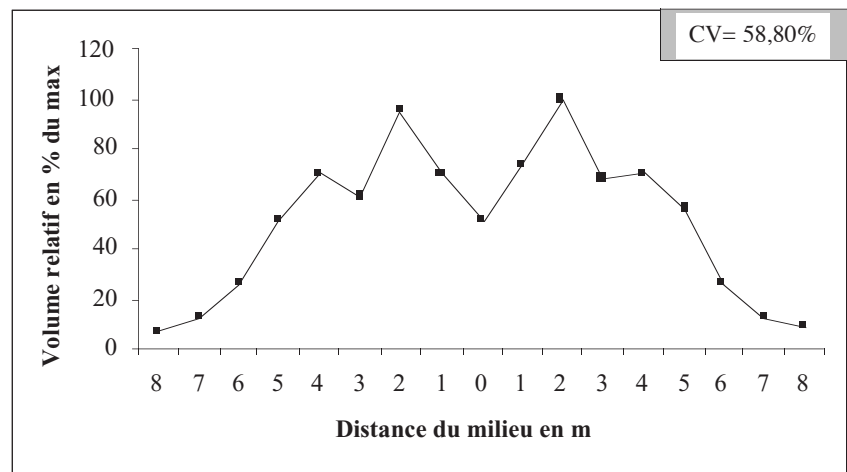
#### III.1. Eléments de référence sur les engrais

##### III.1.1. Qualité des produits

Aux Domaines Agricoles, l'interruption des programmes des épandages d'engrais sur les céréales en années sèches, oblige à garder parfois d'importantes quantités d'engrais en stock. De ce fait, la reprise en masse des produits, reste le phénomène majeur à gérer en matière de qualité [Aït Houssa et al., 2001]. Dans la présente étude, le problème a été suivi



**Figure 1:** courbe de répartition de l'ammonitrate normal derrière un épandeur centrifuge mono-disque.



**Figure 2:** Courbe de répartition de l'ammonitrate après la reprise en masse derrière un épandeur centrifuge mono-disque.

sur l'ammonitrate (l'un des produits les plus sensibles à ce phénomène) stocké en piles de 1,45 m de hauteur durant 24 mois puis repris pour l'épandage après re-pilonnage.

Le premier inconvénient de la reprise en masse est le temps que demande de re-pilonner le produit

lorsque le travail est fait à la main (4 h 30 min/t), en particulier quand l'opération coïncide avec des périodes de semis où l'on a plutôt besoin d'avoir le «vent en poupe», le second est d'ordre économique (le coût est de 21 Dh/t pour que le produit retrouve partiellement son

état physique initial), et le troisième est d'ordre technique pour la qualité des épandages (répartition plus hétérogène derrière le tracteur, figures 1 et 2).

### III.1.2. Modalités de mélange et de transport

#### Comportement des divers types de mélange

Du fait de sa souplesse d'emploi (possibilité de composer toute sorte d'équilibre NPK sur place, application de la fumure en un seul passage), le mélange en vrac ou «bulk blending» est d'une utilisation très fréquente aux Domaines Agricoles, pour apporter la fumure de fond. Il est parfois directement commandé aux fabricants, mais le plus souvent préparé à la ferme sur une bâche, sur une remorque plateau en tête de parcelle ou dans la trémie même au moment de l'utilisation. Le tableau 2 donne les divers types de mélange testés dans cette étude en vue de fixer les normes d'épandage du «bulk blending».

Du fait de leur incompatibilité granulométrique, le bulk composé en mélangeant entre eux, engrais pulvérulent et engrais granulé est à proscrire. Le plus grave est le «faux bulk» réalisé directement dans la trémie, pour aller plus vite, en disposant les produits en couches simples ou alternées (figure 3).

Quel soit versé premier ou second dans l'épandeur, le produit pulvérulent est toujours achevé le premier, sauf pour le SKp. Le «vortex» créé au centre de la trémie par l'agitateur (appel par le milieu) n'améliore que très peu la qualité du mélange et par conséquent celle de l'épandage. L'équilibre de dosage entre produits n'est atteint que tardivement (après 6 ou 8 min ou en fin de vidange). Il s'inverse ensuite rapidement ou dure très peu, de sorte que globalement l'épandage reste de mauvaise qualité.

A l'épandage, un mélange binaire granulé/pulvérulent disposé en couches dans la trémie, donne une hétérogénéité globale extrême ( $110 < CV < 250\%$ ) correspondant en fait à une répartition de produits par bandes:

	Bulk binaire pulvérulent + granulé	Bulk binaire granulé	Bulk ternaire granulé
Produits	MAP + TSP	Ur + DAP.	AM + DAP + SKc
	SKc + SKp		Ur + DAP + KCLc

Tableau 2: Liste des mélanges testés au Domaine Agricole Itto Aomar

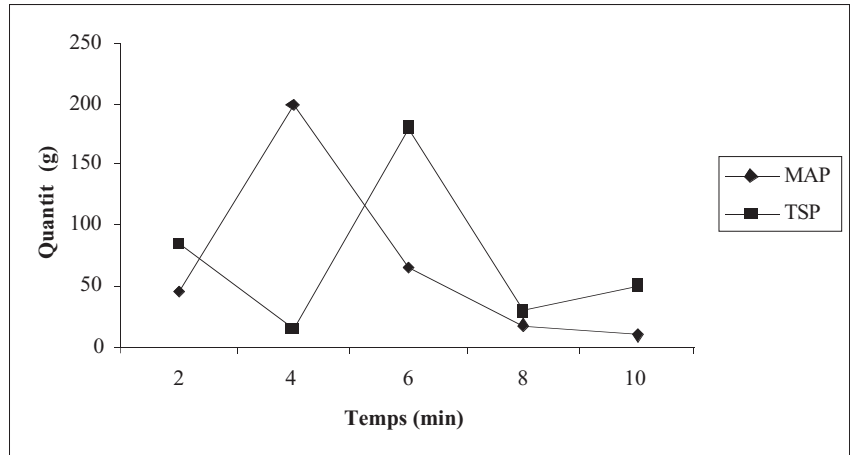


Figure 3: Évolution de l'épandage de bulk MAP + TSP

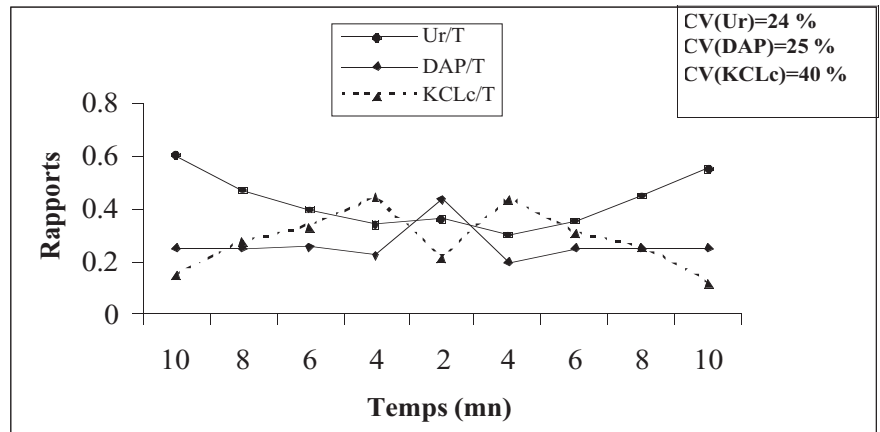


Figure 4: Évolution des quantités épanchées de produits disposés en couches alternées  $T = \sum Ur + DAP + KCLc$ .  $R = Ur/T$ ;  $DAP/T$ ;  $KCLc/T$ .

- bande continue ne recevant que du granulé du fait que ce dernier est projeté sous l'action du disque, plus loin qu'un produit pulvérulent;
- bande sur-dosée en pulvérulent et sous dosée en granulé durant les premiers moments de l'épandage ;
- bande sur-dosée en granulé et sous dosée en pulvérulent en fin d'épandage.

En cas de granulés, l'hétérogénéité à l'épandage est également importante si les produits sont disposés en couches épaisses ( $30 < CV < 88\%$  selon le produit). La qualité de l'épandage s'améliore par contre de façon sensible ( $24 < CV < 40\%$ ) en cas de plusieurs couches fines alternées ou de mélange manuel au sein de la trémie (figure 4).

### Conditions de préparation d'un bon bulk

Pour préparer rapidement le mélange d'engrais (bulk) dans les grandes propriétés, la mécanisation est incontournable. Les essais menés au Domaine Itto Aomar ont montré qu'avec une bétonnière classique, actionnée par un moteur électrique, un mélange homogène est obtenu au bout de 2 min (figure 5), à condition de ne pas dépasser la moitié de la capacité de la bétonnière (soit 200 kg pour une capacité de 400 kg). Au delà, le bulk est de moins bonne qualité, faute d'un brassage suffisant des produits au fond de la machine.

La préparation manuelle du bulk sur une bêche, quoique plus lente, est également possible. Mais la masse de référence de 500 kg recommandée jusqu'ici aux Domaines Agricoles (sur la base d'appréciations purement visuelles), pour réaliser le mélange, donne un bulk de qualité plutôt irrégulière, même en prolongeant la durée de l'opération. Les meilleurs résultats sont obtenus en procédant par petits lots successifs de 3 ou 4 sacs (3 par 3 ou 4 par 4) avec homogénéisation de 5 à 10 min.

### Effet des conditions de transport

En l'absence de secousses, le transport d'un bulk soigneusement préparé à la ferme, sur de petites distances (moins de 1 km), que ce soit en sacs ou dans l'épandeur même, est sans grande influence sur la qualité de l'épandage. Ce n'est plus le cas dès lors que l'épandeur est soumis à de fortes secousses (figure 6), dues par exemple à un état de surface très motteux. Même sur une faible distance, il peut y avoir ségrégation des produits, avec une incidence négative sur la qualité des épandages.

Manifestement, le bulk avec le risque minimum de ségrégation est celui préparé en tête de parcelle sur une remorque plateau et déversé aussitôt dans l'épandeur [Aït Houssa, 1998], la remorque avançant au fur et à mesure avec l'épandeur, le long de la parcelle.

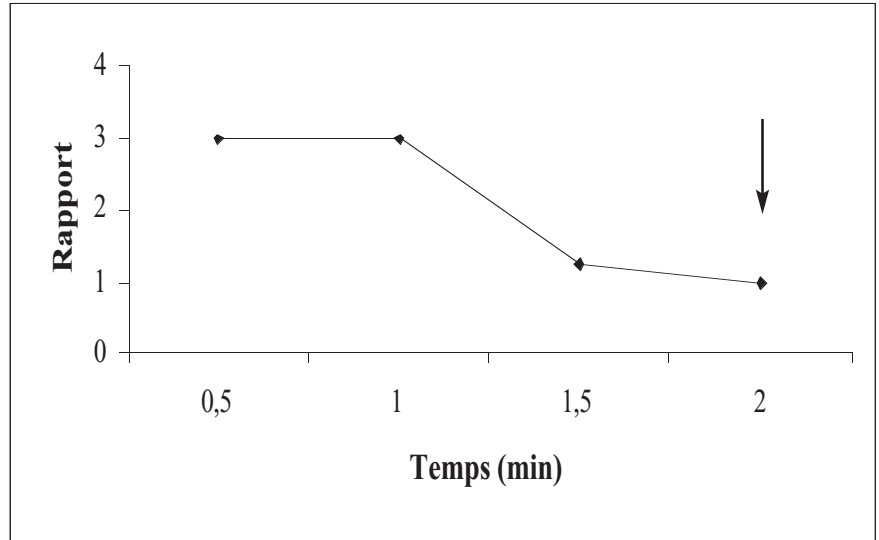


Figure 5: Homogénéisation du Bulk en fonction du temps de mélange dans une bétonnière

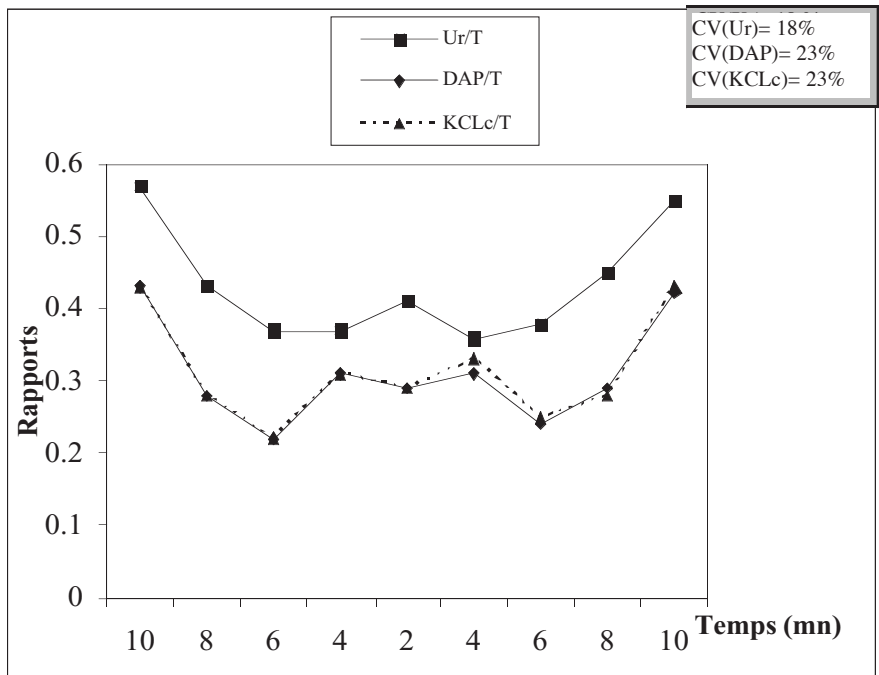


Figure 6: Effet des secousses sur l'uniformité de l'épandage de bulk ternaire  
 $T = \sum Ur + DAP + KCLc$ .  $R = Ur/T ; DAP/T ; KCL/T$ .

### III.2. Eléments de référence sur le matériel

#### III.2.1. Effet des mauvais réglages élémentaires

Le premier réglage élémentaire à surveiller est celui de l'attelage épandeur/tracteur. Le non respect de la symétrie par rapport à l'axe du tracteur (axe de l'épandeur déporté), de la hauteur (appareil trop haut,

trop bas), de l'horizontalité (appareil en dévers, trop penché vers l'avant ou vers l'arrière), sont autant de facteurs d'influence sur la qualité des épandages [Cemagref, 1997 ; Nodet-Gougis, 1986]. Il en est de même lorsque l'épandeur est en mauvais état (disque déformé, pâles déformées ou trop usées,...). Les figures 7 et 8 donnent le type de dissymétrie et l'extrême hétéro-

généité des épandages dus au non respect des réglages élémentaires de l'attelage (ici dévers exagéré) et à des défauts sur une pièce maîtresse (ici disque déformé). Les CV obtenus (35 à 42 %) sont pratiquement de 1.4 à 1.8 fois la valeur obtenue en conditions normales d'épandage de l'Ammonitrate.

### III.2.2. Méthode d'étalonnage de l'épandeur centrifuge

Les quatre éléments qui interviennent dans l'étalonnage d'un épandeur centrifuge sont la dose Q à épandre, la vitesse V avec laquelle évolue le tracteur, la largeur L d'épandage, le débit D de l'appareil et la superficie S à fertiliser. Ces paramètres sont reliés par l'équation simple :

$$D = Q VL/S$$

En mode d'expression usuel avec Q en kg/ha, V en km/h, L en m et S en ha, la relation de calibrage ci-dessus devient :

$$D \text{ (en kg/mn)} = QVL/600$$

#### Détermination de la dose Q

La détermination de la dose d'engrais Q à épandre est du ressort du spécialiste en fertilisation. Q est fonction de l'élément considéré (azote, phosphore, potasse), de la culture envisagée (céréale, légumineuse, betterave,...), du niveau de productivité réalisable dans la zone (élevé, moyen, médiocre) et du mode d'apport (totalement bloqué, fractionné). Des logiciels ont été mis au point dans le contexte marocain depuis déjà plus de 12 ans et peuvent être utilisés pour le calcul des plans de fumure, que ce soit pour les agrumes [Aït Houssa et al., 1987] ou la grande culture [Aït Houssa et al., 1997]. Pour les problèmes d'épandage que nous traitons dans la présente étude, la valeur de Q est sans grand intérêt, pourvu qu'elle soit raisonnable et couverte par la gamme de doses pour laquelle l'appareil a été calibré au départ par le constructeur.

#### Détermination de la vitesse V

##### Méthode de détermination et règles à respecter

Pour des impératifs liés au confort du conducteur, à sa sécurité, voire à

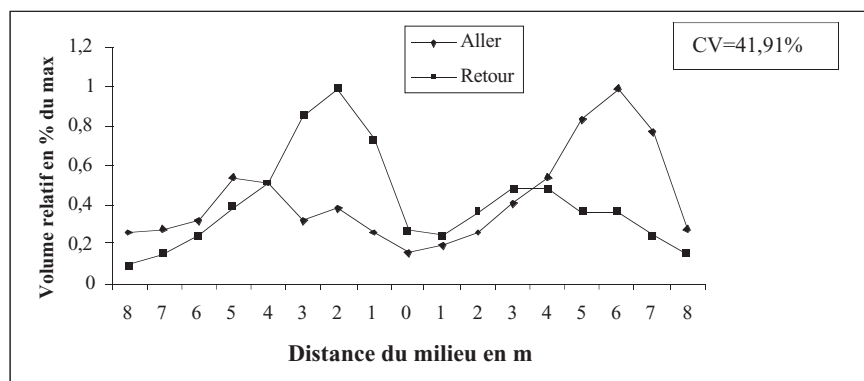


Figure 7: Effet du dévers sur la qualité des épandages de l'ammonitrate HD

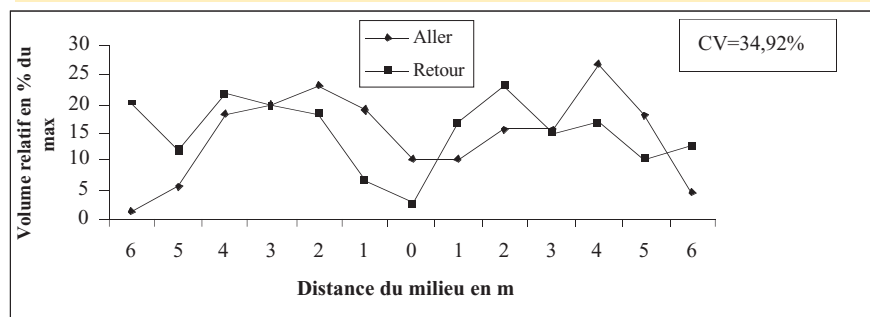


Figure 8: Effet de la déformation du disque sur la qualité des épandages de l'urée

	Terrain plat affiné	Terrain en pente (5 %)	Le long des courbes de niveau (5% de pente)	Terrain plat motteux
4RM Deutz DX 4.57	10-12	6-7	6-7	5-7
2RM New Holland TS90	8-10	5-6	5-6	5-6

Tableau 3: Choix de la vitesse d'épandage des engrais en fonction des conditions du terrain et du type de tracteur utilisé (km/h)

la sécurité du matériel lui même, la vitesse d'avancement V doit être choisie in situ, la trémie du tracteur à moitié chargée. La détermination en est faite sur une distance de 100 m en répétant l'aller retour 2-3 fois, la rotation de la prise de force étant calée sur 540 tr/min et le rapport choisi au niveau de la boîte de vitesse maintenu constant. Le tableau 3 donne les résultats obtenus sur ce point à Itto Aomar.

La vitesse V avec laquelle le tracteur peut évoluer sur le terrain est manifestement plus grande pour un épandage en terrain plat, que pour un épandage en pente ou le long des courbes de niveau. V à adopter est également plus grand sur un état de

surface affiné que sur un terrain motteux ou pierreux. En sol trop argileux travaillé à sec à la charrue à socs, l'épandage s'avère parfois même quasi impossible du fait des gros blocs soulevés par cet outil. Il faut, soit attendre l'arrivée des premières pluies, soit faire appel à un rouleau pour briser les mottes [Aït Houssa, 2001].

#### Facteurs influant sur V

Les essais menés à Itto Aomar sur cet aspect, montrent que même à rapport et à accélération constants, V reste légèrement influencée par le type de tracteur (la vitesse est globalement plus régulière avec un 4RM qu'avec un 2RM, sauf le long des courbes de niveau où il y a

égalité de performances entre les deux (tab. 4). Bien évidemment, le faible écart constaté n'a qu'un intérêt pratique limité. Il n'est pas question de chercher à s'équiper en tracteur 4RM (quant on n'en a pas) ou à l'affecter en priorité aux épandages (quand d'autres travaux plus importants tels que les labours attendent) sous prétexte qu'il y a une petite amélioration de la qualité des épandages.

On note également un effet net de la pente (effet de régulation de la pompe d'injection en montée) et de l'état de surface du sol (régularité meilleure en terrain plat qu'en terrain en pente, en sol sec qu'en sol humide).

### III. 2.3. Recherche de la largeur optimale

Avec un épandeur centrifuge, la répartition transversale de l'engrais (dans le sens perpendiculaire à l'avancement), n'est pas uniforme mais dégressive [Cemagref, 1997 ; Tissos et al., 1995]. Plus on s'éloigne de l'axe du tracteur, plus la dose diminue. D'où la nécessité, pour obtenir un épandage homogène, d'un recouvrement partiel entre la bande B1 fertilisée à l'aller et la bande B2 fertilisée au retour. Mathématiquement parlant, un recouvrement parfait est celui où :

$$T_1(B_1) \cap T_2(B_2) = T_1(B_1) = T_2(B_2)$$

Avec  $T_1$  dosage de la bande aller B1,  $T_2$  dosage de la bande retour B2

Si l'épandage est linéaire et non dissymétrique, la largeur optimale de la bande de travail  $L_0$  peut également être déterminée en résolvant l'équation ci-dessous par rapport à l'axe aller ou ( ce qui revient au même) à l'axe retour, pris comme axe de référence [Aït Houssa, 2003] :

$$b_1 - T_1 L_0 = - b_2 + T_2 L_0 ; \text{ avec } T_1 = T_2 = T \text{ et } b_1 = b_2 = b, \text{ ce qui donne } L_0 = b/T$$

Au sens statistique du terme, le meilleur recouvrement est celui qui minimise le coefficient de variation

**Tableau 4:** Effet de divers états de terrain sur la vitesse d'avancement de deux types de tracteur lors de l'épandage d'engrais

Etat du terrain	Plat sec	En pente sec	Plat humide	En pente humide	Le long des courbes de niveau
(CV%) 4RM Deutz DX 4.57	0	0,7	0,27	0,35	0,91
(CV%) 2RM New Holland TS90	0,72	0,85	0,92	0,8	0,94

**Tableau 5a:** Largeur maximale  $L_m$  (m) et largeur optimale  $L_o$  (m) d'épandage des principaux engrais utilisés au Maroc (Centrifuge monodisque Nardi)

$L_m$ (m)	Produits	CV (%)	$L_o$ (m)	Produits	CV (%)
10	SA; SSPp; SKp; MAP	65-98	7	SA; SSPp; SKp; MAP	7-40
16	Ur	61	10	Ur	9
20-22	AM; ASP; DAP	46-59	11-12	AM; TSP; ASP; DAP; 14-28-14C	16-35
24	TSP; KCLc; SKc; 14-28-14C	20-59	14	KCLc; SKc	32-39

**Tableau 5b:** Largeur maximale  $L_m$  (m) et largeur optimale  $L_o$  (m) d'épandage des principaux engrais utilisés au Maroc (Centrifuge bidisque Sulky DR 650)

$L_m$ (m)	Produits	CV (%)	$L_o$ (m)	Produits	CV (%)
12	SA ; SSPp ; SKp ; MAP	49-72	9	SA; SSPp; SKp; MAP	15-19
20	Ur	45	12	Ur	18
22-24	AM; ASP; DAP	46-57	13-15	AM; TSP; ASP; DAP ; 14-28-14C	15-22
24-26	TSP; KCLc; SKc; 14-28-14C	39-50	16	KCLc; SKc;	17-26

(rapport de l'écart type à la moyenne x 100) de la répartition transversale [Dagnélie, 1975].

Les tableaux 5a et 5b présentent les largeurs maximales et optimales (la résolution mathématique et la méthode statistique ont donné sur ce point des résultats équivalents) obtenues dans les essais en hall au Domaine Itto Aomar. Les valeurs dépendent des caractéristiques physiques des produits. Elles sont plus faibles pour les produits pulvérulents et plus importantes pour les produits compactés à gros grain dense.  $L_m$  et  $L_o$  sont également influencées par le type de matériel (le bidisque donnant tout naturellement des largeurs supérieures que le monodisque).

Pour le mono-disque Nardi (type d'appareil plus courant aux Domaines Agricoles en raison de son faible prix d'achat), les résultats obtenus permettent en outre de classer globalement les largeurs optimales d'épandage des produits en 4 groupes :

**Groupe 1** à largeur d'épandage optimale faible ( $L = 7$  m), formé par les trois produits pulvérulents (SSPp, SKp, MAP) et le produit cristallisé (SA) ;

**Groupe 2** à largeur d'épandage optimale égale à 10 m, formé par la perlurée ;

**Groupe 3** à largeur d'épandage optimale entre 11 et 12 m, formé par les cinq autres granulés testés

## Références bibliographiques

- **Aït Houssa A., 1992.** Rapport de stage sur la fabrication des engrais effectué dans les usines de la Grande Paroisse et aux Potasses d'Alsace. 8p.
- **Aït Houssa A., Idrissi L., Lekchiri A., 1987.** Logiciel de fertilisation des agrumes au Maroc. (Première version). SASMA, Aïn Sebaa, Casablanca, Maroc.
- **Aït Houssa A., Ouknider M., Safine M. 2001.** Gestion des engrais et production agricole. L'expérience des Domaines Agricoles. Revue H.T.E. n°118, pp13-19.
- **Aït Houssa A., Rajaa H., Mme Rajaa S., Benmansour S., Albabaallal H., Ouknider M., Benbella M., El Midaoui M., 1997.** Ibn Alawam Système, logiciel de fertilisation raisonnée des grandes cultures. Guide d'utilisation, DDA/ENA, Maroc.
- **Aït Houssa A., Villemin P., 1998.** Fertilisation et gradients de potassium dans des sols en pente au Maroc. Cahiers Agricultures; 7: 23-5.
- **Aït Houssa A., 2001.** Observations réalisées sur les sols tirs de Itto Aomar travaillés à sec à la charrue à socs. Non publié.
- **Aït Houssa A., 2003.** Document TP, stage 5ème année, option: Productions Végétales. E.N.A., Meknès.
- **AZF., 1992.** Méthodes de mesure des propriétés physiques des granulés dans le Groupe GP. Cahiers Recherches Procédés Engrais. BP 204, 76120 Grand Quevilly-France.
- **CEMAGREF, 1997.** Les matériels de fertilisation et traitement des cultures. Technologies de l'agriculture. Collection FORMAGRI, Vol. 4/5, 343 p, Lavoisier TEC & DOC, France.
- **Dagnélie P, 1975.** Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Vol 2, Gembloux, 457 p.
- **CEMAGREF, 2000.** Modulation de l'épandage centrifuge des engrais granulés: Mesure de débit et détermination des trajectoires par imagerie. Actes du colloque «Agriculture de précision, avancées de la recherche technologique et industrielle» Dijon 29/30 mai : p321-335.
- **DDA, 1992.** Résultats d'analyses de puits d'irrigation situés dans la région de Rabat. Non publié.

**Tableau 6:** Relation entre débit (kg/min) et ouverture de la trappe de dosage (cm) pour différents groupes d'engrais (monodisque Nardi)

Groupe d'engrais	Pentes	Ordonnées à l'origine	R2
SSPp	8,71	-21,69	0,96*
TSP, Ur, KCLc, DAP, ASP, 14-28-14C	15-17	-2	>0,98**
SA, AM., SKp, MAP,	18-19	-7	0,99***
SKc	28,28	-72,29	0,94*

(AM, TSP, ASP, DAP, 14-28-14C);

**Groupe 4** à largeur d'épandage optimale de 14 m formé par les deux produits compactés (KCLc, SKc).

L'hétérogénéité d'épandage obtenue avec le monodisque Nardi après recouvrement, reste globalement élevée par rapport aux normes (CV<15 %) en usage en Europe [Cemagref, 1997]. Des écarts particulièrement importants existent également entre les indications fournies par la fiche de réglage de ce matériel [SOMA, 1998] et les tests réels d'optimisation de la largeur de travail sur le terrain (14 m contre 22 m pour les granulés à gros grain et 12 m contre 18 m pour les granulés à grain moyen). La notice du constructeur donne l'impression de privilégier le rendement de la machine (plus d'ha par jour).

Le niveau d'hétérogénéité, après recouvrement, reste par contre globalement voisin de la norme pour l'épandeur Sulky DR650, sans pour autant atteindre les nouvelles performances (CV< 7 % pour l'urée et l'ammonitrate) avancées par cette entreprise sur ses nouveaux matériels mis récemment sur le marché tels que le DPX Prima et Magnum [Sulky, 2002]

### III.2.4. Détermination du débit de l'épandeur D

Une fois la dose Q, la vitesse d'avancement V et la largeur de travail L choisies, le débit (en kg/min) se déduit directement de la relation précédente :

$$D = QVL/600$$

La relation débit/ouverture de la

trappe de dosage est une relation à peu près linéaire mais avec des pentes et des ordonnées à l'origine différentes, en rapport avec la nature ou plus exactement avec la coulabilité du produit. Le tableau 6 présente les pentes et les ordonnées à l'origine types par groupe de produits, obtenues dans le cadre de la présente étude.

Ce débit est sensiblement influencé par la hauteur du produit dans la trémie. Pour l'ASP, le MAP, le DAP et le 14-28-14C, l'effet hauteur est régi par le modèle quadratique commun :

$$D \text{ (kg/min)} = 0,0867 H \text{ (\%)} - 0,0005H^2 + 8,4185 ; R^2 = 0,99^{**}$$

Ce résultat suggère, pour avoir un débit constant, soit d'alimenter constamment l'épandeur au travail pour que son niveau ne baisse pas trop, soit de disposer d'épandeur équipé de volet de dosage à commande différentielle assisté par ordinateur, comme celui proposé en agriculture de précision (Ruckman et al, 1981; Griffis, 1985; Schueller, 1991; cemagref, 2000), encore au stade expérimental même aux USA, qui en sont le premier pays initiateur.

Pour la pratique agricole, qui nous préoccupe le plus ici, la détermination de D est souvent facilitée par la notice de réglage du constructeur. En l'absence de cette notice, D peut être déterminé par tâtonnement et approximations successives, en faisant varier l'ouverture depuis le minimum et en pesant l'engrais correspondant

### Références bibliographiques

- **GRIFFIS C.L. , 1985.** Electronic sensing of soil organic matter. Trans. A.S.A.E, 28 : 703-705.
- **NODET-GOUGIS, 1986.** Distributeur DP112, notice d'utilisation, catalogue des pièces de rechange. BP 70, 77873, Montereau Cedex, France.
- **RUCKMAN I.L, HUMMEL I.W., BUTLER B.J, 1981.** Improved soil organic matter sensor with microprocessor control. ASAE paper n°81-1012.ASAE, St Joseph, MI, USA.
- **SCHUELLER J.K., 1991.** design for dynamic response of sprayer-applicators. J Fert. Issues 8 (3) : 69-73.
- **SOMA, 1998.** Fiche de réglage de l'épandeur mono-disque Nardi, 4 p. Casablanca, Maroc.
- **SCET-Maroc, 1999.** Projet de protection de l'environnement du bassin de Sebou (PPES). Etude pour un programme d'action visant à minimiser et à contrôler l'impact des engrais et des pesticides sur l'environnement du bassin de Sebou. Résumé du rapport général d'étude. 44 p. Rabat, Maroc.
- **SULKY, 2002.** Notice technique de l'épandeur DPX system. BP 92111, Rue Fabien Burel, 3521, Chteau-bourg Cedex, France.
- **Tissot S., Oestges., Bruart J., 1995.** Le stockage des engrais minéraux solides et liquides. Le comité «Nitrate» Communiqué n°64. Station de Génie Rural-Chaussée de Namur, 146, 5630. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. Passage des Deportes. 2, B-6030 Gembloux - Belgique.
- **Zari A., 2003.** Eléments de référence pour le raisonnement des épandages d'engrais au Maroc. Mémoire de troisième cycle, E.N.A., Meknès. 73p.

**Tableau 7:** Variabilité de la répartition transversale des engrais derrière l'épandeur pneumatique à rampes Nodet-Gougis DP112

	Sulfate de potasse pulvérulent	Sulfate de potasse granulé	Urée
Nombre de mesures	16	16	16
CV (%)	3,46	3,25	2,75

récolté dans un bac. Avec 5 ou 6 points de référence, D est donné soit par la méthode graphique soit par interpolation linéaire.

### III.3. Le cas particulier de l'épandeur pneumatique à rampes

Que le produit soit pulvérulent, compacté ou granulé, l'uniformité d'épandage obtenue avec ce matériel est irréprochable (tableau 7). L'appareil est en outre simple à régler et d'une utilisation très facile (largeur de travail fixe et égale à celle de la rampe, facile à contrôler, homogénéité remarquable et moins influencée par la forme de l'engrais, par le vent,...). Malheureusement, dans le contexte Marocain, cet épandeur n'a pas rencontré le succès attendu. Introduit aux Domaines Agricoles dans les années 1985, il n'a pas pu résister devant les appareils centrifuges en raison de son coût élevé (48.882 Dh en 1986 contre 2500 Dh pour un appareil centrifuge monodisque !!), de son rendement plus faible, de sa fragilité (usure rapide des tubes, des joints,...), et de son inadaptation aux terrains accidentés. Le coût de maintenance et le manque de pièces de rechange n'avaient pas joué non plus en sa faveur.

### IV. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

L'enquête menée dans la région du Gharb à l'occasion de la présente étude a montré la forte carence des exploitations en équipements d'épandage, doublée d'une insuffisance de la maîtrise des réglages lorsque le matériel existe sur l'exploitation (souvent le réglage reste grossier et ne respecte pas de façon complète les bases agro-mécaniques requises : type d'engrais,

sa qualité, calibrage de la vitesse, choix judicieux de la PdF, de la largeur d'épandage,...). Ce fait dénote l'ampleur de l'effort qui reste à faire au Maroc, en matière d'équipements d'épandage d'engrais (et d'équipements agricoles en général) et de leur maîtrise technique.

Quand on connaît l'extrême hétérogénéité de l'épandage manuel [Aït Houssa et al., 2001; Zari, 2003], on est étonné que l'apport de l'azote de couverture sur les cultures (un élément très polluant) soit encore presque exclusivement fait à la main, même dans les propriétés équipées en matériel d'épandage.

Apporter la dose globale adéquate ne suffit pas pour atteindre les objectifs d'une fertilisation raisonnée. Encore faut-il qu'un mauvais épandage n'en limite pas l'efficacité par endroit (en créant des zones sous fertilisées entraînant de la sous productivité) ou ne conduise pas à des gaspillages par endroit (en créant des zones sur fertilisées sans incidence positive ni sur la productivité ni sur la qualité). Mais, le plus grave en cas de mauvais épandage, reste le danger pour l'environnement à terme, des migrations des reliquats d'engrais, azotés en particulier.

Comme de nombreux résultats récents d'analyse des eaux de la nappe souterraine en témoignent [DDA, 1992 ; SCET, 1999] au Maroc, on en est plus au stade de la prévention des dangers des excès d'engrais sur l'environnement mais à un stade bien avancé, voire inquiétant dans certaines zones vulnérables telle que la côte atlantique (200 mg/l de NO<sub>3</sub>- contre 50 mg/l recommandées par l'OMS

en cas d'utilisation de l'eau à des fins domestiques).

Il y a donc une nécessité impérieuse à améliorer d'urgence les pratiques actuelles de fertilisation entre autres par une amélioration de la qualité des épandages.

Ce travail a été une occasion pour apporter à l'utilisateur marocain, les premières réponses chiffrées aux interrogations pratiques sur les conditions d'un épandage raisonné (relation entre qualité de l'engrais et qualité de l'épandage, comment préparer son bulk, le transporter, comment régler son épandeur,

quelle largeur retenir en fonction de la nature du produit pour optimiser l'apport ...). Il a été aussi une occasion pour caractériser les engrais du Maroc fabriqués par l'OCP (MAP, DAP, ASP, TSP, 14-2814C) vis à vis des exigences des épandages.

Enfin, sur un plan général (et au delà des chiffres), la recommandation la plus importante à retenir de ces recherches est l'obligation pour le Maroc d'un contrôle des technologies agricoles importées de l'étranger, au moment de leur première introduction, en vue de

s'assurer de leur efficacité dans le contexte local. Pour le monodisque testé, nous avons été surpris par les écarts constatés entre les largeurs de travail recommandées par la notice du fabricant et les largeurs optimales réelles déterminées sur le terrain ; un élément pourtant déterminant de la qualité des épandages (14 m contre 22 m !! pour les granulés à gros grain et 12 m contre 18 m !! pour les granulés à grain moyen). Ce qui démontre qu'un calibrage, même lorsque celui-ci est fait dans les règles de l'art dans le pays d'origine, n'est pas forcément le meilleur calibrage dans un autre contexte.

# ELEMENTS D'AIDE AU RAISONNEMENT DE L'ECHANTILLONNAGE DU SOL EN PARCELLE AGRICOLE

A . Aït Houssa<sup>1</sup>, M. Benbella<sup>1</sup> , M. Badraoui<sup>2</sup>

## Résumé

La fertilisation raisonnée des cultures exige l'évaluation de la fertilité des sols. Le recours à l'analyse d'échantillons représentatifs des parcelles est une étape fondamentale dans le processus de fertilisation. L'objectif de cet article est de présenter une synthèse des éléments d'aide au raisonnement pour l'échantillonnage du sol en parcelle. Un bon échantillonnage exige :

- d'effectuer les prélèvements obligatoirement par système de culture homogène (grande culture, arboriculture, maraîchage,...) et par type de sol homogène (Tirs, Dehs, Hamri, R'mel, ...),
- d'opérer un choix judicieux de la période d'échantillonnage, de l'outil à utiliser, de la profondeur de prélèvement, du nombre de carottes à effectuer, de la façon de les répartir au sein de la parcelle et des conditions de préparation de l'échantillon composite final adressé au laboratoire.

Dans le contexte marocain, le raisonnement de l'échantillonnage doit, en outre, tenir compte des performances des prestataires de service (laboratoire d'analyse, service agronomique interpréteur, fournisseur d'engrais) en termes de délais réels de réponse.

**Mots clés:** échantillonnage, sol, analyse, fertilité, fertilisation.

## I. INTRODUCTION

La fertilisation raisonnée des cultures exige l'évaluation de la fertilité des sols. Le recours à l'analyse d'échantillons représentatifs des parcelles est une étape fondamentale dans le processus de fertilisation. Un bon échantillonnage de sol, c'est à dire respectant les règles de mise en oeuvre, est la condition sine qua non d'un résultat d'analyse fiable et par la suite du conseil de fumure qui en découle. Si le prélèvement de sol est mal réalisé sur le terrain, quelle que soit la précision obtenue sur l'analyse, le plan de fumure sera entaché d'erreur, d'une importance égale, au moins à celle commise sur l'échantillonnage. Introduire des systèmes de certification modernes de type ISO, en vue d'obtenir des analyses précises, n'a d'intérêt que si l'échantillon prélevé est réellement représentatif du milieu concerné. La question est d'autant plus importante qu'il a été démontré depuis longtemps que la part de l'échantillonnage dans l'erreur globale commise, est souvent plus importante que celle due à l'analyse elle même [ Cline, 1944 ; Vermeulen, 1953; Ferrari et Vermeulen, 1956 ; Zerda, 1983 ; Aït Houssa, 1989].

Au Maroc, une certaine expérience en matière d'échantillonnage de sol existe, [Hmamou et Mathieu, 1980; Hmamou, 1983; Zerda, 1983; Benbella, 1984;

Ayoujil, 1988; Aït Houssa, 1989; Aït Houssa et al. 1992; Badraoui, 1994; Aït Houssa et Villemin, 1998 ; Aït Houssa et Habjaoui, 2004], mais peu de littérature pour en formaliser la procédure complète a été publiée.

Le but de cet article est de présenter une synthèse sur le sujet, alliant éléments agronomiques, statistiques et de recherches, disponibles dans le contexte marocain, afin d'aider le praticien à mieux raisonner l'échantillonnage, depuis le moment où il a été décidé de procéder au prélèvement, jusqu'à la remise de l'échantillon au laboratoire pour analyse.

## II. NECESSITE DE LA PRISE EN COMPTE DU SYSTEME DE CULTURE ET DU TYPE DE SOL

Soient d'une part:

- E l'espace de terrain, composé de N parcelles, concerné par le projet d'échantillonnage,

- TS1, TS2, ...TSn, les différents types de sol formant E (Tirs, Dehs, Hamri, Biada, R'mel, ...etc.).

- SC1, SC2, .... SCp, les différents systèmes de culture présents dans E (grandes cultures, cultures maraîchères, agrumes, rosacées, vigne,... etc.).

Considérons, d'autre part, le principe agronomique évident que pour les recommandations d'engrais, on ne peut confondre entre eux, des types de sol différents (pas de conseil de fumure pour un terrain argileux sur la base de prélèvements réalisés dans un terrain sableux), ou des systèmes de culture différents (pas de conseil pour des arbres sur la base de prélèvements réalisés au milieu d'une céréale).

Alors, le nombre potentiel de sous espaces  $E_1, E_2, E_3, \dots$  de E, à prendre en considération, pour réaliser l'échantillonnage du sol, est donné par le tableau cartésien (TS x SC) ci-dessous [ Aït Houssa, 1998]:

		SC			
		SC1,	SC2,	:	SCp,
TS	TS1	TS1 — SC1	TS1 — SC2	:	TS1 — SCp,
	TS2	TS2 — SC1	TS2 — SC2	:	TS3 — SCp,
	.....	.....	.....	:	.....
	TSn	TS2 — SC1	TS2 — SC2	:	TSn — SCp,

1. Département d'Agronomie, Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès.

2. Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat.

Manifestement, toutes choses égales, l'expérience montre que la subdivision de E est plus importante pour l'arboriculture (agrumes en l'occurrence) où le raisonnement du choix de l'unité d'échantillonnage peut être poussé, au sein d'un même système de culture global, jusqu'à la variété ou le porte greffe [SASMA, 1983 ; Aït Houssa, 1998], que pour la grande culture ou la rotation de plusieurs espèces est souvent traitée comme un tout.

D'une manière générale, dans un terroir agricole de superficie réduite, il est peu probable que tous les types de système de culture soient présents, en même temps, dans tous les types de sol. De même qu'au moment de l'échantillonnage, certains espaces Ekj peuvent être non concernés (ou ne présenter qu'un intérêt marginal) pour l'objectif poursuivi. Si bien qu'en définitive, dans la pratique, le nombre réel d'espaces devant faire l'objet de la prospection, peut être largement inférieur au nombre théorique du tableau cartésien ci-dessus :

$$E_r \ll E$$

Remarquons que le principe de ne pas confondre entre elles des formations pédologiques différentes ou des systèmes de culture différents, s'applique à l'espace E, quelle qu'en soit l'étendue, qu'il soit très vaste, avec une multitude de types de sol et de systèmes de culture ( région, localité, grande propriété), ou exigu et formé par un bout de terrain divisé en plusieurs bandes dont l'une est affectée à la grande culture, la seconde aux serres de maraîchage, la troisième à l'arboriculture fruitière,...etc. [ Aït Houssa, 1998].

### III. EPOQUE D'ECHANTILLONNAGE

En matière d'échantillonnage du sol, c'est l'objectif poursuivi qui détermine l'époque de prélèvement. Un contrôle d'azote peut être ponctuel et dicté par le besoin de connaître le niveau du sol en cet élément autour d'un stade crucial (tallage pour le blé, sortie du régime pour le bananier, formation du bouton pour le rosier) ou continu et dicté par le besoin d'un suivi plus soutenu des

changements d'états de l'élément dans le milieu, dans un but soit agronomique (établissement des courbes de minéralisation / réorganisation, figure1), soit environnemental (identification des périodes à haut risque de pollution par migration de  $\text{NO}_3$  ).

L'époque de prélèvement est parfois repoussée à cause du climat (difficulté d'obtenir un échantillon représentatif sur sol détrempe ou sous la neige ). De même que les résultats d'analyse de sol sont biaisés si l'échantillonnage de sol est réalisé juste après un apport massif d'amendements ou de matières fertilisantes (fumier, calcaire, engrais), d'où la nécessité d'attendre 2 à 3 mois [ Riehm,1956 ].

De nombreux autres paramètres de fertilité du sol que  $\text{NO}_3$ , subissent des variations saisonnières. Le pH par exemple, a tendance à baisser légèrement en été par suite de production d'acides ( nitrique, humique, carbonique) due à l'activité biologique intense à cette période, et à augmenter en hiver, par dilution des ions  $\text{H}^+$  dans la solution du sol, sous l'effet de la pluie [Bryssine, 1966 ; Coppenet et al, 1986 ]. Pour le potassium échangeable, il a été démontré en comparant 50 parcelles différentes de céréales, que la mesure réalisée en été donne un résultat systématiquement différent de la mesure de printemps (les points tous d'un même côté de la bissectrice  $y = x$ , figure 2).

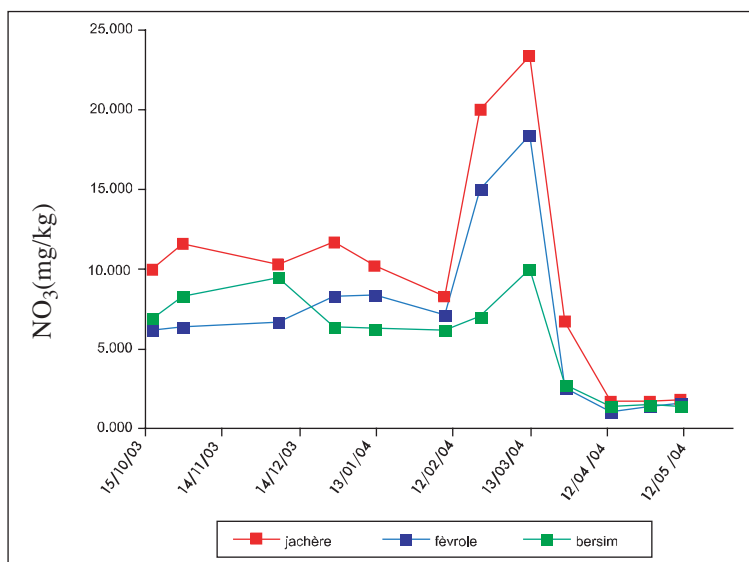


Figure 1 : Variabilité de l'azote nitrique en sol nu derrière plusieurs précédents culturaux (Benbella,1983).

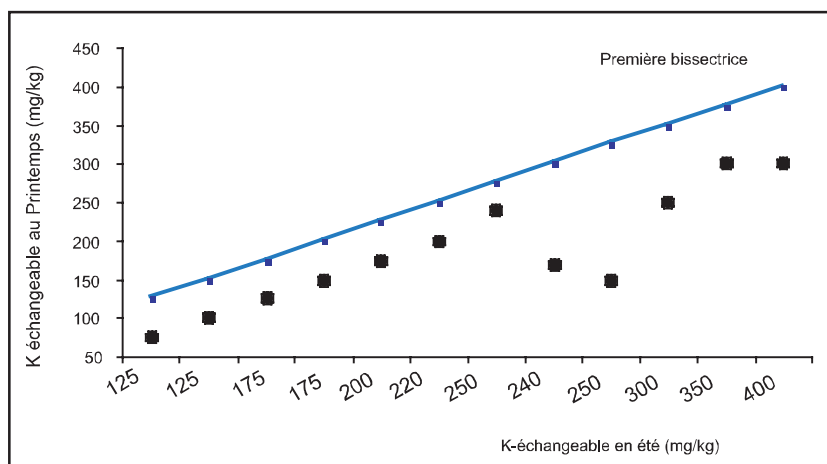


Figure 2: Effet de l'époque de prélèvement sur la teneur en potassium échangeable du sol (extrait des résultats de Aït Houssa, 1989 )

Si un nouvel échantillonnage doit être refait avec comme objectif la comparaison, il y a tout intérêt à éliminer de l'analyse, l'effet additionnel du à la saison, en prélevant toujours à la même l'époque.

Au Maroc, les délais réels de réponse, des laboratoires d'analyse sont très loin des performances dont on entend parler dans les pays développés ( 2 à 3 mois !! contre 15 j aux USA et 3-4 semaines en Europe ), particulièrement après la disparition de l'un des principaux laboratoires du pays (SASMA) équipé pour la routine. Impératifs de délai obligent, pour l'analyse complète dite de base (granulométrie, bases échangeables, azote, phosphore, oligo-éléments, salinité, capacité d'échange), la campagne de prélèvements doit toujours commencer tôt si l'on veut être au rendez vous, en vue de l'interprétation et la commande d'engrais pour les cultures [Aït Houssa et al, 2001].

En Bour, la sécheresse et l'absence de culture font de l'été, une période caractéristique (avec conditions de milieu reproductibles), particulièrement indiquée pour l'échantillonnage en vue d'analyses de base pour les cultures d'automne. En ce qui concerne l'irrigué, la période importe peu, à la condition près de toujours revenir à la même époque et de pouvoir disposer de l'analyse à temps.

Dans les pays où les délais ne constituent pas une contrainte, la vieille règle disait que la meilleure époque de prélèvement se situe avant les fumures et derrière une culture exigeante ( telle une betterave); le but final, ne l'oublions pas, étant de remettre au sol, ce qu'il a perdu comme éléments minéraux à la suite d'une forte récolte épuisante.

Au Maroc, en attendant la création d'un nouveau laboratoire équipé pour la série, avec les petites structures existantes, il faudrait s'efforcer au moins, à ce que les résultats des échantillons prélevés en été, soient disponibles avant les fumures d'automne, et ceux prélevés en automne, avant les fumures de printemps.

#### IV- CHOIX DE L'UNITE D'ECHANTILLONNAGE

Une analyse complète (subvention déduite) coûte environ 560 Dh [LABOMAG, 2004]. Les impératifs de coût économique obligent ; dans une grande exploitation agricole très morcelée, il n'est pas toujours possible de tout échantillonner. Quelques unités seulement, dites de référence, feront l'objet de prélèvement par groupe homogène (de point de vue sol, culture, conduite, ...) de parcelles. Leurs résultats d'analyses seront ensuite utilisés pour élaborer un plan de fumure commun pour tout le groupe. C'est la procédure utilisée pendant longtemps au Maroc par la SASMA pour traiter les agrumes : regroupement par type de sol, variété, âge et type de conduite.

Dans la nature, l'hétérogénéité de fertilité n'est pas forcément corrélée à l'importance de l'aire de la parcelle [Aït Houssa, 1989 ] et aucune donnée figée ne peut être avancée dans l'absolu, quant à la superficie de référence à prendre pour une unité d'échantillonnage.

Dans certains pays comme le Canada [DAT, 2001 ], sans en expliciter les raisons dans le document de travail, les services de l'Etat fixent l'unité d'échantillonnage à 5ha, et en cas de grand terrain, à une superficie maximale de 10 ha.

Au Maroc, des parcelles de plus de 40 ha présentent parfois une fertilité d'une homogénéité remarquable en ce qui concerne le potassium [Aït Houssa et Habjaoui, 2004 ], du fait d'une pédogenèse homogène et d'une histoire culturale homogène, alors que dans d'autres situations (sol de marâchage, parcelle pâturée, fertilisation localisée), de petites parcelles de moins de un ha, peuvent présenter une importante hétérogénéité [Oulahcen, 1984 ; Aït Houssa, 1989 ].

Sur le terrain, il faut allier bon sens, données sur le sol, sur la culture et observations visuelles in situ, pour fixer une unité d'échantillonnage. Dans un verger d'agrumes composé de plusieurs variétés (clémentinier, Salustiana, Washington sanguine, Maroc Late ), le critère tête de liste pour opérer le

regroupement sera incontestablement la variété, le critère de second degré obligatoire sera le type de sol, le troisième l'âge, le porte greffe ou la densité ...afin de constituer des groupes aussi homogènes que possible.

Une fois l'unité choisie, l'homogénéité réelle en est ensuite vérifiée sur place (homogénéité de sol ) et par enquête auprès du propriétaire (homogénéité d'histoire culturale récente, de productivité,...).

Vu sous un angle de coût économique, dans le contexte marocain, en système de grande culture intensif, des unités d'une aire de l'ordre de 10 ha justifient tout à fait l'analyse (56 Dh/ ha tous les 3-5 ans). Cette superficie peut être ramenée à des unités plus petites de l'ordre de l'ha, voire de quelques ares en cas de cultures en bandes ou sous serres, à fort produit brut (fleur coupée, bananier, tomate...) [Aït Houssa, 1998].

#### V- OUTIL DE PRELEVEMENT

D'habitude, le prélèvement de sol est réalisé au moyen d'une tarière agricole, d'une sonde ou d'une canne. Au Maroc, dans un but promotionnel (de l'analyse), on peut tolérer provisoirement que le prélèvement soit fait à l'aide d'outils non conçus en principe dans ce but, telle une pelle, une bêche ou une sape. Par contre, il faut éviter de prélever le sol à la main.

Dans un essai ayant porté sur la comparaison d'une tarière hélicoïdale (Carotte de longueur L = 18 cm et de diamètre  $\phi = 5$  cm) et d'une sape de taille moyenne ( longueur L= 25, largeur l = 15 cm), réalisé à Meknès [ Zerda, 1983 ], les résultats obtenus montrent l'existence d'un effet « outil » significatif, du vraisemblablement à la différence de forme entre les deux outils. La sape, utilisée surtout en raison de sa maniabilité aisée en sol meuble, donne des chiffres systématiquement supérieurs, aussi bien en ce qui concerne la richesse moyenne ( tableau 1) qu'en ce qui concerne la variabilité correspondante. Dans le cas précis de cette terre homogène, les coefficients de conversion pour le potassium, ont été de 1.03 pour la couche arable et 1.08 pour le sous sol par rapport à la tarière.

Un tel résultat suggère, pour opérer convenablement des comparaisons périodiques, de ne pas changer d'outil entre deux prélèvements successifs.

## VI- PROFONDEUR DE PRELEVEMENT

C'est l'épaisseur réelle susceptible d'être exploitée par les racines, qui doit dicter l'épaisseur de sol à échantillonner. Celle-ci ne doit être évaluée ni par excès ni par défaut, sinon le système interpréteur sera induit en erreur, au moment du choix du coefficient de modulation, pour tenir compte de la profondeur du terrain [Aït Houssa et al, 1987; Aït Houssa et al, 1997 ].

Un tel choix n'est pas sans susciter des interrogations en cas de présence d'obstacles physiques dans le profil (semelle de labour) ou de successions de cultures ou s'alternent espèces à enracinement profond (colza, féverole) et espèces à enracinement superficiel (bersim, ray gras). Dans les terrains herbagers de type prairie permanente (moins importants au Maroc), d'ordinaire, il ne faut pas excéder la profondeur du tapis racinaire de 5-10 cm [Riehm, 1956].

En sol peu profond telle une rendzine, le prélèvement sera limité à la couche superficielle (10/15 cm), l'analyse du substrat très calcaire et stérile sous-jacent, ne présente en général aucun intérêt (retirer la tarière dès que la carotte touche à l'horizon d'accumulation du calcaire). Inversement, dans un sol profond, travaillé normalement (charrue, chisel) et portant une culture annuelle à enracinement normal (céréales, betterave, ...), il est d'usage de réaliser un premier prélèvement dans la couche superficielle, où se déroule l'essentiel de l'activité racinaire (0-20 ; 0-30 cm), et un second prélèvement dans le sous-sol (20-40 ; 30-50 cm). Le fond du labour est souvent utilisé comme repère pour le choix de la profondeur.

D'une manière générale, l'analyse du sous sol n'est pas une obligation (du moins en grande culture), puisque d'un point de vue fertilité chimique, souvent couche arable et sous-sol sont l'un à l'image de l'autre [Remy et Marin-Lafèche, 1974 ; Aït Houssa, 1989 ; Aït Houssa et. al, 1992 b]. Par contre, la corrélation positive sol/sous-sol n'est

Type d'outils	K- échangeable (mg/kg)		P- citrique (mg/kg)	
	Sol	Sous sol	Sol	Sous sol
Tarière	429	300	74	34
Sape	443	323	79	36

**Tableau n°1:** Comparaison des résultats d'analyse entre échantillons prélevés à la tarière agricole et échantillons prélevés à la sape ( D'après Zerda, 1983).

plus vraie dès lors que le terrain est soumis à une fertilisation excessive de surface ou lorsque la formation pédologique est constituée d'une couche de surface sableuse pauvre, reposant sur un horizon argileux fertile [Sparks, 1981 ; Aït Houssa, 1989 ].

L'exemple typique au Maroc, est fourni par les sols argileux ensablés des Doukkala [SASMA, 1987]. Dans ce dernier cas, une attention particulière doit être portée au sous-sol si l'on veut interpréter correctement le résultat d'analyse [Aït Houssa, 1989; Aït Houssa et. al, 1992 b]. ].

Dans le cas d'un verger en place, il est également de tradition de compléter le prélèvement à la tarière, par des échantillons spécifiques prélevés dans le profil, réalisé autour des racines des arbres [SASMA, 1983]. Pour la vigne, la couche du sol à prélever se situe entre 20 et 50 cm. C'est dans cette partie du sol que la densité en racines est la plus forte [Badraoui, 1994]. Les quelques racines situées dans la couche 0 à 20 cm n'ont qu'une importance très limitée dans l'alimentation minérale de la plante.

Des protocoles spéciaux, fonction du besoin de l'étude, sont également utilisés si le travail est réalisé à des fins de recherche. C'est le cas du suivi de la lixiviation des éléments mobiles tel que l'azote nitrique.

## VII - NOMBRE D'ÉCHANTILLONS

D'une manière générale, dans la pratique, toutes les analyses sont déterminées sur un seul et même échantillon dit composite ou moyen, constitué en fin d'échantillonnage en mélangeant entre eux, l'ensemble des prélèvements élémentaires d'une même parcelle. Sur le plan théorique, Si :

- CV<sub>1</sub>, CV<sub>2</sub>, CV<sub>3</sub>,...CV<sub>n</sub> désignent les coefficients de variation associés à

chacun des éléments analysés (MO, pH, N, P, K, Ca, Mg, etc.) ;

-Dr l'erreur à ne pas dépasser sur la moyenne de chaque élément, par exemple 5 %,

- l'échantillon moyen Em., n'est pas significativement différent de la moyenne Xm, des échantillons, comme cela a été vérifié depuis longtemps ailleurs et confirmé au Maroc, à condition de réaliser un échantillonnage soigné [Zerda, 1983; Aït Houssa, 1989];

A l'évidence (toutes les analyses étant traitées sur le même pied d'égalité), c'est l'élément dont la répartition est la plus hétérogène dans le sol, qui va fixer le nombre de prélèvements p à réaliser pour constituer l'échantillon moyen. Dans le cas de variables analytiques non structurées, c'est à dire répondant au critère d'indépendance stochastique [Arrouyas et al, 1997], normalement réparties dans le milieu et présentant en outre un CV quasi-constant, la formule approchée suivante [Snedecor et Cochran, 1967; Dagnélie, 1975] est proposée pour calculer le nombre d'échantillons p à prélever (et à mélanger), en fonction de l'erreur admise sur la moyenne X<sub>m</sub>:

$$p = t^2(CV^2)/ Dr^2$$

avec t valeur de la variable de Student pour un niveau de probabilité donné ( t = 1.96 pour α = 5 %).

D'après les résultats disponibles au Maroc [Hmamou, 1983; Zerda, 1983; Benbella, 1984, Aït Houssa, 1989 ; Aït Houssa et Habjaoui, 2004], il faut prélever entre 10 et 20 échantillons pour se faire une idée précise du coefficient de variation CV, en ce qui concerne l'azote, le phosphore et le potassium.

La formule ci-dessus montre que pour une valeur de CV connue, plus le

nombre de prélèvements est élevé plus la précision sur l'analyse s'améliore (figure 3).

En sol physiquement homogène (visiblement uniforme à l'œil nu) et n'ayant pas fait l'objet d'apport récent hétérogène de fertilisants (d'après l'enquête au champ), le CV minimal de référence pour déterminer p peut être pris égal à 7 % en ce qui concerne P et K [Zerda, 1983 ; Aït Houssa, 1989 ; Aït Houssa et Habjaoui, 2004]. Ce CV devient par contre important, lorsque le sol est hétérogène ou rendu hétérogène par des modalités spéciales d'apport de fertilisants (en bande, localisé, tableau 2) ou d'exploitation du terrain (culture intercalée avec des arbres et fertilisée différemment, rebouchage de trous d'arrachage avec forte remontée de sous sol) [Aït Houssa, 1998].

La pâture directe crée un milieu fortement hétérogène par suite des déjections et pissats localisés des animaux, extrêmement riches en azote et surtout en potassium [Lombaert, 1983]. Il en est de même des modalités de gestion des effluents de l'agriculture (autres que l'engrais) avant leur épandage. C'est le cas des zones «Dir» au Maroc, où litière et cendre de bois de chauffage, sont parfois déposés en petits tas éparpillés sur la parcelle plusieurs semaines avant d'être épandus. Ce qui laisse par endroit un «jus» azoté (quand il s'agit de fumier bien décomposé) ou de la poudre riche en P, K, Mg... (en cas de cendres), se traduisant par la suite par une croissance en touffes, très visibles à l'œil nu dans les parcelles.

Le CV est aussi fonction de la profondeur (en général plus élevé pour le sous sol qu'en surface, tableau 2) et du critère considéré (toutes choses égales, en terre de grande culture, la répartition de l'azote nitrique dans le sol semble plus hétérogène que celle du pH, de la matière organique, P, K... [Zerda, 1983; Benbella, 1984; Ayoujil, 1988 ; Aït Houssa, 1989].

En outre, le nombre de prélèvements par parcelle doit tenir compte du coût économique et de la pénibilité du travail à la tarière, en particulier en sol sec et sous le soleil ardent de l'été. L'expérience a montré qu'il ne sert à rien de préconiser au préleveur, un nombre trop élevé d'échantillons par

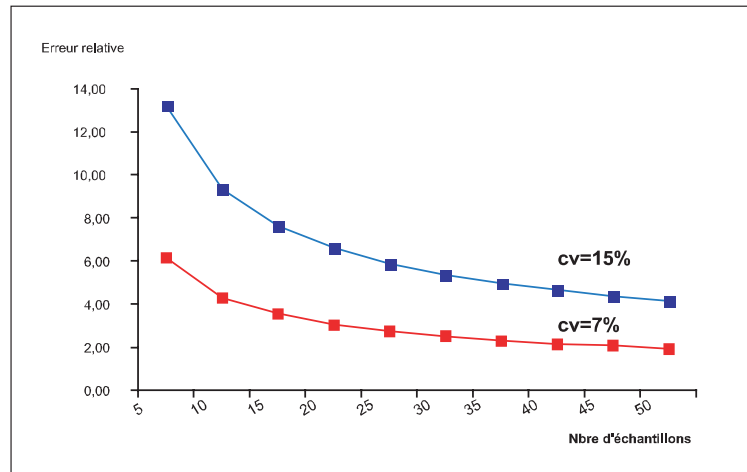


Figure 3 : Variation de la précision en fonction du nombre d'échantillons prélevés dans une parcelle agricole

Paramètre	Meknès		Tadla		Mohammedia		Moulouya	
	sol	s.Sol	Sol	s.Sol	Sol	s.Sol	sol	s.Sol
Xm (mg/kg)	428	299	301	236	1652	1540	1404	1255
Ecart type (mg/kg)	31.5	30.5	36.2	60.4	259	315	145.3	168.8
CV (%)	7.3	10.2	12.0	25.6	15.7	20.5	10.3	13.5

Sol°: horizon superficiel°; s.Sol°: horizon du sous sol

Tableau 2: Variabilité du potassium échangeable en parcelle dans quelques grandes régions agricoles du Maroc (D'après Aït Houssa, 1989)

parcelle (50 ou 100) qu'il ne fera jamais. Ainsi, pour allier exigences théoriques et contraintes pratiques, les résultats de recherches disponibles [Hmamou et Mathieu, 1980; Hmamou, 1983; Zerda, 1983; Benbella, 1984; Ayoujil; Aït Houssa, 1989; Aït Houssa et Habjaoui, 2004] conduisent à la nécessité d'un minimum de 10-15 prélèvements élémentaires en parcelle à pédogenèse homogène et 20- 30 en parcelle hétérogène.

### VIII- REPARTITION DES PRELEVEMENTS AU SEIN DE LA PARCELLE

Dans une parcelle, il y a un nombre infiniment grand Ig de possibilités de répartir les vingtaines de points, couramment réalisés pour prélever le sol. Si n désigne la densité potentielle de prélèvement ou de carottage [Aït Houssa,

1989 ], c'est à dire le nombre d'emplacements disponibles, dans une parcelle de superficie S, pour faire l'objet d'un et un seul coup de tarière, alors :

$$I_g = C_n^p = n! / (p! (n - p) !)$$

Avec une petite tarière de type Riverside, produisant un trou dans le sol de diamètre Ø = 7 cm, n ≈ 2.599.766 pour une parcelle de 1ha et n ≈ 25.997.660 pour une parcelle de 10 ha, et :

$$I_g \approx 2.599.766! / 20! (2.599.766-20)!$$

En théorie, pour des variables analytiques non structurées spatialement et réparties selon la loi de Gauss [Arrouyas et al., 1997], les p sondages peuvent être distribués en principe au sein de la parcelle, selon n'importe quel plan d'échantillonnage. Dans la pratique, il a été démontré

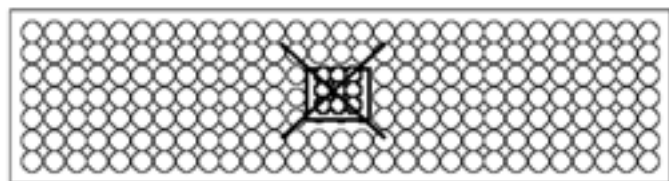


Figure 4 : Méthode ponctuelle d'échantillonnage de sol consistant à prélever dans un seul coin de la parcelle d'apparence homogène (à proscrire).

depuis fort longtemps que la répartition des éléments est parfois une distribution en «poches», de ce fait, l'aire réelle à prospecter doit être suffisamment grande pour pouvoir représenter la parcelle [Riehm, 1956; Benbella, 1984]. La vieille méthode dite ponctuelle, consistant à échantillonner une petite pièce limitée de quelques m<sup>2</sup>, (figure 4), pour évaluer la fertilité du sol, est à proscrire.

De l'infiniment grand  $I_g$ , il faut en particulier exclure une à une, toutes les agrégations des  $p$  points contigus ( $n-p+1$ ), ensuite toutes les combinaisons de  $p$  points ( $C_{kp}$ ), trop groupés pour être représentatifs d'une grande parcelle (aire prospectée  $s \ll S$  et  $k \ll n$ ). Ce qui donne une seconde formule théorique de  $I_g$ , soit :

$$I_g' = [C_n^p - (n-p+1)] - [C_k^p - (k-p+1)]$$

avec  $k \ll n$ .

Le parcours le plus souvent recommandé dans la littérature, pour réaliser le prélèvement, est soit le zigzag, le long des diagonales, en lignes parallèles, ou en étoile à partir du centre dans le cas des pivots [Aït Houssa, 1998]. Comme on peut le démontrer aisément, à partir de la formule de  $I_g$ , appliquée (à des fins didactiques) à une superficie infinitésimale (figure 5), de tels modes de répartition, ne sont rien d'autres que des cas particuliers d'un échantillonnage aléatoire de  $I_g$ . Leur avantage pratique est par contre, d'obliger le préleveur à visiter les divers coins de la parcelle.

## IX - PERIODICITE

Pour décider de la périodicité des analyses, il faut faire la distinction entre le groupe de paramètres de fertilité à évolution lente, à moyen ou à long terme, et les paramètres susceptibles d'évolution rapide à une échelle de temps très courte. A moins de les modifier par des apports massifs exogènes de matière (rajout de sable, de chaux, de fumier...), des caractéristiques du sol comme la granulométrie, la capacité d'échange cationique, le calcaire total, le calcaire actif, ...évoluent très peu ou pas à une échelle agronomique (de l'ordre d'une ou plusieurs décennies) et n'ont pas besoin d'être déterminées à chaque fois.

Dans les sols suffisamment tamponnés avec des bilans (Apports-Exportations) en éléments minéraux équilibrés et dans les zones arides à productivité faible et aléatoire, P et K n'évoluent pas beaucoup non plus à moyen terme (moins de 5 ans).

Les états de fertilités sont par contre susceptibles d'évolutions plus rapides pour certains éléments comme l'azote en sols sableux peu tamponnés [Aït Houssa, 1993; DAT, 2001], et en conditions de systèmes de cultures intensifs avec des bilans d'éléments minéraux constamment déséquilibrés (enrichissement ou épuisement permanent). C'est ce qui avait été constaté dans le périmètre irrigué des Doukkala par suite d'utilisation d'engrais de type N-2P-K (14-28-14C, 13-26-13) riches en phosphore et pauvre en potassium. Après 30 ans, il a été constaté que les sols se sont fortement enrichis en P et appauvris en K [SASMA,1987].

La fertilité du sol vis à vis du P, K, Mg, Ca, est susceptible de changement brutal en cas d'apport massif pour des objectifs de redressement rapide. De même que des changements à courte échéance sont possibles pour des minéraux nocifs tels le Chlore (Cl) ou le sodium (Na) en cas d'irrigation avec de l'eau très salée, en particulier en sol lourd et en l'absence de pluie ou d'une politique de lixiviation des sels (lessivage) appropriée [Aït Houssa, 2003; Badraoui et Ouknider, 2003].

C'est pour l'azote minéral, que d'importantes variations quantitatives dans le sol sont possibles, à des échelles très courtes de temps (de l'ordre de la journée, voire de l'heure), même en l'absence de fertilisation [Benbella, 1983].

D'une manière générale, hormis les prélèvements ponctuels dévoués à des contrôles serrés des états hydriques,

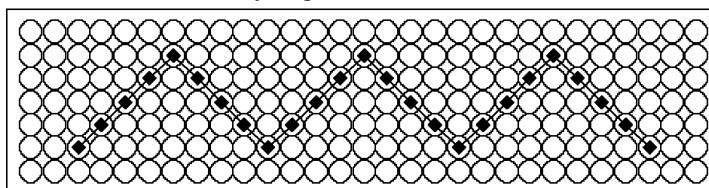


Figure 5: Mode d'échantillonnage en zigzag dont le but est la prospection intégrale de la parcelle.

d'azote minéral, de salinité,... l'échantillonnage en vue d'une analyse générale destinée à la grande culture et à l'arboriculture fruitière de plein sol, n'est refait que tous les 4 ou 5 ans (3 ans en sol sableux). En zones arides à évolution très lente, il peut même être porté à 8 ou 10 ans.

## X- LES CAS PARTICULIERS ET LES CAS SPECIAUX

Dans les terrains en pente, il a été démontré que l'échantillonnage classique n'est pas la meilleure procédure pour élaborer le conseil de fumure [Aït Houssa, 1989; Aït Houssa et Villemain, 1998]. Le potassium par exemple y est réparti de façon dégressive suivant des lignes d'isoteneurs (d'égaux teneurs) perpendiculaires à la pente, selon le modèle ci-dessous (plus on remonte la pente, moins il y a de K dans le sol) :

$$\text{Kéch. (d)} = \text{Kéch (bas)} \times \text{EXP} (- 0.0037 \times d)$$

Où Kéch. (d) représente la teneur en potassium échangeable mesurée à la distance d, du bas de la pente (exprimée en mg/kg), Kéch (bas) la teneur en bas de la pente, et d la distance depuis le bas de la pente (exprimée en m).

Ceci suggère qu'un échantillonnage adéquat doit faire intervenir, soit un prélèvement en bas de pente avec utilisation du modèle pour estimer la valeur de K pour le reste de la parcelle, soit un prélèvement séparé bande par bande de façon perpendiculaire à la pente (bas, milieu, haut).

La procédure classique avec un seul échantillon composite n'est pas non plus adaptée en cas de très grande parcelle hétérogène (50-100 ha) même s'il s'agit d'une même culture. Elle doit être remplacée par plusieurs échantillons composites prélevés par zone de terrain homogène [Aït Houssa, 1989; Arrouyas

### Références bibliographiques

- Aït Houssa A., Idrissi L., Lekchiri A., 1987- Logiciel de fertilisation raisonnée des agrumes ( première version ) . SASMA, Maroc.
- Aït Houssa A., 1989 - Etude du potassium dans divers types de sol et systèmes de culture au Maroc. Thèses de Doctorat d'Etat ès Sciences Agronomiques. Rabat : IAV Hassan II, 145 p.
- Aït Houssa A., Rajaa H., Mme Rajaa Saïda, Benmansour S., Albabaallal H., Ouknider M., Benbella M., Elmidaoui M., 1997 -Ibn Alawam système, logiciel de fertilisation raisonnée des grandes cultures. Guide d'utilisation. DDA/ENA, Maroc.
- Aït Houssa A., Villemin P., 1998 - Fertilisation et gradients de potassium dans des sols en pente au Maroc. Note de recherche. Cahiers Agricultures ; 7 : 233-5.
- Aït Houssa A., 1998 – Notes inédites - Cours de fertilisation- Chapitre "Echantillonnage du sol et des plantes". ENA, Meknès, Maroc.
- Aït Houssa A., 2001- Observations réalisées au Domaine Agricole de Sidi Abdelaziz ( Gharb), sur la préparation de buttes pour plantation de jeunes agrumes. Non publié.
- Aït Houssa A., 2003 – Observations réalisées au Domaine Agricole de Sidi Abdelaziz ( Gharb), sur de jeunes agrumes plantés sur butte irrigués à l'eau salée. Non publié.
- Aït Houssa A., Ouknider M., Safine M., 2001-Gestion des engrais et production agricole. Revue H.T.E n° 118 : 13-19 p.
- Aït Houssa A., Habjaoui A., 2004- Analyse de la variabilité de la matière organique et des éléments minéraux en grande parcelle homogène. Non publié.
- Ayoujil A., 1988 –variabilité spatiale du K-échangeable et réponse à la fertilisation potassique du blé tendre ( Nesma, 149) sur un sol vertique de la haute Chaouia. Mémoire Ingénieur d'Etat en agronomie. IAV Hassan II, Rabat : 68 p.

et al, 1997].

Il existe aussi des cas spéciaux de gestion de fertilisants où d'exploitation de sols où des procédures spéciales sont indispensables pour obtenir un échantillonnage efficace. Dans les systèmes arboricoles et maraîchers, souvent les apports de fumier et d'engrais sont effectués par bande le long des lignes de semis ou de plantation. Ce qui à terme, crée des niveaux de fertilité par bande très contrastés et oblige au moment de l'échantillonnage, pour mieux caractériser la fertilité, de prélever séparément sur la ligne et entre les lignes. L'interprétation peut ensuite en être effectuée en attribuant un coefficient de pondération à chaque bande, à la manière des méthodes de calcul proposées pour les agrumes [Aït Houssa et al, 1987], ou de traiter chaque bande à part.

En arboriculture équipée en micro irrigation, l'échantillonnage du sol doit être effectué dans le bulbe en tenant compte du rayon (r) humecté; souvent il arrive de prélever au centre, à mi-distance  $r/2$  et sur la périphérie.

Si dans la parcelle coexistent arboriculture fruitière conduite en goutte à goutte, sous frondaison, et culture annuelle en agriculture pluviale entre lignes, objectivement l'échantillonnage doit être de type double (l'un dans le bulbe pour les arbres et l'autre entre lignes pour la culture annuelle) et pas forcément réalisé au même moment.

Si les plantations sont réalisées sur butte, il est plus raisonnable, du fait des perturbations causées au sol par les engins de terrassement, de n'effectuer l'échantillonnage qu'une fois la butte définitivement stabilisée [Aït Houssa, 2001].

### XI- CONSEILS PRATIQUES POUR LA MISE EN ŒUVRE DE L'ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage du sol est une affaire de spécialiste. Sa mise en œuvre sur le terrain ne peut être déléguée sans garanties du respect intégral des consignes complémentaires suivantes :

1. le personnel en charge de l'opération doit être expérimenté, consciencieux

et avisé des risques encourus en cas de non respect des consignes (échantillonnage limité à un coin de la parcelle, nombre de prélèvements insuffisant, erreur sur l'étiquetage...). En cas de chantiers d'envergure, un ingénieur superviseur à pied d'œuvre, c'est du gain de temps et surtout en qualité du travail;

2. le matériel de prélèvement (tarière, sape), d'emballage du sol (boite en carton, sac en plastique), d'étiquetage,... doit être propre et garanti Zéro Risque de contamination pour l'échantillon. Ne surtout pas expédier le sol au laboratoire dans un sac d'engrais usagé !!
3. ne jamais mélanger entre eux, sol et sous sol d'une même parcelle, pour constituer un échantillon composite ;
4. en cas de plusieurs horizons, utiliser de préférence des seaux de couleurs différentes; si le prélèvement est réalisé à deux (une personne pour la couche arable et une seconde pour le sous sol), opérer de préférence l'un décalé par rapport à l'autre (d'un trou), et non l'un en compagnie de l'autre ;
5. nécessité absolue du respect de la profondeur de prélèvement;
6. la masse de terre prélevée par carotte doit être la même (principe de proportionnalité) ;
7. éviter de prélever dans des micro-zones particulières pour ne pas biaiser l'analyse (zone marginale, aire de séjour d'animaux, aire de stockage de fumier ou de cendres avant épandage, couche particulière déposée par suite d'érosion ...) ;
8. en fin de parcelle, veiller à une bonne homogénéisation in situ (5-10 min), de la masse totale de terre recueillie avant d'en prélever le 1 ou 2 kg à envoyer au laboratoire pour analyse ;
9. l'étiquette de référence doit être accolée solidement au sac et contenir toutes les informations nécessaires à l'identification de l'échantillon (adresse complète, numéro de la parcelle, type de sol, date, précédent cultural, profondeur de prélèvement);
10. ne jamais mettre une étiquette en carton à l'intérieur du sac si le sol

### Références bibliographiques

- Arrouyas D., Vion I., Jolivet C., Guyon D., Couturier A., Wilbert J., 1997 – variabilité inter parcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne ( France). Conséquence sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. Etude et Gestion des sols ; 4, 1 : 5-16 pp.
- Badraoui M. 1994. Maîtrise de la conduite de fertilisation des principales cultures dans les propriétés de la SO.GE.T.A., Diagnostic de la fertilité des sols et plans de fumure pour la campagne 1994-95, Rapport d'étude, SOGETA, Rabat.
- Badraoui M., Agbani M., Bouabid R., Zeraoui M. 2001a. Mieux fertiliser le tournesol en irrigué : nouvelles normes pour la région du Gharb. Transfert de technologie en Agriculture, N° 80, PNTTA, MADRPM/DERD
- Badraoui M., Agbani M., Bouabid R., Zeraoui M. 2001b. Nouvelles normes pour mieux fertiliser le blé en irrigué dans la région du Gharb. Transfert de technologie en Agriculture, N° 84, PNTTA, MADRPM/DERD
- Badraoui M., Soudi B., Agbani M., El Gharous M. & Karrou M. 2000. Normes d'interprétation des analyses de sol pour les cultures de blé et de la betterave (cas des Doukkala). Transfert de technologie en Agriculture, N° 70, PNTTA, MADRPM/DERD
- Bryssine Irène., 1966- Etudes sur la dynamique de la microflore de trois types de sols marocains. Cah. Rech. Agro. N°23, INRA, Maroc.
- Benbella M. 1984 – Variabilité de l'azote nitrique dans le sol. Précision des mesures et choix d'un mode d'échantillonnage. Bull. ENA- Meknès. Maroc.
- Cline M.G., 1944 – Principles of soil sampling. Soil Science, 58 : 275-288.
- Badraoui M., Ouknider M., 2003 – Observations sur les sols du Domaine Hamma récemment irrigué à l'eau salée. Rapport d'étude de sols. DDA, Casablanca.

est humide (risque de décomposition) ;

11. s'il y a des risques qu'une étiquette soit détachée, mettre un numéro d'identification sur le sac à l'aide d'un stylo feutre indélébile ;
12. l'échantillon doit être accompagné d'une fiche agronomique complète conforme au modèle du laboratoire interpréteur, sans oublier d'en garder un double ;
13. veiller au transport des échantillons dans des conditions sans risque de contamination ;
14. des conditions spéciales de transport à froid sont exigées pour l'azote si le contrôle doit être fait avec grande précision ;
15. pour des impératifs de traçabilité, obligation de citer le nom du préleveur afin de pouvoir consulter ce dernier, en cas de problème quelconque sur l'échantillon.

### XII- FICHE AGRONOMIQUE DE RENSEIGNEMENTS.

C'est le système d'interprétation mis en place, qui fixe le contenu de la fiche de renseignements à faire parvenir au laboratoire avec l'échantillon. Le modèle varie quelque peu avec les systèmes, quoique le but agronomique commun reste dans tous les cas, de rattacher l'échantillon à son environnement au plan climat, terrain, agriculture pratiquée, ses particularités, ... afin d'obtenir l'interprétation la plus juste possible du résultat d'analyse.

Pour le logiciel Ibn Alawam système, dédié à la grande culture [Aït Houssa et al, 1997], voici le minimum d'informations exigé pour renseigner l'ordinateur afin d'avoir une interprétation correcte de l'analyse :

1. Identification de l'échantillon : pays, région, exploitation, parcelle ;
2. Informations sur le milieu : étage climatique et possibilité d'irrigation (aride, semi-aride, Bour dit favorable, irrigué traditionnel, irrigation par pivot), type de terrain et ses caractéristiques (pente, pierrosité, profondeur) ;
3. Informations sur la culture: précédent

cultural (jachère, légumineuses, plantes sarclées, céréales), rendement du précédent, culture envisagée, rendement prévisionnel espéré;

4. Informations sur les mouvements de matière: apports de fumier, de gadoue, lisier, leur qualité générale (bonne, moyenne, mauvaise), appréciation sur le risque de lixiviation NPK et de volatilisation de l'azote (nul, faible, moyen, élevé), devenir des chaumes (brûlés, retournés).

### XIII- MODALITES D'EXPLOITATION DES RESULTATS D'ECHANTILLONNAGE

La qualité de cette exploitation est en rapport direct avec la performance atteinte par le système utilisé, elle même fonction de l'état d'avancement des recherches sur la fertilisation (au sens large du terme), d'abord à l'échelon national, puis international. D'une manière générale, en matière de modalités d'exploitation des échantillonnages de sol, la recherche scientifique est très en retard sur le besoin de la pratique, même si les agronomes donnent l'impression d'être globalement satisfaits des méthodes sommaires en vigueur.

Pour l'agronome interpréteur (le problème concerne aussi l'agronome concepteur), l'une des interrogations pertinentes, une fois devant l'ordinateur, est de savoir si la saisie des deux échantillons prélevés (sol et sous sol) est obligatoire pour l'interprétation, en particulier en présence de culture à enracinement profond évoluant dans un profil où la fertilité des divers horizons est un vrai continuum. Même si on sait que l'horizon de surface est plus important au plan nutrition, mais du fait qu'il faut des chiffres, la question est de savoir quel coefficient de pondération réel doit-on lui attribuer ?

Le problème se complique encore davantage lorsqu'on considère un bulbe de fertigation avec compartimentation de type 3 x 3 (3 prélèvements latéraux et 3 en profondeur). Une matrice [ligne x colonne] de 9 coefficients différentiels a besoin alors d'être renseignée.

### Références bibliographiques

- Coppenet M., Ailliot G., Cariou G., Colomb B., Darre J., Haut R, 1986 –Etat calcique des sols et fertilité. : Le chaulage. ACTA, 149, Rue de Bercy, 75595, Paris ( France) : 174 p.
- DAT, 2001 –Guide de fertilisation des cultures. Direction de l'aménagement des terres, Brunswick, Canada. 34 p.
- Dagnelie P., 1975 - Théorie et méthode statistiques. Applications agronomiques. Vol. 2 , Gembloux, Presses Agro. 463 p.
- Ferrari T.J, Vermeulen F.H.B ., 1956 – L'incidence de l'hétérogénéité des sols sur les résultats de leur analyse. Organisation et rationalisation de l'analyse des sols. OECE, Paris : 125-138 .
- Hmamou E., Mathieu C., 1980 – Essai de la fumure phospho-potassique sur la betterave sucrière à la Moulouya. Rapp. Ann. Serv. Pédol. ORMVAM , Maroc
- Hmamou E., 1983 – travaux de cartographie des sols de la Moulouya, divers doc. Serv. Pédol. ORMVAM , Maroc
- Lemsalek K., Mosseddaq F., Moughli L. 2001. Fertilisation de blé en irrigué au Tadla: adaptation des résultats de recherche aux conditions des agriculteurs. Hommes, Terre et Eaux, N° 118, 97-104.
- Lombaert V., 1983- Etude du devenir du potassium restitué par les urines de bovins au pâturage. Thèse de Doctorat Sci. Agro. Fac. Sci. appli. Univ. Libre de Bruxelles.
- Leteinturier A, 2004 -Traçabilité et chaîne de froid pour l'exportation des fruits et légumes marocains. Séminaire Franco-Marocain sur la valorisation des fruits et légumes, CIEC, Casablanca : 12 mars..
- LABOMAG, 2004- Tarifs des analyses pour la campagne 2004. Rue J, n°1, km 10, route 111, Ain Sebaa.
- Oulahcen B., 1984- rapports d'étude de fertilité. SASMA, Maroc.
- Riehm H., 1956- méthodes de prélèvement et de préparation des échantillons. Organisation et rationalisation de l'analyse des sols. OECE, Paris : 103-124.

Au Maroc, faute d'éléments de recherche, voici les procédures conventionnelles proposées pour gérer les échantillonnages une fois en face de la machine [Aït Houssa et al, 1987 ; Aït Houssa et al, 1997] :

- Echantillonnages réalisés en terrain à pédogenèse homogène.

Pour un terrain homogène de grande culture, seul l'échantillon de surface est en principe exploité pour l'interprétation, le sous sol n'intervient comme appoint que si l'horizon de surface seul, risque de fausser le diagnostic (horizon sableux pauvre reposant sur un horizon sous jacent fertile, susceptible d'intervenir efficacement dans l'alimentation des cultures ) [ Sparks, 1883 ].

Pour les vergers d'agrumes et de rosacées fruitières, lorsque le prélèvement est fait horizon par horizon, la richesse est en principe pondérée en fonction de l'épaisseur de l'horizon . Mais là le sujet est moins problématique dans la mesure où c'est le résultats de l'analyse de la feuille ( réalisée en principe tous les ans), et non l'analyse de sol qui détermine la décision d'engrais [Aït Houssa et al, 1987 ].

- Echantillonnages réalisés en terrain à pédogenèse hétérogène.

Pour traiter l'échantillonnage d'une grande parcelle hétérogène, la ligne de conduite proposée fait intervenir la possibilité ou non de réaliser un zonage opérationnel, le niveau d'intensification du système de culture et l'intérêt porté à la productivité par rapport aux risques sur l'environnement [Aït Houssa, 1989 ; Aït Houssa 1998 ].

Si les zones échantillonnées sont des zones d'iso teneurs suffisamment grandes pour faire l'objet d'une fertilisation appropriée, celles-ci doivent être traitées comme des sous parcelles. Bien sur, encore faut-il que leur forme géométrique ne soit pas trop biscornue si l'on envisage un épandage mécanique.

Inversement, si l'hétérogénéité se présente en mosaïque, alors l'interprétation doit être nuancée en fonction du

compromis recherché entre productivité et risques sur l'environnement [Aït Houssa, 1989; Aït Houssa,1998 ] :

- calcul aligné sur le minimum observé, si l'agronome interpréteur privilégié la recherche de la productivité maximale au détriment de l'impact sur l'environnement (excès d'engrais avec risque de pollution, en certains points du milieu, sciemment accepté) ;

- calcul aligné sur des critères de dispersion plus modérés telles que la moyenne ou la médiane, si l'agronome interpréteur intègre la notion de risque sur l'environnement ou si on est en présence d'un système extensif peu exigeant, pour cause d'aridité, ne justifiant pas la sur-fertilisation partielle du terrain.

### XIV- CONCLUSION

La mise en pratique des connaissances sur les techniques d'échantillonnage, ne peut être traitée indépendamment du progrès sur l'analyse (dont il est la composante) et d'une manière plus générale, du progrès sur la fertilisation. Avec la disparition du laboratoire de la SASMA ( le seul équipé pour la routine et en relation directe avec les producteurs), l'agriculture marocaine a malheureusement plutôt marqué un certain recul dans ce domaine, même si d'autres laboratoires sont actuellement fonctionnels dans les institutions de formation et de recherche, dans quelques Directions Provinciales de l'Agriculture (DPA) et dans certains Offices Régionaux de Mise en valeur Agricole (ORMVA). Des laboratoires privés d'analyses de sol, d'eau et de plante tardent à s'installer.

Toujours est-il que, pour des impératifs de traçabilité remontante, le Maroc n'a pas d'autres choix, en ce qui concerne les produits d'exportation, que de développer l'analyse pour se conformer aux exigences des bonnes pratiques agricoles (Eurep Gap), mises en place par ses grands clients de l'Union Européenne. La question est d'autant plus urgente que les textes actuels risquent d'être bientôt érigées au rang de directives communautaires avec obligation de s'y conformer [Leteinturier, 2004 ].

### Références bibliographiques

- Remy J.C., Marin Laflèche A., 1974 – L'analyse de terre: réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Ann. Agron. 25 (4): 607-632. interprétation automatique des résultats d'analyses du sol.
- SASMA, 1983 – Méthodologie de travail sur le terrain non publiée.
- SASMA, 1987 – Caractérisation des sols dans le secteur tramé de Sidi Bennour. CR d'étude agro pédologique réalisée pour le compte de la sucrerie des Doukkala, Maroc.
- Snedecor G.W and Cochran W.G., 1967- Statistical methods. 6th Ed. Iowa State Univ. Press. Amer. Iowa. 593 p.
- Sparks D.L., 1981- De la chimie du potassium dans les sols sableux. Revue de la potasse, n°5, sect.4, 72ème suite.
- Vermeulen F.H.B., 1953 – Control of the reproducibility and accuracy of routine analyses at the laboratory for soil and crop testing in the Netherlands. Plant and soil, 4 : 267-275.
- Zerda M., 1983- Echantillonnage des sols et analyses chimiques au laboratoire. Mémoire de fin d'études, ENA Meknès. 50 p.

Dans l'état actuel des choses, la demande en analyse au Maroc est limitée (ou du moins mal connue, puisqu'il n'y a jamais eu de véritable étude de marché publiée). Pour la développer, il faudrait accepter l'idée d'un travail de vulgarisation de proximité, afin que la culture de l'analyse soit inculquée à un public plus large du monde agricole.

Dans sa dimension économique et financière, le projet de relance de l'analyse, se doit d'intégrer les contraintes spécifiques du pays : exigüité des propriétés, aridité du climat et revenu globalement faible du producteur .

Au Maroc, l'échantillonnage en vue d'un plan de fumure personnalisé, n'est guère envisageable que pour une catégorie d'exploitations d'une taille minimale, réalisant un chiffre d'affaire en mesure de supporter le coût de l'opération à titre individuel. C'est le cas des grandes propriétés irriguées produisant des céréales, des agrumes, des rosacées, de la tomate ou des cultures spéciales comme le bananier ou la fleur coupée. Pour le reste du pays, caractérisé par une agriculture conjuguant inconvénients du Bour et inconvénients de la micro propriété, incapable de supporter le coût des

analyses, il faudrait pour compléter cette synthèse, évoquer la nécessité d'un modèle de gestion global plus économique de l'échantillonnage et de l'analyse de terre, adapté à ce type d'agriculture. La pierre angulaire de la stratégie doit être un échantillonnage par communauté d'agriculteurs-types (même région, même système de culture, même type de sol, même niveau de technicité,...) et délivrance de plans de fumure-types afin de partager les frais entre tous les membres de la communauté [Aït Houssa et al, 1997]. Le modèle n'est pas nouveau. Il avait été appliqué avec succès par la SASMA, dans le domaine des agrumes et du maraîchage ( autour de son laboratoire de grande routine de Casablanca) et par l'Etat dans le cadre des projets de soutien au développement agricole dans les périmètres irrigués des Doukkala, du Tadla et du Gharb [Badraoui et al., 2000 ; 2001a ; b ; Lemsalek et al., 2001]..

Pour réussir l'opération, à notre avis, les efforts de l'Etat ne doivent pas se limiter à la subvention de l'analyse. Il faudrait aller bien au delà en créant des projets intégrés avec comme but, d'accompagner le producteur dans ce qu'il fait de A à Z.

# EFFETS DU TRAVAIL DU SOL SUR LA LEVEE ET LE DEVELOPPEMENT RACINAIRE DU COTONNIER SUR SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX LESSIVES AU BURKINA FASO

G. Son<sup>1</sup>, M. Badraoui<sup>2</sup>, F. Kambire<sup>1</sup> & E. Bourarach<sup>2</sup>

## RESUME

Les petits agriculteurs de la zone cotonnière Ouest du Burkina Faso utilisant la traction animale connaissent un retard dans l'installation des cultures, notamment du cotonnier qui nécessite des semis précoces. Un décompacteur du sol à l'état sec est introduit pour permettre un travail précoce du sol, avant l'arrivée des premières pluies. Les effets de l'introduction de cet outil dans les systèmes techniques de préparation du sol sur la levée et le développement racinaire du cotonnier sont comparés au semis direct et au labour à plat. La reprise au labour à plat précédé de l'éclatement des billons par les dents du décompacteur s'est montré le train technique le plus performant. Le pseudo-labour aux dents du décompacteur a donné des résultats équivalents au labour à plat, lorsque les périodes sèches s'installent. Les performances des traitements sont influencées par la distribution fréquentielle des agrégats, notamment par les proportions d'agrégats dont les diamètres sont équivalents à la taille de la semence.

**Mots clés:** Travail du sol, traction animale, agrégats, cotonnier, levée, biomasse racinaire, profondeur racinaire, Burkina Faso

## INTRODUCTION

La partie Ouest du Burkina Faso est la zone cotonnière par excellence tant du point de vue des superficies emblavées que de la production et des rendements. Selon la SOFITEX<sup>3</sup> (1995), cette zone fournit 90 % de la production en coton graine. Cependant, cette agriculture pluviale est sujette à une variation spatio-temporelle des pluies et à une diminution continue de la matière organique en raison de l'exploitation continue des sols et du taux faible annuel de minéralisation (2 %) (Dakouo et Berger, 1987; Somé et Dembelé, 1996; Mugishawimana, 2000). L'absence de couverture de ces sols favorise une prise en masse et un durcissement sous l'effet du climat (Nicou et Chopart, 1992). Dans ces conditions, l'intervention des outils conventionnels de traction animale est difficile à cause de la faiblesse physique des animaux de trait en début de saison.

Mugishawimana (2000) a montré que les pluies de début de la saison pluvieuse sont sporadiques avec de fréquentes périodes de sécheresse. Les variations spatio-temporelles, la sporadicité des pluies et les poches de sécheresse, rendent très aléatoire l'installation des semis (Son et Bourarach, 2002). Il en résulte un retard persistant dans l'installation des semis, surtout dans les exploitations utilisant la

traction animale qui représentent 70 % des exploitations dans l'Ouest du Burkina (Garnier, 1995). L'équipement de ces exploitations, essentiellement composé de charrue à soc et de dents canadiennes, n'est pas adapté pour le travail du sol en sec. C'est dans ce contexte qu'est introduit le travail du sol à l'état sec par l'utilisation d'un décompacteur à dents pour améliorer l'installation des semis. L'objectif de cet article est d'évaluer l'incidence des états structuraux produits par les systèmes techniques de préparation du sol proposés, sur la levée et l'évolution du système racinaire du cotonnier qui sont fortement influencées par l'état structural du sol (Papy, 1987; Tardieu et Pellerin, 1990).

### Caractérisation du site

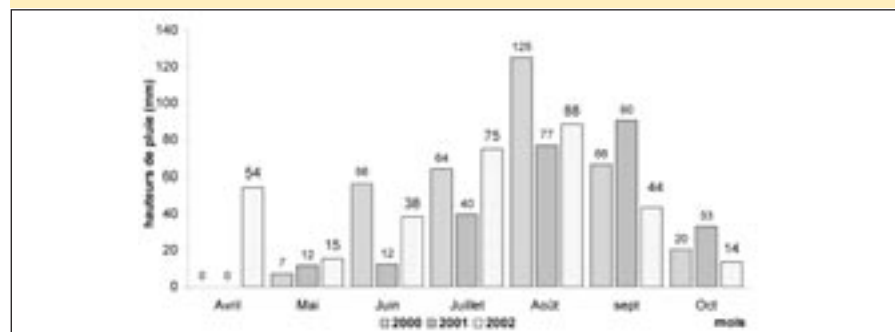
Les essais ont été menés dans la station de recherche de Farako-bâ, située au centre

## MATERIEL ET METHODES

de la zone cotonnière Ouest, à 10 Km de Bobo-Dioulasso sur l'axe Bobo - Banfora. Ses coordonnées géographiques sont 04°20' de longitude et 11°06' de latitude nord-ouest. Cette situation géographique lui confère un climat sub-soudanien caractérisé par une seule saison de pluies de mai-juin à octobre. A la période d'installation des cultures, la demande évaporative sous l'effet du rayonnement solaire (15 à 22 Méga Joules/m<sup>2</sup>) est de 12 mm par jour (Hainzelain, 1998). La pluviométrie enregistrée pendant les années d'expérimentation (2000 à 2002) est présentée par décennie et par année (figures 1, 2, 3).

La pluviométrie enregistrée montre qu'en 2002, les pluies sont irrégulières et de faibles volumes. Elles se sont

Figure 1 : Pluies de la première décennie de 2000 à 2002



1. Chercheurs à l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies BP 7047 Ouagadougou Burkina Faso

2. Professeurs à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II BP 6202, Rabat-Instituts, Rabat Maroc

3. Société des fibres et textiles

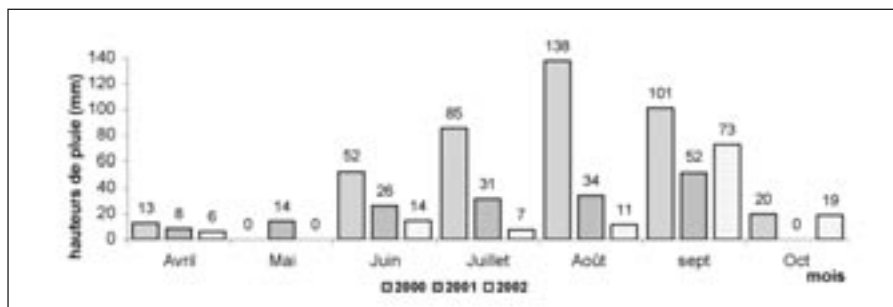


Figure 2 - Pluies de la deuxième décennie de 2000 à 2002

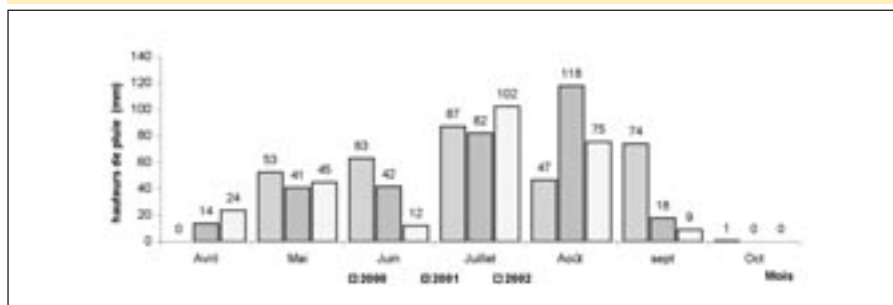


Figure 3 - Pluies de la troisième décennie de 2000 à 2002

véritablement installées en juillet, et ont connu une diminution brutale dès la troisième décennie de septembre pour se terminer à la première décennie d'octobre. La deuxième décennie des mois de juillet et d'août a été particulièrement sèche en 2002.

Trois profils pédologiques ont été creusés, décrits et analysés pour vérifier l'homogénéité des sols du site d'expérimentation. Les profils pédologiques ont été décrits selon les directives de la FAO (1994). Les sols ont été classés selon le système FAO/UNESCO (1994). La perméabilité verticale a été réalisée en période de culture (août 2002) sur les billons et dans les sillons. La méthode du double cylindre a été utilisée du fait de son avantage à limiter la diffusion latérale de l'eau. Les deux cylindres emboîtés ont été enfoncés simultanément à 10 cm dans le sol. Le grand cylindre puis ensuite le petit ont été remplis d'eau jusqu'au niveau de référence à l'intérieur du petit cylindre. Le niveau d'eau du petit cylindre gradué a été relevé à des intervalles de temps réguliers, suivi d'une mise à niveau de l'eau après chaque lecture. La hauteur d'eau infiltrée est égale à la différence entre le niveau de référence et le niveau au moment de la

lecture. La vitesse d'infiltration est obtenue par le rapport entre la hauteur d'eau infiltrée et le temps d'infiltration correspondant.

L'humidité à la capacité au champ correspond à la teneur en eau du sol après ressuyage. Elle a été déterminée par le suivi de l'humidité du sol prélevé sur des placettes (6 placettes par traitement dont 3 sur billons et 3 dans les sillons) de 1 m<sup>2</sup> chacune, à intervalle minimal de temps (quatre heures). Les placettes ont été imbibées d'eau jusqu'à stagnation puis recouvertes d'un plastique blanc pour éviter l'évapo-ration, après chaque prélèvement. Les prélèvements d'échantillons ont été réalisés à la tarière jusqu'à une profondeur de 20 cm. Les pesées ont été faites au 1/100e de gramme, avant et après le séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 h. Les prélèvements ont été répétés jusqu'à avoir des taux d'humidité pratiquement constants.

La densité apparente est obtenue par le rapport entre le poids sec de la terre et le volume du cylindre. Trente (30) échantillons de sol non remanié (dont 15 sur billons et 15 dans les sillons) ont été prélevés à l'aide de cylindres biseautés de 53,73 cm<sup>3</sup>. Ils ont été pesés au 1/100e de gramme avant et après le séchage à l'étuve

pendant 24 heures à 105°C.

### Matériel de travail du sol et dispositif expérimental

Le matériel de travail du sol utilisé se compose d'une charrue à soc de 9'', d'un butteur et d'un décompacteur IR.12<sup>4</sup> (Son, 1994) qui permet le travail en sec du sol. Cet équipement est muni de trois dents rigides réglables en largeur de travail. L'espèce bovine, N'Dama, est l'énergie animale utilisée.

Le dispositif statistique utilisé est un bloc de Fisher à quatre répétitions. Cinq séquences techniques de préparation du sol ont été testées. Chaque parcelle élémentaire compte six (6) lignes sur une superficie de 96 m<sup>2</sup>, recouvrant les quatre (4) lignes centrales d'observation. Les systèmes techniques de préparation du sol mis en comparaison sont:

- SDB: Semis direct sur billons, sans travail préalable du sol.
- EBC: Eclatement des billons dans l'axe central à l'état sec avec une dent IR.12, en un passage. Ce passage dans l'axe du billon ouvre une raie qui sert aussi de ligne de semis;
- PD-L: Pseudo-labour en pré-humide au décompacteur. Cet agencement comporte une dent centrale avant et deux dents latérales arrière. Les billons sont éclatés en sec et les sillons en pré-humide. Au travail, la dent centrale passe dans l'axe du billon;
- EB-LP: Eclatement des billons à l'état sec avec trois dents associées, comme en pseudo-labour, suivi d'une reprise au labour à plat à la charrue à soc en humide;
- LPH: Labour à plat à la charrue à soc à l'état humide. Il correspond à la pratique paysanne la plus répandue.

### Caractérisation du travail du sol

L'humidité à la préparation du sol a été effectuée aux horizons 0-5, 5-10 et 10-15 cm, avant l'intervention de chaque série d'opérations.

Le travail du sol a été caractérisé par la profondeur de travail et la distribution des agrégats. Pour les techniques utilisant le décompacteur, la dénivelée du sol a été

4. Dent réversible, épaisseur 12, mise au point par l'Institut d'Etude et des recherches Agricoles

prise avant et après le passage de l'outil, avec un incrément de 1cm près, à l'aide de règles graduées. La profondeur de travail du sol correspond alors à la différence des dénivellations. La profondeur de la raie a été mesurée, dans le cas du labour à plat.

En ce qui concerne la distribution fréquentielle des agrégats, trois prélèvements, repartis sur la diagonale de la parcelle élémentaire de la couche de sol travaillée, ont été effectués sur un carré de 25 cm x 25 cm. Dans le cas de l'éclatement des billons à une dent, toute la terre remaniée a été ramassée sur 25 cm le long de la raie ouverte. Les échantillons, prélevés à l'aide d'une pelle, ont été ensuite séchés au soleil pour éviter que les mottes ne se brisent pendant le tamisage. Elles ont été passées aux tamis de diamètres (mm): >5, >10, >20, >40, >80, superposés dans l'ordre croissant des mailles. Pour qu'une motte soit affectée à une classe, il faut que le refus soit total quel que soit le sens dans lequel elle est introduite dans la maille du tamis. Les agrégats ainsi séparés ont été pesés par classe de taille. Ces mesures ont été réalisées en 2000 et 2002.

#### Matériel végétal, semis et mesures

La variété du cotonnier (*Gossypium barbadense*) utilisée est FK 290 qui a été produite à la station de Farako-bâ. Les graines sont de petites tailles (ff 5,5 mm), avec un poids de 9 grammes pour 100 graines. Son cycle végétatif de 150 jours, nécessite un semis précoce (entre le 20 mai et le 15 juin) pour permettre à la plante de boucler son cycle. Elle exige pour son installation un travail préalable du sol non seulement en raison de son installation précoce (période de pluies irrégulières) mais aussi pour améliorer la colonisation racinaire du sol.

Les semis ont été réalisés, pendant les trois années, à la même date dans la période du 14 au 26 juin pour tous les traitements. L'écartement des semis est de 0,80 m entre les lignes et de 0,40 m entre les poquets. La densité théorique est de 62500 plants à l'hectare. Les entretiens culturaux (sarco-binage manuel, buttage en traction animale et traitements phytosanitaires) ainsi que l'application de la fumure minérale ont été identiques pour tous les traitements.

Les mesures de terrain ont porté sur les paramètres suivants:

- L'évolution de la levée a été suivie. L'évaluation de la levée a lieu du 4<sup>ème</sup> au 7<sup>ème</sup> jas (jours après semis), sur 20 poquets délimités au centre de chaque parcelle élémentaire et pendant les trois années d'observation.

Le taux de levée à 7 jas a été évalué sur les quatre lignes centrales en laissant une bordure de deux poquets aux bouts de chaque ligne. Cette délimitation renferme 188 poquets semés. Le taux de levée est obtenu par le rapport du nombre de poquets levés sur la densité théorique. La profondeur moyenne de semis est de 2 cm  $\pm$  0,6 sur 40 poquets à raison de 2 poquets par parcelle élémentaire. Sur les parcelles élémentaires en pseudo-labour cette variation moyenne de la profondeur de semis est de  $\pm$  0,8 cm. Les mesures ont été effectuées au 7<sup>ème</sup> jas, en mesurant la racine jusqu'au collet sans la tendre.

- Le diagnostic racinaire vise à apprécier l'incidence des trains techniques de préparation du sol sur la profondeur d'enracinement et le poids racinaire du cotonnier. La méthode de Henin (profil cultural) adaptée au cotonnier a été utilisée pour mesurer la profondeur d'enracinement. Cette méthode consiste à faire une fosse à la profondeur limite du front racinaire; la distance comprise entre le collet et l'extrémité visible de la racine pivotante correspond à la profondeur d'enracinement. Le système racinaire est ensuite sectionné à partir du collet. Le poids sec est obtenu après séchage à l'étuve à 70°C pendant 72 heures. Les observations ont porté sur quatre plants représentatifs de chaque parcelle élémentaire à 40, 80 et 120 jas de 2000 à 2002.

**Figure 4:** Etat initial de la surface du sol du site 'expérimentation (station de recherche de Farako-bâ, 20 mai 2002).



Les données ont été traitées avec les logiciels Excel et SAS. La normalité de la distribution des données a été vérifiée au seuil de signification de 5 %. Les tests de tukey lines ont été utilisés dans l'analyse de la variance. Les régressions linéaires ont également été évaluées au seuil de signification de 5 %.

#### Caractéristiques du sol avant l'intervention des outils de travail du sol

L'état initial, au démarrage des travaux de préparation du sol, est caractérisé par l'absence totale du couvert végétal (Figure 4). Les dénivellées observées résultent du buttage qui est la dernière opération de travail du sol du précédent cultural qui est le coton ou le maïs. Les hauteurs des billons résiduels varient de 8 à 15 cm et les largeurs de 25 à 42 cm.

L'observation des profils pédologiques (Figure 2) laisse apparaître en profondeur à partir de 20 cm de nombreuses tâches (10 à 40 %) de couleurs brun-jaunâtre (10YR), rougeâtre (10YR) et brunâtre (10YR5/4).

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les types de sols qui se dégagent sont des lixisols ferriques (sols ferrugineux tropicaux lessivés à tâches et concrétions) et les lixisols endoleptiques (sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés peu profonds). La profondeur du sol est limitée par une carapace ferrugineuse friable, à partir de 45 cm de profondeur. On note également l'apparition d'un horizon gréseux très friable, à partir de 180 cm de profondeur. Le profil racinaire est bien fourni en racines fines et très fines avec quelques racines moyennes. L'activité biologique est assez bien développée, surtout en surface. La texture est limono-sableuse entre 0 et 14 cm de profondeur et une teneur en argile variant entre 9,8 et 15,7% (tableau 1).

Au-delà de 14 cm, la texture devient limono-argileuse (23,5 à 31,4 % d'argile et des teneurs de limons et sables variant entre 31,7 et 39 %). La teneur en matière organique ne dépasse guère 0,7 %, quelle que soit la profondeur. Le pH de l'eau varie entre 4,7 et 5,8. L'analyse granulométrique n'a pas révélé de différence significative de texture entre sillons et billons. La vitesse d'infiltration, aux taux d'humidité correspondant à la capacité au champ (12 à 15 %), est

généralement très faible. Elle est plus faible dans les sillons (0,04 cm/h) que sur les billons (0,15 cm/h). La densité apparente moyenne du sol est de 1,55 g/cm<sup>3</sup>.

Les résultats d'analyses susmentionnés mettent en évidence une fragilité physico-chimique du sol qui se traduit par une désaturation du complexe argilo-humique et un développement en surface d'une structure massive et compacte à l'état sec. Cet état de surface du sol est à l'origine du ruissellement élevé en début des pluies (Roose, 1997; Casenave et Valentin, 1989). Si le billon a une meilleure vitesse d'infiltration, sa forme géométrique l'expose au dessèchement rapide à cause de la forte évaporation à la période des premières pluies (Somé, 1989). La faible capacité au champ montre que le temps disponible après une pluie utile pour le travail du sol est faible, puisqu'il faut entre 12 et 14 % de taux d'humidité du sol pour une utilisation optimale de la charrue à soc (Somé, 1989). Ces contraintes justifient la recherche des techniques de captage des eaux des premières pluies à la parcelle par la réduction du ruissellement.

### Caractéristiques du sol travaillé

La première série des séquences de préparation du sol a été réalisée par le décompacteur équipé de dents IR12. Ces opérations ont consisté à utiliser le décompacteur selon les traitements définis. Le taux d'humidité sur l'horizon 0 à 5 cm est inférieur ou égal 2 %. Entre 5 et 15 cm de profondeur, l'humidité varie entre 2 et 5%, selon les arrières effets du travail du sol.

Les mottes créées sont peu dissociées dans le cas de l'éclatement du billon dans l'axe central, par le passage d'une dent (EBC). Quelques mottes sont projetées dans le sillon, créant ainsi des obstacles au ruissellement, au profit de l'infiltration. Le semis est réalisé dans la raie laissée par le passage de l'outil.

Le pseudo-labour (PD-L) correspond au passage de l'outil sur le billon, ensuite dans le sillon. Ce travail laisse un état motteux sur presque toute la surface ce qui favorise l'humidification du sol. L'éclatement des billons au décompacteur à trois dents (EB-LP) laisse un état de surface motteux dans les sillons et sur les billons. Les profondeurs moyennes de travail (cm) à l'état sec sont indiquées dans le tableau 2.

Le labour à plat à la charrue à soc en traction animale est réalisé lorsque l'humidité le permet. Les traitements «EB-LP» en reprise au labour et le labour direct sans travail préalable (LPH) sont effectués en même temps. Les états d'humidités moyennes aux travaux de reprise (figure 5) mettent en évidence l'effet du travail du sol aux dents à l'état sec, qui améliore l'infiltration de l'eau aussi bien dans le sillon que dans le billon. Les écarts types sont plus variables sur les billons que dans les sillons.

L'effet bénéfique du travail à sec par le décompacteur à dents se traduit par des améliorations substantielles des taux d'humidité par rapport au labour à plat direct. Ces augmentations d'humidité sont évaluées à 124 %, 62 % et 39 % respectivement dans les horizons 0 – 5 cm, 5 – 10 cm et 10 – 15 cm. Le taux

d'augmentation moyen sur les 15 premiers centimètres du sol est de 67 %.

L'effet bénéfique du travail du sol à sec par le décompacteur à dents avant les premières pluies se manifeste également sur la profondeur de travail du sol à la charrue à soc. Ainsi, la profondeur de travail en reprise au labour (EB-LP) est de 14,3 cm ± 0,68 et celle du labour à plat (LPH) n'est que de 9,12 cm ± 1,17, soit une augmentation moyenne de 57 % (tableau 2 ci-dessus).

Effets des traitements sur la distribution des tailles d'agrégats

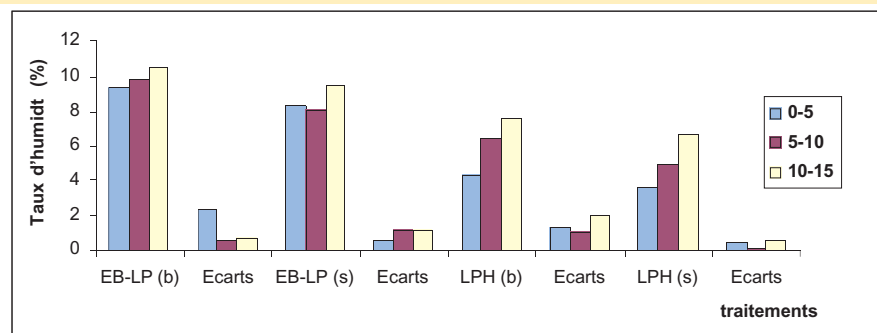
Les états structuraux obtenus après le passage du décompacteur et de la charrue à soc en conditions humides, selon les traitements sont repartis en classes d'agrégats suivant leurs diamètres (Figure 6).

Texture	Profondeur 0-8 cm		8-14 cm		14-27 cm	
	sillon	Billon	sillon	billon	sillon	billon
Argile (%)	11,76	9,8	15,69	15,69	31,37	23,53
Limon (%)	43,14	43,14	33,33	35,29	37,26	39,22
Sable (%)	45,1	47,06	50,98	49,02	31,37	37,25

Tableau 1: Analyse granulométrique (trois fractions)

Traitements	État d'humidité	Profondeur de travail à l'état sec (H < 4 %)	Profondeur de travail à l'état humide
	EBC		16,7 ± 1,42
EB-LP		7,79 ± 1,42	14,3 cm ± 0,68 (H > 8 %, horizon 0-10 cm)
PD-L		8,26 ± 1,03	-
Labour à plat		-	9,12 cm ± 1,17 (H = 6.5 %, horizon 0-10 cm)

Tableau 2 : Profondeur moyenne de travail du sol.



N.B. b : billon ; s : sillon

Figure 5: Taux d'humidités du sol (%) avant le passage de la charrue à soc

La variation entre les classes extrêmes est importante. La reprise au labour à plat à la charrue à soc (EB-LP) produit 52 % de terre fine contre 36 % pour le labour à plat (LPH) sans éclatement préalable des billons. Par contre, le labour à plat donne 29 % d'agrégats dont les tailles sont supérieures à 80 mm, contre seulement 9 % en reprise au labour. Les classes d'agrégats de diamètres compris entre 5 et 80 mm ont sensiblement les mêmes proportions. Ces proportions d'agrégats matérialisent l'effet de l'outil. Ce sont ces états structuraux qui caractérisent le lit de semence, selon les traitements.

Globalement, l'éclatement des billons à l'état sec suivi par un labour à la charrue à soc à l'état frais (EB-LP) produit le lit de semence le plus fin. Les autres traitements produisent des lits de semence plus grossiers. L'importance du travail de reprise à l'état frais pour l'ameublissement du lit de semence, se matérialise par les différences entre les traitements EB-LP et EBC, dont les proportions sont complètement opposées.

La figure 7 montre que les écarts types sont plus élevés pour les agrégats de diamètres supérieurs à 80 mm. En ce qui est du traitement de la reprise au labour précédé de l'éclatement des billons, les écarts types atteignent 12% pour la classe d'agrégats de diamètres inférieurs à 5 mm, contre un maximum de 5 % pour les autres traitements.

#### Effets des traitements sur la levée des semis

Le semis a été effectué après une pluie ayant permis un front d'humectation relativement homogène sur les vingt premiers centimètres pour tous les traitements (12 à 14 % d'humidité sur les lignes de semis). Le traitement «EB-LP», qui a la structure d'agrégats la plus fine, avec une variation importante des agrégats de tailles inférieures à 5 mm, donne les taux de levée les plus élevés (figure 8). Le taux de levée à 7 jas atteint 84 %. Ce traitement est suivi du traitement «PD-L» puis de «EBC», qui ont respectivement des taux de levée de 79 et 76 %. Le semis direct (49%) est de loin le moins performant, avant le labour à plat sans travail préalable du sol (LPH) (70%). Cependant les variations de la levée diminuent avec la durée du semis. La levée en semis direct est la plus irrégulière

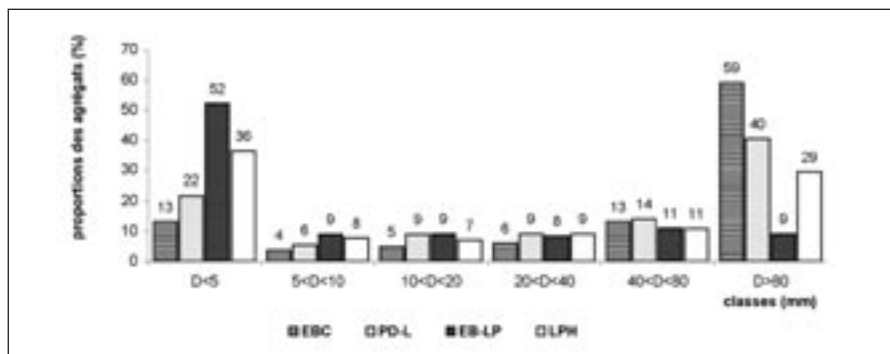


Figure 6: Distribution fréquentielle des agrégats par système technique de préparation du sol à la traction animale

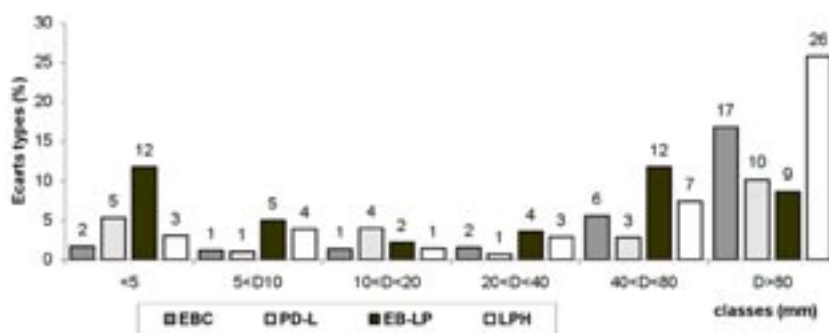


Figure 7: Ecart types de la distribution fréquentielle des agrégats par système technique

jusqu'au 6 jas. Les traitements «PD-L» et «EBC» semblent avoir une phase d'imbibition difficile jusqu'au quatrième jour puisque à partir du cinquième jour, le taux de levée tend vers celui du traitement EB-LP. Cela résulte sans doute de la taille des agrégats qui ne favorise pas l'imbibition des graines.

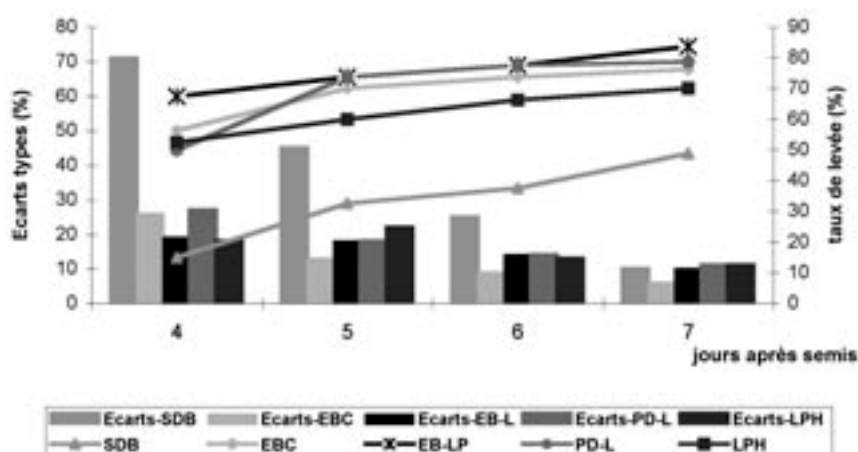
Le retard de levée des deux traitements «EBC» et «PD-L» pourrait être aussi dû à la force de poussée nécessaire par l'hypocotyle pour dégager les mottes de surface. En effet, les proportions d'agrégats de diamètres supérieurs à 80 mm sont supérieures à 40 % dans ces deux traitements. Pommel (1990) souligne les difficultés de la levée, en présence d'une structure motteuse qui multiplie les obstacles mécaniques pouvant même dans certains cas limites, la rendre impossible. Bouaziz et al.(1990) ont montré que plus le diamètre des agrégats est grand, plus la demande de poussée d'émergence exercée par l'hypocotyle est élevée pour un sol de densité donnée. Selon Richard et Dürr (1996), le cotonnier peut exercer une poussée de 4,91 N. La diminution du taux de levée en pseudo-labour à partir du sixième jour est la conséquence de la

profondeur d'enfouissement de certaines graines dans les macro-porosités laissées par le travail du sol et / ou selon Richard et Dürr (1996), par la désagrégation des mottes à la suite des pluies tombées avant la levée. Cependant, ce traitement offre un taux de levée à 7 jas équivalent à celui de la reprise au labour, sur une moyenne de trois ans de suivi (tableau 3). Durant les années d'observation, la pluviométrie de 2002 a été la plus faible en répartition comme en volume. Les différences sont significatives entre les traitements, d'après les tests de tukey lines. La contradiction apparente entre les taux de levée en 2002 et les moyennes sur les trois années résulte des effets de la variation climatique. Le pseudo-labour (PDS-L) et la reprise au labour précédé de l'éclatement des billons à trois dents (EB-LP) sont les traitements qui réagissent le mieux aux risques climatiques. Le traitement «EBC» est significativement meilleur que le semis direct sur billons (SDB), mais est le moins performant par rapport aux autres traitements.

La performance de la levée est d'autant meilleure que les tailles des agrégats sont proches de celles de la semence, en

## Références Bibliographiques

- Bouaziz A., Souty N., Hicks D, 1990 - Emergence force exerted by wheat seedlings.
- Soil and Tillage Research 17 (1-2): 211-219.
- Casenave A., Valentin C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne: Influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM. Coll. didactiques.
- Dakouo D., Berger M., 1987 - Agronomie et techniques culturales. Rapport annuel 1987.
- INERA, 119 p. et annexes.
- FAO, 1994-Directives pour la description des sols, 3<sup>ème</sup> édition (révisée), FAO-ISRIC, Wageningen, 73 p.
- FAO/UNESCO, 1994 – soil map of the world, revised legend with corrections, FAO-ISRIC, Wageningen, 140 p.
- Garnier A., 1995 - Bilan et perspectives de la traction animale dans la zone cotonnière du Burkina-Faso. Mémoire de fin d'études, CNEARC/EITARC, France, 97 p.
- Hainzelin E., 1998 - Amélioration du rendement et de la tolérance aux densités élevées de deux populations tropicales élites de maïs par introgression de matériels exotiques, thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Sciences du végétal, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, France, 174 p.
- Monnier G., Fiès J. C., 1983 - Stabilisation structurale: Evolution par Désagrégation: Test de stabilité. Séminaire CEE-Agrimed, 14-18 mars 1983. 9 p.
- Mugishawimana J., 2000 - Impact de la pluviométrie des dix dernières années sur la mise en place des cultures mécanisées en zone cotonnière Ouest du Burkina Faso: cas du coton et du maïs. Mémoire de fin d'études, option Agronomie, IDR, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 85 p. + annexes.



**Figure 8 :** Evolution temporelle des taux de levée du cotonnier selon des traitements

Année	Traitements					CV (%)	ppds
	SDB	EBC	EB-LP	PD-L	LPH		
2002	60b	88a	91a	87a	82ab	28,5	24,6
2000-2002	58c	64,bc	77ab	79a	69abc	12,7	13,7

**Tableau 3:** Effet des séquences de travail du sol sur le taux de levée (%) du cotonnier

fonction de la densité du sol et que le semis a été réalisé après une pluie utile sur le sol travaillé.

Il est également important de remarquer que le labour à plat sans éclatement préalable des billons à l'état sec (pratique des agriculteurs) a toujours été aussi performant en terme de levée que les autres traitements ayant utilisé le décompacteur.

La structure motteuse du pseudo-labour a favorisé, dans ces sols ferrugineux tropicaux, limono-sableux en surface et à faible teneur en matière organique (0,7 %) susceptibles à la prise en masse en surface sous l'effet du climat, une meilleure conservation de l'eau de pluies stockée. C'est ainsi que le pseudo-labour a pu maintenir le processus de germination, en présence de périodes sèches prolongées après semis. La conservation de l'eau résulte du ralentissement du dessèchement. Monnier et Fiès (1983) et, Nicou et Chopart, (1992) lient la vitesse de ce dessèchement au rythme de la variation alternée des pluies et des températures qui favorisent la prise en masse et la formation de la pellicule de battance, selon la structure des agrégats et l'état de surface. Cette alternance est à

l'origine de la désagrégation des mottes, sous l'action de la pression d'air emprisonnée par l'eau superficielle (Rudolphe et al., 1995 ; Watung et al., 1996).

En l'absence de couverture végétale du sol, le dessèchement et la prise en masse sont alors accélérés sur les parcelles des traitements «EB-LP» et « LPH », dont l'émiettement du sol est plus accentué ;

ceci explique le ralentissement de la levée de ces traitements.

Influence des traitements sur le développement racinaire

La biomasse racinaire en phase d'implantation de la culture (entre 7 et 40 jas) présente des différences significatives entre les traitements, selon les tests de tukey lines au seuil de 5% (tableau 4). Le labour à plat précédé de l'éclatement des billons (EB-LP) produit plus de biomasse racinaire (0,58 g/plante) que les autres traitements, à l'exception du labour à plat (LPH, 0,49g/plante) qui lui est statistiquement égal.

Bien que les quantités de biomasse produites soient faibles, les différences significatives observées témoignent de l'effet des séquences de travail du sol. Les traitements LPH et EB-LP sont similaires

## Références Bibliographiques

- Nicou R., ChHopart J. L., 1992 - Travail du sol et propriétés physiques du sol en zones arides Ouest africaine. In: International Seminar of the 3rd section of the International Commission Agricultural Engineering "tillage in Arid and Semi-Arid areas", 22-25 avril 1992. Rabat, Maroc.
- Papy F., 1987 - Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. *Agronomie*, 7 (2): 111-121.
- Pommel B., 1990 - Caractérisation de la plantule de maïs par ses paramètres au départ et selon son environnement. In: *Physiologie et production du maïs. Colloque- la vie du maïs- Physiologie du maïs: application à la production*, INRA, AGPM et Université de Paris Sud. 13-15 novembre 1990. pp. 75-82.
- Richard G., Dürr C., 1996 - Conséquences de l'état du profil cultural sur le peuplement végétal : réussite de la levée en relation avec l'état du lit de semences. In : *Le travail du sol dans les systèmes mécanisés tropicaux. Actes du colloque*, 11-12 septembre 1996, Montpellier, France. pp 49-54.
- Roose E., 1977 - Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et documents de l'ORSTOM*, n°78.
- Rudolph A., Helming K., Diestel H., 1995 - Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes.
- SO.FI.TEX, 1995 - Eléments de stratégie de relance de la production coton graine au Burkina. Rapport général de la première édition des journées coton sur la politique et stratégie de relance de la production cotonnière au Burkina, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 9-11 mars 1995. 30 p.

Période Traitements	40 jas		80 jas		120 jas	
	Poids (g/plant)	7-40 /120 (%)	Poids (g/plant)	40-80/120 (%)	Poids (g/plant)	80-120/120 (%)
SDB	0,14 c	3,3	2,25 b	49,7	4,25 c	47,0
EBC	0,24 b	4,8	3,00 ab	55,2	5,00 bc	40
EB- LP	0,58 a	9,28	4,25 a	58,72	6,25 a	32
PD-L	0,32 b	6,1	3,25 ab	55,8	5,25 b	38,1
LPH	0,49 a	9,3	4,00 a	66,9	5,25 b	23,8
CV (%)	11,8		16,58		7,45	
ppds	0,1		1,25		0,87	

Tableau 4 - Poids secs des racines du cotonnier en fonction des traitements et performances par rapport à celles de 120 jas (Station de recherche de Farako-bâ)

Période Traitements	40 jas		80 jas		120 jas	
	Profondeur (cm)	7-40/120 (%)	Profondeur (cm)	40-80/120 (%)	Profondeur (cm)	80-120/120 (%)
SDB	18,75 b	60.5	28,75 c	32.3	31,00 b	7.2
EBC	21,00 b	65.7	30,00 bc	28	32,00 b	6.3
EB- LP	26,25 a	72.4	33,75 a	20.7	36,25 a	6.9
PD-L	24,5 a	72.1	31,00 abc	19.1	34,00 ab	8.8
LPH	24,25 a	70.3	32,50 ab	23.9	34,50 ab	5.8
CV (%)	5,14		4,87		5,41	
Ppds	2,66		3,42		4,09	

NB: les chiffres suivis de la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %.

Tableau 5 : Profondeurs moyennes d'enracinement (cm) du cotonnier en fonction des traitements et performances par rapport à celles 120 jas (Station de recherche de Farako-bâ)

jusqu'à 80 jas et la supériorité du traitement EB-LP apparaît ensuite entre 80 et 120 jas où la biomasse racinaire produite atteint à 6,25 g/plant. La production maximale de racines se produit durant la phase végétative entre le 40 et 80 jas. Durant cette phase le cotonnier a produit entre 50 et 67 % de la biomasse totale des racines. Le semis direct sur billon (SDB) produit la masse racinaire la plus faible.

A la phase productive (entre 80 à 120 jas) où la demande nutritive est intense, suivie de baisse des volumes pluviométriques, la vitesse de production de la biomasse est ralentie et se maintient entre 24 et 47 % par rapport au potentiel de 120 jas, selon les traitements. Tous les traitements arrivent à 120 jas avec des biomasses voisines sauf le traitement SDB qui est nettement plus faible et le traitement EB-LP nettement plus élevé.

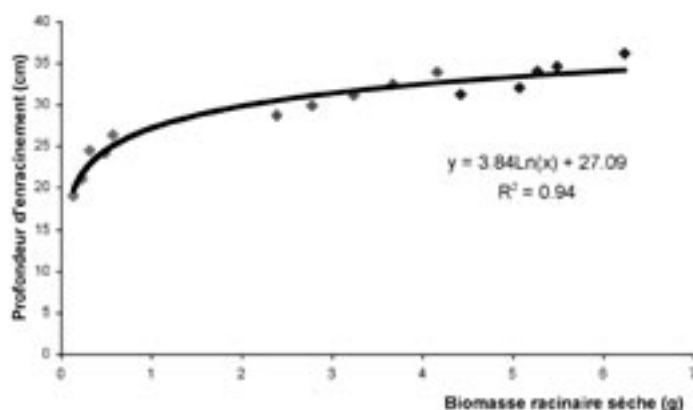
Les séquences de travail du sol testées ont induit des profondeurs d'enracinement différentes selon les tests de tukey lines au seuil de 5 % (tableau 5). Ainsi, entre la

levée et 40 jas, la profondeur d'enracinement se situe entre 18 et 26 cm. Les traitements EB-LP, PD-L et LPH ont réalisé des profondeurs statistiquement équivalentes comprises entre 24 et 26 cm. Entre 40 et 80 jas, les traitements qui ont été moins efficaces (entre la levée et 40 jas), ont amélioré leurs performances. Cette phase est caractérisée par une baisse progressive de la vitesse d'enracinement jusqu'à 120 jas où la profondeur d'enracinement atteinte est comprise entre 34 et 36 cm pour les traitements les plus performants (EB-LP, PD-L et LPH). La profondeur minimale a été observée dans le traitement correspondant au semis direct.

La profondeur d'enracinement et la biomasse racinaire sont positivement corrélées. En fait, il y a une relation entre ces deux variables. Cependant, les meilleures performances d'enracinement se situent entre 7 et 40 jas, alors que celles de la production de la biomasse racinaire sont développées durant la période végétative entre 40 et 80 jas. La régression linéaire simple s'ajuste à une fonction

## Références Bibliographiques

- Somé L., 1989 - Diagnostic agroclimatique du risque de sécheresse au Burkina Faso. Etude de quelques techniques agronomiques améliorant la résistance pour les cultures de sorgho, de mil et de maïs. Thèse de doctorat. Spécialité: physiologie, biologie des organismes et des populations : Agronomie. Université de Montpellier (Montpellier II) Science et technique de Languedoc, 321p + annexes.
- Somé L., Dembélé Y., 1996 - Péjoration pluviométrique au Burkina Faso: impacts sur les productions agricoles. In: La recherche scientifique face aux problèmes de l'environnement, Actes 2, Forum National de la Recherche Scientifique et des Innovations Technologiques, Tome 2, les communications scientifiques. pp. 81-90.
- Son G., 1994 - Optimisation des paramètres de travail de la dent IR12. Rapport d'activités. Institut d'étude et des Recherches Agricoles (INERA), Ougadougou, Burkina Faso, 15p.
- Son G., Bourarach EL- H., 2002 - The issue of crops establishment in the Western area of Burkina Faso. XV CIGR WORLD congress and ASAE Annual International Meeting Chicago, Illinois USA/CIGR.
- Tardieu F., Pellerin S., 1990 - Modélisation de l'architecture du système racinaire du maïs au champ: aspects géométriques. In: Physiologie et production du maïs. Colloque-la vie du maïs- INRA, AGPM et Université de Paris Sud. 13-15 nov. 1990. pp. 133-141.
- Watung R. L., Sutherland R. A., El-Swaify S.A., 1996 - Influence of rainfall energy flux density and antecedent soil moisture content on splash transport and aggregate enrichment ration for a Hawaiian Oxisol. Soil technology 9: 251-272.



**Figure 9:** Relation entre la biomasse racinaire et la profondeur de l'enracinement du cotonnier

logarithmique avec un coefficient de corrélation de 0,94 (figure 9). C'est durant la période 0 à 40 jas que l'élongation des racines vers la profondeur a été la plus importante, mais avec une faible augmentation de la biomasse. Par contre, la période végétative, a connu une très forte augmentation de la biomasse pour une faible progression des racines vers la profondeur. La tendance est pratiquement la même durant la période de production (80 à 120 jas). Il y a d'abord descente du pivot puis développement latéral des racines dans le cycle du cotonnier.

Ces résultats montrent que la profondeur du travail du sol et la taille des agrégats obtenus influencent aussi bien la production de la biomasse racinaire que la profondeur d'enracinement.

## CONCLUSION

L'utilisation du décompacteur du sol à l'état sec contribue à l'amélioration de l'humidification du sol, ce qui prédispose à une utilisation plus précoce de la charrue à soc. La combinaison de l'éclatement des billons à l'état sec et de la reprise au labour à plat, permet d'obtenir des structures d'agrégats dont les effets sont statistiquement équivalents, sinon significativement supérieurs à tous les traitements en taux de levée et en développement racinaire. En semis précoces, caractérisés par de fréquentes périodes sèches, le labour peut être difficile à réaliser et retarde la date de semis. Le pseudo-labour aux dents IR12 du décompacteur, est lui réalisable en conditions sèches et donne des performances équivalentes au labour à plat à la charrue à soc, en taux de levée comme en production de biomasse

racinaire. La reprise au labour à plat, précédée de l'éclatement des billons est le traitement qui pourrait permettre non seulement une intervention plus précoce de la charrue à soc, mais aussi favorise une meilleure levée et un bon développement racinaire du cotonnier. C'est le traitement qui semble réduire au mieux les risques climatiques. Le semis direct, sans couverture végétale en surface est le traitement qui donne les faibles résultats. Il apparaît que l'insertion du décompacteur dans les séquences de préparation du sol a permis d'offrir des alternatives équivalentes, sinon meilleures au labour à plat pour l'installation du semis et le développement racinaire du cotonnier.

Les proportions, d'au moins 35 % d'agrégats de tailles inférieures à celles de la semence, semblent plus adaptées aux sols ferrugineux tropicaux limono-sableux à moins de 1 % de matière organique et une teneur d'argile en surface de l'ordre de 10 à 15 %, pour accélérer la croissance racinaire et prolonger la durée de l'effet du travail du sol.

Cette étude apporte aussi des références sur la vitesse de colonisation racinaire du cotonnier. La profondeur explorée par les racines sur ce type de sol est limitée à environ 40 cm dont environ 70 % de cette profondeur est explorée au bout de 40 jas. Par contre la colonisation latérale de cette couche par les racines se produit ensuite et essentiellement entre 40 et 80 jas.

Une relation logarithmique a été établie entre la profondeur du sol colonisée par les racines et la biomasse racinaire.

# EPURATION ET REUTILISATION DES EAUX USEES À DES FINS AGRICOLES (EXPERIENCE OUARZAZATE)

H. Berdai<sup>1</sup>, T. Benchokroun<sup>2</sup> & B. El Hamouri<sup>3</sup>

## 1. INTRODUCTION

Faisant partie des pays à climat méditerranéen arides à semi-arides, le Maroc a un potentiel hydrique relativement limité et aléatoire (COP 7, 2001 (1); CSEC, 2001). Les estimations prévisionnelles de l'offre et de la demande, effectuées par la Banque Mondiale (1995), en tenant compte des changements climatiques que subit le Maroc induisant des séquences de sécheresse pouvant s'étaler sur plusieurs années, montrent que le Maroc serait, dans moins de 20 ans, en situation de stress hydrique chronique (ressources en eau renouvelables < 500 m<sup>3</sup>/hab/an).

Par ailleurs, la détérioration de la qualité des ressources en eau suite à l'activité humaine constitue une menace aussi importante que celle liée au déséquilibre quantitatif. En effet, le problème de pollution des ressources en eau généré par les rejets urbains et par l'activité industrielle et agricole, diminue le potentiel des ressources hydriques de bonne qualité, engendre un risque sanitaire pour la population et compromet le développement socio-économique du pays.

Dans ce contexte de rareté croissante des ressources hydriques nationales et de dégradation de leur qualité, le traitement et la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture présentent un intérêt certain. Les effets bénéfiques de ces pratiques sont multiples. Elles permettent de:

- protéger et conserver les milieux naturels, en particulier la qualité des eaux ;

- préserver, voire améliorer, la santé de la population ;
- exploiter une ressource en eau additionnelle non négligeable et disponible en permanence ;
- valoriser les apports par les eaux usées épurées d'éléments nutritifs qui sont utilisés pour produire la biomasse végétale et les produits de récolte;
- et réduire les dépenses de l'exploitation en minimisant les apports d'engrais chimiques.

Ces pratiques constituent également une alternative très intéressante et une option à développer lorsque les ressources en eau souterraine sont surexploitées ou fortement salines. C'est le cas par exemple de la nappe du Souss qui accuse un déficit hydrique annuel du niveau de la nappe allant de 0,5 à 2 m/an (CSEC, 2001 (2)). C'est aussi le cas de la zone côtière où l'intrusion marine constitue une menace sérieuse aux eaux souterraines fortement sollicitées pour l'irrigation des cultures maraîchères et de la vigne.

Le traitement et la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture sont donc incontestables. Néanmoins, leur mise en œuvre au Maroc nécessite, à priori, de rechercher les méthodes de traitement des eaux usées optimales et adaptées à notre contexte climatique. Elle requiert aussi la mise au point d'approches intégrées permettant de concilier entre l'amélioration de la productivité des terres agricoles irriguées par les eaux usées épurées et la préservation de la santé humaine et animale ainsi que la qualité des ressources naturelles eau et sol.

Un grand effort doit donc être consenti en matière de recherche et d'expérimentation afin de mettre au point un référentiel technique permettant un traitement adéquat et une gestion rationnelle des eaux usées épurées en conditions marocaines dans une perspective d'une réutilisation agricole de ces eaux productive et durable. Ce référentiel technique pourrait ensuite servir de base pour la conception et la gestion à grande échelle des unités d'épuration et des périmètres de réutilisation.

C'est dans ce contexte que le projet pilote de traitement et de réutilisation des eaux usées à Ouarzazate a été initié au début des années 90. Bien que ce projet ait présenté initialement un caractère purement expérimental (Phase I) et démonstratif (Phase II), ses résultats ont, cependant, débordé largement le seul contexte de la recherche. En effet, outre les résultats directs, qui ont permis de tracer un cadre global du traitement et de la réutilisation des eaux usées en agriculture au Maroc lequel a été examiné par le Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC) lors de sa huitième session (1994), le projet a eu d'autres impacts positifs indirects d'une importance majeure.

Ainsi, le projet Ouarzazate a contribué pleinement à améliorer le niveau de réflexion concernant le traitement et la réutilisation des eaux usées à l'échelle nationale, et à créer un dynamisme pour la promotion de ce secteur. Il a contribué à la réflexion pour l'élaboration d'un cadre normatif, organisationnel et institutionnel de la réutilisation

1. Ingénieur au Service des Expérimentations des Essais et de la Normalisation / Direction du Développement et de la Gestion de l'Irrigation ; Docteur Es Sciences Agronomiques de l'IAV Hassan II.

2. Chef de Division de l'Hydraulique Agricole / Direction du Développement et de la Gestion de l'Irrigation.

3. Enseignant-Chercheur à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.

contrôlée en agriculture permettant d'assurer la réussite et la durabilité de cette pratique. Ces résultats ont été directement utilisés par les bureaux d'étude dans le cadre des Etudes des Schémas Directeurs d'Assainissement des grandes villes et des agglomérations urbaines et rurales. Dans ces études, la composante protection de l'environnement intégrant l'option "traitement des eaux usées et réutilisation en agriculture" a été prise en considération.

D'autres projets pilotes de traitement - réutilisation ont été lancés dans d'autres régions du Maroc. Les plus récents, ont associé les usagers des eaux usées épurées dans leur phase de planification et de gestion (Attaouia, Drarga). L'implication des agriculteurs et des associations des usagers de l'eau agricole (AUEA) dans le processus de décision est un élément clé de réussite de ces projets.

De même, en capitalisant sur les résultats du Projet Ouarzazate, plusieurs études ont été lancées par différentes institutions, (ONEP, Département de l'Environnement, AGR, etc.). Ces études portent sur plusieurs aspects du traitement et de la réutilisation des eaux usées au Maroc : les aspects techniques, normatifs, institutionnelles, etc.

C'est dans le but de présenter les principaux résultats et les leçons tirées de l'expérience pilote Ouarzazate, d'une part et de mettre en évidence l'impact du Projet sur le développement du secteur du traitement et de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture au Maroc, d'autre part, que cette note est établie.

## 2. HISTORIQUE ET ORGANISATION DU PROJET OUARZAZATE

La consistance des installations d'épuration, les performances épuratoires et les résultats expérimentaux intéressant les aspects agronomiques, écologiques, épidémiologiques et économiques de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation sont présentés

en détail dans le rapport du séminaire de clôture du projet MOR 86/018 auquel on pourra se référer pour plus de précisions.

Conscient de l'importance du traitement et du recyclage des eaux usées épurées dans le secteur agricole et dans le but d'œuvrer pour la mise au point des méthodes optimales de traitement et de réutilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation des cultures, un groupe de recherche a été constitué suite à la signature d'une convention, le 27 février 1987, entre le Service des Expérimentations, des Essais et de la Normalisation de l'Administration du Génie Rural et le Département de Biochimie de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Ce groupe de recherche, composé d'une équipe pluridisciplinaire, a mené des recherches sur l'épuration et la réutilisation des eaux usées en agriculture au niveau de la station pilote de l'IAV Hassan II (chenal algal à haut rendement).

Ainsi, la première expérience marocaine de réutilisation des eaux usées épurées date depuis 1987. Elle a donné lieu à une première publication concernant la culture du chou dans la Revue "Homme, Terre et Eaux" (Berdai et al, 1989), puis une autre relative à la tomate dans la Revue "Actes de l'IAV Hassan II" (Rhallabi et al, 1990). Les essais relatifs au traitement des eaux usées ont eu lieu bien avant cette date à Rabat (IAV Hassan II) et dans d'autres régions du Maroc (Marrakech, Ben Sergao à Agadir) où divers systèmes d'épuration (lagunage, filtration - percolation et chenal algal à haut rendement) ont été testés.

Lancé dans cette même optique par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), le projet MOR 86/018 a démarré en 1990. L'Administration du Génie Rural, organisme de coordination et de supervision du projet au niveau central, a fait appel à la première

équipe qui s'est intéressée à la réutilisation des eaux usées au Maroc. C'est ainsi que les membres du groupe de recherche, qui ont conduit les premières expériences marocaines de la réutilisation des eaux usées en agriculture à la station pilote de l'IAV Hassan II, ont intégré le projet MOR 86/018 et sont devenus les principaux responsables d'exécution du Projet. L'équipe a été par la suite élargie pour intégrer d'autres disciplines relatives notamment à la santé humaine, la santé animale et les aspects économiques.

Le projet Ouarzazate a bénéficié du soutien technique de la FAO et de l'OMS. La FAO est en plus l'agence d'exécution du projet. L'assistance technique a été assurée par cinq consultants internationaux. Le suivi du projet a été réalisé, au niveau local par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate. Les institutions nationales qui ont assuré ou contribué à l'exécution du projet sont l'Administration du Génie Rural, l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, l'Institut National d'Hygiène et la Direction de l'Epidémiologie et des Programmes Sanitaires du Ministère de la Santé Publique.

## 3. OBJECTIFS DU PROJET OUARZAZATE

Le projet MOR 86/018 s'est proposé d'apporter quelques éléments de réponse aux questions suivantes :

### 3-1- En matière de traitement des eaux usées :

- Quelles sont les performances d'épuration dans les conditions marocaines des systèmes extensifs qui répondent le mieux aux contraintes économiques (coûts d'investissement et d'exploitation) ? En l'absence de données factuelles, les décideurs optaient pour les systèmes intensifs plus coûteux et moins adaptées au contexte national.
- Concernant l'option "épuration par lagunage", quel dimensionnement

des bassins de stabilisation et quelle filière de traitement sont les plus adaptés dans les conditions climatiques marocaines ?

- Quel est l'ordre de grandeur du prix de revient de l'épuration par lagunage dans les conditions locales ?

- Que faire des boues, le deuxième sous produit de l'épuration ? Comment les traiter ? Quelles sont les possibilités et les potentialités d'une valorisation agricole des boues résiduelles de la station d'épuration par lagunage ?

### 3-2- En matière de réutilisation agricole des eaux usées épurées

- Quelles sont les techniques de production potentielles adaptées à la valorisation des eaux usées épurées en agriculture ? Quelles cultures ? Quels systèmes d'irrigation ? Quelles stratégies de gestion de l'eau à la parcelle ? Quelles précautions prendre ?

- Quel est l'impact de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture sur la qualité des ressources naturelles : eau et sol et sur la santé humaine et animale ?

- Quel intérêt économique présente l'utilisation des eaux usées épurées en irrigation pour l'agriculteur ?

Les investigations réalisées dans le cadre du projet MOR 86/018 ont permis d'atteindre les objectifs fixés au préalable. Elles ont ainsi débouché sur une adaptation du système d'épuration par lagunage aux spécificités de la région de Ouarzazate et ont démontré la faisabilité technique et économique de l'épuration par lagunage et de la valorisation des eaux épurées en agriculture dans les conditions marocaines.

Les résultats obtenus ont servi à tracer un cadre global de réutilisation contrôlée des eaux usées épurées au Maroc qui prend en considération les aspects techniques, économiques, normatifs et institutionnels et à orienter le choix des décideurs pour une gestion rationnelle des eaux usées depuis

leur traitement jusqu'à leur utilisation en irrigation à Ouarzazate et dans d'autres régions similaires du Maroc.

## 4- PRINCIPAUX RESULTATS ET LEÇONS TIREES DU PROJET OUARZAZATE

### 4-1- Epuration des eaux usées

#### 4-1-1- Performances épuratoires de la filière BDS

La filière BDS, composée d'un bassin anaérobie (A), 3 bassins facultatifs (3F) et 2 bassins de maturation (2M), permet l'élimination de 69 % de la DCO, 66 % de la DBO5, 48 % de l'azote ammoniacal, 44% des orthophosphates, 4 unités Log de coliformes fécaux (CF) et 100% des œufs d'helminthes. (Tableau 1). Ce qui conduit à un effluent de catégorie A selon les directives de l'OMS. Cet effluent peut donc être destiné à irriguer les cultures, dont les fruits peuvent être consommés à l'état cru et ce conformément aux directives de l'OMS.

Les expérimentations réalisées dans le cadre du projet Ouarzazate ont permis de :

- Démontrer la faisabilité technique de l'épuration des eaux usées dans les bassins de stabilisation sous les conditions climatiques de Ouarzazate.

- Evaluer le temps de séjour permettant d'obtenir une eau de catégorie A selon les directives de l'OMS (moins de 1000 coliformes par 100 ml et absence des œufs d'helminthes) à 25 jours. Ce temps a été au départ de 34,2 jours. L'avantage de cette révision est une réduction du prix de l'épuration dans les conditions étudiées.

- Déterminer la superficie requise par équivalent habitant qui est de l'ordre de 4m<sup>2</sup>.

- Réviser le dimensionnement des bassins facultatifs basé préalablement sur des modèles empiriques en déterminant un modèle adapté aux conditions climatiques de Ouarzazate. Cette révision a été effectuée grâce à l'analyse par régression de la charge surfacique,  $_s$ , exprimée en kg DBO5 ha-1.j-1 et la température (T), au niveau du facultatif F1 de la filière BDS. La nouvelle équation proposée est :  $_s = 22 T + 350$ . Elle montre qu'il est

Bassins	DCO (mg/l)			DBO5			N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)			P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
EUB	500			340			37,4			20,2	19	43
A	210	58	84	152	55	83	32,8	12	25	16,4	42	52
3F	160	68	15	122	64	14	24,8	34	46	11,8	44	5
2M	156	69	1	115	66	3	19,6	48	29	11,3		

Bassins	Coliformes fécaux/100 ml		Œufs d'helminthes/litre	
	1	2	1	2
EUB	4,1.10 <sup>6</sup>		13	
A	5,85.10 <sup>5</sup>	0,85*	1,2	91
3F	5,8.10 <sup>3</sup>	2,85*	0	100
2M	4.10 <sup>2</sup>	4,01*	0	100

Tableau 1 : Rendement épuratoire moyen de la filière BDS

(1) : Valeurs brutes à la sortie du bassin

(2) : Rendement épuratoire cumulé %

(3) : Part du rendement du bassin par rapport au rendement total %

\* : Taux d'abattement des coliformes fécaux en unités logarithmiques.

possible, dans le cas de Ouarzazate, d'appliquer des charges surfaciques bien supérieures à celles permises par les modèles précités.

- Réviser la moyenne globale de la constante de premier ordre de mortalité des coliformes fécaux, déterminée par MARAIS, qui est de 2 j-1. La valeur spécifique à Ouarzazate, déterminée en conditions réelles, est de 3 j-1. Cette valeur peut être utilisée pour le dimensionnement de ce type de station en conditions marocaines.

En plus de ces résultats, l'expérience Ouarzazate a permis de mettre en évidence les contraintes de l'épuration par la filière BDS. Elle a permis également d'engager une réflexion et d'ouvrir des perspectives pour une recherche plus détaillée concernant certains aspects importants de l'épuration.

Ainsi, pendant les mois les plus froids de l'hiver (décembre et Janvier), l'épuration produit un effluent de la catégorie B selon les directives de l'OMS. Cette diminution des rendements épuratoires de la station n'est pas contraignante puisque l'effluent n'est généralement pas utilisé en irrigation pendant cette période. Néanmoins, pour éviter les pertes d'eau et le risque sanitaire et environnemental liés au rejet de cet effluent dans le milieu récepteur, le stockage de cet effluent pour son utilisation ultérieure pendant la période de forte demande en eau des cultures est vivement recommandé. Cette option a été envisagée lors de la deuxième phase du projet Ouarzazate. Elle constitue un axe de recherche qui mérite d'être exploré afin de vérifier la faisabilité technique et économique de cette option et de rechercher dans quelle mesure elle pourrait affiner davantage le traitement.

De même, l'émanation des mauvaises odeurs au niveau des unités anaérobies a constitué une contrainte de l'épuration par la filière BDS. Un système anti-odeurs a été testé au

cours de la phase II du projet. Il a consisté à faire un recyclage d'eau épurée du Chenal algal, riche en algues et en oxygène et de l'appliquer à la surface des bassins anaérobies. Néanmoins, en dépit de la diminution notable des odeurs constatée après la mise en place du dispositif anti-odeurs, les résultats obtenus restaient en deçà des attentes de l'équipe du projet. Pour résoudre ce problème, un nouveau dispositif a été mis en place et testé dans la station d'épuration de l'IAV Hassan II. Ce dispositif consiste à couvrir les bassins anaérobies, ce qui permet non seulement d'obtenir une station d'épuration sans odeurs désagréables mais aussi de produire du gaz, qui peut être utilisé pour produire de l'énergie.

#### 4-1-2- Performances épuratoires de la filière LHR

La filière (lagunage à haut rendement) se distingue de celle des BDS par le remplacement de la série des trois bassins facultatifs F1, F2 et F3 par un chenal algal à haut rendement. Cette filière comporte, au même titre que la

filière BDS, 1 bassin anaérobie et 2 bassins de maturation.

Selon les directives de l'OMS, l'effluent de la filière LHR est classé, au même titre que celui de la filière BDS, dans la catégorie A pouvant servir à l'irrigation des denrées pouvant être consommées à l'état cru.

La comparaison des deux filières en terme de flux spécifique éliminé (FSE<sup>4</sup>), qui tient compte de débit quotidien traité et de la superficie occupée par les composantes des filières, met en évidence la supériorité de la filière LHR. Celle-ci permet une élimination plus importante des éléments N et P qui sont détournés dans la biomasse algale. L'augmentation du pH pendant la mi-journée en raison d'une photosynthèse plus active, favorise la volatilisation de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) d'où un risque de pollution azotée plus faible. Le CAHR permet également des abattements de la DCO et des CF bien supérieurs à ceux obtenus par les BF en raison d'une activité photosynthétique plus active.

Bassins	DCO (mg/l)			DBO5			N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)			P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
EUB	500			340			37,4			20,2		
A	220	56	85	155	54	82	34	9	15	15,2	25	44
CAHR	173	65	14	118	65	16	19,4	48	65	9,2	54	53
2M	170	66	1	115	66	2	15	60	20	8,8	56	3

Bassins	Coliformes fécaux/100 ml		Œufs d'helminthes/litre	
	1	2	1	2
EUB	4,1.10 <sup>6</sup>		13	
A	5,1.10 <sup>5</sup>	0,90*	1	92
CAHR	1,5.10 <sup>4</sup>	1,44*	0	100
2M	0,9.10 <sup>3</sup>	3,65*	0	100

**Tableau 2** : Rendement épuratoire moyen de la filière LHR

(1) : Valeurs brutes à la sortie du bassin

(2) : Rendement épuratoire cumulé %

(3) : Part du rendement du bassin par rapport au rendement total %

\* : Taux d'abattement des coliformes fécaux en unités logarithmiques.

4. FSE = (Ci-Ce)\*Q/A où Ci et Ce sont, respectivement, la concentration en g/m<sup>3</sup> de l'élément polluant considéré, ou en UFC/m<sup>3</sup> de coliformes fécaux, à l'entrée et à la sortie de la filière entière. Q représente le débit traité en m<sup>3</sup>/j et A, la superficie couverte en m<sup>2</sup>. FSE en g ou en UFC m-2.j-1.

Enfin, au même titre que la filière BDS, la filière LHR ne permet pas de satisfaire les normes de la catégorie A suivant les directives de l'OMS pendant les mois de janvier et février. Cette eau, de catégorie B, est généralement non utilisée pendant cette période de faible demande climatique des cultures. Elle nécessite également un stockage en vue d'une utilisation au printemps ou en été. Cette option requiert une recherche préalable avant sa mise en application en pratique.

#### 4-1-3- Gestion des boues au niveau de la station d'épuration

L'exploitation et l'entretien des bassins de stabilisation sont faciles en comparaison avec d'autres systèmes de traitement biologique. Néanmoins, une exploitation adéquate et une maintenance régulière sont extrêmement importantes lorsqu'on souhaite avoir une bonne performance et une durée de vie prolongée des installations.

La plupart des stations d'épuration des eaux usées au Maroc sont devenues non fonctionnelles à cause d'un manque ou d'un mauvais entretien. De plus, si l'opération de gestion des boues résiduelles n'est pas intégrée dès le début de la conception de la station d'épuration, des problèmes, qui menacent l'efficacité et la durabilité de la station, apparaissent après un temps de fonctionnement plus ou moins long.

Conscients de ces problèmes, l'équipe chargée de l'épuration s'est préoccupée à effectuer plusieurs mesures sur le bassin anaérobie. L'objectif était d'évaluer la quantité de boues qui se dépose par m<sup>3</sup> d'eau traitée et par la suite de déterminer le taux spécifique d'accumulation des boues.

La vitesse d'accumulation des boues dans les conditions de Ouarzazate a été évaluée à 240 m<sup>3</sup>/an, soit un taux de comblement du bassin anaérobie d'environ 13%/an et une réduction du temps de séjour dans le bassin anaérobie d'un taux annuel équivalent.

Dans les conditions de fonctionnement de la station BDS de

Ouarzazate, le temps de séjour dans le bassin anaérobie était de 4,2 jours. Mais le temps de séjour optimal a été évalué à seulement 1,5 jours. C'est, par définition, le temps de séjour qui assure un taux de rabattement de la DBO<sub>5</sub> initiale de 50 %. Ce temps de séjour optimal est atteint au bout de la 7<sup>ème</sup> année. Ceci a permis de fixer l'intervalle optimum d'évacuation des boues du bassin anaérobie à 7 ans.

Par ailleurs, le taux spécifique d'accumulation des boues calculé sur la base d'un volume quotidien consommé de 100 l/hab.j conduit à environ 0,055 m<sup>3</sup> de boues/hab.an. Ce chiffre dépasse légèrement celui de 0,04 m<sup>3</sup> rapporté par l'OMS (OMS, 1987). Ce taux mesuré dans les conditions marocaines peut être utilisé pour estimer, d'une façon plus précise, la production des boues.

Exemple : Sur la base d'une phase solide de 10 %, d'une densité à 40 % de matière sèche de 1000 kg/m<sup>3</sup> et d'une population équivalente de charge polluante de 1.500.000, la production de boue est estimée à 82.500 m<sup>3</sup>/an soit 8250 tonnes de matière sèche par an.

L'expérience Ouarzazate a donc permis de mettre au point les bases nécessaires pour une gestion optimale des boues au niveau de la station d'épuration. De même, un manuel a été établi pour l'exploitation, la maintenance et le suivi du fonctionnement des différents organes de la station d'épuration de Ouarzazate. Les dispositions prévues dans ce manuel peuvent être appliquées à d'autres stations d'épuration similaires dans le pays.

#### 4-1-4- Traitement des boues en lit de séchage

En cas de valorisation agricole des boues, leur traitement s'impose. En effet, l'épuration des eaux usées n'atteindrait pas ses objectifs de préservation de l'environnement si on restituait au milieu récepteur des eaux usées parfaitement épurées et des boues polluantes.

La déshydratation des boues dans les lits de séchage constitue une solution intéressante et économique pour

l'élimination des pathogènes. La surface requise par ce procédé, dans le cas de Ouarzazate, a été de 0,06 m<sup>2</sup>/habitant.

Le projet MOR 86/018 a permis de démontrer l'efficacité du traitement des boues en lits de séchage sous les conditions climatiques marocaines. En effet, les boues contenant près de 9 œufs d'*Ascaris*, réputés les plus résistants dans le milieu extérieur, par g de boues sèches au moment du curage, ne comptaient plus d'œufs après 8 mois de séchage. L'humidité est passée pendant cette période de 94 % à 4 % en moyenne. En raison de leur plus faible volume, les boues ainsi traitées sont pelletables et faciles à stocker et à transporter. La valorisation de ces boues en agriculture nécessite une étude préalable pour évaluer son intérêt agricole et son impact sur l'environnement.

#### 4-2- Réutilisation des eaux usées épurées en agriculture

##### 4-2-1- Qualité des eaux épurées

Par rapport aux eaux souterraines disponibles pour l'irrigation, les eaux usées épurées de Ouarzazate présentent plusieurs avantages :

- Elles sont moins salines et moins alcalines. Elles nécessitent donc des restrictions moins sévères en irrigation que les eaux de puits.
- Elles présentent une valeur fertilisante appréciable. Les apports d'éléments fertilisants par une dose de 1000 mm d'eau usée épurée sont de 219 kg N/ha; 125 kg P/ha et 289 kg K/ha, ce qui permet d'économiser un coût global en éléments fertilisants de 3450 DH/ha.

- Les apports en matière organique par les eaux usées épurées permettent à long terme d'augmenter la fertilité naturelle du sol sur le plan physique, chimique et biologique.

Pour ce qui est des éléments à l'état de trace, les concentrations mesurées dans les eaux usées épurées sont, en général, inférieures aux teneurs maximales proposées pour l'irrigation des cultures. Ces éléments ne constituent donc pas une contrainte à

l'utilisation de ces eaux en irrigation, d'autant plus que le sol présente un pH basique et n'est pas initialement contaminé par ces métaux lourds. Certains de ces éléments sont, par contre, indispensables à la croissance des végétaux (oligo-éléments) tels que le zinc, le cuivre et le manganèse. Leur apport en faible concentration par les eaux usées épurées est donc bénéfique pour les cultures.

#### 4-2-2- Techniques et matériels d'irrigation

Dans le cadre du projet pilote Ouarzazate, trois systèmes d'irrigation ont été testés : le gravitaire, l'aspersion et le localisé avec deux techniques pour ce dernier : le micro-jet et l'ajutage calibré.

En utilisant comme indicateur de performance, les rendements des cultures, le système d'irrigation le plus performant dans les conditions de Ouarzazate, pour la luzerne, les cultures d'automne et les cultures de printemps est l'ajutage calibré. Par contre, pour les cultures d'été, c'est l'irrigation par micro-jet appliquée exclusivement pendant la nuit qui a donné les meilleurs résultats. L'irrigation de nuit permet d'éviter les fortes évaporations, l'accumulation des sels à la surface du sol, les vents violents et la toxicité au Na<sup>+</sup> et au Cl<sup>-</sup> liée à l'absorption foliaire (fermeture des stomates pendant la nuit).

En plus de ces performances agronomiques, l'irrigation localisée par les eaux usées épurées présente l'avantage :

- d'économiser l'eau et de l'utiliser de façon plus efficiente ;
- de réduire le risque de contamination de la nappe essentiellement par les nitrates puisque ce système d'irrigation permet des apports en eau et en azote plus faibles ;
- d'assurer sur le plan sanitaire une protection maximale des agriculteurs;
- et de réduire le degré de contamination des fruits ; et même pour le micro-jet, qui est aérien, une réduction du nombre de germes contaminants suite à l'exposition au

rayonnement solaire a été mise en évidence.

Néanmoins, ce système d'irrigation reste assez coûteux et ne peut être introduit que pour des cultures à haute valeur ajoutée (cultures maraîchères, cultures arboricoles). Un autre inconvénient réside dans la sensibilité du matériel d'irrigation localisé au bouchage. Grâce à l'expérience Ouarzazate, des recommandations ont été avancées pour limiter les problèmes liés au bouchage dans le cas de l'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Elles comportent : le choix du matériel adéquat, la conduite de l'irrigation et les précautions à prendre. De même, un programme d'entretien du matériel d'irrigation a été proposé. Ainsi, le choix d'un bon matériel d'irrigation, le curage du réservoir de stockage d'eau, l'installation d'une double filtration (filtre à sable et filtre à tamis), les purges des portes rampes et des rampes et le nettoyage des distributeurs bouchés sont indispensables pour éviter le colmatage du matériel d'irrigation ainsi que pour améliorer l'uniformité d'arrosage à la parcelle et la maintenir.

#### 4-2-3- Essais agronomiques

Pour toutes les cultures testées (luzerne, maïs, courgette, fève, concombre, pois, tomate et navet) les résultats des essais agronomiques ont montré une amélioration nette des rendements dans le cas de l'irrigation par les eaux usées épurées. Cette amélioration est d'autant plus importante que les cultures sont sensibles à la salinité. Deux facteurs justifient ces résultats :

- une salinité moins élevée et un risque de toxicité au sodium et au chlore plus faible, dans le cas des eaux usées épurées par rapport à l'eau du puits témoin ;
- et la présence d'éléments fertilisants dans les eaux usées épurées. Ainsi, le taux de couverture des besoins des cultures par ces eaux varie entre 40 % et 95 % pour l'azote, entre 33 % et 100 % pour le phosphore et dépassent 100 % pour le potassium.

Concernant la qualité hygiénique des productions, les eaux usées épurées,

quand elles sont appliquées gravitairement, induisent une contamination des fruits supérieure à celle générée par l'eau du puits. Cette contamination est, par contre, comparable pour ces deux types d'eau, dans le cas des autres systèmes d'irrigation. L'effet type de cultures a été mis en évidence sur le degré de contamination (type et densité du feuillage, cultures à port rampant ou dressé, fruit type racine). Ainsi, le degré de contamination observé chez les cultures à feuillage touffu et dense, comme la luzerne, était supérieur à celui des cultures à feuillage épars, comme la fève et le pois. Ces dernières permettent au rayonnement solaire d'atteindre le fruit, ce qui entraîne un effet létal de ce rayonnement sur les germes. Cet effet est conjugué au port dressé de la fève et du pois qui minimise le contact entre l'eau d'irrigation et le fruit.

Par ailleurs, l'utilisation des eaux usées épurées de Ouarzazate n'a pas induit une contamination supérieure à celle relative aux produits agricoles du marché local.

#### 4-2-4- Impact sur la qualité du sol et des eaux

La salinisation du sol et la pollution nitrique des eaux souterraines constituent les principaux problèmes environnementaux liés à l'utilisation des eaux usées épurées de Ouarzazate en irrigation.

En effet, la teneur des eaux usées en sels présente une contrainte à leur utilisation en agriculture en raison du risque de salinisation et d'alcalinisation du sol. Ce risque n'est pas liée seulement au caractère et alcalin des eaux usées épurées, mais également à la nature du climat (fortes températures, faibles précipitations) et à celle du milieu physique (texture limono-argileuse du sol, faible perméabilité, densité apparente élevée et existence d'une nappe salée peu profonde qui permet le retour des sels par capillarité).

La maîtrise de ce problème de salinisation du sol est nécessaire pour maintenir la productivité du sol irrigué par les eaux usées épurées. Une gestion rationnelle des systèmes de

cultures s'impose comportant : le choix de cultures tolérantes, la maîtrise de l'irrigation et du drainage et les pratiques agricoles adaptées.

Par ailleurs, le risque de lixiviation des nitrates lié à la réutilisation des eaux usées en agriculture est amplifié par le pouvoir de minéralisation intense de la matière organique du sol en raison des conditions hydriques et thermiques favorables à l'activité ammonifiante et nitrifiante du sol. Ainsi, l'azote potentiellement lixiviable estimé pour la tomate, par la méthode du bilan de masse, a été de 337 kgN/ha.

Les pratiques agricoles suivantes peuvent être envisagées pour diminuer le risque de pollution de la nappe par les nitrates liés à l'utilisation des eaux usées épurées en agriculture :

- l'adoption du système d'irrigation localisé ;
- le mélange ou l'alternance des eaux usées épurées avec les eaux conventionnelles ;
- et la pratique de l'irrigation de complément par les eaux usées épurées dans les zones où cette pratique pourrait éventuellement être envisagées.

Ces deux pratiques diminuent aussi le risque de contamination bactérienne et par les éléments à l'état de trace du sol et des cultures et permettent de faire bénéficier un nombre plus grand d'agriculteurs en eau usée épurée. Il conviendrait également d'éviter la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation dans les zones vulnérables (proximité des eaux de surface, nappe peu profonde, etc.).

D'autres options existent pour diminuer le risque de pollution nitrique de la nappe. Parmi ces options, citons particulièrement le recyclage partiel des effluents vers les eaux usées brutes pour profiter du carbone associé à la respiration endogène de la biomasse microbienne. Cette variante est adoptée dans la station de Drarga avec un renforcement par une roselière comme traitement tertiaire (Projet PREM, 2002) ;

La contamination bactérienne dans les parcelles irriguées par les eaux usées

épurées est semblable à celles irriguées par les eaux de puits. En plus, elle ne dépasse jamais la profondeur de 25 cm, ce qui écarte tout risque de contamination par les germes pathogènes des ressources en eau souterraine.

#### *4-2-5- Impact sur la santé humaine et animale*

Ces aspects ont été investigués lors de la deuxième phase du projet dans un périmètre pilote démonstratif (périmètre contrôlé) où les eaux usées épurées ont été substituées aux eaux usées brutes.

##### **Santé humaine**

L'étude épidémiologique, réalisée sur une trentaine de familles, a montré qu'avant la distribution des eaux usées épurées aux agriculteurs au niveau du périmètre de substitution, il était 3 à 4 fois plus probable qu'une personne ayant utilisée les eaux usées brutes pendant plusieurs années, contracte une helminthiase comparativement à une personne ayant utilisé une eau conventionnelle.

Après six mois d'utilisation des eaux usées épurées en irrigation, cette même prévalence des helminthiases a été maintenue même après traitement préalable des personnes parasitées, montrant ainsi que le sol constitue un réservoir où les formes de résistance des parasites persistent au moins pendant une durée de six mois.

Ces résultats ont permis d'émettre les recommandations suivantes :

- améliorer l'état sanitaire des populations des périmètres de réutilisation (traitements curatifs et préventifs, information, sensibilisation, formation et vulgarisation des pratiques agricoles adaptées et des précautions à prendre, suivi, contrôle, encadrement...);
- et éviter le maintien d'une zone limitrophe où les eaux usées brutes continuent d'être utilisées en irrigation.

##### **Santé animale**

Les expérimentations ont été réalisées sur des animaux traceurs et sur des animaux maintenus en un local séparé

et nourris par les fourrages récoltés sur les parcelles irriguées soit avec les eaux usées brutes, les eaux usées épurées ou témoin. Tous les animaux étaient des ovins de la race locale ayant le même âge et dont les conditions sanitaires initiales ont été nivelées.

Les résultats ont montré que les œufs des parasites véhiculés par les eaux usées brutes parviennent à survivre sur la luzerne et dans le sol, ce qui représente le principal moyen d'infestation des animaux dans les zones de réutilisation des eaux usées brutes. Cette infestation diminue la productivité des animaux et constitue une menace pour la santé publique dans le cas des maladies communes à l'Homme et à l'animal, comme par exemple le teania.

Par ailleurs, la substitution des eaux usées épurées, exemptes de parasites, aux eaux usées brutes a eu un impact positif sur la santé des animaux. Il est donc nécessaire d'aboutir à une élimination totale des parasites lors du processus d'épuration avant de réutiliser les eaux usées épurées en agriculture. Cette intervention reste le meilleur moyen d'atténuer les effets négatifs des maladies parasitaires sur la santé et la production animale dans les zones concernées.

#### *4-2-6- Aspect organisationnel*

La gestion des installations d'épuration et leur contrôle, la gestion des périmètres de réutilisation et leur suivi et la coordination entre les différents intervenants nécessitent la mise en place d'un cadre organisationnel. Cet aspect a été examiné lors de la phase II du projet et a fait suite aux recommandations de la 8ème session du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (1994).

Ainsi, un cadre organisationnel adapté au périmètre contrôlé a été établi. La responsabilité locale du projet a été placée au niveau provincial puisque les travaux de la phase II du projet ont touché l'agriculteur et sa famille. Et un comité technique provincial de suivi du projet a été créé. Ce comité a été constitué comme suit :

- Province de Ouarzazate
- Municipalité de Ouarzazate

- Office de Mise en Valeur Agricole de Ouarzazate
- Direction Provinciale des Travaux Publics
- Office Nationale de l'Eau Potable
- Santé Publique
- Direction Nationale du Projet MOR 86/018

Certaines actions ont été menées pour garantir la réussite du projet :

- l'implication des agriculteurs au stade de la conception du projet et leur organisation ;
- l'établissement de fiches de déclaration d'engagement des agriculteurs pour exploiter les terres irriguées par les eaux usées épurées pendant la durée du projet ;
- l'organisation d'une campagne d'information des agriculteurs ;
- l'incitation des agriculteurs par l'achat de semences sélectionnées et la réalisation de quelques travaux (labour, semis, préparation des calants) ;
- et l'encadrement des agriculteurs, par les Techniciens de l'ORMVA de Ouarzazate, pour adopter les pratiques agricoles optimales.

#### 4-2-7- Aspect économique

En plus des aspects techniques, écologiques et organisationnels, l'aspect économique du traitement et de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture constitue un point important pour orienter le choix des décideurs. De même, une évaluation précise du prix des eaux usées épurées est très importante pour le recouvrement des coûts de l'exploitation de la station d'épuration. La prise en charge de ce prix, en totalité ou en partie, par l'agriculteur permettra de l'inciter à l'utiliser d'une manière plus efficiente.

L'expérience Ouarzazate a permis d'évaluer le coût du m<sup>3</sup> d'eau usée traité (Tableau 3).

Le coût de l'irrigation est analysé à deux niveaux, d'abord au niveau de l'adduction qui comporte le pompage et l'acheminement jusqu'au périmètre puis ensuite la distribution dans le périmètre lui-même. (Tableau 4)

En ce qui concerne la valorisation de l'eau épurée dans le périmètre contrôlé, l'étude a permis de montrer que cette valorisation dépend du degré d'encadrement des agriculteurs. Les meilleurs rendements sont obtenus dans les parcelles encadrées par les techniciens du projet, d'où l'importance de l'implication des agriculteurs et de leur l'encadrement pour une utilisation rationnelle des eaux usées épurées en agriculture.

#### 4-3- VALORISATION AGRICOLE DES BOUES RÉSIDUAIRES

L'utilisation des boues résiduares des stations d'épuration des eaux usées constitue une alternative très intéressante à l'usage intensif de fertilisants minéraux. Par leurs teneurs élevées en matière organique, les boues d'épuration constituent un excellent amendement du sol. Toutefois, leur utilisation présente des inconvénients, notamment ceux engendrés par la présence de germes pathogènes, de polluants organiques et/ou de métaux lourds. Toute valorisation éventuelle de ces boues doit donc faire l'objet d'une étude préalable pour évaluer son intérêt agricole et économique et son impact sur l'environnement.

Les boues produites par lagunage à Ouarzazate présentent un pH de 6,86

proche de la neutralité et favorable à l'activité biologique du sol (Tableau 3).

Les boues résiduares de la ville de Ouarzazate indiquent un niveau élevé d'humification (CEC = 27,15 méq/100g MS) et constituent une source importante en MO (5014 Kg/ha de MO). Elles constituent donc un excellent amendement organique permettant d'améliorer la fertilité naturelle des sols.

Les boues constituent également une source en éléments majeurs N, P et K évalués pour une dose de 15 T/ha à 248 Kg de N/ha, 48 Kg de P/ha et 38 Kg de K/ha. Ce qui permet d'économiser un coût global de l'ordre de 1900 DH/ha.

Les teneurs des boues en métaux lourds respectent les directives de la CEE 86/278. La contamination métallique du sol et des cultures n'est donc pas possible d'autant plus que le sol présente un pH basique et n'est pas initialement contaminé par les métaux lourds.

L'intérêt agronomique des boues résiduares de Ouarzazate a été mis en évidence. En effet, l'apport de boues a permis la libération d'une quantité supplémentaire d'azote minéral dans le sol et une réponse positive du Ray-Gras d'Italie aux différentes doses de

Filière	Investissement	Fonctionnement et maintenance	Total	Volume traité m3/j
BDS 1	0,57	0,43	1,00*	173
BDS 2	0,65	0,44	1,09	173
LHR	0,54	0,45	0,99	345

\* : Stockage compris (0,12 DH/m<sup>3</sup>)

**Tableau 3 : Coût du m3 d'eau usée traité en DH**

Composante	Gravitaire	Aspersion	Localisé
Traitement	1	1	1
Adduction	0,17	0,27	0,3
Distribution	0,05	0,12	0,13
Total	1,22	1,39	1,43

**Tableau 4 : Coût du m3 d'eau usée traité en DH**

boues exprimée en terme de rendement en matière sèche et en terme d'exportation en azote (Jemali et Soudi, 1996). Ainsi, l'augmentation de matière sèche produite a dépassé les 200 % par rapport au témoin. Par ailleurs, aucune accumulation de métaux lourds n'a été détectée dans le sol ou dans le végétal.

### 5- IMPACT POSITIFS DU PROJET OUARZAZATE

Outre les résultats directs atteints dans le cadre du projet Ouarzazate sur le plan technique, environnemental et économique mettant en évidence les avantages mais aussi les inconvénients de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture, d'autres effets positifs ont également été obtenus. Ces effets peuvent être résumés comme suit :

- Le projet Ouarzazate constitue l'exemple d'un exercice réussi de recherche-développement qui traduit la collaboration entre plusieurs institutions nationales et internationales et dont les résultats ont directement été appliqués en pratique pour :

- o Le dimensionnement de la station d'épuration de la ville de Ouarzazate ;

- o Et pour la conception et la gestion d'un périmètre de réutilisation des eaux usées épurées en agriculture.

De même, dans le cadre des schémas directeurs d'assainissement des grandes villes et des agglomérations urbaines et rurales, les responsables des études ont capitalisé sur les résultats de Ouarzazate pour :

- o Le choix des options de traitement ;

- o Le dimensionnement des stations d'épuration ;

- o Le choix du site de réutilisation ;

- o La conception et la gestion des périmètres de réutilisation

- o Et la préparation d'un programme de gestion des boues depuis le curage jusqu'à l'épandage au champ.

- Le projet Ouarzazate a constitué un cadre de formation d'une équipe pluridisciplinaire, au niveau central et

<b>pH extrait 1/10</b>	<b>6,86</b>
<b>CE extrait 1/10 (mmhos/cm)</b>	<b>0,76</b>
<b>CE pâte saturée (mmhos/cm)</b>	<b>4,89</b>
<b>CEC méq/100g MS</b>	<b>27,15</b>

<b>Eléments</b>	<b>Teneur des boues en % MS</b>	<b>Apports sur les sols en kg/ha</b>
<b>MS (%)</b>	<b>95,5</b>	<b>14325</b>
<b>C</b>	<b>20,3</b>	<b>2908</b>
<b>NTK</b>	<b>1,72</b>	<b>246,4</b>
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>0,76</b>	<b>108,9</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0,32</b>	<b>45,8</b>
<b>MgO</b>	<b>1,53</b>	<b>219,2</b>
<b>CaO</b>	<b>7,33</b>	<b>1050</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0,14</b>	<b>20</b>
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ppm MS</b>	<b>330,3</b>	<b>4,7</b>
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ppm MS</b>	<b>50,6</b>	<b>0,7</b>

**Tableau 5:** Caractéristiques des boues résiduaires et apports d'éléments sur les sols pour une dose de 15 tonnes/ha

<b>Eléments</b>	<b>Teneurs</b>	<b>Apports sur les sols en kg/ha</b>
<b>Al % MS</b>	<b>1,17</b>	<b>167,6</b>
<b>Fe % MS</b>	<b>1,32</b>	<b>189,1</b>
<b>Hg mg/kg MS</b>	<b>0,93</b>	<b>0,01</b>
<b>Pb mg/kg MS</b>	<b>149,5</b>	<b>2,14</b>
<b>Cd mg/kg MS</b>	<b>2,62</b>	<b>0,03</b>
<b>Ni mg/kg MS</b>	<b>26,7</b>	<b>0,38</b>
<b>Cu mg/kg MS</b>	<b>127,4</b>	<b>1,82</b>
<b>Co mg/kg MS</b>	<b>13,3</b>	<b>0,19</b>
<b>Cr mg/kg MS</b>	<b>50</b>	<b>0,72</b>
<b>Zn mg/kg MS</b>	<b>157</b>	<b>2,25</b>
<b>Mn mg/kg MS</b>	<b>195</b>	<b>2,79</b>

**Tableau 6:** Teneur des boues résiduaires en métaux lourds et apport en métaux lourds sur les sols par une dose de 15 t/ha

régional, dans le domaine du traitement et de la réutilisation des eaux usées en agriculture. De plus, grâce à ce projet, la formation de plusieurs cadres a été assurée par le biais de stages au Maroc ou à

l'étranger ou de diplômes universitaires (CEA, DES, Doctorats). L'équipe formée est devenue en mesure d'assurer la formation d'autres personnes et de conduire d'autres projets pilotes. La compétence

acquise, dans le cadre de ce projet, lui a permis également de s'occuper de la conception et de la gestion des périmètres de réutilisation. Plusieurs membres de cette équipe ont, en effet, été sollicités pour animer des séances de formation ou pour réaliser des études dans le cadre des schémas directeurs d'assainissement.

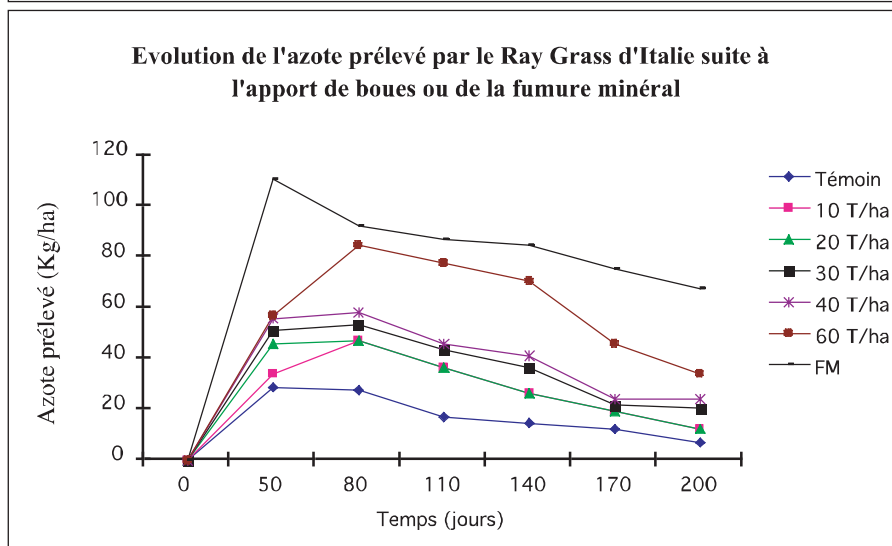
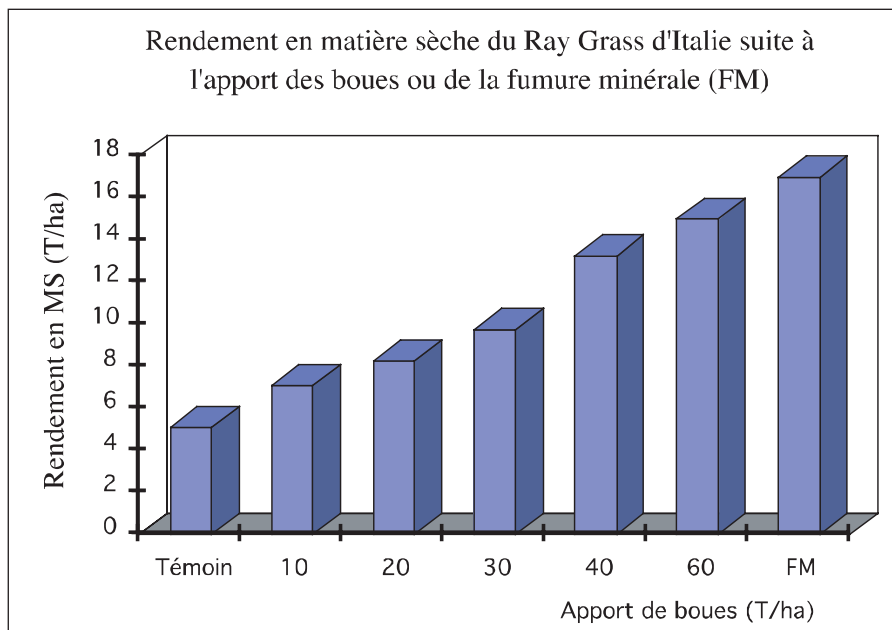
- Les résultats de recherche du projet Ouarzazate ont tracé des axes de recherche et des perspectives d'avenir pour une meilleure exploration des procédés de traitement des eaux usées et pour une réutilisation saine et contrôlée des eaux usées. Les projets pilotes "IAV Hassan II" et "Attaouia" constituent, à cet effet, la continuité du projet Ouarzazate.

- D'autres projets pilotes, intégrant les deux options traitement et réutilisation, ont été mis en œuvre à l'échelle nationale. Parmi les projets qui ont bénéficié d'un suivi régulier par des équipes pluridisciplinaires, citons :

- o Projet Ben Sergao, infiltration - percolation, 1990.
- o Projet Ben Slimane, lagunage aéré, 1997.
- o Projet Drarga, infiltration - percolation, 2000.

- Les résultats du projet Ouarzazate ont également permis de pousser la réflexion plus loin en faisant une analyse précise de l'option traitement et réutilisation des eaux usées au Maroc. Cette analyse a permis de mettre en évidence les avantages et les obstacles au développement de ce secteur comportant les composantes: assainissement - épuration - mobilisation de la ressource et irrigation. Elle a également permis de proposer des recommandations, sur le plan technique, organisationnel, institutionnel, financier, économique et socio-politique, pour enrayer ces obstacles (El Hammouri, 1999).

- D'autres études, ateliers et forum ont été réalisées par différentes institutions pour promouvoir le traitement et la réutilisation des eaux



usées épurées au Maroc, citons particulièrement :

- o Amélioration des connaissances dans le domaine des procédés de valorisation des eaux usées épurées (Projet UTF, 2001) ;
- o Document technique sur les normes et standards pour la réutilisation des eaux usées au Maroc (Projet PREM, 2002) ;
- o FORUM sur la gestion de la demande en eau, Moyen Orient et Afrique du Nord : La réutilisation des eaux usées en agriculture (CRDI, 2002) ;
- o Atelier sur la vulgarisation des

technologies appropriées de traitement et de réutilisation des eaux usées (PREM, 2002) ;

- o Atelier sur le thème : Quel système de gestion des projets d'épuration et de réutilisation des eaux usées (ONEP/FAO, 2003) ;
  - o Epuration et réutilisation des eaux usées : Lignes d'orientation pour les études de mise en œuvre des projets intégrés de collecte (ONEP/FAO, 2003).
- Grâce à l'approche méthodologique adoptée, le projet Ouarzazate a contribué à la mise au point de directives de surveillance des unités d'épuration et des sites de

### Références Bibliographiques

- Banque Mondiale, 1995. Royaume du Maroc. Le secteur de l'eau au Maroc, Rapport N° 12649 MOR, 71 pages.
- Berdai H., Jellal N., Touzani M., Mekrane M., Benchokroun T., Rhallabi N., Moundib R., Maraghich M., Thoreau F. et El Hammouri B., 1991. Traitement des eaux usées domestiques dans un chenal algal à haut rendement et leur réutilisation pour l'irrigation du chou, Revue Homme, Terre et Eau.
- Convention UTF/MOR/023/MOR, 2003. Atelier sur le thème : Quel système de gestion des projets d'épuration et de réutilisation des eaux usées (ONEP/FAO, 2003) ;
- Convention UTF/MOR/023/MOR, 2003. Epuration et réutilisation des eaux usées : Lignes d'orientation pour les études de mise en œuvre des projets intégrés de collecte (ONEP/FAO, 2003).
- COP 7, 2001. Communication Initiale du Royaume du Maroc à la Communauté Internationale. Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Marrakech, septembre, 22 pages.
- CRDI, 2002. FORUM sur la gestion de la demande en eau, Moyen Orient et Afrique du Nord : La réutilisation des eaux usées en agriculture. CD.
- CSEC, 2001 (1). Gestion de l'économie de l'eau. Conseil Supérieur de l'eau et du climat. 9<sup>ème</sup> session. Agadir, 21-22 Juin, 53 pages.
- CSEC, 2001(2). Plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins du Souss Massa. 9<sup>ème</sup> Session. Agadir, 21-22 juin, 102 pages.

réutilisation nécessaires pour la gestion des eaux usées épurées.

- Au niveau national et afin d'assurer la durabilité de la productivité des terres agricoles irriguées par les eaux usées épurées, de garantir la protection des ressources naturelles et de préserver la santé humaine et animale, un effort de normalisation des eaux usées traitées réutilisées en irrigation a été consenti depuis 1994, date de création du Conseil National de l'Environnement. Il a permis la publication des normes au bulletin officiel, BE N° 5062 du 5/12/2002. Ces normes précisent les valeurs limites des paramètres physico-chimiques, bactériologiques, parasitologiques et toxiques auxquelles doit se conformer une eau usée épurée destinée à l'irrigation. Elles fixent également les conditions d'utilisation des eaux usées épurées en irrigation suivant leur qualité bactériologique et parasitologique ainsi que les procédés de traitement des eaux usées susceptibles d'assurer la qualité microbiologique voulu. En plus des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation, l'arrêté fixe les modalités de prélèvements des eaux usées épurées (nombres d'échantillon par an en fonction des paramètres de suivi, nombre de prélèvements par échantillon composite et les méthodes d'analyse).
- En capitalisant sur les résultats du projet Ouarzazate, le Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, chargé de formuler les orientations générales de la politique nationale en matière de gestion des ressources en eau, a consacré la session de 1994 exclusivement à définir les grandes lignes d'un cadre général pour la réutilisation contrôlée des eaux usées épurées en agriculture au Maroc.
- Et enfin, sur les plans législatif et réglementaire, le Maroc s'est doté en 1995 de la loi N° 10/95 sur l'eau. Cette loi pose les bases d'un plan national de l'eau établi sur la base des plans directeurs d'aménagement des bassins hydrauliques. En matière d'eaux usées, cette loi et ses textes d'application fixent les normes de

qualité suivant l'utilisation de l'eau. Elles interdisent les rejets sans autorisation, pour assurer une conservation qualitative du domaine hydraulique public, et instaurent deux redevances : la redevance de déversement et la redevance de prélèvement. En matière de réutilisation, la loi stipule que les conditions d'utilisation des eaux usées sont définies par l'Administration et que toute réutilisation est soumise à autorisation. Elle stipule aussi que tout utilisateur peut bénéficier du concours financier de l'état et d'une assistance technique à condition de se conformer aux conditions de réutilisation fixées par l'administration. Cette loi offre un cadre juridique adapté aux besoins en matière de gestion et de protection de la qualité des ressources en eau. Il reste, cependant, à en appliquer tous les termes.

### 6- RECOMMANDATIONS POUR LE DEVELOPPEMENT DU SECTEUR DES EAUX USEES AU MAROC

Quelques recommandations peuvent être avancées pour le développement du secteur des eaux usées au Maroc. Certaines d'entre elles figurent dans le rapport (El Hammouri, 1999).

- Au Maroc, les eaux usées doivent être considérées comme une ressource en eau devant être mobilisée et valorisée au même titre que les eaux conventionnelles. Il faut que les décideurs soient conscients de la vraie valeur du traitement et de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation et de la nécessité de les considérer comme un élément important de toute politique nationale intégrée de gestion de l'eau.
- Les résultats Ouarzazate, au même titre que ceux des autres expériences pilotes nationales, doivent être considérés par les décideurs comme un instrument de référence dans le domaine de la gestion des eaux usées.
- Un grand effort de mobilisation des eaux usées, nécessitant de raccorder

## Références Bibliographiques

- El Hammouri B., 1999. Consolidation de la stratégie nationale en matière de réutilisation des eaux usées en agriculture. 89 pages. PNUD/AGR/DDGI Rhallabi N., Moundib R., Maaroufi M., Maraghich M., Khallayoune Kh., Bouzoubaa Kh., Agoumi A., Ettalibi M., Berdai H., Jellal N., Touzani M., Mekrane M., Handoufe A., Benchokroun T. et El Hammouri B., 1990. Effets des irrigations avec des eaux usées brutes et épurées sur le sol, le rendement d'une culture de tomate et la qualité hygiénique de la récolte. Actes Inst. Agro. Vet., Vol 10(2) 57-66..
  - Jemali A et Soudi B., 1996. Valorisation agricole des boues résiduaires, I: valeur fertilisante et efficacité d'utilisation de l'azote par la culture de Ray Gras d'Italie, II: Impact des amendements sur la dynamique de l'azote des sols, Atelier International sur l'Épuration des eaux usées et leur réutilisation en agriculture, du 23 au 26 Novembre 1996, Agadir, Maroc.
  - Projet MOR 86/018, 1998. Épuration et réutilisation des eaux usées de Ouarzazate à des fins agricoles. PNUD/FAO/OMS/Maroc. Rapport du séminaire de clôture du projet, 156 pages.
  - Projet PREM, 2002. Document technique sur les normes et standards pour la réutilisation des eaux usées au Maroc. Département de l'Environnement/USAID.
  - Projet PREM, 2002. Atelier sur la vulgarisation des technologies appropriées de traitement et de réutilisation des eaux usées. Département de l'Environnement/USAID.
  - Projet UTF/MOR/023/MOR, 2001. Développement de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement en zone rurale. Amélioration des connaissances dans le domaine des procédés de valorisation des eaux usées épurées. ONEP/FAO
- toutes les zones au réseau d'assainissement, devra être déployé pour augmenter le potentiel de réutilisation.
- Les rejets provenant des unités industrielles doivent être traités sur place pour ne pas compromettre le traitement et garantir une qualité d'eau usée épurée adaptée à la réutilisation en agriculture.
  - L'épuration et la réutilisation des eaux usées doivent être prises en compte dans les projets d'assainissement (projets intégrés assainissement – épuration – réutilisation) même au niveau des villes côtières. Dans ce cas, des relevages sur des grandes distances et sur des hauteurs importantes seront nécessaires pour ramener l'eau à l'arrière pays. Des collecteurs installés à distances régulières dans le réseau permettent d'intercepter l'eau au cours de son cheminement vers le littoral (côte zéro) et de la récupérer moyennant des dépenses de pompage plus réduites.
  - Sur le plan institutionnel, la réutilisation des eaux usées épurées nécessite une coordination entre les différents départements impliqués dans les opérations de traitement et de réutilisation. Des contrats qui lient ces différents partenaires et précisent leurs responsabilités et leurs rôles respectifs doivent être établis. Les partenaires sont, en particulier, les collectivités locales ou le gestionnaire de la station d'épuration du secteur public ou privé, les services régionaux du Ministère de l'Agriculture et les associations des usagers de l'eau agricole (AUEA). Le secteur associatif et les ONG doivent être impliqués davantage dans le domaine de l'assainissement et de la réutilisation. Les agences de bassin seront les animateurs de ces structures régionales.
- Outre les conventions qui engagent les principaux partenaires du projet, un comité technique de suivi doit être institué et un système de suivi des unités de traitement et des sites de réutilisation doit être conçu et mis en œuvre. Le rôle du comité technique est de suivre les performances de la station et de sensibiliser, former et encadrer les agriculteurs et les AUEA pour une utilisation efficace et rationnelle des eaux usées épurées en irrigation (choix des cultures, pilotage et conduite de l'irrigation, précautions à prendre, etc.). L'objectif est que la production soit optimale et conforme aux normes de qualité d'une part, et que l'environnement, (Homme et ressources naturelles eau et sol), soit préservé au sens d'une réutilisation agricole durable des eaux usées épurées, d'autre part.
- La publication des arrêtés relatifs à la mise en place des incitations financières prévues par la loi sur l'eau et ses textes d'application, notamment l'aide pour l'épuration et la mobilisation des eaux usées, doit être activée.
  - Les agences de bassin mises en place doivent être opérationnelles. Il est nécessaire de les doter de moyens humains et matériels pour qu'elles puissent remplir leur rôle dans le processus d'épuration et de mobilisation des eaux usées et de dispositifs réglementaires pour qu'elles puissent assurer la coordination entre les structures régionales appelées à intervenir dans le domaine intégré de l'assainissement – épuration – réutilisation.

# L'IRRIGATION DANS LES PAYS DU MAGHREB, ENJEUX STRATÉGIQUES ET DEFIS MAJEURS

A. Filali B<sup>1</sup>.

## INTRODUCTION

L'eau est une ressource précieuse et convoitée. Actuellement dans le monde, cette denrée constitue un enjeu politique et économique comparable à ce que fût le pétrole durant les trois dernières décennies. Bien que la terre possède des réserves énormes en eau, 97,5 % ces réserves sont salées et sont non utilisables et seules 2,5 % soient à peu près l'équivalent de 35 millions de km<sup>3</sup> qui peuvent être utilisées. Mais, les réserves en eau douce sont très inégalement réparties sur terre et ne sont pas directement accessibles à toute l'humanité. On estime que vers 2050, à peu près 7 milliard d'habitants (soit 65 % de la population mondiale) manqueront d'eau. C'est ainsi que l'eau constitue un sujet d'intérêt commun dans tous les pays de la planète particulièrement ceux qui souffrent d'un certain déficit hydrique. Comme partout dans le monde, tout sujet sur l'eau trouve son écho dans les pays du Maghreb.

En effet, les pays du Maghreb en l'occurrence l'Algérie, la Libye, le Maroc, la Mauritanie et la Tunisie sont classés parmi les pays de la planète les moins dotés en eau. Cette situation de fait peut être attribuée aux caractéristiques inhérentes de la région. Le Maghreb reste une région où les conditions naturelles et socio-économiques sont des plus sévères et constituent un handicap majeur pour instaurer un développement durable. A l'instar des autres pays dans le monde, les conditions climatiques, démographiques et hydrologiques du Maghreb font que les pouvoirs publics et privés doivent coordonner leurs efforts pour maintenir un équilibre social et

assurer un développement économique durable.

## Le Climat du Maghreb

Le Maghreb est une région à prédominance aride et semi aride avec des pluies moyennes annuelles très faibles et des températures très élevées. Tous les pays du Maghreb connaissent une variation climatique spatiale avec une bande très mince humide sur le littoral, mais une prédominance saharienne à l'intérieur des pays. A cette variabilité spatiale s'ajoute une variabilité temporelle. La pluviométrie moyenne annuelle sur l'ensemble du territoire maghrébin ne dépasse guère 98.16 mm avec des variations très importantes (voir tableau N° 1).

Ainsi, la région est très touchée par des changements climatiques inquiétants avec une tendance à la sécheresse. Pour l'ensemble des pays du Maghreb, on est passé d'une sécheresse tous les 11 ans au début du 20<sup>ème</sup> siècle à une sécheresse tous les 2 ans durant la dernière décennie et actuellement. Cette situation confère à la sécheresse le caractère structurelle dans tous les pays du Maghreb sans exception. Le

nombre de jour de pluie reste très faible ne dépassant guère 60 jours. Ces pluies en plus qu'elles sont faibles deviennent de plus en plus rares et très concentrées. Ces changements engendrent d'autres problèmes tels que l'aridité du sol de plus en plus prononcée, l'érosion très forte accompagnée des inondations parfois catastrophiques comme en témoignent les inondations dans la région du Haouz en 1996 au Maroc, les inondations du 10 au 14 novembre 2001 en Algérie (700 victimes à Alger) et les inondations du 20 au 27 novembre 2002 à Settat et Mohammedia au Maroc (63 morts).

Ces perturbations du régime climatique s'accompagnent d'une tendance à la baisse qui met en péril le renouvellement des réserves en eau dans tous les pays du Maghreb par l'action simultanée de deux phénomènes :

- Le réchauffement: On prévoit une augmentation de la température de 2 à 4 °C durant le 21<sup>ème</sup> siècle. Pour la seule période 2000-2020, on prévoit une augmentation de la température de 1 °C.

Tableau N° 1. Pluviométrie dans les pays du Maghreb

	Pluie Moyenne en mm	Intervalle de Variation En mm	Durée de la saison sèche En mois
Algérie	89	0 à 500	5
Libye	56	26 à 300	7
Maroc	217	100 à 1500	6
Mauritanie	92	10 à 500	9
Tunisie	207	100 à 1200	6

1. Département Equipement Rural, Ecole Nationale d'Agriculture, ENA BPS 40 Meknes, Maroc  
zfilali@enameknes.ac.ma

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

- Une tendance à la baisse de la pluviométrie: On estime que les pluies vont diminuer d'à peu près 10% dans l'ensemble du territoire.

### Démographie dans le Maghreb

La population Maghrébine connaît une croissance parmi les plus élevées du monde (voir tableaux N° 2 et 3). avec des mutations sociales très prononcées caractérisées par l'exode rurale et l'urbanisation.

La sévérité du climat, l'aridité du sol et l'instabilité des conditions naturelles avec une croissance démographique galopante font que les pays du Maghreb connaissent l'exode rural le plus fort du monde avec une urbanisation très rapide (augmentation annuelle de 4%) pour passer d'une population fondamentalement rurale (plus de 70% ruraux) vers les années 60 à une population urbaine (plus de 60% urbains) actuellement.

### Le Ressources en Eau dans les pays du Maghreb

Le Maghreb est classé par la Banque Mondiale comme une région pauvre en eau. Dans cette région, le stress hydrique reste une préoccupation nationale. Les crises hydriques qui deviennent de plus en plus fréquentes secouent l'économie de ces pays.

En fait, le Maghreb est une région qui connaît un déficit en eau de plus en plus grave (voir tableau N° 4). Les ressources en eau renouvelables sont de l'ordre de 61 109 m<sup>3</sup>/an (voir tableau N° 5). La dotation en eau annuelle par personne qui était en 1994 de 879.9 m<sup>3</sup>/an est actuellement passée à 771.9 m<sup>3</sup>/an et diminue rapidement pour atteindre le seuil de pénurie en eau absolue vers l'an 2030. Alors qu'on estime qu'il faut en moyenne 1100 m<sup>3</sup>/an pour répondre aux besoins de chaque habitant en cette denrée, tous les pays du Maghreb se trouvent bien loin pour répondre à ces besoins. Ils sont tous à des degrés différents au delà du seuil de pénurie en eau critique et pour la plupart au-delà du seuil de pénurie absolue.

**Tableau N° 2:** La Population au Maghreb en 1994

	Population 106 d'habitants	Taux de Croissance en %	% des ruraux
Algérie	27.0	3.2	50
Libye	5.0	4.1	18
Maroc	26.0	2.3	54
Mauritanie	2.2	2.7	53
Tunisie	8.7	2.0	40
Total	68.9	2.8	48

**Tableau N° 3:** Evolution de la population dans les pays du Maghreb

	Population en l'an 1998 en 106 d'habitants	Population en l'an 2001 en 106 d'habitants	Population en l'an 2002 en 106 d'habitants	Espérance de vie en années
Algérie	29.5	30.8	31.3	70.7
Libye	5.1	5.4	5.5	72.3
Maroc	27.8	29.2	29.6	68.4
Mauritanie	2.5	2.7	2.8	51.0
Tunisie	9.3	9.7	9.8	72.7
Total	74.2	77.8	79.0	69.5

**Tableau N° 4:** Les Ressources en Eau Renouvelables dans le Maghreb

	Eau Totale reçue en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Eau Intérieure Renouvelable en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Eau Intérieure de Surface En 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Eau Intérieure souterraine en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>
Algérie	212.0	13.9	13.2	0.7
Libye	98.5	0.6	0.4	0.2
Maroc	154.3	30.0	22.5	7.5
Mauritanie	94.3	0.4	0.1	0.3
Tunisie	33.9	4.2	2.8	1.4
Total	593.0	49.1	39.0	10.1

**Tableau N° 5.** Les Dotations en eau renouvelables au Maghreb

	Population Totale en l'an 2002 en 10 <sup>6</sup> d'hab	Eau Globale Renouvelable en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Dotation par habitant En eau renouvelable en m <sup>3</sup> /hab/an
Algérie	31.30	14.32	457.51
Libye	5.50	0.60	109.09
Maroc	29.60	30.00	1013.51
Mauritanie	2.80	11.50	4117.14
Tunisie	9.80	4.56	465.31
Total	79.00	60.98	771.90

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

Les ressources en eau dans le Maghreb restent limitées avec une tendance à la baisse à cause de la sévérité du climat et une demande de plus en plus accrue. La croissance démographique, l'urbanisation et la perturbation du régime hydrique font que la région du Maghreb est une région très vulnérable avec des ressources en eau non seulement limitées mais aussi instables caractérisées par:

- des réserves en eau disponibles de plus en plus rares
- la qualité de l'eau disponible de plus en plus dégradée à la limite des normes
- le niveau des nappes phréatiques qui baisse de plus en plus
- la salinité de plus en plus accentuée des nappes surtout qui sont proches du littoral
- une agriculture très fragile et
- une désertification accélérée

Ainsi, les disponibilités en eau atteignent le niveau de la crise. Il y a alors une compétition de plus en plus poussée entre utilisateurs de l'eau. On assiste à une surexploitation des nappes profondes qui conduit fatalement à une baisse des niveaux et une salinité de ces nappes qui affecte surtout celles qui sont proches du littoral. Le cycle hydrologique subit des perturbations exogènes non seulement liés aux changements climatiques mais aussi à la déforestation et la désertification. L'agriculture est amenée plus que par le passé à être plus performante pour une meilleure utilisation de l'eau en irrigation.

#### UTILISATION DE L'EAU EN AGRICULTURE DANS LES PAYS DU MAGHREB

L'agriculture représente la plus grande part de la consommation en eau. On estime que dans le monde, l'agriculture consomme 70% des ressources renouvelables. Dans les pays du Maghreb, l'agriculture consomme plus de 81.6% des ressources renouvelables disponibles et seules les 18.4% restants sont utilisés pour répondre aux besoins industriels et urbains (voir tableau N°6). Comme la demande en eau urbaine et industrielle augmente

avec la croissance démographique et l'urbanisation, l'irrigation se trouve contrainte à réduire de plus en plus sa consommation en eau. Comme conséquences, on doit assister à une baisse de plus en plus de la capacité de production alimentaire et par conséquent une augmentation plus accrue des importations en denrées alimentaires.

L'agriculture Maghrébine est accusée non seulement d'être la plus grande consommatrice d'eau, mais aussi d'être à l'origine du gaspillage d'eau. En effet, l'efficacité d'utilisation de l'eau en irrigation ne dépasse guère 60 % dans les meilleures des cas avec une moyenne de l'ordre de 42.4 % pour

toute la région (voir tableau N°7). Cette efficacité reste faible et engendre alors un grand gaspillage d'eau. Il y a alors des pertes estimées à plus de 6 109 m<sup>3</sup> ou encore 2500 m<sup>3</sup>/ha.

Le volume d'eau utilisé par hectare varie entre 6281.7 m<sup>3</sup> à plus de 9500 m<sup>3</sup> avec cependant un volume moyen de 8511.72 m<sup>3</sup>/ha pour toute la région (voir tableau N° 8). On estime qu'un volume de 6021 m<sup>3</sup>/ha aurait suffi pour la production agricole escomptée ce qui permet d'estimer le volume d'eau gaspillé à 2491 m<sup>3</sup>/ha.

Les conditions climatiques, la croissance démographique, l'urbanisation et l'industrialisation

**Tableau N° 6:** La répartition de l'Eau Mobilisée entre Différents Utilisateurs

	Utilisation Domestique en %	Utilisation Industrielle en %	Utilisation Agricole en %
Algérie	22	4	74
Libye	15	10	75
Maroc	7	9	84
Mauritanie	6	2	92
Tunisie	13	7	80
Total	14.6	4.2	81.6
Monde	10	20	70

**Tableau N° 7:** L'Utilisation de l'Eau en Agriculture

	Besoins en Eau des cultures en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Volume d'eau Irrig mobilisée en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Efficience Globale en %
Algérie	1.45	3.94	36.8
Libye	2.56	4.27	60.0
Maroc	4.28	11.48	37.3
Mauritanie	0.44	1.5	29.3
Tunisie	1.21	2.23	54.3
<b>Total</b>	<b>9.94</b>	<b>23.42</b>	<b>42.4</b>

**Tableau N° 8:** L'utilisation de l'eau dans les secteurs irrigués

	Surface Irriguée en 10 <sup>3</sup> ha	Volume d'eau Irrig mobilisée en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Dotation en eau en m <sup>3</sup> /ha
Algérie	555.5	3.94	7092.71
Libye	470.0	4.27	9085.11
Maroc	1206.0	11.48	9519.07
Mauritanie	165.0	1.50	9090.91
Tunisie	355.0	2.23	6281.69
Total	2751.5	23.42	8511.72



instaurent un état de rareté locale. Cette situation de fait dicte l'adoption d'une politique d'austérité pour économiser l'eau. Mais, l'eau économisée en réduisant les dotations agricoles peut avoir des conséquences économiques et sociales plus graves. A travers les négociations, les échanges et les importations cet état de rareté déborde au-delà des frontières et met en péril la politique de sécurité alimentaire jusque là adoptée par tous les gouvernements du Maghreb et que seule l'irrigation constitue la technique clé capable de maintenir une agriculture économiquement viable avec une équilibre social.

### GESTION DES RESSOURCES EN EAU DU MAGHREB

La stratégie nationale adoptée par tous les pays du Maghreb, mais réalisée avec un rythme différent est la mobilisation des toutes les ressources renouvelables en utilisant des grands ouvrages (voir tableau N° 9 ci-après).

Avec des ressources en eau limitées et une dotation en eau de plus en plus faible, les pays du Maghreb sont tenus plus que jamais à entreprendre des actions économes en eau. La gestion de l'eau est une affaire très complexe dans la société Maghrébine connue par ses pratiques ancestrales de l'irrigation et par son respect à cette denrée vitale. La réglementation reste incapable d'instaurer un climat de conscience et le secteur privé trouve des difficultés pour développer des modèles de gestion rationnelle basée sur des considérations marchandes. La région du Maghreb reste alors une région à défi pour l'eau. Mais, l'irrigation dans ses limites n'est pas un miracle qui peut durer éternellement. La surexploitation devient un phénomène nouveau par le développement des pompes puissants et contribue à l'épuisement des ressources non renouvelables (cas de la Libye). On voit alors s'installer la guerre de l'eau qui reste très difficile à gagner. Cette guerre présente alors deux fronts :

- La quantité et de la qualité et

- L'importation de l'eau à travers l'importation des produits alimentaires

Dans les pays du Maghreb, le déficit en eau devient de plus en plus grand chaque année et rend alors la gestion des ressources de plus en plus difficile. A moins que les pouvoirs publics agissent rapidement pour stabiliser la croissance de la population, le déficit en eau induit le déficit alimentaire.

L'Importance de l'Irrigation dans l'Agriculture Nationale Maghrébine

Le Maghreb constitue un territoire qui s'étend sur plus de 6 millions de km<sup>2</sup>, avec un potentiel cultivable de plus de 42 millions d'hectares (7% du territoire). La superficie moyenne annuelle cultivée est de l'ordre de 19 millions d'hectare ce qui représente

moins de 50 % du potentiel en terre agricole (voir tableau N°10). Cependant, à l'exception de la Mauritanie qui n'exploite que 1 % de son potentiel agricole, les autres pays du Maghreb utilisent actuellement et en moyenne 84.4 % du potentiel en terres agricoles.

Le secteur agricole dans le Maghreb occupe une place importante dans l'économie nationale et contribue dans une large mesure au développement durable de la région. Ainsi, la part de l'agriculture dans le PNB varie de 10 à 24 % selon les pays. Pour toute la région cette part est de l'ordre de 14 % du PNB total (voir tableau N° 11).

La valeur ajoutée agricole dégagée actuellement varie beaucoup avec les aléas climatiques. Pour toute la

**Tableau N° 9:** Les grands ouvrages de stockage au Maghreb

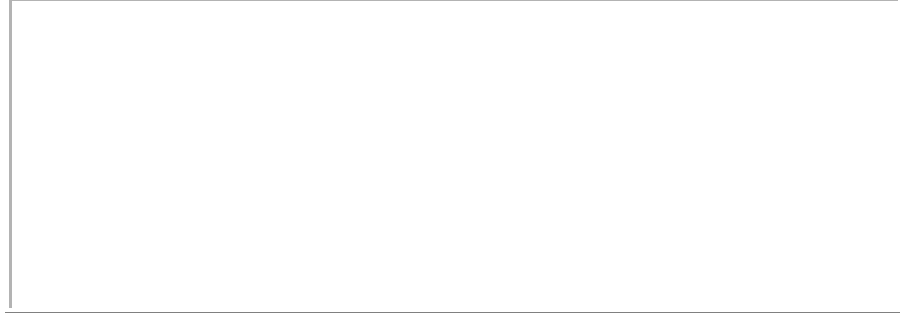
	Nombre des Barrages construits	Capacité régularisée en 10 <sup>9</sup> de m <sup>3</sup>
Algérie	107	6.5
Libye	12	0.387
Maroc	92	14.8
Mauritanie	9	-
Tunisie	72	1.5
Total	292	23.187

**Tableau N°10:** Surfaces Cultivables et Cultivées au Maghreb

	Superficie totale En 106 km <sup>2</sup>	Superficie Cultivable en 106 ha	Superficie moyenne cultivée en 106 ha
Algérie	2.38174	8.10	7.50
Libye	1.75954	2.17	1.93
Maroc	0.71085	8.10	7.21
Mauritanie	1.02552	20.00	0.20
Tunisie	0.16361	4.00	2.23
Total	6.04126	42.37	19.07

**Tableau N° 11:** Le PNB agricole dans le Maghreb en 109 de dollars

	1998	2001	2002
Algérie	5.7354	5.3802	6.9068
Libye	-	-	-
Maroc	6.1576	5.3562	6.0053
Mauritanie	0.2440	0.2090	0.2103
Tunisie	2.4875	2.3200	2.2048
Total	14.6245	14.2654	15.3272
% PNB	14.05	12.99	13.31



région elle fluctue entre 833 et 900 \$/ha (entre 1998 et 2002). Alors que la production agricole représente 14 % du PIB, l'agro-industrie n'en constitue qu'une part négligeable (voir tableau N° 12).

Malgré que l'agriculture dans les pays du Maghreb reste à caractère extensif prédominant, l'intensification et la diversification des cultures sont deux actions soutenues par les pouvoirs publics pour mieux valoriser aussi bien les ressources en terre que les ressources en eau. Ces deux actions sont rendues possibles par les efforts d'aménagement hydro agricoles. Le potentiel irrigable se chiffre à environ 3.917 millions d'hectare ce qui représentent à peu près 20 % des terres cultivées (voir tableau N°13). Actuellement., l'aménagement pour l'irrigation touche plus de 70% du potentiel irrigable. Les ressources en eau limitent l'extension des périmètres irrigués.

L'intensification de l'agriculture est principalement réalisée par l'irrigation. Le taux d'intensification varie de 83 à plus de 124 % selon les pays. Il est de 96.3 % pour l'ensemble de la région (voir tableau N° 14). Le taux d'intensification élevé et la diversification des cultures témoignent d'une volonté de développer l'agriculture pour soutenir la politique de la sécurité alimentaire adoptée par tous les pays du Maghreb.

#### PERFORMANCE DE L'IRRIGATION DANS LES PAYS DU MAGHREB

Pour soutenir la politique de sécurité alimentaire, les pays du Maghreb sont appelés à développer les ressources hydriques pour répondre à une demande en eau sans cesse croissante de tous les secteurs. L'importance de l'agriculture pour assurer la couverture des besoins alimentaires ne lui confère pas le droit d'utiliser l'eau à volonté et doit se soucier à faire des économies au profit des autres secteurs qui sont prioritaires.

Avant d'entamer l'exploitation d'autres ressources, il est nécessaire de valoriser les réserves existantes. En fait, l'efficacité globale du

secteur irrigué des pays du Maghreb varie entre 36.8 % et 60 % et reste faible dans l'ensemble de la région. Les techniques d'irrigation adoptées varient des plus performantes à la

moins efficiente. En effet, le système d'irrigation par gravité reste le plus dominant et occupe 72 % des terres irriguées suivi par le système aspersion, soit 26.18 %, alors que le

**Tableau N° 12:** La valeur ajoutée agricole en US \$/ha/an

	1998	2001	2002
Algérie	764.72	717.36	920.91
Libye	-	-	-
Maroc	854.04	742.88	832.91
Mauritanie	1220.00	1045.00	1050.60
Tunisie	1115.47	1040.00	988.70
Total	853.24	832.29	894.24

**Tableau N° 13:** Surfaces irrigables et irriguées

	Superficie potentielle Irrigable en 103 ha	Superficie moyenne Irriguée en 103 ha
Algérie	730	555.5
Libye	750	470.0
Maroc	1653	1206.0
Mauritanie	221	165.0
Tunisie	563	355.0
Total	3917	2751.5

**Tableau N°14:** Assolement en Irrigué Pratiqué dans les Pays du Maghreb

Cultures Pratiquées	Algérie en 1000 ha	Libye en 1000 ha	Maroc en 1000 ha	Mauritanie en 1000 ha	Tunisie en 1000 ha
Blé	1426	78	500		34
Riz	167		10	22	
Mais	179	4	10	2	
Orge	93				
Pomme de terre	14	28	62		10
Légumineuses	25	11	108		23
Légumes	55	48	170	20	90
Fruit	87	27	120	5	58
Agrumes	-	6	110		58
Sésame	27				
Oléagineux	34	77			20
Coton	60		20		
Fourrages	115	9	100		19
Sorgho				12	
Betterave à Sucre			58		2
Canne à Sucre			18		
Tabac			10		4
Arachide		9	10		
Surface totale	2282	306	1306	61	318
Surface équipée	2386	361	1258	49	385
Intensification	96%	85%	104%	124%	83%

[Redacted text]

[Redacted text]

[Redacted text]

[Redacted text]

---

système d'irrigation localisée occupe moins de 2 %. Dans les limites des performances de chacun des systèmes d'irrigation adoptés, l'efficacité potentiellement réalisable est de 66.63 % (voir tableau N° 15). Avec une telle performance, le secteur irrigué dans la région du Maghreb aurait économisé l'équivalent de 8.5 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (voir tableau N° 16).

L'amélioration des performances des systèmes d'irrigation nécessite le déploiement des moyens techniques, financiers et humains.

contamination, d'intrusion salines et de pollution. Les approches de conception et de gestion étaient souvent centralisées et ne répondent pas nécessairement aux besoins des usagers. Face à cette situation, les pays du Maghreb doivent promouvoir une gestion intégrée des ressources en eau visant non seulement l'utilisation optimale, économe et rationnelle de l'eau, mais aussi la conservation et la préservation de cette denrée.

Dans le contexte de la politique générale de sécurité alimentaire, les interventions doivent être concentrées pour augmenter la production en denrées alimentaires et promouvoir l'usage rationnel de l'eau et du sol. L'extension de l'irrigation et la réhabilitation des périmètres anciens constituent le moyen susceptible de contribuer à atteindre cet objectif. Pour réduire les effets de la pénurie et de pollution, trois niveaux d'actions sont à entreprendre :

- Actions techniques consenties dans le but de bien réduire les pertes d'eau et éviter le gaspillage,
- Actions économiques par une révision du système tarifaire et de subvention adopté et
- Actions type social pour informer, encadrer, former et organiser les usagers à une gestion participative.

## Références Bibliographique

1. FAO 2002: framework for calculating water resources country.
2. FAO, Aquastat, Système d'information: L'Algérie version 1995.
3. FAO, Aquastat, Système d'information: Monographie de l'Algérie, Données Physiques et population
4. FAO, Aquastat, Système d'information, Division de la Mise en valeur : Le Maroc
5. FAO, Aquastat, Système d'information, Division de la Mise en valeur : La Libye
6. FAO, Aquastat, Système d'information, Division de la Mise en valeur : La Mauritanie.
7. FAO, Aquastat, Système d'information, Division de la Mise en valeur : La Tunisie
8. Fiali B. Abdelwahab : Les Pratiques de l'Irrigation, les Actes du séminaire sur "Les Pratiques de l'Irrigation dans les Pays du Maghreb, Quelle Durabilité?", organisé par ENDA Maghreb et tenu à Rabat le 23 et 24 octobre 2003.
9. Sébastien Treyer, ENGREF dans PNUE, Plan Bleu : Analyse des stratégies et perspectives de l'Eau en Tunisie

## CONCLUSION

Durant la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, les efforts ont été consentis pour le développement et la régularisation des ressources en eau avec une planification orientée essentiellement vers la satisfaction des besoins en eau. La mobilisation de toutes les ressources renouvelables a rendu indisponibles cette denrée et une tension de plus en plus accrue entre les différents utilisateurs. Le coût de mobilisation de nouvelles ressources devient de plus en plus élevé. L'exploitation excessive qui induit l'abaissement des nappes a augmenté le coût du pompage. Les réserves en eau sont de plus en plus exposées aux risques de

**Tableau N° 15.** Volume d'eau Economisée à la limite des Performances

	Efficiéce potentiellement réalisable	Eau nécessaire à l'irrigation en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	Q <sup>ité</sup> d'eau économisée en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>
Algérie	61.44	2.3600	1.5800
Libye	80.00	3.2000	1.0700
Maroc	63.67	6.7222	4.7893
Mauritanie	60.00	0.7333	0.7667
Tunisie	63.61	1.9022	0.3278
Pour l'ensemble	66.63	14.9177	8.5338

**Tableau N° 16.** Volume d'Eau Economisé en Fonction de la Performance Pour Tout le territoire Maghrébin

Efficiéce en %	42.4	45	50	55	60	65	66.63
V utilisé en 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	23.443	22.089	19.880	18.073	16.567	15.292	14.918
V éco <sup>nomisé</sup> En 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	0.000	1.355	3.563	5.371	6.877	8.151	8.525
Gain en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /°eff	521.2	441.6	361.6	301.2	254.8	229.4	
Gain unitaire m <sup>3</sup> /ha/°eff	190.0	160.5	131.4	109.5	92.60	83.40	



# L'ENDETTEMENT, UNE CONTRAINTE A L'ACCES AU CREDIT ?

## CAS DES EXPLOITATIONS FAMILIALES DE LA ZONE IRRIGUÉES DE L'ON, AU MALI

Y. Koné<sup>1</sup>, D. Koné<sup>2</sup>, M. Bagayoko<sup>3</sup>, D. P. Samson<sup>4</sup>

### Résumé

Au Mali, la zone irriguée de l'Office du Niger (ON) occupe une place de choix dans les stratégies d'autosuffisance alimentaire du pays. Elle constitue la principale zone de production rizicole et une plaque tournante du crédit agricole. Cependant, l'endettement des exploitations est une problématique majeure pour l'accès durable des paysans aux services financiers. Le présent article fait l'état des lieux de la question au sein des exploitations. L'objectif poursuivi, est d'identifier les causes de cet endettement. La conduite de l'étude a nécessité une enquête auprès de 177 exploitations réparties dans 14 villages de la zone d'intervention de l'ON. L'analyse des résultats montre que l'endettement est un phénomène qui touche toutes les catégories d'exploitations de l'ON. Les causes de cet endettement sont à la fois endogènes et exogènes. Les causes endogènes sont liées au détournement de l'objet de prêt, le non respect du calendrier agricole par l'insuffisance d'équipement agricole et le manque d'organisation du système de stockage du riz paddy. Les facteurs exogènes sont les difficultés d'apprentissage et d'adaptation à la politique de libéralisation de la filière riz, les risques pluviométriques et le manque de concertation entre les principales institutions financières de la place. L'effet de pollution de l'endettement a créé une crise de confiance entre institutions financières offreurs de services financiers et paysans demandeurs de crédits. La restauration de cette confiance est nécessaire pour l'assainissement de la zone, mais cela nécessite un appui à la réduction de l'asymétrie de l'information entre paysans et partenaires financiers.

### I. INTRODUCTION

Dans la plupart des pays en développement, en plus des contraintes environnementales et agro-techniques, plusieurs autres contraintes d'ordre socio-économiques entravent le développement agricole et particulièrement en Afrique subsaharienne. Parmi ces contraintes l'insuffisance du crédit agricole doublée d'un accès difficile, limite les capacités d'investissement d'une grande majorité de paysans et d'opérateurs économiques évoluant dans les filières agricoles (Sissoko K., 1998; Témé B. et al., 1995). Les paysans et paysannes ont peu d'accès aux systèmes financiers (Fournier Y., 1995). En conséquence, peu de possibilités d'obtenir du crédit leur sont offertes et ils ne peuvent pas mettre leur épargne à l'abri des événements aléatoires ou des pressions sociales.

Au Mali, dans la zone d'intervention de l'Office du Niger (ON), l'un des

plus grands bassins rizicole de l'Afrique de l'Ouest avec un potentiel de terres irrigables par gravité d'environ un million d'hectares, les paysans ont de plus en plus de difficultés à accéder aux services financiers. En effet, avec la dévaluation du franc «CFA» intervenue en janvier 1994, le niveau d'endettement, principal indicateur de la solvabilité des producteurs s'est gravement détérioré auprès des principales institutions de financement rural, notamment la Banque Nationale de Développement Agricole (BNDA) et le Fonds de Développement Villageois (FDV) (Koné et al., 1998). Selon (Gakou et Traoré., 1996), le non remboursement s'est traduit dans certains cas par une forte réduction ou le non octroi du crédit pour la campagne suivante, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur les systèmes de production.

Le présent article fait l'état des lieux de la problématique de l'endettement des paysans de l'ON. L'objectif poursuivi est d'identifier les différents

facteurs qui influencent le niveau d'endettement et, donc qui limitent l'accès aux financements.

### II. METHODOLOGIE

#### 1. Choix des villages

L'enquête sur les causes de non accès des paysans aux crédits a été faite selon la diversité et la représentativité des villages de l'ON. Parmi les critères de diversité et de représentativité on peut citer entre autre: le niveau d'endettement des villageois, la durée d'endettement des paysans, le degré d'intensification (rapport superficie et rendement) et l'état des aménagements. Pour chacune des 5 zones que comporte la zone d'intervention de l'ON, trois villages ont été choisis selon leur niveau d'endettement: un village fortement endetté, un village faiblement endetté et un village non endetté (Tableau I).

Dans la zone de N'Débougou, aucun village n'est fortement endetté, ainsi seuls deux types de villages ont été

1. CHERCHEUR AGROÉCONOMISTE IER, MALI, Institut d'Economie Rurale, BP :258 Bamako, Rue Mohamed V, Bamako, Mali  
2. CHERCHEUR AGROPASTORALISTE IER, MALI  
3. CHERCHEUR AGROPÉDOLOGUE IER, MALI  
4. ASSISTANT DE RECHERCHE, IER, MALI

choisis dans la dite zone. De ce fait le nombre total de villages a été ramené à quatorze au lieu de quinze comme précédemment prévu.

## 2. Choix des exploitations

Dans les villages retenus, un inventaire de toutes les exploitations a été effectué (structure des unités de productions agricoles). Les données collectées ont concerné: la démographie, la superficie, la production, le niveau d'équipement, l'endettement individuel et collectif.

Les données collectées ont permis de faire une corrélation entre niveau d'endettement individuel et classe d'exploitation. Pour cette opération, les paysans sont classés en trois catégories de classe selon leur niveau d'équipement (classification classique IER/ICRA des paysans selon leur niveau de richesse). La classe « A » comprend les paysans ayant au moins deux attelages complets communément appelés paysans riches ou aisés. La classe «B», comprend les paysans ayant un et un seul attelage, appelés cependant exploitants moyens. Contrairement aux deux autres classes, les paysans de la classe «C» ne disposent pas d'attelage complet. Très souvent certains d'entre eux ont une charrue sans bœufs ou vis versa.

Dans chacune des trois catégories de classe (A,B,C) de paysans, 5% des exploitants sont enquêtés, soit un

total de 15% de l'ensemble des exploitants de chaque village retenu. Cependant compte tenu de la disparité entre les différentes classes sur le terrain, ce principe n'a toujours pas été respecté. Le nombre de familles enquêtées est proportionnel à la taille de chaque village. Mais, il est important de signaler que tous les paysans ont été assujettis aux mêmes questionnaires d'enquête. Au total 177 exploitations ont été concernées par l'enquête terrain.

## 3. Déroulement de l'enquête

L'enquête relative aux causes du non accès au crédit à travers les cinq zones de l'ON a démarré la première décade du mois de mars 2002, après l'élaboration des premières fiches d'enquête. Elle a nécessité une phase test à Ténégué (N10), un village de la zone de Niono. Cette opération test n'ayant décelé aucune anomalie majeure concernant le contenu des fiches et a permis le démarrage des enquêtes sur le terrain. Cette phase de terrain s'est déroulée en deux étapes suivant un calendrier pré établi. La première a concerné les zones de Niono, Molodo et N'Débougou du 11/03/02 au 7/04/02 et la seconde, les zones de Kouroumari et de Macina les plus éloignées de Niono, du 21/04/02 au 6/05/02.

## 4. Traitement des données

Les données collectées ont été

dépouillées à l'aide du tableur Excel et du logiciel Statistique SPSS (Statistical Package for Social Science) version 10. Des agrégations des montants des dettes antérieures des Associations villageoises ont été effectuées à partir des données collectées auprès des institutions financières. Des calculs d'occurrences et de moyennes ont été aussi effectués pour connaître les perceptions des paysans vis-à-vis des contraintes rencontrées, et aussi pour apprécier l'état des besoins en crédit au sein des différentes catégories d'exploitations.

## III. RESULTATS ET DISCUSSIONS:

### 1. Aperçu historique du crédit à l'Office du Niger

Pour mieux cerner la problématique de l'endettement dans la zone de l'ON, il est important de faire un rétrospectif historique du crédit agricole. Dans cette rétrospective le processus de libéralisation de l'économie au début des années 1980 constitue une référence importante

Avant la libéralisation (1980), le système de crédit (l'octroi et le remboursement), était largement encadré par l'entreprise Office du Niger lui-même. Le crédit était retenu à la source conformément au rôle de redevance eau préétabli à cet effet. La commercialisation étant assurée par l'ON, aucune possibilité de non

**Tableau 1:** Répartition des villages retenus pour l'enquête selon le degré d'endettement dans la zone de l'ON au Mali

Zones	Villages		
	Fortement endetté	Faiblement endetté	Non endetté
Niono	Tissana N9	Ténégué N10	Niégué Km23
Molodo	Bekaye-Wèrè	Hamdallaye	Tientiembougou
N'Débougou	-	Ringandé	Niobougou B1
Macina	Kayo Bamanan	Kossouga	Goursy
Kourou mari	Kourouma	Bamako-Coura	Yangassadioucoura

remboursement n'était envisageable car toutes les retenues étaient opérées en nature au moment du battage de la production rizicole. C'est après remboursement de tout crédit (charges obligatoires) que le producteur pouvait espérer percevoir en liquidité la somme restante due. Toutefois le prix du riz paddy était fixé à l'avance par le gouvernement. A noter que l'autoconsommation était dégagee en priorité avant les autres charges d'exploitation. A cette époque, tout impayé était dû au bas rendement enregistré par l'exploitant agricole. Le système était tellement centralisé que le rendement malheureusement d'année en année ne faisait que chuter d'où une certaine accumulation croissante des créances, avoisinant les 800 millions de francs CFA.

Avec la libéralisation et la politique d'ajustement, l'ON a été autorisé par l'Etat malien à se retirer du système de crédit pour se limiter uniquement à sa fonction de prestation de service notamment celle de collecte de la redevance eau et de la gestion des terres irriguées.

A partir de 1983 l'ON s'est retiré du crédit au profit du projet Amélioration de la Riziculture Paysanne à l'ON (ARPON). La période d'intervention du projet ARPON (83-90), est une date de référence du crédit agricole pour les paysans de . Le projet avait mis en place un fonds d'Intrant Agricole (FIA), en raison de l'insuffisance de l'équipement agricole tout comme les intrants agricoles. Le Fonds d'Intrants Agricole fût créé sur la base des aides Néerlandaises à la

balance des paiements directes accordées aux paysans (cheptels vifs et morts). Le FIA fonctionnait comme un «revolving funds» (c'est à dire un fonds destiné à faire un crédit, une fois que ce crédit est payé, il est encore retourné sous forme de crédit). Il a évolué comme un projet au sein de l'ON avec une autonomie de gestion. La conviction du projet Arpon ajoutée au processus de réaménagement du réseau hydraulique a eu un impact positif sur le rendement du riz à un niveau acceptable.

Au cours de cette période, l'instruction du crédit agricole et son recouvrement étaient assurés par l'ON. Les conditions d'octroi qui ont existé au moment où faisait du crédit sur ses fonds propres ont continué également sous le FIA (Crédit individuellement distribué aux exploitants et individuellement recouvré à la commercialisation aux rizeries qui étaient une autre entité de l'ON). Les taux de recouvrement enregistrés par l'ON étaient assez bons car le niveau de rendement commençait à être favorable pour les riziculteurs. Cependant il faut signaler que le FIA n'était pas totalement remboursée par l'ON. Les taux de recouvrement entre l'ON et le FIA étaient faibles alors que ce taux était bon entre les paysans et l'Office. C'est ainsi que plus d'un milliard d'impayés ont existé entre l'ON et le FIA.

En 1986, la BNDA, établissement officiel chargé du crédit agricole au Mali, faisait son entrée et partagea le marché financier avec le FIA, son concurrent direct. Mais c'est en 1990

que la BNDA a véritablement intervenu dans le domaine du crédit agricole après l'assainissement du climat financier entre l'ON et les paysans. C'est dans ce contexte que les Pays-Bas ont envisagé la possibilité de transfert des fonds à cette institution malienne. Cependant le transfert des fonds n'a pu se faire suite à des différences d'objectifs.

C'est ainsi qu'en mars 1990 par décision N° 051 le FIA a été transféré en Fonds de Développement Villageois (FDV) avec un élargissement de son mode d'intervention et des lignes de crédits à octroyer. Le financement désormais ne devait plus passer par l'ON, mieux encore, il ne devait plus être donné à des individus, mais plutôt à des organisations paysannes à l'image de la BNDA.

En 1992 et 1994 Niesigiso, et la Caisse Villageoise d'Epargne et de Crédit Agricole (CVECA/CIDR ) augmenteront le groupe à quatre. Un an après, en 1995, le FDV (Fonds de Développement Villageois) a été transformé en Caisses Rurales Mutualistes du Delta (CRMD) avec transfert de fonds.

## 2. Endettement

### 2.1. Volume de la dette antérieure par zone

Le Tableau 2 ci-dessous donne le volume des dettes antérieures des AV auprès des deux institutions financières de la place (BNDA et FDV). Le montant total dépasse le milliard en fin 2001. L'analyse par

**Tableau 2:** Situation des dettes antérieures des Associations Villageoises (2000/2001)

ZONE	BNDA	FDV	Total dette	Total	Endettement
	Millions Fcfa	Millions Fcfa	Millions Fcfa	(%)	(Fcfa/ha)
Molodo	205, 33	167, 78	373, 11	38	59 450
Niono	143, 44	80, 40	223, 84	23	54 271
Macina	81, 30	164, 87	246, 17	25	34 014
Kouroumari	93, 52	ND	93, 52	10	24 958
Ndebougou	23, 15	9, 72	32, 87	3	7 308
<b>Total</b>	<b>546, 74</b>	<b>422, 78</b>	<b>969, 52</b>	<b>100</b>	<b>36 000</b>

Sources: enquête

zone montre que les dettes antérieures sont présentes dans toutes les zones de l'ON. Mais Molodo est la zone la plus endettée avec environ 38% des dettes recensées. Pour cette zone le niveau d'endettement est d'environ 60 000 Fcfa/ha. Les autres sites à fort degré d'endettement sont les zones du Macina et Niono (25 et 23 % du volume total des dettes).

### 2.2. Volume de la dette antérieure suivant l'état du casier rizicole :

La répartition des dettes antérieures suivant l'état des parcelles sont présentés dans le Tableau 3. Les résultats indiquent une concentration des crédits dans les villages disposant de casiers non réhabilités (environ 58% du volume). Dans ces villages, le bas niveau des rendements obtenus est cité comme la cause de l'endettement.

### 2.3. Répartition des exploitations suivant le degré d'endettement

Le Tableau 4 donne une répartition des exploitants enquêtés dans toutes les zones de l'ON suivant le degré d'endettement. Environ 65.5% des exploitants enquêtés sont endettés. Le niveau d'endettement est corrélé avec la zone. Ainsi, il existe des zones de forte concentration d'exploitants fortement endettés (Molodo, Macina, Niono, et Kouroumari) et des zones de faible niveau d'endettement (Ndébougou). Les paysans de la zone de N'Débougou sont réputés bons gestionnaires et respectueux du calendrier agricole toute chose qui influe sur le niveau d'endettement.

## 3. Causes de l'endettement

Les causes de l'endettement des paysans de l'ON, sont multiples et variées. Beaucoup de producteurs retiennent la dernière décennie du siècle dernier (1990 –2000), comme période de référence. Au cours de cette période plusieurs paysans se sont endettés auprès des établissements de crédit. Suivant l'environnement socio-économique, les causes de l'endettement peuvent être regroupées en facteurs endogènes et exogènes.

### 3.1. Causes endogènes

Les causes endogènes sont intimement liées au comportement de l'exploitant après réception du prêt (négligence et/ou à une mauvaise utilisation/détournement de l'objet du prêt).

#### 3.1.1. Le réallocation de l'objet du prêt

De nos jours, malgré l'existence d'un comité de surveillance pour l'utilisation et le suivi du crédit, son utilisation efficace pose encore de sérieux problèmes. Pour la plupart des personnes endettées interviewées, les crédits contractés auprès des institutions financières n'ont pas été efficacement utilisés du fait qu'une partie de l'emprunt est orienté dans d'autres secteurs d'activités non ciblées au départ par l'exploitant agricole. Ce phénomène est surtout observé à l'échelle des petites exploitations à faible revenu où une partie de l'emprunt (cas de l'argent en espèce) est viré dans l'autoconsommation.

Le crédit engrais évalué sur la base de la superficie totale de l'exploitation ne couvre pas tous les besoins de fertilisation. Les besoins de fertilisation de la pépinière n'étaient pas pris en compte. Dans la plupart des cas, on assiste à une affectation d'une partie du stock d'engrais à la fertilisation de la pépinière. Ce transfert d'engrais diminue le nombre de sacs d'engrais à l'hectare. Ceci explique en partie la diminution de la productivité. Par conséquent, la production est réduite du fait que les doses de fertilisants recommandées par la recherche ne seront plus respectées, d'où l'inefficacité des engrais. Il faut noter également que les prêts coïncident avec la période de soudure, période pendant laquelle la plupart des paysans n'ont pas les moyens financiers pour faire face aux travaux rizicoles.

#### 3.1.2. Le non respect du calendrier agricole

En agronomie, ce facteur révèle une importance capitale dans la production agricole. Tous les travaux doivent être exécutés à un moment précis de l'année, de la préparation du sol jusqu'à la récolte en passant par les travaux d'entretien. Or à l'ON, une majeure partie des petites exploitations (60%) sont sous équipées entraînant un grand retard dans l'exécution des travaux. De plus les frais de location des bœufs de labour, généralement en nature et très élevés, sont payés par ceux dépourvus d'équipements agricoles. L'enquête conduite auprès des exploitations a permis d'établir

**Tableau 3:** Situation des dettes des Associations Villageoises (année 2000/2001)

Etat d'aménagement casier	Superficie	Montant dette auprès BNDA	Montant dette auprès FDV	Montant dette	Degré d'endettement	Fcfa/ha
	Ha	Millions Fcfa	Millions Fcfa	Millions Fcfa	(%)	
Non Réhabilité	20 462	332, 16	229, 68	561, 84	58	43 240
Réhabilité	9 680	183, 24	175, 38	358, 62	37	32 883
Hors casier	ND	31,34	17, 72	49, 06	5	ND
Total	30 143	546 ,74	422, 77	969, 52	100	38 062

Sources: enquête

des besoins réels en équipement agricole au sein des exploitations (Tableau 5). Le besoin de crédit pour l'équipement agricole est exprimé par plus de la moitié des paysans enquêtés.

En plus, l'arrivée tardive des engrais pose aussi de sérieux problèmes aux exploitations. En effet, le décalage par rapport au délai normal de livraison dépasse parfois un mois voire plus. Dans d'autres cas, le type d'engrais souhaité par l'exploitant reste souvent introuvable. Ainsi, toutes ces difficultés exposent l'exploitant agricole à une contre performance et par conséquent à une transgression des engagements envers les institutions financières.

### 3.1.3. Manque de locaux de conservation

Faute de magasins appropriés de stockage, certains villages ont été confrontés à des difficultés d'écoulement de leur stock de riz. En effet, le cas le plus frappant a été celui de l'association villageoise de Bamako-Coura dans la zone de Kouroumari. En 1997 le stock de riz n'a pu être écoulé suite à une altération qualitative du riz par les moisissures.

### 3.2. Causes exogènes

Elles sont les plus nombreuses et variées et sont indépendantes de la gestion de l'exploitation agricole et du paysan.

#### 3.2.1. L'apprentissage de la libéralisation de la filière riz

En 1980, la décision de libéralisation et de profession-

nalisation de la filière du riz a été déjà lancée par le gouvernement malien. Mais il a fallu attendre 1984 pour que la libéralisation de la commercialisation du riz se profiler à l'horizon. Le paysan devait désormais vendre librement ses produits céréaliers (riz) et régler les crédits des institutions financières. Dans le même temps la police économique qui, autrefois assurait le rôle de récupération du paddy, a été abolie. Mais force est de reconnaître que cette trop grande liberté, par la suite a fini par causer plus de mal que de bien aux institutions financières de la place et aux paysans eux-mêmes.

En effet dès les premières années de libéralisation de la filière riz, les paysans de l'ON ont été victimes d'une escroquerie de commerçants véreux. Première du genre, ce phénomène s'est malheureusement déroulé au cours des années 1993-94. Des commerçants véreux venus de Bamako la capitale du Mali, qui se voyaient maîtres du terrain (marché libre), ont profité de l'ignorance des exploitations agricoles en matière de commercialisation pour détourner une bonne partie du stock de riz. Plusieurs milliers de tonnes de riz paddy (environ à 40 millions de francs CFA dans certains villages de l'Office) ont été détournées souvent avec la complicité des responsables des associations villageoises.

Le détournement du riz du paysan a été une des principales causes d'endettement de plusieurs villages en l'occurrence les villages dits fortement endettés. Environ 30%

des cas d'endettement enregistrés au cours de l'enquête menée à travers les cinq zones de l'Office ont été concernés par l'escroquerie des commerçants. De nos jours, sur le plan financier, certaines associations villageoises se portent très mal et continuent de peiner sous le poids des créances de la BNDA et du FDV/FCRMD. Dans ce contexte les paysans des villages concernés n'ont pas pu honorer leurs engagements vis à vis des institutions financières.

Dès lors la détérioration des rapports entre institutions financières et paysans a affecté négativement le volume du crédit à injecter à l'ON. Il a fallu revenir à la case de départ pour individualiser le crédit. Ceci a motivé la création des réseaux de caisses d'épargne et de crédit afin de responsabiliser davantage le monde rural dans la gestion du crédit (gestion participative du crédit). Cette gestion doit désormais passer nécessairement par la mobilisation de l'épargne rurale, un des axes prioritaires du gouvernement malien pour la lutte contre la pauvreté en milieu rural.

#### 3.2.2. Déficit de communication entre institutions financières

Au Moment de leur création (1990/1993), les institutions financières se sont engagées dans une concurrence de partage du marché financier rural. En effet, Chacun des réseaux de caisse voulait avoir le plus grand nombre de caisses à l'horizon 2000. Cette conquête du marché financier rural a eu pour conséquence néfaste. Les principes et règles élémentaires qui les régissaient étaient chaque fois

**Tableau 4 :** Répartition des exploitations suivant le degré d'endettement

Degré d'endettement	Niono	N'Débougou	Molodo	Kouroumari	Macina	Total	%
Fortement endetté	19	0	6	10	10	45	25.4
Faiblement endetté	19	15	14	10	13	71	40.1
Non endetté	13	21	9	7	11	61	34.5
Total	51	36	29	27	34	177	100

Sources: enquête

**Tableau 5 : Besoin de crédit pour l'équipement agricole**

classe	nécessiteux en crédit		Non nécessiteux en crédit		Total
	Effectif	% ligne	Effectif	% ligne	Effectif
A	11	61,1	7	38,9	18
B	26	50	26	50	52
C	68	63,6	39	36,4	107
Total	105	59,3	72	40,7	177

### Références Bibliographiques

- **Fournier Y., 1995.** Les systèmes financiers ruraux , communication présentée au séminaire sur les systèmes financiers ruraux au Mali Sud. Sikasso Mai.
- **Gakou A. ; Kébé, D.;Traoré B., 1996.** Gestion de la fertilité des sols au Mali, Esquisse de plan d'action. Banque Mondiale. Bamako
- **Koné Y. ; Dembelé, I. ;Kater, L. ; Koné, D., 1998.** Organisation et contraintes des systèmes d'approvisionnement des producteurs ruraux en engrais dans les zones d'encadrement de la CM DT et de l'ON. IER. Niono
- **Sissoko K., 1998.** Et demain l'Agriculture? Options techniques et mesures politiques pour un développement agricole durable en Afrique subsaharienne. Cas du Cercle de Koutiala en zone sud du Mali. Doctorat, WaginighenTémé B., Breman, H.; Sissoko, K., 1995. Intensification agricole au Sahel: Mythe ou réalité? Rapport de synthèse du colloque international sur l'intensification au Sahel. IER. Bamako .

ignorés. L'octroi du crédit est peu contrôlé et/ou assujetti à des conditions d'octroi très flexibles, les dossiers sont techniquement mal étudiés; la coexistence de deux ou plusieurs établissements de crédit dans un même village , la capacité d'endettement mal étudiée ou pas prise en compte, du fait de l'absence de centrale des risques.

Ayant profités de ce dysfonctionnement, du manque d'informations et de collaboration entre les responsables des réseaux de caisse, plusieurs villages se sont endettés simultanément auprès de la BNDA, du FDV (voir tableau dettes antérieures).

#### 3.2.3. Risque climatique et difficultés de drainage de l'eau

Ce phénomène est surtout signalé dans les zones non réaménagées où la maîtrise de l'eau est partielle ou non. De ce fait le drainage constitue un handicap sérieux pour l'irrigation entraînant de graves conséquences sur le plan agronomique et environnemental. A cela vient s'ajouter très souvent le problème des eaux diluviennes au cours des années de bonne pluviométrie. Sous équipés dans la majorité des cas (60%), les paysans se sentent incapables de faire face à de tel phénomène naturel.

### IV. CONCLUSION

L'endettement des paysans de l'ON auprès des institutions financières concerne toutes les zones et toutes les catégories d'exploitations. Le phénomène est historique et est antérieure au processus de la

libéralisation de la filière riz. Plusieurs facteurs exogènes et endogènes ont joué en faveur de l'endettement des exploitations. Les facteurs endogènes concernent le détournement de l'objet de prêt, le non respect du calendrier agricole et le manque d'organisation du système de stockage du riz paddy. Les facteurs exogènes ont été l'apprentissage de la libéralisation, les risques pluviométrique et le manque de concertation entre les principales institutions financières de la place.

Pour restaurer la confiance entre les institutions financières offreurs de crédits et les paysans qui en sont les demandeurs, il est nécessaire de réduire l'asymétrie d'information et de communication entre les deux partenaires. Cette réflexion passe par la prise en compte des facteurs qui ont contribué à l'effet de pollution d'endettement de la zone Office.

Compte tenu des enjeux majeurs autour de la filière riz au Mali,notamment dans le cadre de la conquête du marché sous régional, la mise en oeuvre d'une stratégie de financement durable de l'exploitation familiale à l'ON reste centrale et récurrente. Dans cette réflexion, une politique du financement de l'investissement productif sera déterminante. Elle interpelle tous les acteurs de la filière, producteurs, financiers, chercheurs, décideurs politiques, bailleurs de fonds.

# SYSTEME D'IRRIGATION TRADITIONNELLE PAR KHETTARAS DANS LE SUD EST MAROCAIN FONCTIONNEMENT ET ROLE DANS LA SAUVEGARDE DE LA VIE DANS LES OASIS

M. Ouhssain<sup>1</sup>

## PREAMBULE

L'eau, élément indispensable pour la survie de l'espèce humaine, a été depuis l'aube de l'histoire une source de conflits entre les tribus, les civilisations et même les personnes. Malgré ça plusieurs peuples, et dans le but de satisfaire leurs besoins en aliments de base en eau potable ont inventé l'irrigation, qui consiste à approvisionner les cultures en eau par des moyens artificiels, en vue de permettre l'agriculture dans les zones arides et de compenser les effets de la sécheresse dans les zones semi-arides. Même dans les zones où les précipitations saisonnières totales sont en moyenne adéquates, elles peuvent être inégalement réparties pendant l'année et variables d'une année sur l'autre. Là où l'agriculture pluviale traditionnelle comporte de gros risques, l'irrigation peut contribuer à garantir une production stable.

Par ailleurs les eaux d'irrigations sont, selon les régions, soit d'origines superficielles ou souterraines. Plusieurs techniques ont été utilisés par les agriculteurs. En effet les agriculteurs de l'Afrique du Nord ont utilisé des systèmes allant du simple au complexe, notamment la naâoura, aghrur, jadouf, et khattaras et bien d'autres.

Dans les régions du sud-est du Maroc, l'eau est si important que l'organisation sociale des communautés traditionnelles est liée à la conquête et la mobilisation de cet élément vital.

Il n'est donc pas surprenant de le voir occuper le centre de la

préoccupation de la population oasienne qui a su accorder à cette question l'importance qu'elle mérite en déployant des efforts titaniques à la recherche de l'élément de fécondation l'eau. Evoquer le problème de l'eau dans les collectivités traditionnelles, c'est évoquer toute la société à tel point ...

Dans cette région qui ne bénéficie pas des eaux de surfaces les faibles quantités de pluies qui tombent condamnent la population oasienne à chercher l'eau sous terre. La récupération de ces eaux se fait depuis des temps immémoriaux par des techniques simples mais d'une grande ingéniosité, les KHETTARAS et les AGHROURS sont les plus symboliques de ces sociétés hydrauliques méridionales.

Evoquer les khattaras c'est évoquer la raison d'être des agglomérations villageoises et les organisations qui sont faites pour et par ses systèmes....

Dans cet article, il est question du système traditionnel de mobilisation des eaux souterraines par les Khéttaras dans la région du sud est du Maroc, leur fonctionnement et leur situation en temps actuel.

## LE SYSTEME DE LA KHETTARAS (TARGA) :

Certaines régions du Sahara sont riches en eaux souterraines. Cela a permis, vers le 1<sup>o</sup> siècle, le percement d'un extraordinaire système de captage et d'adduction d'eau sur le modèle existant dans certaines régions de la Mésopotamie. Pour couvrir les

besoins en eau et lutter contre l'aridité importante de la terre sans laisser prise à l'évaporation, parfois considérable dans le Sahara, il a fallu trouver un moyen d'irrigation adapté: C'est le système des "khattaras" (ou "TARGA" en Tamazight)<sup>2</sup>.

Cependant plusieurs écrits historiques affirment que ce système est une pure création des habitants de l'Afrique de Nord « Imazighen ». Malika Hached, dans son ouvrage « Les premiers berbères » confirmer cette hypothèse en se basant sur les gravures rupestres existant à nos jours dans le Sahara algérien.

Selon L.C.Briggs, le système des khattaras est très fortement développé dans la partie occidentale du centre du Sahara. Certains estiment que ce sont des Juifs ou des Berbères judaïsés réfugiés de la Cyrénaïque qui auraient introduit les khattaras au Sahara occidental il y environ deux mille ans. Ce système existe tout au long d'une ligne partant du Sud Marocain en direction du sud-est et traversant le Hoggar puis en direction de l'est traversant le Fezzan,

En fait, la Khéttaras est une canalisation souterraine construite pour alimenter les jardins dans les palmeraies, lorsqu'il n'est pas possible de creuser des puits. Elle peut avoir un développement de 2 à 10, voire 15 kilomètres. Les canalisations suivent une pente légère (quelques millimètres de dénivelé par mètre) et courent à environ 5 ou 10 mètres sous la surface du sol. La khattara proprement dite a un diamètre

1. Ingénieur d'Etat en Génie Rural - MAROC - Email : m\_ouhssain@hotmail.com

2. semble être originaire de la Perse et remonter à une antiquité reculée. On en trouve déjà la mention au V<sup>o</sup> siècle av.J.-C., dans Hérodote (Melpomène 120) [...]. On possède également, grâce aux narrations de Polybe (X-23.25), des renseignements détaillés sur les khattaras de la Perse du III<sup>o</sup> et du II<sup>o</sup> siècle av. J.-C. "(J.M.Solignac).



suffisant (1 m à 1,20 m) pour permettre le déplacement d'un homme courbé, travailleur progressant d'aval en amont au moment du percement, et ouvrier circulant pour effectuer des travaux d'entretien.(fig1)

En surface, les cônes de déblais ou les ouvrages maçonnés jalonnent le trajet de la khattara (et de l'eau) entre la nappe et le bassin de réception. Construits tous les 12 à 15 mètres, ces cônes protègent l'orifice en même temps qu'ils permettent de surveiller l'écoulement et, au besoin, de descendre dans la khattara pour débayer le point précis de la galerie qui viendrait à être obstrué. Au débouché de chaque canalisation dans la palmeraie, l'eau est reçue dans un bassin.

**Exploitation des eaux des khattaras**

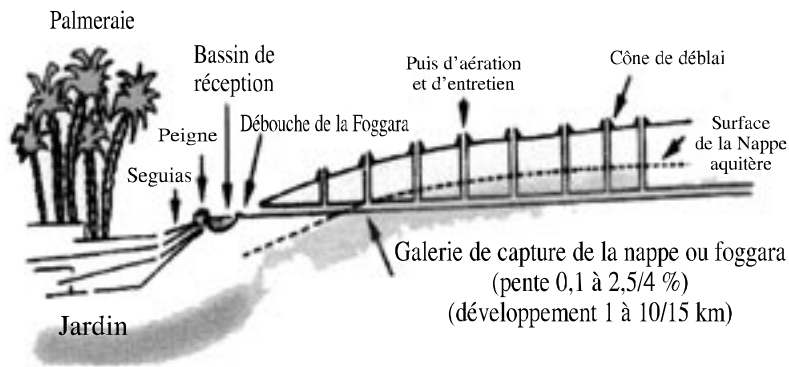
La gestion des eaux véhiculées par les khattaras obéit à des lois coutumières de réparation appelées «Droits d'eau». C'est le volume de travaux fournis par usager lors de l'édification de la khattaras qui constitue la référence d'appropriation de la ressource, laquelle se transmet d'une génération à une autre. Ces règles continuent à servir de base pour l'organisation des travaux de maintenance et d'entretien.

Le détenteur d'un droit d'eau peut en faire usage, le vendre ou le louer pour une période déterminée, il peut également en faire associer d'autres usagers.

Le système de répartition des eaux qui prédomine est celui dit «de parts» dont l'unité est appelée «Nouba» ou «Fardia» correspondant à une durée de 12 heures durant laquelle le ou les détenteurs de parts bénéficient de la totalité de débit de la khattara.

Le tour d'eau est fonction du nombre de Nouba, il est par exemple de 15 jours lorsque le nombre de nouba est de 30.

La répartition de l'eau est assurée entre les propriétaires selon le tour d'eau et sous le contrôle du Cheikh



**Figure 1:** Schéma approximatif d'une khattaras



**Fig. 2**

et des Mezrags qui jouent le rôle d'aiguadiers communautaire.

**Gestion des Khéttaras**

Un droit d'eau se traduit également par des obligations de fourniture de prestations d'entretien. Ce sont les aiguadiers communautaires qui prennent en charge l'organisation de la fourniture de ces prestations en rappelant les ayants droits chaque fois que le besoin y est.

Les travaux d'entretien conduits sous la supervision de ces aiguadiers concernent généralement, le curage, le déblocage, l'obturation des fuites, etc... Pour ce type de travaux les ayants droits mettent à la disposition des aiguadiers la main d'œuvre nécessaire.

Dans le cas de travaux de construction en maçonnerie, en béton ou d'extension en amont, la formule adoptée consiste à créer un fond de caisse dont la contribution de chaque usager est fonction des parts qu'il détient.

L'ingéniosité du procédé réside dans sa conception et son adaptation aux conditions de la vie et du climat sahariens : Il supprimait les corvées d'eau épuisantes, qui prenaient

l'essentiel du temps des habitants, et assurait un approvisionnement à débit constant, sans risque de tarir la nappe d'eau et en limitant l'évaporation au minimum.

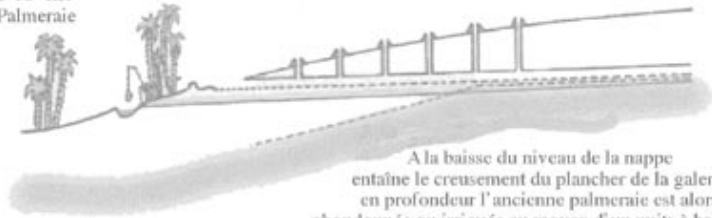
La réussite de cette technique continue aujourd'hui encore à faire l'admiration des observateurs. "Il ne peut pour ainsi dire jamais au pays des fgagir (khattaras). Et cependant, depuis plus de dix siècles, à chaque heure, la moindre khattara soutire plusieurs mètres cubes d'eau souterraine dont le remplacement pluviométrique est manifestement impossible" (J.Savornin).

"En utilisant quelques suintements après un labeur énorme et une dépense stupéfiante d'ingéniosité, l'homme [...] a fait naître une agriculture savante, intensive, ce qu'on connaît de plus évolué en matière d'agriculture [...]".

**Evolution des khattaras**

Suite aux problèmes de rabattement de la nappe les ayants droits des eaux des khattaras procèdent au surcreusement des sources à l'amont de la galerie drainante pour maintenir le niveau d'eau et le débit à l'aval (Figure 2).

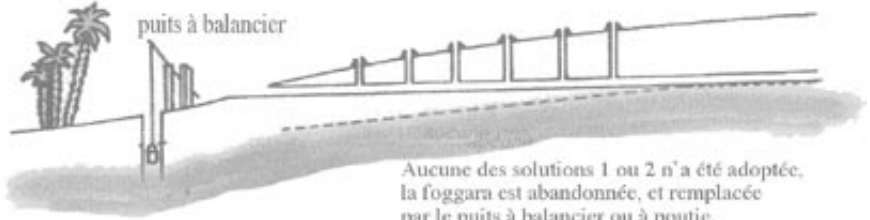
Nouvelle  
Palmeraie



A la baisse du niveau de la nappe  
entraîne le creusement du plancher de la galerie  
en profondeur l'ancienne palmeraie est alors  
abandonnée ou irriguée au moyen d'un puits à balancier

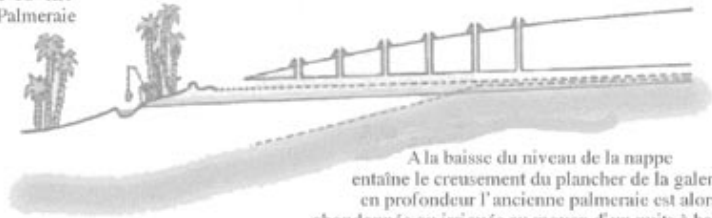
Oasis

## FOGGARA MORTE



Aucune des solutions 1 ou 2 n'a été adoptée,  
la foggara est abandonnée, et remplacée  
par le puits à balancier ou à poutie.

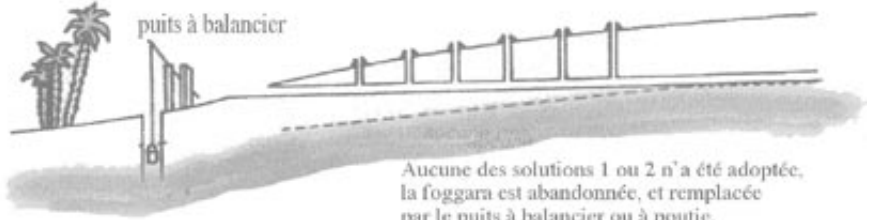
Nouvelle  
Palmeraie



A la baisse du niveau de la nappe  
entraîne le creusement du plancher de la galerie  
en profondeur l'ancienne palmeraie est alors  
abandonnée ou irriguée au moyen d'un puits à balancier

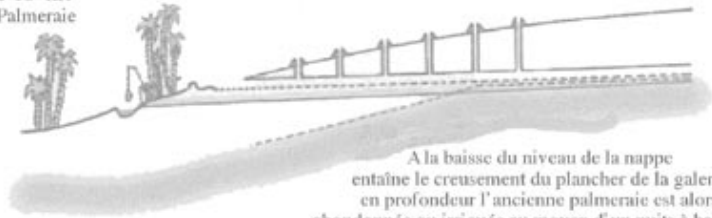
Oasis

## FOGGARA MORTE



Aucune des solutions 1 ou 2 n'a été adoptée,  
la foggara est abandonnée, et remplacée  
par le puits à balancier ou à poutie.

Nouvelle  
Palmeraie



A la baisse du niveau de la nappe  
entraîne le creusement du plancher de la galerie  
en profondeur l'ancienne palmeraie est alors  
abandonnée ou irriguée au moyen d'un puits à balancier

Oasis

## FOGGARA MORTE



Aucune des solutions 1 ou 2 n'a été adoptée,  
la foggara est abandonnée, et remplacée  
par le puits à balancier ou à poutie.

Fig. 3

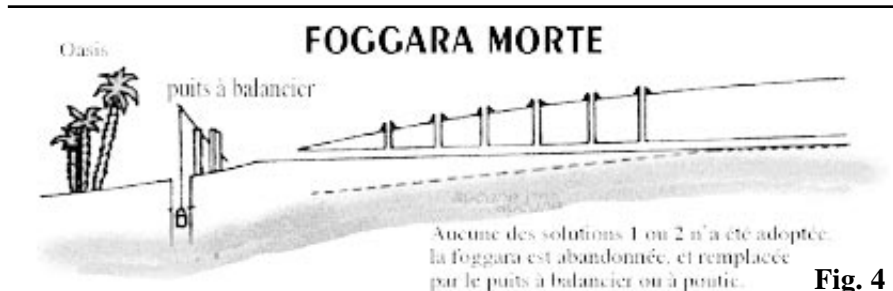
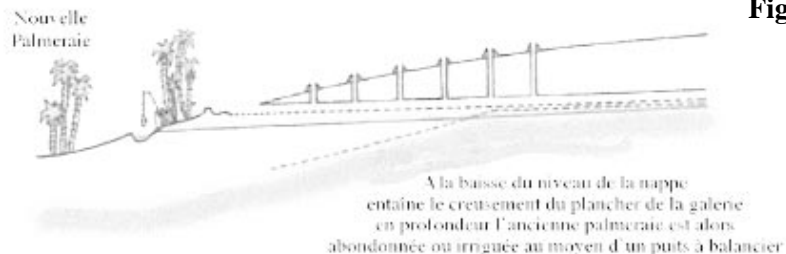


Fig. 4

### Références Bibliographiques :

- Quelques éléments sur la problématique et les développements technologiques de restauration des Khetaras dans le Tafilalet, ORMVA de Tafilalet septembre 2000,
- Programme de développement rural intégré centré sur la petite et moyenne hydraulique, document AGR-DAHA octobre 2000,
- [http://zoumine.free.fr/tt/sahara/eauau\\_sahara.html](http://zoumine.free.fr/tt/sahara/eauau_sahara.html), site web consacré aux khetaras dans les zones arides et semi-arides dans le monde
- L'Ajjer, Sahara central, Jean Dubief, Karthala, (1999): nombreux domaines abordés concernant une zone du Sahara, notamment orographie, géophysique, géologie, climat, hydrologie ... , du tassili au fezzan, du fadnoun à la tadrart .
- Les juifs au Sahara ; le Touat au moyen-âge , J.Oliel , CNRS-histoire , 1994.
- Déserts , Théodore Monod - Jean-marc Durou , AGEP , 1997.
- Les Premiers Berbères, Malika Hachid édisud/ena-yas 2000

Quant le creusement descend à un niveau inférieur à celui de l'ancienne galerie les agriculteurs créent une nouvelle palmeraie à l'aval, l'ancienne palmeraie se trouve abandonnée ou alimente au moyen d'un puits (aghrur ou motopompe par exemple) (figure 3):

Dans le cas extrême ou le creusement n'est pas permis ou par manque de moyens de creusement la khetta est abandonnée et remplacée par un autre moyen (figure 4).

### Situation actuelle des khetaras dans la zone de Tafilalet

Le recensement entrepris au cours du mois d'Août 2000 montre que le nombre de khetaras en fonctionnement dans la zone de Tafilalet est de 308 Khetaras d'une longueur de 1.190 km desservant 155 périmètres d'une superficie totale de 12.750 ha.

La confrontation de ces chiffres aux résultats du recensement général effectué en 1967 montre qu'à l'heure actuelle 262 khetaras d'une longueur d'environ 1.710 km se trouvent abandonnées. Cette situation s'explique par la fréquence des épisodes d'années sèches qui ont conduit au rebattement de la nappe, l'exode rural et les difficultés

rencontrées par les populations encore sur place à fournir les prestations d'entretien nécessaire.

A noter aussi que la réalisation du barrage El Hassan Addakhil en plus de l'aménagement hydro-agricole depuis le début des années 70 a contribué à ce rebattement de la nappe du fait du manque de l'alimentation de la nappe par les eaux de la rivière de Ziz principalement.

### CONCLUSION

L'analyse de ce système, plusieurs fois millénaire, montre à quel point les hommes qui ont occupé ce territoire immense sans ressources en eau ont pu défier la nature hostile à la vie humaine pour le rendre si attrayant et possible pour le développement de plusieurs civilisations.

L'ingéniosité de ce système qui lui permet de résister le long de l'histoire nous interpelle pour approfondir son analyse et son étude de tous les cotés, notamment technique, organisationnel. Ce patrimoine qui s'éteint de plus en plus doit être protégé et mis en valeur par les responsables de ce pays sinon un jour la vie dans le Sud Est n'aura pas de sens sans les oasis dont la plus part est alimentée par des khetaras.



# L'EAU, ELEMENT CONFLICTUEL

M. Serghini\*

## Résumé

Seulement 3% de l'eau de notre planète est douce. Mais le problème relatif à cette ressource réside dans sa répartition inégale à l'échelle mondiale. En effet, neuf pays collectent les 2/3, tandis que les zones arides et semi-arides, qui représentent 40% de la surface terrestre, ne reçoivent que 2% du volume des précipitations annuelles. La croissance démographique, l'urbanisation et le développement économique font que le 21ème siècle sera caractérisé par une pression sans précédent sur cette ressource et plusieurs pays auront de sérieux problèmes pour s'approvisionner en eau. La pollution des ressources hydriques menace plusieurs écosystèmes et la santé des populations. Au 21ème siècle, les pénuries d'eau auront des retombées internationales. Plusieurs bassins hydrauliques sont partagés par deux ou plusieurs pays. Le moyen Orient, l'Afrique et l'Asie sont les régions où les conflits sont latents. La communauté internationale est appelée à trouver un cadre juridique pour éviter les conflits liés à l'eau.

## I- INTRODUCTION

La terre est la planète de l'eau, mais les eaux salées des mers et des océans en constituent la quasi-totalité : 97.2%. En d'autres termes, l'eau douce ne représente que 2,8% des ressources hydriques. Indispensable à toute activité humaine, cette ressource naturelle, est inégalement répartie à l'échelle mondiale. En effet, plus de 70% des ressources en eau renouvelables se trouvent en Amérique et en Asie. Les neuf puissances mondiales de l'"Or Bleu" (Brésil, Russie, Chine, Canada, Indonésie, États-Unis, République démocratique du Congo, Inde, et Colombie) collectent à elles seules les deux tiers de cette ressource naturelle. Inversement, les zones arides et semi-arides, qui représentent 40% de la surface de la planète, ne reçoivent que 2% du volume des précipitations annuelles, estimé à quelques 110 000 Km<sup>3</sup>.

La consommation d'eau a été multipliée par deux au cours des 20 dernières années. Avec une population de plus de 8 milliards d'individus en 2025, le XXIe siècle sera caractérisé par une pression, sans précédent, sur cette ressource. Selon le Water Resources Institute, «26 pays - soit 250 millions d'individus - ne disposent pas, aujourd'hui, du minimum vital d'eau défini à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. 400 millions de personnes vivent en situation de stress hydrique, estimé entre 1000 et 2000 m<sup>3</sup> annuels

par habitant. Et les données de la Banque Mondiale chiffrent à 40% le pourcentage de la population, répartie dans 24 pays, souffrant de pénurie d'eau(1) ». D'après les Nations Unies, le nombre de pays qui subviendront à leurs propres besoins en eau, en 2050, ne dépassera pas une trentaine. A titre d'exemple, si rien n'est fait, d'ici 2025 la moitié de la population du bassin méditerranéen devra faire face à de graves problèmes d'approvisionnement en eau potable. Et comme l'ont souligné la plupart des participants au sommet de Johannesburg, l'accès à l'eau sera un des défis majeurs de ce troisième millénaire.

## II- UNE PRESSION DE PLUS EN PLUS FORTE SUR LES RESSOURCES EN EAU

Les besoins en eau sont considérables, en raison du développement de l'agriculture intensive, de l'essor démographique, de l'urbanisation, de l'industrialisation et du tourisme, qu'en plusieurs endroits, le débit des cours d'eau diminue vers l'aval. C'est ainsi, que plusieurs cours n'atteignant plus la mer durant certaines périodes de l'année. C'est le cas notamment du Nil, du Gange, du fleuve Jaune en Chine et du Colorado, aux États-Unis. La mer d'Aral, en Asie centrale, qui était, en 1960, le quatrième plan d'eau douce à l'échelle mondiale, ne couvre aujourd'hui que 50% de sa superficie initiale, en raison du détournement des deux fleuves qui l'alimentent – Syr-Dar et Amou- Daria – pour l'irrigation

intensive. A long terme, l'affaiblissement des débits des fleuves et des rivières aura des dommages irréversibles sur les écosystèmes. Ainsi, que le "credo" qui consiste à ne laisser pas une goutte d'eau se déverser dans la mer est collectivement suicidaire.

La surexploitation des eaux souterraines a provoqué une baisse du niveau des nappes phréatiques d'où, une intrusion des eaux de mer dans les régions côtières et une accentuation de la désertification dans les zones arides en Afrique et en Asie. La salinisation des terres agricoles par l'irrigation intensive fait que des milliers d'hectares deviennent incultes chaque année. L'"extraction minière" des nappes fossiles (non renouvelables), est une des causes de l'élévation du niveau de la mer affirment certains scientifiques.

Par ailleurs, les problèmes des ressources en eau ne se posent pas seulement en termes quantitatifs, mais ils ont également une dimension qualitative. En effet, dans plusieurs pays, notamment en développement, les eaux usées sont rejetées sans traitement dans les rivières ou s'infiltrent dans les nappes phréatiques. Le non traitement des eaux usées génère des coûts, en soins de santé et en activités économiques perdues, de plusieurs centaines de milliards de dollars par année et menace les écosystèmes. Selon l'union mondiale pour la nature 34% des espèces de poissons d'eau

(\* ) Enseignant Chercheur au Département d'Economie Rurale, Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès, Maroc.

douce sont en voie d'extinction. Et d'après l'organisation mondiale de la santé «2,2 millions de personnes meurent chaque année de maladies diarrhéiques; et l'ensemble des pathologies liées au facteur hydrique est responsable, chaque année, de la mort de plus de 3,5 millions de personnes, en majorité des enfants(2)».

### III- L'EAU EST "SOURCE" DE CONFLITS

Depuis fort longtemps, la rareté des ressources en eau a été à l'origine de conflits entre les usagers, notamment dans les régions irriguées. La rareté des ressources hydriques a donné lieu à des institutions spécialisées dans l'arbitrage des conflits liés à l'usage de l'eau d'irrigation. La croissance démographique, l'urbanisation et le développement économique, ont donné une autre dimension aux conflits liés à l'usage des ressources hydriques; la concurrence n'est plus seulement entre les usagers agricoles et entre les campagnes et les villes, mais entre les usages alternatifs : l'irrigation, l'hydroélectricité, l'eau potable et l'environnement. Les changements climatiques attendus au cours des prochaines décennies amplifieront ces conflits et rendront les arbitrages et les consensus difficiles à obtenir, notamment dans les régions arides et semi-arides.

Au XXI<sup>e</sup> siècle, les pénuries d'eau risquent d'avoir des retombées internationales. Dans plusieurs régions, l'eau douce doit être partagée entre des pays riverains. En effet, «les bassins internationaux recouvrant 47% de la superficie des terres émergées de la planète, à l'exclusion de l'Antarctique, et hébergent 40% de la population mondiale. Cette proportion atteint 60% en Afrique et en Amérique latine. Plus de 300 bassins majeurs sont partagés par 2 ou plusieurs pays à travers le monde, incluant plusieurs nappes souterraines(3)».

L'histoire nous enseigne que la compétition pour l'eau était à l'origine de plusieurs guerres régionales et que cette ressource de vie peut être utilisée comme arme pour obliger les

populations à se déplacer. Le Moyen Orient (bassins du Jourdain et du Tigre-Euphrate), l'Afrique (bassins du Nil, du Sénégal, du Niger, du Congo et Lac Tchad), et l'Asie (bassins d'Indus, du Mékong, du Gange, et de Brahmapoutre), sont les régions, où les conflits liés à l'eau sont latents.

#### 3.1 Moyen orient

Au Moyen Orient, l'eau constitue un enjeu stratégique pour le développement socioéconomique des pays de la région. Pour leur approvisionnement en eau, la Jordanie, la Syrie, le Liban, la Palestine et Israël dépendent du bassin du Jourdain qui comprend le fleuve Jourdain, ses affluents, le lac de Tibériade et l'aquifère de la Montagne situé au cœur de la Cisjordanie. 90% de l'eau de Cisjordanie est aujourd'hui utilisée par les israéliens qui consomment en moyenne 260 litres par habitant par jour, alors que les palestiniens doivent se contenter de 70 litres.

Face à une demande croissante, Israël augmente ses pompages dans le lac de Tibériade, intègre 80% des eaux de Cisjordanie dans son réseau national et surexploite la nappe côtière. Israël qui occupe 55% du territoire régional absorbe 86% des ressources en eau ; les deux tiers de la consommation d'Israël proviennent de l'extérieur des frontières de 1948. Le contrôle des ressources hydriques de la région par Israël fait partie intégrante de sa stratégie de la colonisation des terres arabes.

Le partage des ressources en eau est un des aspects les plus épineux dans le processus du règlement du problème Palestino-Israélien. En attendant! «L'Etat hébreu exploite les eaux palestiniennes sans limite ni contrainte, surtout depuis le déclenchement de la deuxième Intifada qui a fait voler en éclats les accords d'Oslo(4)».

Un tiers de la consommation en eau des Israéliens provient du Golon, terre ancestrale du peuple Syrien. La logique (!) est là pour justifier une telle situation, «pour Israël, il est aujourd'hui inconcevable de se priver

de tout ou partie d'une ressource exploitée depuis plus de trois décennies maintenant (5) ».

La Jordanie, pays de 4,7 millions d'habitants, est en situation de « stress hydrique » avancé ; le quart de sa consommation annuelle provient de ressources non renouvelables. Selon Mohammed Shatanaoui, « si rien n'est fait, le déficit en Jordanie passera de 155 millions de mètres cubes en 1999 à 485 millions de mètres cubes en 2020(6) ». Un des aspects du traité de paix entre la Jordanie et Israël, est de trouver une solution à la réallocation des eaux du fleuve Yarmouk. Or, sept ans après sa signature « il [le traité] n'a pas restitué à la Jordanie tous ses droits sur l'eau (...) Bref, tant que le rapport de forces vis-à-vis d'Israël nous sera défavorable, nous ne pourrons pas être en mesure de défendre correctement nos droits hydrauliques», ajoute Mohammed Shatanaoui.

En 2002, Israël s'apprêterait à bombarder une station de pompage située au sud Liban sous prétexte que ce pays se prépare à puiser 10 millions de m<sup>3</sup> au lieu de 7,5 par an dans la rivière Ouazzani. Ainsi, en plus de l'occupation des territoires, Israël n'hésitera pas de recourir à la force pour garantir son approvisionnement en eau. « Ceux qui tenteraient de détourner le Jourdain ne joueraient pas seulement avec l'eau, mais avec le feu (7) » disait Golda Meir avant la guerre des six-jours. Ce récent conflit entre les deux Etats riverains prouve l'instabilité des équilibres régionaux en matière des partages transnationaux des ressources hydriques.

Dans la même région, la Syrie, l'Irak et la Turquie partagent les eaux du bassin du Tigre-Euphrate. Sauf que dans ce cas-ci, l'équation est encore plus complexe, puisque les deux principaux fleuves de ce bassin, berceau de la civilisation mésopotamienne, trouvent leur source en Turquie, ce qui donne à ce pays une position de force en matière d'allocation de cette ressource stratégique. Au moment, où la Syrie et l'Irak demandent une révision de l'accord signé en 1987 qui garantit au

deux pays un débit de 500 m<sup>3</sup>/s, la Turquie a planifié la réalisation de 22 barrages, lui permettant de stocker 60 milliards de m<sup>3</sup>, ce qui réduirait le débit du fleuve de 40% en Syrie et de 90% en Irak. Les querelles sur les ressources hydriques, dans cette région, sont amplifiées par des différents d'ordre politiques entre la Turquie, la Syrie et l'Irak.

### 3.2. Afrique

En Afrique, plusieurs pays de ce continent partagent les eaux des mêmes bassins. La sécheresse et la surexploitation des ressources hydriques risquent de rendre les conflits inévitables. Dans sa partie australe, les ressources en eau sont partagées entre l'Angola, le Botswana, le Lesotho, le Malawi, le Mozambique, la Namibie, l'Afrique du sud, le Swaziland, la Tanzanie, la Zambie et le Zimbabwe. Mais, c'est surtout le bassin du Nil, dont les eaux sont partagées d'une façon inégale entre neuf pays (Égypte, Soudan, Ouganda, Éthiopie, Burundi, Rwanda, Kenya, Tanzanie et Congo), où les conflits d'usage des ressources en eau sont persistants.

L'eau constamment disponible, grâce au barrage d'Assouan, est partagée entre l'Égypte (55,5 milliards de m<sup>3</sup>) et le Soudan (18,5 milliards de m<sup>3</sup>), selon l'accord de 1959. Or, l'Éthiopie considère comme nuls et non avenus les accords de partage des eaux du Nil entre l'Égypte et le Soudan. Elle fait valoir que plus de 80% du débit du Nil se forme sur son territoire et qu'elle n'en utilise pour l'instant que 0,3%. Sa population de 58 millions d'habitants devrait doubler en 2025; elle entend, comme les autres pays de la région, à développer ses superficies irriguées.

L'exploitation des nappes aquifères fossiles par la Libye ne laisse pas indifférent les pays riverains, notamment le Tchad, le Soudan, le Niger et l'Égypte. Le tarissement des ressources en eau dans cette région fait que les conflits qui ont opposé, par le passé, l'Égypte et le Soudan risquent de se produire à n'importe quel moment.

### 3.3. Asie

En Asie, les eaux du bassin de l'Indus sont partagées entre la Chine, l'Inde et le Pakistan, trois puissances nucléaires dont les relations sont instables et particulièrement conflictuelles. Les eaux du fleuve Indus ont constitué une source de conflit incessante entre l'Inde et le Pakistan jusqu'à la signature d'un traité entre les deux pays en 1960. Le partage des eaux du Gange et des autres rivières est source de conflit entre le Bangladesh et l'Inde. Ce dernier pays est également en conflit avec le Népal qui envisage la construction d'un barrage hydroélectrique sur le Gange.

Le conflit est également latent entre la Russie et la Chine au sujet du fleuve Amour. En Europe, le partage des eaux du Danube est source de conflit entre la Slovaquie et la Hongrie. En Amérique du Nord, les accords de libre-échange (ALENA et ZLEA) pourraient être exploités par les firmes multinationales pour faire de l'eau une marchandise à grande échelle ce qui ne laisserait pas indifférent les pays de la région, notamment le Canada.

L'eau est devenue un enjeu majeur non seulement entre États qui partagent les mêmes bassins, mais elle est également source de conflit entre les populations d'un même pays, comme c'est le cas du fleuve de Colorado aux États-Unis et le fleuve d'Èbre en Espagne.

## IV- ABSENCE D'UN CADRE JURIDIQUE

Le conflit entre les États-Unis et le Mexique à la fin XIX<sup>e</sup> siècle, concernant les eaux du fleuve Rio Grande, a donné lieu à deux "principes" inconciliables dans le domaine de l'allocation des ressources en eau. Le premier "principe" est celui de la souveraineté territoriale illimitée, il implique que le pays qui se trouve en amont du cours d'eau contrôle celui-ci intégralement. Le second "principe" est celui de l'intégrité territoriale illimitée, par lequel tous les pays traversés par le même cours d'eau sont sur un pied d'égalité. Ainsi, lors des conflits liés à l'usage des ressources en eau, chaque pays évoque

le principe selon sa situation par rapport au cours d'eau.

Pour dépasser ces deux "doctrines" inconciliables et trouver des compromis en matière d'allocation des ressources hydriques, d'autres "principes" ont été introduits, notamment de communauté d'intérêt, de souveraineté territoriale limitée et d'utilisation équitable et raisonnable. Ces "principes", ont été énoncés dans les déclarations de Stockholm (1972) et de Rio (1992) sur l'environnement et le développement.

Le principe 21 de la déclaration de Stockholm cherche à établir un équilibre entre la souveraineté territoriale et la protection de l'environnement. Il stipule que les États ont le droit souverain d'exploiter leurs propres ressources selon leur politique d'environnement et ils ont le devoir de faire en sorte que les activités exercées dans les limites de leur juridiction ou sous leur contrôle ne causent pas de dommage à l'environnement dans d'autres États ou dans des régions ne relevant d'aucune juridiction nationale. En matière des ressources en eau, ce "principe" assure aux pays situés en aval des cours d'eau un approvisionnement aussi bien quantitatif que qualitatif.

La protection de l'environnement, la coopération, l'égalité et le respect de la souveraineté et des intérêts, sont les ingrédients du principe 24 de la même déclaration. Ce "principe" invite les États à conclure des accords bilatéraux et multilatéraux afin de résoudre pacifiquement les conflits liés à l'usage des ressources naturelles.

Le "principe" 19 de la déclaration de Rio, sur l'environnement et le développement, souligne l'obligation de communiquer aux États riverains les conséquences probables des projets de détournement ou de retenue, dans le cas des ressources en eau. Selon ce "principe", les États doivent notifier suffisamment à l'avance les États pouvant être affectés et leur communiquer toute information pertinente sur les activités qui peuvent avoir des effets transfrontières sérieusement négatifs sur l'environnement et mener des

### Références bibliographiques

- (1) Alice Rolland, "H2O : l'Étoffe de la Vie", Science et Vie, n0 211, juin 2000.
- (2) Deléage Jean-Paul, "Environnement: le Legs Empoisonné", Manière de Voir, N.65, le Monde Diplomatique, septembre octobre 2002.
- (3) Ministère des Relations Internationales du Québec, "Les Enjeux Stratégiques de l'Eau et les Initiatives Internationales Récentes", décembre 1999.
- (4) Chesnot Christian, "Un Enjeu du Conflit Israélo Arabe", Manière de Voir, N.65, le Monde Diplomatique, septembre octobre 2002.
- (5) Idem.
- (6) Idem.
- (7) Pierre Aain Roche, "L'Eau au XXIème siècle: Enjeux, Conflits, Marché", <http://www.ifri.org>.
- (8) Federico Mayor, "Water and Civilization", in Actes du premier Forum mondial de l'eau, Elsevier science, Oxford, 1997.
- (9) Ignacio Ramonet, "Une Ressource Stratégique", La Ruée Vers l'Eau, Manière de voir 65, Le Monde Diplomatique, septembre-octobre 2002.

consultations avec ces États rapidement et en toute bonne foi.

Mais, à part la convention de Barcelone (1921) qui régie les aspects relatifs à la navigation internationale, Il n'existe aucun cadre juridique international pour arbitrer les conflits liés à l'allocation des ressources en eau partagées ; la convention adoptée par l'assemblée générale des nations unies en 1997 n'est pas encore ratifiée.

### V- CONCLUSION

Certes, les traités bilatéraux et multilatéraux ont fait éviter certains conflits militaires, mais il semble que le problème du partage des ressources hydriques, avec ses dimensions stratégique, politique, économique, agricole, démographique et environnementale, sera l'un des plus délicats et des plus complexes à résoudre. Ainsi, il est temps que l'eau soit considérée comme une ressource universelle ne pouvant être captée unilatéralement par une puissance régionale. La communauté

internationale doit se mettre d'accord sur un droit international pour éviter les conflits armés et assurer un usage équitable et durable de cette ressource naturelle, qui selon le directeur général de l'UNESCO, «doit être considérée comme un trésor naturel faisant partie de l'héritage commun de l'humanité(8)». Mais, comme l'a dit Ignacio Ramonet « l'eau est devenue une denrée rare et une ressource stratégique. Les tensions qu'elle suscite ici et là ne sont que les signes avant-coureurs de rupture plus profondes et de crises plus graves. L'eau douce est un indéniable enjeu du XXIe siècle. A moins que, dans la prochaine décennie, on trouve un procédé peu coûteux de désalinisation de l'eau de mer...(9) ». Orienter une partie des budgets d'armement, à l'échelle mondiale, au profit de l'investissement dans la recherche scientifique pour atteindre ce noble objectif réduirait les conflits, la pauvreté et la famine dans le monde.