

DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'ENTERRAGE DE SEMOIR DIRECT POUR LE TRAVAIL EN SOL SEC

E.H. BOURARACH¹, A. BOUZZA² ET A. NOUSFI³

Au Maroc, la technique du semis direct des céréales n'est à l'étude que depuis une dizaine d'année. Ainsi, BOUZZA (1986 et 1990) a montré que dans des zones semi-arides de moins de 400 mm de précipitations annuelles, le semis direct permet une économie d'eau. Aussi, le semis direct procure des rendements supérieurs au travail conventionnel de 250 à 1100 Kg/ha. Cette supériorité est plus prononcée en blé continue qu'en rotation blé - jachère. De son côté BOURARACH (1989) a montré que le semis direct permet une économie de temps de 45 à 70 % respectivement par rapport aux travaux réduits et conventionnels. Durant les années à pluviométrie satisfaisante aucune différence significative quant au rendement grain n'est décelée entre le semis direct et les autres séquences techniques de travail du sol pratiquées dans le pays. Durant les années de sécheresse, le semis direct maintient un rendement appréciable et souvent équivalent à celui des travaux conventionnels tout en minimisant les coûts d'installation des céréales. Les résultats des travaux susmentionnés et ceux de DAHANE (1992) ont montré que les semoirs commerciaux actuellement disponibles sur le marché ne sont pas adaptés aux conditions sèches et qu'il est nécessaire de développer un semoir direct spécifique aux conditions pédoclimatiques marocaines.

Le présent travail a pour objectif de mettre au point un prototype d'un élément d'un semoir direct pour le travail en conditions sèches, en optimisant ses différentes composantes : coutre circulaire, soc ouvreure et roue plombeuse.

I. MATERIEL ET METHODES

Les essais ont été menés sur deux sites dans la région de Settât à climat semi-aride à hivers frais et dont la pluviométrie annuelle moyenne est de 390 mm : Sidi El Aidi et Jemaa Riah. Le site de Sidi El Aidi est caractérisé par un sol calcimagnésique, brun clair à texture argileuse humifère

en surface (1.7 % de matière organique) et se fissure avec le dessèchement (BOUKSIRAT, 1986). Le site de Jemaa Riah est caractérisé par un sol limono-argileux ayant un comportement battant et tend à devenir dur et cohérent en conditions sèches. L'humidité et la densité apparente du sol dans les deux sites sont données au Tableau I. Les mesures pénétrométriques à l'aide d'un pénétromètre dynamique manuel (Tige de Kunzel ; m = 10 kg, h = 0.5 m, O base = 24.2 mm) ont montré que pour atteindre une profondeur de pénétration de 0.06 m, il faut une énergie d'environ 20 J à Sidi El Aidi et 100 J sur le site de Jemaa Riah.

Tableau I. Humidité pondérale et densité apparente du sol au moment des essais sur les sites de Sidi El Aidi et de Jemaa Riah

Site	Profondeur (m)	0-0.05	0.05-0.10
Sidi El Aidi	Humidité pondérale (%)	7.50	11.60
	Densité apparente Mg/m ³	1.13	1.28
Jemaa Riah	Humidité pondérale (%)	8.15	10.10
	Densité apparente (Mg/m ³)	1.30	1.32

Chaque site a été choisi pour tester les conditions extrêmes de travail. Le site de Sidi El Aidi à sol relativement meuble a été retenu pour l'essai de traitement de résidus végétaux et le site de Jemaa Riah à sol dur a été retenu pour mettre à l'épreuve les socs ouvreurs et les roues plombeuses.

Le prototype utilisé dans les essais est présenté à la figure 1. Il se compose des éléments constitutifs suivants : un coutre circulaire un soc ouvreure (Figure 2a) muni de deux soc-tubes de localisation des engrais et des semences (Figure 2b) et d'une roue plombeuse à surface convexe (Figure 2c) permettant de refermer le sillon, de retasser le sol et de limiter la profondeur de travail.

¹ Enseignant - chercheur à l'institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (Dpt. de Machinisme Agricole)

² Chercheur à l'institut National de la Recherche Agronomique (CRRRA-Settat)

³ Ingénieur (Directeur de CT) à la Direction Provinciale de l'Agriculture de Safi, Maroc

I.1. Essai I

Le coultre circulaire étudié est formé de deux disques de diamètres différents montés sur le même axe et séparés par une entretoise. Trois valeurs du diamètre du grand disque ont été testées (350, 400 et 460 mm) et trois variantes de la différence entre le grand et le petit disque ont été adoptées. La distance entre les deux disques (largeur de l'entretoise) a été fixée à 25 mm. La couverture du sol en résidus retenus est de 30 %. Elle correspond à 1200 kg de paille/ha (BALIRI, 1992 ; DAHANE, 1992). Les paramètres mesurés dans cet essai sont le nombre de tiges de paille et la profondeur de pénétration.

I.2. Essai II

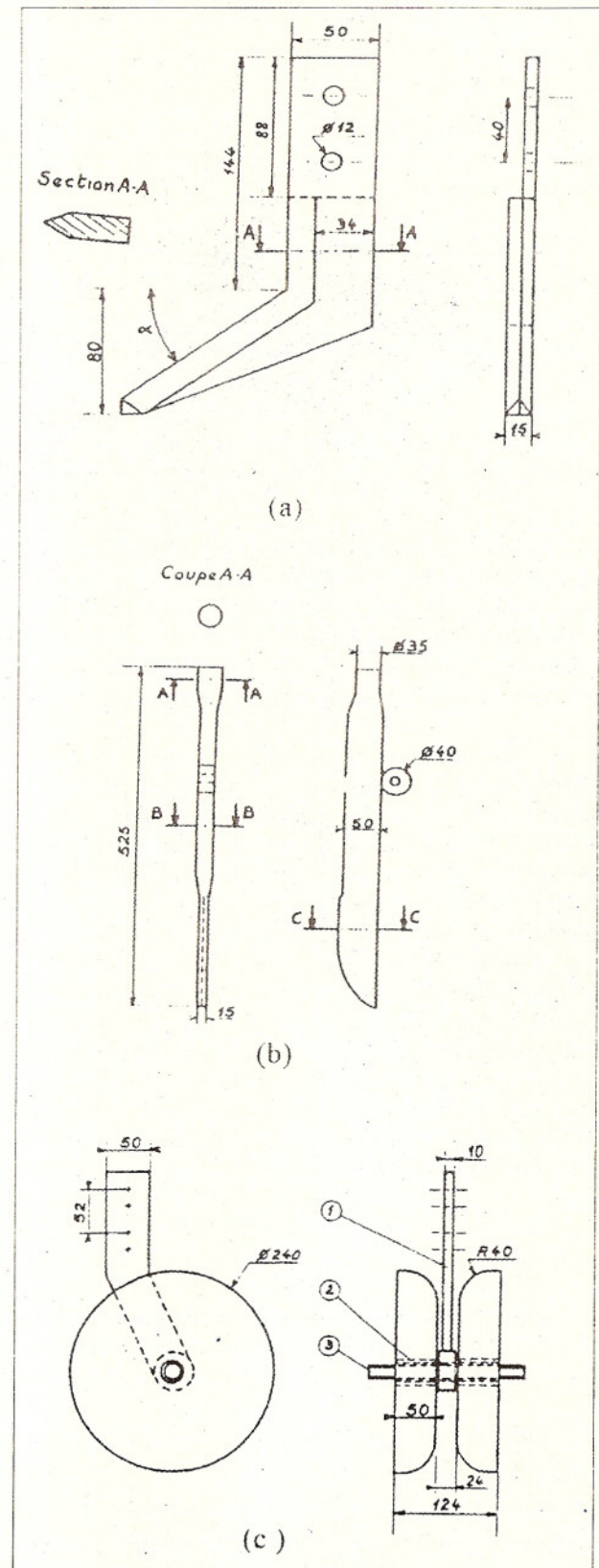
L'angle d'entrure du soc ouvreur (Figure 2a) constitue le facteur testé. Quatre variantes ont été choisies (25°, 40°, 55° et 70°). L'angle du double - tranchant du soc est de 30°. Dans cet essai, la profondeur de pénétration du soc, le nombre de mottes de plus de 40 mm formées à la surface et l'effort de traction ont été mesurés.

I.3. Essai III

Au cours de cet essai, nous avons tenté d'étudier l'interaction entre la distance entre les deux disques du coultre (appelée largeur de l'entretoise), la forme de la roue plumbeuse et le soc ouvreur. Cet essai s'est déroulé en deux phases. Durant la première phase, seuls les disques et le soc ouvreur ont été montés sur le cadre d'expérimentation. Durant la deuxième phase la roue plumbeuse a été rajoutée au premier montage en vue d'observer son action sur les mottes soulevées. La forme de la roue plumbeuse et l'épaisseur de soc ouvreur ont été gardées constantes (Figure 2a et 2c). Trois largeurs de l'entretoise du double - disque ont été testées (15, 25 et 35 mm). Les paramètres suivants ont été suivis : le diamètre moyen pondéré des agrégats créés, l'indice de finesse et l'effort de traction requis.

Au cours des trois essais, la vitesse d'avancement a été fixée à 1.33 m/s (8 km/h). Cette vitesse a été dictée par la nécessité d'augmenter le rendement horaire du semis qui coïncide généralement avec une période de pointe des travaux d'installation des cultures d'automne. Le poids du prototype varie de 150 à 170 kg selon qu'un seul organe ou les quatre à la fois sont montés sur le cadre d'expérimentation.

Figure 2 : Principaux éléments du semoir direct étudié (a) soc ouvreur (b) soc-tubes de descente (c) roue plumbeuse.



II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

II.1. Essai I

Le tableau 2 résume les observations concernant les performances du double disque de point de vue traitement des résidus végétaux.

Tableau 2 : Pourcentage de tiges coupées par le double disque

Différence de diamètre (mm)	Diamètre du grand disque (mm)		
	460	400	340
20	98.66	100.00	97.33
40	97.33	97.33	98.66
60	93.33	96.00	94.66

E.T. : 2.43 %, C.V. : 2.5 %

L'analyse statistique* des valeurs observées montre que le diamètre du grand disque n'a pas d'effet significatif sur le pourcentage de tiges coupées. Alors que la différence de diamètre entre le grand et le petit disque a un effet hautement significatif ($\alpha = 1\%$) sur la variable observée. Cependant, il n'y a pas d'interaction entre ces deux facteurs.

Les comparaisons multiples des moyennes (Test de Newman-Keuls) concernant le facteur différence de diamètre entre le grand et le petit disque, montrent que le groupe de variante 20 et 40 mm est plus performant du point de vue pourcentage de tiges coupées que la variante 60 mm. Nous avons constaté que lorsque la différence de diamètres est faible (20 mm), les tiges de paille sont fréquemment coupées en 3 brins. Alors que dans le cas contraire (différence de 60 mm) les tiges sont généralement coupées en deux brins. Ceci permet de conclure que dans ce dernier cas, seul le grand disque est intervenu dans la coupe, le petit disque n'atteint pas la tige. Ainsi, dans les conditions sèches de cet essai, les trois gammes de doubles disques testées donnent satisfaction de point de vue traitement des résidus végétaux des céréales.

Les résultats des mesures de la profondeur de travail du coutre sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Profondeur de pénétration (mm) du double disque en fonction du diamètre du grand disque et de l'écart entre le grand et le petit disque

Différence de diamètre (mm)	Diamètre du grand disque (mm)		
	460	400	340
20	80	83	91
40	81	89	96
60	84	93	97

E.T. : 4.8mm, CV. : 5.4 %

L'analyse statistique des valeurs observées a montré que le diamètre du grand disque a un effet très significatif ($\alpha = 1\%$) sur la profondeur de pénétration dans le sol. De

même, la différence de diamètres a occasionné un effet hautement significatif ($\alpha=1\%$) sur cette même variable. Cependant, il n'y a pas d'interaction entre ces deux facteurs. Par ailleurs, les comparaisons multiples des moyennes (Test de Newman Keuls) concernant le diamètre du grand disque ont montré que les trois gammes de diamètre testées diffèrent deux à deux. Autrement dit, plus les diamètres des disques sont petits, plus le pouvoir de pénétration du double disque dans le sol est grand. Ceci a été démontré par Shaaf et al. (1983).

De même, les comparaisons multiples des moyennes concernant la différence de diamètre entre le grand et le petit disque ont montré que le groupe de différence 40 et 60 mm a un pouvoir de pénétration dans le sol supérieur à celui du double de disque de différence 20 mm. Ainsi, un double disque dont la différence de diamètres est grande se comporte dans le cas extrême comme un simple disque du point de vue pénétration dans le sol.

II.2. Essai II

Les profondeurs de pénétration du soc ouvreur mesurées dans cet essai sont consignées au Tableau 4. L'analyse statistique des valeurs observées a montré que l'angle d'entrure du soc ouvreur a un effet hautement significatif ($\alpha=1\%$) sur la profondeur de pénétration. Les comparaisons multiples des moyennes (test de Newman-Keuls) ont montré que les surs testés diffèrent deux à deux. Ainsi, plus l'angle d'entrure est petit, plus la profondeur de pénétration est importante. Autrement dit, un angle d'entrure faible facilite la pénétration du soc qui se trouve plus sollicité vers le bas.

D'autre part, les écarts types des valeurs observées dans chaque traitement (Tableau 4) permettent de conclure que le soc d'angle d'entrure de 25° travaille à une profondeur moins stable que les autres socs (E.T. = 10.2 mm). Ceci peut être expliqué par le fait que ce soc subit une grande résistance et plus d'accoups en travaillant plus profondément. De même, le soc de 70° exerce une action d'émiettement relativement plus énergique sur le sol que ceux à angle d'entrure plus faible. Cette action est contrariée par une grande résistance. Ainsi, dans ce cas aussi le ressort de rappel entre fréquemment en action, provoquant des accoups, ce qui induit une variation de la profondeur de pénétration (E.T. = 8.3 mm).

Tableau 4 : Profondeur moyenne de pénétration du soc ouvreur pour différents angles d'entrure (site Jemaa Riahi)

Angle d'entrure	25°	40°	55°	70°
Profondeur de pénétration (mm)	91.3	81.0	73.4	65.7
Ecart type (mm)	10.2	4.0	6.6	8.3

Par ailleurs, l'analyse statistique des valeurs observées concernant les agrégats dont la taille est

supérieure à 40 mm (Tableau 5) a montré que l'angle d'entrure du soc ouvreur a un effet hautement significatif ($\alpha=1\%$) sur le nombre de mottes déplacées en surface et par conséquent sur l'état de la surface obtenu.

Tableau 5 : Nombre moyen de mottes par m² ayant plus de 40 et 80 mm, déplacées en surface sous l'action du soc ouvreur en fonction de l'angle d'entrure

Angle d'entrure	25°	40°	55°	70°	
Taille > 40 mm	98	66	48	32	E.T. : 16.88 C.V. : 27.7 %
Taille > 80 mm	26	8	4	0	

Les comparaisons multiples des moyennes (test de Newman-Keuls) ont montré que le soc de 25° déplace plus de mottes en surface que les autres socs testés. Aussi, le groupe des socs de 55° et de 70° forme le nombre le plus faible de mottes. D'autre part, l'analyse statistique des valeurs concernant les agrégats dont la taille est supérieure à 80 mm a montré également que l'angle d'entrure du soc a un effet hautement significatif ($\alpha = 1\%$) sur le nombre de mottes déplacées en surface.

Ces résultats permettent de conclure que plus l'angle d'entrure est faible, plus le soc a tendance à déplacer le sol sous forme de mottes vers la surface et plus la taille des agrégats est importante. Autrement dit, plus l'angle d'entrure est grand, plus le soc a tendance à laisser le sol émietté à l'intérieur du sillon, en exerçant une action élatrice relativement plus faible sur les agrégats.

Les valeurs de l'effort de traction mesurées sont trop dispersées pour se prêter à une analyse statistique. Néanmoins les résultats obtenus sont synthétisés au Tableau 6 et permettront d'affiner le cahier des charges du semoir direct recherché. Ces résultats montrent tout de même une tendance à l'accroissement de l'effort de traction avec l'augmentation de l'angle d'entrure, ce qui est conforme aux résultats obtenus par Spoor (1969) pour des dents de cultivateur.

Tableau 6 : Caractéristiques de l'effort de traction du soc ouvreur (daN) en fonction de son angle d'entrure

Angle d'entrure	Effort Max	Effort Min	Effort Moyen	Ecart Type
25°	39.53	1.19	18.62	9.71
40°	34.80	0.83	19.51	10.39
55°	58.17	2.96	21.27	12.58
70°	31.43	5.81	22.62	7.02

II.3. Essai III

L'effet de la distance entre les disques du coutre (largeur de l'entretoise) sur le diamètre moyen pondéré des

agrégats formés (DMP) et sur l'indice de finesse (If) est présenté respectivement au Tableau 7 et 8. L'analyse statistique des valeurs observées concernant le diamètre moyen pondéré (DMP) et l'indice de finesse (If) a montré que la largeur de l'entretoise du double disque a eu un effet hautement significatif ($\alpha = 1\%$) sur les variables précitées. Les comparaisons multiples des moyennes (Test de Newman-Keuls) concernant le DMP ont montré que les trois largeurs testées diffèrent deux à deux. Autrement dit, plus la distance entre les deux disques est importante plus la taille des agrégats est grande. De même, les comparaisons multiples des moyennes concernant l'If ont montré que la largeur de 15 mm occasionne une structure plus fine que les largeurs de 25 et de 35 mm. Entre ces deux dernières, on ne note aucune différence significative. Ainsi, plus l'écartement des disques est faible, plus la bande de sol soulevée par le soc ouvreur est étroite et plus la structure obtenue est fine. D'autre part, la comparaison des valeurs moyennes du DMP résultant des deux phases, permet de déduire que l'action de la roue tasseuse a occasionné en moyenne une diminution de 44 % de la valeur du DMP enregistrée sans roue tasseuse. De même, la roue tasseuse a occasionné une augmentation moyenne de l'If relativement à l'essai sans roue tasseuse de 77 %.

Tableau 7 : Effet de la largeur de l'entretoise du double disque et de la roue tasseuse sur le diamètre moyen pondéré (DMP)

Largeur de l'entretoise (mm)	15	25	35	
DMP (mm) sans roue tasseuse	13.34	15.06	16.86	ET : 0.8 C.V. : 5.3%
DMP (mm) avec roue tasseuse	7.20	8.07	10.12	ET : 0.52 C.V. : 6.2%
Diminution du DMP (%)	46	46.4	40	

Tableau 8 : Effet de l'épaisseur de l'entretoise du double disque et de la roue tasseuse sur l'indice de finesse If

Largeur de l'entretoise (mm)	15	25	35	
If (mm) sans roue tasseuse	1.20	0.94	0.90	ET : 0.12 CV : 11.5%
If (mm) avec roue tasseuse	2.32	1.78	1.34	ET : 0.22 CV : 12%
Action roue tasseuse (augmentation %)	93.3	89.3	48.8	

Comme pour le disque ouvreur seul, la mesure de l'effort de traction de la combinaison double disque - soc ouvreur a donné des valeurs dispersées ne permettant pas d'analyse statistique. Toutefois, les résultats synthétisés (Tableau 9) permettront un meilleur dimensionnement des organes de la machine. En rajoutant la roue tasseuse, l'effort maximal enregistré est de 51 daN, l'effort minimal est de 1 daN, la valeur moyenne est de 19 ± 11 daN.

Tableau 9 : Caractéristiques de l'effort de traction (daN) de la combinaison : double disque (340-300 mm) - soc (40°)

Largeur de l'entretoise (mm)	Effort Max	Effort Min	Effort Moyen	Ecart Type
15	35.80	5.57	19.18	10.27
25	39.54	1.85	20.30	10.03

CONCLUSION

Au terme de ce travail qui constitue une ébauche de la conception d'un semoir direct, il s'est avéré que :

- Dans les conditions sèches, les trois gammes de doubles disques testées donnent satisfaction de point de vue traitement des résidus végétaux. Cependant, la gamme des petits doubles disques (diamètres du grand disque 340 mm) s'est distinguée par un meilleur pouvoir de pénétration dans le sol. Au sein de cette même gamme, le double disque 340-300 mm présente un compromis entre la pénétration dans le sol et la performance de coupe des résidus végétaux.
- L'angle d'entrure de 40° confère au soc ouvreur un pouvoir de pénétration satisfaisant et une stabilité relativement plus importante de la profondeur de travail.
- L'écartement des deux disques du coutre circulaire conditionne l'ébauche de la structure du sol visée. Plus il est important, plus le diamètre moyen pondéré des agrégats formés est grand et l'indice de finesse est petit.
- Le type de roue tasseuse adopté (surface convexe) semble occasionner un affinement appréciable des agrégats du sol. Elle procure une augmentation de l'indice de finesse de plus de 75 %.

Enfin, le plan d'ensemble adopté a conduit à la fabrication d'un prototype de système d'enterrage qui fonctionne conformément aux prévisions et de manière satisfaisante même en conditions difficiles. C'est là donc une solution envisageable pour le semis direct en conditions sèches. Cependant, il est nécessaire de perfectionner le système et y apporter des modifications susceptibles de réduire son coût et faciliter sa fabrication locale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Bahri, A. 1992 : Evaluation of opener and presswheel combinations on a no-till grain drill when seeding wheat M.S Université de Nebraska, Lincoln.
2. Bourarach E.H 1989. Mécanisation du travail du sol en céréaliculture pluviale : performances techniques et aspects économiques dans une région semi-aride au Maroc. Thèse de Doctorat d'Etat Es-Science Agronomiques, IAV Rassin II.
3. Bouzza, A. 1986. Effet du travail du sol sur la conservation de l'eau dans les assolements blé sur blé et blé après jachère. Rapport d'activités 1986, CRRAS Settât, pp.161-164
4. Bouzza, A. 1990. Water conservation in wheat rotation under serval management and tillage systems in semi arid areas. Ph.D. Dissertation, Université de Nebraska, Lincoln.
5. Dahane, D. 1992. Etude des contraintes techniques et agronomiques pour l'utilisation en conditions sèches de trois semoirs directs dans la région de Settât. Mémoire de 3^{ème} cycle, Département de Mécanisme Agricole, IAV Hassan II Rabat.
6. Shaaf, D.E. Hann and Rogers. 1981. Performance evaluation of furrow openers, cutting coulters and press wheels for seed drills. ASAE. Publication 7-81, pp 76-84. St. Joseph, MI 49085

ETUDE DES POSSIBILITES DE RATIONALISER L'APPLICATION DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES DANS LE TRAITEMENT DE LA TOMATE SOUS SERRE AU MAROC

K. HOUMY, B. EZZAHIRI et K. EL HADRI¹

ABSTRACT

The tomato crop, grown under plastic tunnel, is attacked by a number of pests and pathogens. To protect the crop from the damage that may be caused by these pests and pathogens, the farmers use chemicals that are applied regularly during the growing season. Thus, in consideration of the efficacy of chemical application, of the side effects of pesticides on the environment and of the economic justifications of chemical sprays, we conducted a study to rationalise the use of pesticides by reducing the spray volumes and the number of pesticide applications based on host growth and pest monitoring. The results of this study showed that it is possible to control effectively the diseases of tomatoes, while reducing the spray volumes and the number of fungicide applications. At the same time, the cost of chemical treatments was significantly reduced. This cost representing 18% of the total expenditures of the crop under conventional spray program, was only of 2.5% when using low spray volumes and reduced fungicide applications.

RESUME

Au cours de son cycle végétatif, la culture de la tomate sous abri est continuellement menacée par les différents ravageurs et maladies obligeant ainsi l'agriculteur de traiter chimiquement. Ainsi compte tenu de l'impact de l'utilisation de pesticides sur l'environnement, sur la trésorerie de l'agriculteur et sur l'efficacité même de traitement, la présente étude a été conduite ayant pour objectif de rationaliser les quantités de produit employé en intervenant sur le nombre d'applications des pesticides et les quantités de bouillie par hectare.

Pour cela deux types de matériel de traitement ont été utilisés, un à lance (le plus utilisé) et un pneumatique. Un suivi régulier de la culture a été effectué basé sur des observations concernant les maladies de la tomate, plus particulièrement le mildiou, le Botrytis et l'oidium.

Les résultats de cette étude ont montré que les différentes maladies ont été bien contrôlées en réduisant le volume par hectare et le nombre d'interventions chimiques. De même, il ressort que le coût de l'opération chimique a été réduit significativement. Le coût des interventions pesticides qui représentait 18% du total de production de la culture selon le calendrier conventionnel, a été ramené à 2.5% lorsqu'on a réduit le nombre de traitements fongicides et le volume pulvérisé par hectare.

INTRODUCTION

Au Maroc, la culture de la tomate sous abri (appelé communément sous serre) occupe une place prépondérante dans l'économie nationale tant sur le plan des superficies que sur le plan de la production. La superficie cultivée est d'environ 5 500 ha en 1996 avec une production de 427 500 T dont 165 535 T sont exportées (MAMVA, 1996). La

tomate sous serre est concentrée essentiellement dans les régions d'Agadir, d'El Jadida et de Rabat.

Au cours de son cycle végétatif, cette culture est continuellement menacée par les différentes maladies et ravageurs (JONE et al. 1991) qui affectent aussi bien la qualité que la quantité de production. Parmi ces ennemis de cultures, on cite le mildiou, l'oidium, la pourriture grise, la

¹ Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc

mineuse... . Devant cette situation, l'agriculteur se trouve obligé d'intervenir en utilisant des moyens chimiques.

Toutefois, les conditions d'application de ces produits phytosanitaires sont confrontées à plusieurs problèmes qui sont en relation avec l'efficacité, et une utilisation excessive des produits. Une enquête réalisée dans les régions les plus productrices de la tomate sous abri a montré que les volumes de bouillie par hectare sont très excessifs et sont en moyenne de 2000 l/ha (MOUMEN, 1993). Aussi, le nombre d'intervention peut atteindre des fois jusqu'à 20. Ceci entraîne, malheureusement des pertes énormes de produits, des traitements non justifiés et un coût de l'opération élevé.

Le présent travail a été conduit, ayant pour objectif de rationaliser les quantités de pesticides employées, en intervenant sur le nombre d'application et le volume de bouillie par hectare.

I. MATERIEL ET METHODES

I.1. Protocole expérimental

Afin de répondre à notre objectif, des essais ont été menés dans une exploitation agricole dans la région de Rabat. La variété de la tomate est le Kiwat et l'abri utilisé sont de type SOCODAM de dimension $56 \times 9 \times 3$ m. Le matériel d'application utilisé est de deux types :

Le pulvérisateur à lances (Photo 1) : c'est un pulvérisateur à pression liquide à jet projeté d'une capacité de 2000 l, muni généralement de deux lances et tiré par un tracteur. C'est l'appareil le plus utilisé au Maroc.

Le pulvérisateur pneumatique à dos (Photo 2) : malgré la faible capacité de sa cuve, qui est de 15 l, ce type de pulvérisateur a été choisi pour le principe de pulvérisation

qu'il offre. En effet, il permet d'obtenir une finesse de gouttelettes très fine et par conséquent une réduction de volume par hectare. Il est constitué d'un ventilateur actionné par un petit moteur à deux temps.

Trois serres ont été choisies :

Serre I : correspond à un traitement employant un pulvérisateur à lances et le calendrier adopté par l'agriculteur.

Serre II : correspond à un traitement employant un pulvérisateur pneumatique à dos avec le calendrier de traitement adopté par l'agriculteur.

Serre III : correspond à un traitement employant un pulvérisateur pneumatique avec un calendrier de traitement raisonné.

I.2. Suivi du développement des maladies

Le suivi du développement des maladies et des ravageurs nous a permis de décider des interventions de traitement dans le cadre du calendrier raisonné et de contrôler l'évolution des attaques parasitaires de la tomate dans les trois serres. Pour se faire, nous avons effectué des contrôles hebdomadaires dans les trois serres. A chaque visite nous avons observé 120 plants par serre. Les observations ont consisté à compter le nombre de plants atteints et la proportion de folioles infectées par chacune des maladies détectées. Pour le cas particulier de la pourriture grise l'évaluation du degré d'infection est déterminée par le nombre moyen de feuilles et de fruits atteints et, d'autre part par le nombre de lésions observées sur les tiges.

I.3. Etude économique

Le suivi détaillé de toutes les opérations effectuées nous a permis de calculer la part du coût des produits phytosanitaires, dans la charge globale de production de la tomate dans les trois serres étudiées.



Photo 1 :
Le pulvérisateur à lances



Photo 2 : Le pulvérisateur pneumatique à dos

II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les maladies et les ravageurs développés sur la culture de tomate dans notre expérimentation sont l'oïdium, la pourriture grise, le mildiou et l'acariose bronzée. La lutte contre ces ennemis de la culture a demandé des traitements répétés (tableaux 1 et 2). Selon le calendrier de l'agriculteur, nous avons effectué au total 16 traitements, alors que le calendrier de traitement raisonné n'a demandé que 8 interventions.

Concernant le volume de bouillie par hectare, il a été raisonné en fonction de type de matériel. Pour le pulvérisateur à lances, nous avons utilisé les mêmes réglages que l'agriculteur donnant ainsi, en fonction du débit des lances et de la vitesse d'avancement, des volumes de bouillie variant de 1670 au premier traitement à 4316 l/ha pendant les 16 traitements. Pour le pulvérisateur pneumatique, le volume de bouillie par hectare a été raisonné en fonction de la végétation. Faute de donnée sur l'indice foliaire de la variété de la tomate étudiée, une méthode basée sur le calcul du volume de feuillage a été employée (HARDI, 1993). Le volume de bouillie a varié

dans notre cas de 520 à 975 l/ha.

La période de traitement de la pourriture grise et de l'oïdium s'est étalée du mois de novembre jusqu'au mois d'avril. Quant au mildiou, il est apparu vers fin février. Il a nécessité un traitement dans le cas du calendrier raisonné, alors qu'aucun traitement anti-mildiou n'a été utilisé selon le calendrier de l'agriculteur.

En ce qui concerne les rendements obtenus, nous avons relevé que malgré les différences au niveau des volumes de bouillie et le nombre d'intervention, aucune différence significative n'a été observée. En effet, ces rendements étaient de 2572 kg, 2560Kg et 2545 kg pour les serres I, II et III, respectivement. Ceci montre d'une part que parmi les traitements effectués certains sont inutiles et d'autre part que les volumes de bouillie par hectare et par conséquent les quantités de pesticides utilisés sont surdosées par rapport aux quantités requises. Aussi, il convient de signaler que le pulvérisateur pneumatique, par le courant d'air qu'il engendre, permet des gouttelettes fines et une bonne pénétration (HOUMY *et al*, 1993) permettant au produit d'atteindre toutes les parties de la plante.

Tableau 1 : Calendrier des traitements dans les serres I et II.

N	Tx+1 -Tx	Date	Produit	Matière active	Dose/hl	maladie ou ravageur
T1		17/9/95	Decis DithaneM45	Deltamethrine Mancozèbe	40cc 200g	Noctuelles Mildiou
T2	4 jours	21/9/95	Decis	Deltamethrine	40cc	Noctuelles
T3	18jours	09/10/95	Anvil Decis	Hexaconazole Deltamethrine	40cc 50cc	Oïdium Noctuelles
T4	9jours	18/10/95	Decis Anvil	Deltamethrine Hexaconazole	40cc 40cc	Noctuelles Oïdium
T5	14jours	01/11/95	Anvil Tamaron	Hexaconazole Methamidophos	40cc 150cc	Oïdium Noctuelles
T6	19jours	20/11/95	Ronilan DithaneM45	Vinchlozoline Mancozèbe	100g 200g	Botrytis Mildiou
T7	4jours	24/11/95	GalbenM8-65	Benalaxyl et Mancozèbe	250g	Mildiou
T8	5jours	29/11/95	Kelthane	Dicofol	125cc	Acariose bronzée
T9	7jours	06/12/95	Sumislex	Procymidone	100g	Botrytis
T10	7jours	13/12/95	DithaneM45 Euparène	Mancozèbe Dichlofluanide	200g 250g	Mildiou Botrytis
T11	7jours	20/12/95	Bavistine	Carbendazine	250g	Botrytis
T12	9jours	29/12/95	Sumislex	Procymidone	100g	Botrytis
T13	9jours	07/01/96	AnteorC3 DithaneM45	Cymoxanil + Folpel +Cuivre Mancozèbe	250g 200g	Mildiou
T14	5jours	12/01/96	AnteorC3 DithaneM45	Cymoxanil+ folpel +cuivre mancozèbe	250g 200g	Mildiou
T15	5jours	17/01/96	Bavistine Karaté	Carbendazine Lambdacyhalothrine	250g 20cc	Botrytis Noctuelles
T16	12jours	29/01/96	Organi166 Decis	cabatène+manébe Deltamethrine	250g 40cc	Mildiou Noctuelles

Tableau 2 : Calendrier des traitements dans la serre III

N	Tx+1 -Tx	Date	Produit	Matière active	Dose/hl	Maladie ou ravageur
T1	0j	18/10/95	Anvil	Hexaconazole	40cc	Oïdium
T2	14j	03/11/95	Anvil	Hexaconazole	40cc	Oïdium
T3	26j	29/11/95	Kelthane	Dicofol	125cc	Acariose bronzée
T4	8j	06/12/95	Anvil	Hexaconazole	40cc	Oïdium
T5	14j	20/12/95	Bavistine	Carbendazine	250g	Botrytis
T6	9j	29/12/95	Sumislex Anvil	Procymidone Hexaconazole	100g 40cc	Botrytis Oïdium
T7	19j	17/01/96	Bavistine sumi 8	Carbendazine Diniconazole	250g 50cc	Botrytis Oïdium
T8	27j	14/02/96	GalbenM8-65 Sumislex	Benalaxyl + Mancozeb Procymidone	250g 100g	Mildiou Botrytis

L'évaluation comparée du coût de l'opération relative aux traitements phytosanitaires est présentée dans le tableau 3. Il ressort d'après ce tableau, que l'utilisation

du pulvérisateur à jet projeté est quatre fois plus chère que l'utilisation du pulvérisateur pneumatique à dos en suivant le même calendrier de traitement, celui adopté

MECANISATION AGRICOLE

l'agriculteur. De plus, l'utilisation du pulvérisateur à lance revient 8 fois plus chère par rapport à l'utilisation du pulvérisateur pneumatique et l'adoption en même temps du calendrier du traitement raisonné.

Tableau 3 : Prix total de l'opération du traitement phytosanitaire dans chaque serre étudiée

	Serre I	Serre II	Serre III
Prix de revient d'utilisation du matériel de traitement (dh/ha)	7 205	1 372	767
Coût des produits phytosanitaires utilisés (dh/ha)	21 179	5 381	2 935
Total (dh/ha)	28 384	6 753	3 702

La part des traitements phytosanitaires dans le coût global de la tomate sous l'abri III (pulvérisateur pneumatique à dos + calendrier du traitement raisonné) n'a guère dépassé 2.5%, et de 18 % dans le cas de la tomate sous abri II (pulvérisateur à lance + calendrier de l'agriculteur) (tableau 4).

Tableau 4 : Part des traitements phytosanitaires dans le coût global de production de la tomate dans les serres I, II et III.

	SERRE I		SERRE II		SERRE III	
	Valeur (DH/HA)	%	Valeur (DH/HA)	%	Valeur (DH/HA)	%
Produits Phytosanitaires	21179	20.8	5381	6.3	2935.4	3.5
Les autres charges	80521.7	79.2	80521.7	93.7	80521.7	96.5
TOTAL	101700.7		85902.7		83457.1	

IV. CONCLUSION

Il ressort de cette étude que les différentes maladies développées sur la tomate ont été bien contrôlées tout en réduisant le volume des traitements par hectare et le nombre d'intervention. Ceci s'est traduit par une réduction du coût de la production de la tomate assez significatif par l'utilisation du pulvérisateur pneumatique à dos et l'adoption du calendrier des traitements raisonnés, tout en obtenant des rendements équivalents dans les trois serres.

ETUDE DES CONTRAINTES DE LA PETITE MECANISATION DE LA RECOLTE DES CEREALES

B. BOUZRARI¹, M. ELBAGGARI¹ ET M. GZOULI²

SUMMARY

In some agricultural Moroccan region where work conditions are difficult and appropriate mechanization of harvesting wheat and barley don't exist, the work is accomplished under traditional methods: The stems are cut by sickle or only dig up by hand. In 1994, we establish the introduction of four small binders in two Moroccan regions: Attaouia (province of kalâa-des-Sraghna) and Ben Ahmed (province of Settât). This new technology of harvesting still unknown by the major population that is concerned with these services. So, in order to realize, in general, the problems that interfere with the development of small mechanization of harvesting, we studied the first machine in the field during the summer of 1996/1997. The results show that this technology could be promising under certain conditions.

Key words: Harvesting, binder, small mechanization.

INTRODUCTION

Depuis l'invention de la faucille en silex jusqu'à une époque assez récente, il n'y a pas eu tellement d'évolution dans le domaine du matériel de récolte des grains. Ce n'est qu'à partir du début du siècle dernier que cette technologie a connu un progrès de plus en plus accéléré avec l'apparition successive de machines comme la faucheuse, la javaleuse, la moissonneuse à rabatteur, la moissonneuse-lieuse, la batteuse à poste fixe et la moissonneuse-batteuse.

Le progrès réalisé en matière de récolte des grains est gigantesque : pour récolter un quintal de blé on est passé de 18000 secondes avec la récolte manuelle à 3600 secondes avec la combinaison moissonneuse-lieuse et batteuse à poste fixe puis à 30 secondes seulement avec les moissonneuses-batteuses conventionnelles. Les machines récentes équipées d'un batteur axial ne font que 18 secondes par quintal³.

Les agriculteurs des pays qui ont participé à l'évolution de la technologie du machinisme agricole ont eu suffisamment de temps pour l'assimiler, la maîtriser et l'employer de manière efficace. Cette technologie est sans cesse et remarquablement créative. Par contre, dans les pays en voie de développement - simple consommateurs des techniques - la mécanisation est confrontée à de sérieux problèmes d'utilisation et surtout d'adaptation. En général, l'agriculture

de ces pays se caractérise par la coexistence de trois niveaux de mécanisation : une culture manuelle, une culture attelée avec des outils d'accompagnement archaïques et une culture motorisée provenant des pays développés.

Au Maroc, il existe trois façons différentes de récolter les céréales (Figure 1) :

- Récolte entièrement mécanisée ;
- Récolte semi-mécanisée ; et
- Récolte traditionnelle où l'ensemble des séquences est réalisé à l'aide de l'énergie humaine, animale ou éolienne.

Le choix du procédé de récolte dépend de plusieurs facteurs, à savoir : la situation financière de l'exploitant, le savoir-faire de l'agriculteur, la topographie du terrain, l'accès aux parcelles et l'importance de leurs superficies, la disponibilité en main d'œuvre, en animaux de trait et en temps de travail, l'existence d'organismes de prestation de services, etc...

Dans les zones où la mécanisation conventionnelle n'est pas adaptée, l'itinéraire de récolte le plus fréquemment adopté se résume comme suit :

- 1- Moisson à la faucille ou arrachage manuel ;
- 2- Transport par chariot ou à dos d'homme d'âne ou de mulet ;
- 3- Battage aux animaux de trait ou, quand c'est possible, la batteuse-vanneuse à poste fixe.

¹ Enseignants Chercheurs, Département du Machinisme Agricole, IAV Hassan II, Rabat.

² Meister Brief in Landmaschinentechnik, Germany.

³ Ces chiffres sont donnés à titre indicatif car ils varient avec les conditions de travail.

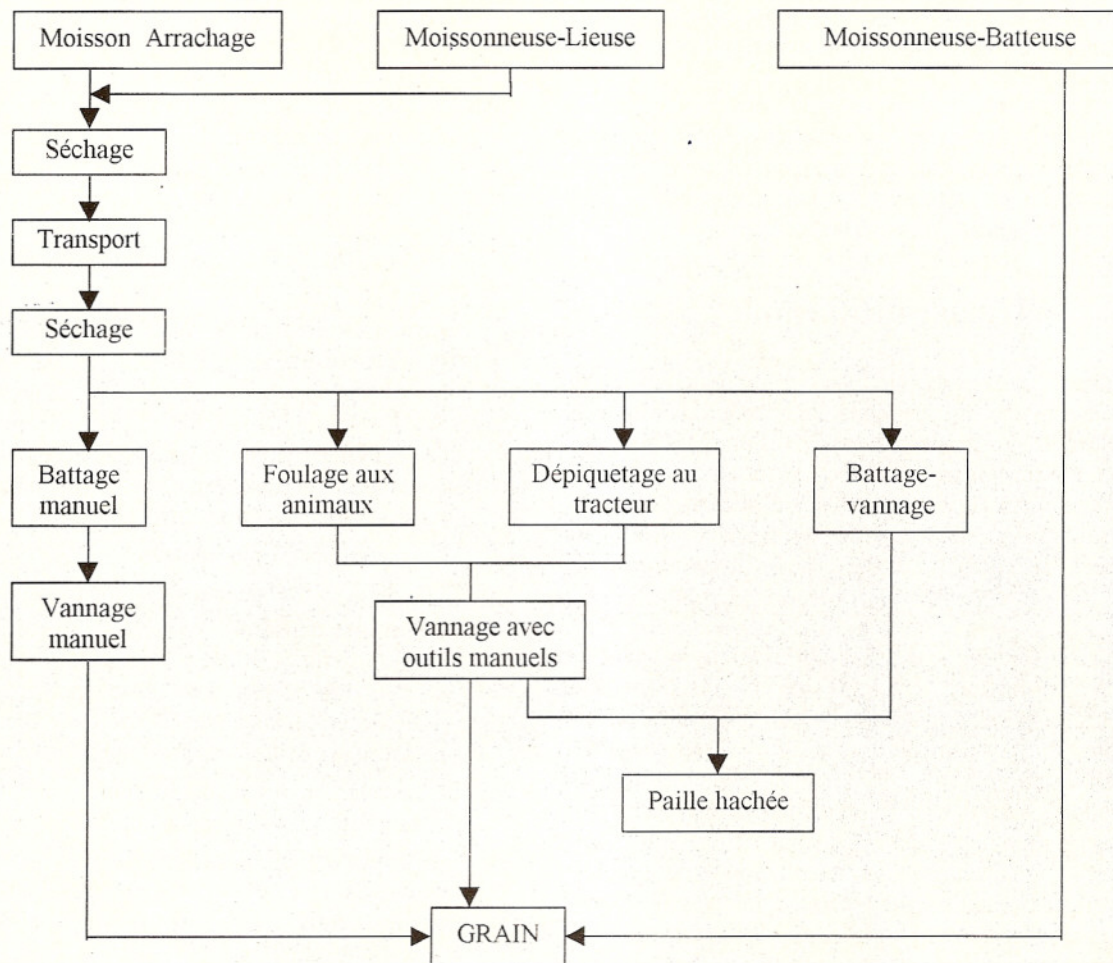


Figure 1 : Différents itinéraires de récolte des céréales.

Cet itinéraire provoque des pertes en grains assez élevées et s'accomplit dans des conditions de travail très difficiles : forte chaleur et parfois, vent chaud et sec, accès difficile, etc. Les moissonneuses-lieuses qui peuvent alléger relativement la charge de travail n'existent malheureusement pas en nombre suffisant. En effet, les données de l'enquête sur le matériel agricole menée en 1993 dans tout le territoire national par le Ministère de l'Agriculture, nous permettent de se rendre compte que le nombre total de moissonneuses-lieuses utilisées dans le pays est passé de 219 à 529 machines entre 1972 et 1979 pour chuter ensuite à 196 unités en 1993. Les 2/3 des moissonneuses-lieuses - toutes à traction animale - se trouvent dans les régions de Abda, Doukkala, Chaouia, Khémisset, Meknès, Fez et Boulemane. Les trois premières régions détiennent à elles seules 46 % de l'effectif national.

Ces trois dernières années, nous avons rencontré, par hasard, quatre petites moissonneuses-lieuses automotrices dans les régions de Attaouia et Chaouia. La diffusion de ces machines n'a pas encore franchit les limites des zones dans lesquelles elles sont utilisées. Elles sont introduites par quelques immigrants vivant en Europe dont l'objectif est d'occuper un parent ou un ami. Pour le moment, elles

restent encore inconnues de plusieurs agriculteurs des régions concernées. Peuvent-elles constituer une solution pour la petite mécanisation de la récolte des grains ? Sinon, quelles sont les contraintes qui s'y opposent et comment tenter de les lever ? Telle est la préoccupation principale de la présente étude.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

La première recherche dans le domaine de la petite mécanisation de la récolte des grains au Maroc a été entreprise par le Centre Régional de la Recherche Agronomique de Settat. Le travail s'est intéressé à l'évaluation technique de quatre types de moissonneuses et a préconisé de continuer les essais sur un type prometteur de motofaucheuse initialement conçu au Japon pour récolter le riz : Kubota AR 120 (Bansal et ElGharras, 1987). Le second travail s'est attelé à la récolte des légumineuses et a abouti à la conception de deux prototypes :

- Kubota AR120 modifié pour la récolte du petit pois et du pois chiche (Bansal et Sakr, 1991) :

- Faucheuse andaineuse à tambours essayée pour la récolte des lentilles. C'est une machine portée par l'attelage trois points d'un tracteur (Bashford et al., 1990).

Le troisième travail a consisté à adapter la motofaucheuse Kubota AR120 à la récolte des céréales en conditions difficiles. Il a eu lieu dans la région montagneuse d'Azilal (Bouzarri, 1996).

MATERIEL ET METHODE

L'étude a porté sur la moissonneuse-lieuse automotrice qui est utilisée dans la région de Attaouia (province d'El Kalâa-des-Sraghna). Cette zone est caractérisée par un terrain accidenté, un système de culture dominé par le blé et l'orge et une mécanisation mixte où la récolte se fait à la faucille ou avec la moissonneuse-batteuse et le battage à la batteuse à poste fixe ou aux animaux de trait.

Les différentes mesures et observations effectuées pour faire l'évaluation technique de la machine ont concerné les parcelles (superficie, forme, pierrosité, pente, accessibilité, etc.), l'état de la récolte (verse, densité, hauteur, infestation, etc.), le temps de travail, la consommation en carburant de la machine, les pertes en épis, etc. De même, pour faire une étude du coût d'utilisation de la machine, nous nous sommes renseignés sur les divers frais qui permettent un tel calcul et réalisé une enquête auprès de quelques équipes de moissonneurs pour pouvoir porter un jugement sur la compétitivité économique de l'appareil.

DESCRIPTION DE LA MACHINE

La moissonneuse-lieuse automotrice étudiée a trois roues : deux motrices placées à l'avant et une directrice placée à l'arrière. Elle est constituée des organes suivants :

- Un tablier avec deux diviseurs, une barre de coupe, une boîte à ficelle, un système de liage, quatre tourniquets servant à convoyer la récolte vers le milieu du tablier pour l'acculer dans le canal de pression où se trouvent le noueur, le système de liage et la boîte à ficelle.
- Un châssis sur lequel on trouve le moteur, le siège du conducteur, les organes de transmission et les divers éléments de commandes (leviers, guidon, pédales, etc.).

Les caractéristiques principales de la machine se présentent comme suit :

- Puissance nominale : 5,9 kW ;
- Largeur de coupe : 1,45 mètres ;
- Poids : 415 kg ;

- Vitesses d'avancement : 1,7 ; 2,5 ; 3,2 ; 4,1 m/s et une marche arrière : 1,9 m/s.

Moyennant des organes fournis en option, la machine peut être utilisée pour la récolte du fourrage ou entraîner une pompe d'irrigation pour faibles superficies, un pressoir, une scie à bois ou une meule d'affûtage ou autres.

RESULTATS ET DISCUSSION

L'évaluation technique des deux moissonneuses-lieuses a fait aboutir aux conclusions suivantes :

- La gamme des vitesses de déplacement est satisfaisante ;
- La visibilité pendant le travail et l'accessibilité au siège de conduite et aux organes de commandes (pédales et leviers) ne posent aucun problème ;
- La garde au sol est acceptable ;
- Le réglage de la hauteur de coupe est simple ;
- En récolte dense et/ou versée, le travail est relativement difficile à exécuter. Pour palier à cette difficulté, la réduction de la largeur de coupe s'impose : ce qui diminue la capacité de la machine. Dans ce cas, les pertes peuvent dépasser facilement 2% ;
- La récolte de variétés traditionnelles à paille longue ne pose pas de problème particulier ;
- Aucun problème n'a été constaté au niveau du convoyeur même en présence de mauvaises herbes encore vertes comme la folle avoine ou le jujubier (*Ziziphus lotus*).
- Le rayon de braquage est faible et très intéressant dans la mesure où il permet de diminuer les temps de fourrière et d'augmenter ainsi la capacité de la machine ;
- Les gerbes sont déposées en ligne sur la bande travaillée, ce qui facilite et réduit le temps de ramassage ;
- Le temps de travail de la machine est de 2 à 2,5 heures par hectare. Il varie suivant la topographie du terrain, la densité de la récolte, la présence ou non de mauvaises herbes, la pierrosité, la hauteur de coupe, l'humidité de la récolte, le degré de maîtrise de la conduite, etc.
- La consommation varie entre 0,9 et 1,2 litres par heure ;
- L'efficacité de la machine est de 80 % ;
- Les pertes à la récolte sont insignifiantes. Les épis qui restent derrière la machine sont aussitôt ramassés par le paysan et sa famille.
- On constate un manque de stabilité de la machine sur pentes moyennes à fortes. Une moissonneuse-lieuse à quatre roues comme celles utilisées à Ben-Ahmed serait bien adaptée à ce terrain ;
- Les organes de coupe, de convoyage et de liage comportent un nombre élevé d'articulations et de

points de graissage. Les réglages sont complexes et nécessitent une main d'œuvre qualifiée :

Les résultats de l'évaluation économique de la machine peuvent être résumés comme suit :

- L'entretien et la réparation consomment 19 DH/h et les frais de fonctionnement (carburant, ficelle, main d'œuvre) se réservent 32.5 DH/h. Les parts respectives de ces deux postes atteignent 36.89 % et 63.11 % de l'ensemble des charges variables. La ficelle à elle seule se taille 43.69 % ;
- La superficie journalière récoltée par la machine est de 5.6 à 11.25 fois plus élevée que celle pouvant être récoltée manuellement par une équipe moyenne de moissonneurs ;
- Le coût horaire d'utilisation de la machine est estimé à 94.7 DH/h. Il est de 1.29 à 1.85 fois plus élevé que celui de la méthode traditionnelle.

Tableau I : Charges fixes et charges variables de la moissonneuse-lieuse automotrice.

	Charges fixes	Charges variables	Total
Coût horaire en DH/h	43.20	51.50	94.70
Part en %	45.62	54.38	100

RECOMMANDATIONS

Pour augmenter l'efficacité du travail et éviter les risques d'accident, il serait souhaitable de faire relayer deux conducteurs en vue de prolonger la durée du travail au maximum possible et équiper la machine des éléments suivants :

- Une bâche de protection contre les radiations solaires ;
- Une caisse à outils ;
- Un pot d'échappement suffisamment haut pour éviter tout risque d'asphyxie du conducteur ou d'incendie de la récolte ;
- Un phare pour rendre possible le travail nocturne.
- Une grande caisse qui sert à contenir les affaires du conducteur qui ne rentre chez lui qu'à la fin de la campagne ;
- Un gyrophare, un catadioptré et un rétroviseur ;

La récolte avec les moissonneuses-lieuses automotrices est une technique qui permet de gagner le temps, réduire les pertes qui sont élevées avec la méthode traditionnelle de récolte et diminuer la pénibilité du travail. Néanmoins, c'est une technique qui se trouve légèrement au-dessus du niveau d'équipement et de technicité des utilisateurs des zones concernées. Des réparations comme le tarage des injecteurs, le calage d'un noueur ou autres ne peuvent s'effectuer que dans des villes qui se trouvent, malheureusement, loin des lieux du travail. De ce fait, les frais de maintenance se trouvent substantiellement augmentés et la durée annuelle d'utilisation réduite à cause des

retards de réparation et des pertes de temps dues à la recherche des pièces de rechange. Cela se remarque au niveau de la marge bénéficiaire qui n'est pas assez satisfaisante.

Il convient également de souligner que les frais d'amortissement et les taux d'intérêt élevés pèsent lourdement sur le poste des charges fixes. Une fabrication locale serait une solution pour diminuer le prix d'achat et contribuer à alléger les charges de structure des petites exploitations agricoles.

BIBLIOGRAPHIE

1. Bansal, R.K. and B. Sakr. 1992. Development of a vertical conveyor reaper for harvesting chickpeas and lentils in morocco. ASAE, Vol. 8(4); July.
2. Bansal, R.K. and O. ElGharras. 1987. A report on small farm mechanization. USAID-MIAC project N° 608-0136. Centre Régional de Recherche Agronomique de Settat. 46p.
3. Bashford, L.L., R.K. Bansal and O. ElGharras. 1990. Mechanization of lentil harvesting. Report of work. USAID-Moac Project N°608-0136.
4. Bouzrari, B. 1993. Mécanisation, eau et énergie. Projet Tanant, DMA, IAV Hassan II, Rabat.
5. Bouzrari, B. 1996. Evaluation d'une motofaucheuse en zones de montagne. Communication présentée au Séminaire International sur la mécanisation des petites exploitations agricoles. CIGR/ANAFID, Rabat, Mai 1996. in Hommes terre et eaux. Vol. 26 (102). Juin-Septembre, 1996, pp. 94-99.
6. Bouzrari, B. 1996. Evaluation d'une batteuse-vanneuse à poste fixe en relation avec les techniques traditionnelles de battage utilisées en zone de montagne. Communication présentée au Séminaire International sur la mécanisation des petites exploitations agricoles. CIGR/ANAFID, Rabat, Mai 1996. in Hommes, Terre et eaux. Vol. 26 (102). Juin-Septembre, 1996, pp. 84-90.
7. Bouzrari B. 1997. Matériel de récolte des grains : Evolution et utilisation. Département de Machinisme Agricole. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Document destiné aux vulgarisateurs de la Direction de l'Enseignement Agricole, de la Recherche et du Développement Rural. (Distribution limitée). 32p.
8. Catholic Relief Services of Morocco. 1987/88. Agricultural Mechanization Project. (Archives).
9. Hamilton, J.H., G.P. Primov. 1986. Animal traction, and small farm equipment and systems project for Morocco. A report study tour to Egypt, India, and Thailand. INRA/MIAC Project, Settat, Morocco.
10. MADRPM. 1993. Parc matériel agricole, enquête 1993, Direction de la production végétale, Rabat, Maroc.

WHEAT STRAW COMBINES: FIELD PERFORMANCE AND ECONOMIC EVALUATION

S.S. AHUJA¹

ABSTRACT

Wheat-straw combine collects the left-over wheat stalk and bruises it to form wheat straw. Field evaluation studies were conducted on wheat straw combine which is operated after grain combining operation. This machine with 2.0 m wide cutterbar can be operated by 45 HP tractor. Machine has an effective field capacity of 0.52 ha/hr. Machine had the capacity to recover about 50-60% of the wheat straw and converts it into fine bruised straw (Bhusa). The machine operation is economically viable and is becoming increasingly popular on custom-hiring basis. Both, serrated blade type and spike tooth bruising mechanism performed satisfactorily, however, serrated blade type had better net specific fuel consumption.

Key Words: Wheat-Straw (Bhusa), Wheat-straw combine, Bruising.

I. INTRODUCTION

Wheat straw is extensively used as a cattle feed for milch animal in India and other south-east Asian countries. Due to ever-increasing population, area under fodder is likely to shrink making wheat straw more and more important ingredient of the animal feed. Harvesting combines for paddy and wheat were introduced in early seventies. However, these combines wastes the wheat straw in the field. Therefore, this important cattle feed is left in the field for burning as mixing requires additional energy. This in turn causes intense heat and smoke and along with threshing floor dust pollutes the environment to a very high degree, raises the surrounding temperature, which otherwise is already above 40 degree centigrade normally. On the basis of available information about 5-6 million ha of wheat crop in the country is being harvested by combines. This causes a wastage of wheat straw around 250 M.T costing \$72-80 million annually.

However, the innovative Manufacturers in this country have evolved a new machine called WHEAT STRAW COMBINE to recover this left over straw.

This machine cuts and gathers the left over straw from the field, chop it into fine straw called "Bhusa" and transfers this to a trolley. Currently, over 2000 such units are in operation in Punjab and neighbouring states during the wheat harvesting season to recover this straw after wheat harvesting. This paper attempts to highlight the functional details, operational capabilities, cylinder

performance and economic viability of such machines based on field studies.

II. CONSTRUCTIONAL FEATURES OF WHEAT STRAW COMBINE

Figure 1 outlines the operational flow diagram of the machine. This machine cuts the left over straw at an average height of 7-8 cm above the ground, conveys it to bruising drum, where it is chopped/bruised into fine straw then blown into attached trolley. Travel speed of the machine varies between 2.5 to 5.0 Kmph.

II.1. Cutting and Gathering Unit

Wheat straw combines have been equipped with conventional harvesting combine cutterbar and conveying unit. Normally the cutter bar width is about 1.8 to 2.0 m. The reel in this straw combine is usually of a smaller diameter in comparison to grain combine. Currently available units are mostly drawn type (i.e. tractor in front). During machine operation some straw is trampled by the tractor tires. A manufacturer has now also attempted a front mounted unit.

II.2. Bruising or Chopping Cylinder

Feeder conveyer feeds the straw to bruising cylinder. Identical to threshing drum in threshers, in this case a bruising drum is provided to bruise/chop.

¹ Author is Senior Agril. Engineer, Dept. of Farm Power & Machinery, PAU, Ludhiana.

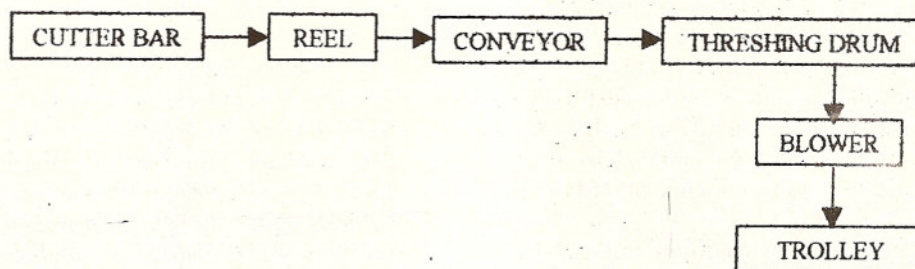


Fig. 1. Operational flow diagram of wheat straw combine

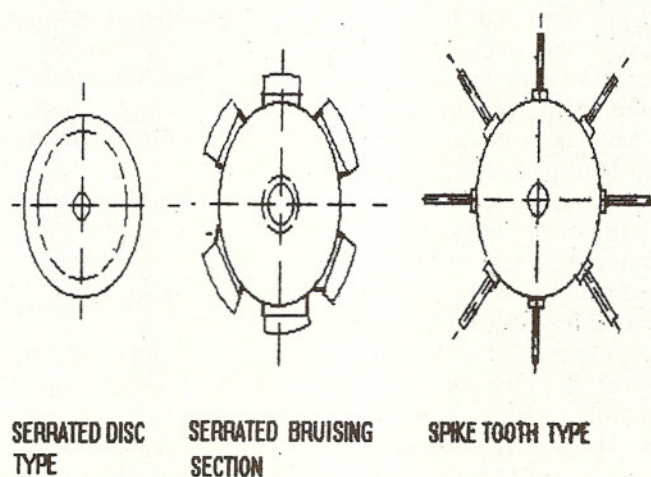


Fig. 2. Different types of straw bruising mechanisms used on straw combines

The straw into fine pieces. Bruising unit has a closed ended concave with openings of 10-12.5 mm size. Thus in this system the straw is not allowed to escape from the top of the concave. Wheat straw passing through the concave after bruising has been suitably reduced in size, to be used as chaff-straw. Several types of bruising drums are currently in practice. These include spike tooth, chaff cutter and serrated saw type (Fig.2). However, serrated saw, though costly are considered as most efficient straw bruising system. Bruising drum diameter and length varies between 60 to 90 cms and 100 to 150 cms respectively. Cylinder rpm varies from 500 to 750 rpm or a tip speed of 24 to 27 m/s.

II.3. Grain & Straw Separation Unit

Material being fed to the bruising unit also contains few grains mostly on account of cutter bar losses. Material passing through the concave falls on a reciprocating sieve. Chaff and lighter materials are sucked by the aspiration fan and is delivered to the attached trolley through an adjustable blower duct. Aspirator normally has 3 to 6 blades with outer diameter ranging from 50 to 80 cms. Fan tip speed varies from 30-50 m/s (800-1000 rpm).

II.4. Storage and transportation trolley

Conventional tractor trolley (2.5 × 4.0 or 5.0 m) is used as a transient storage during harvesting operation. This

trolley is covered with a fine net, so that air is blown off and bruised chaff is stored in this. In order to maintain a continuous field operation of straw bruising unit, two to three trolleys have to be netted (or canvassed) and employed in this operation. This is essential because while the first trolley is being unloaded the second is used for straw combining. Number of trolleys to be used depends upon the transportation distance.

III. MATERIAL & METHODS

A commercially available wheat straw combine being operated by a farmer in the field was taken as a test unit. During the testing normal operation of the combine unit was not hindered in any way due to testing.

III.1. Operational Details of Straw Combine

One wheat straw combining unit and three transport trolleys and two tractors (one of 45 HP and another of 35 HP) were being used by the farmers. Test field was perfectly levelled and had centrally located water risers covering an area of 4 ha. Straw combine was being pulled by a tractor (45 HP), with an attached transport trolley. As soon this trolley was completely filled with straw, this trolley was detached and the second trolley was attached.

This second trolley unit was made available close to the spot where the first trolley was being filled. Thus, straw combine unit was put to operation after attaching the new trolley whereas the filled trolley was detached and taken near the dumping site (located centrally in the field corner). Third trolley unit which had been emptied by then was attached and taken near the straw combine unit for refilling.

III.2. Experimental Straw Combine for studying Cylinder Performance

This combine consisted of a conventional cutter bar (length = 2150 mm), auger platform and reel chain conveyer, bruising drum, a sieve shaker and a reel. The straw bruising drum (Diameter-64 mm) consisted of serrated tooth cylinder or spike tooth cylinder with a concave. Concave clearance in front was 21 mm and 20 mm at the rear. The whole of the straw passed through the concave which after bruising has been reduced in its size. The materials passing through the concave was subjected to the aspiration action of the blower (520 mm diameter, 4 trapezoidal shape blades). The finally bruised straw was blown into trolley which is hooked at the back of the machine. The rear side of trolley was covered with an iron net i.e. JALLI so that air is blown off from the rear side and bruised straw was stored in the trolley. The machine was operated by SWARJ-855 tractor of 55 HP (SAE). The power was transmitted from the tractor P.T.O. shaft to main drive of straw combine through the universal telescopic coupling i.e. shaft.

III.3. Test Procedure

III.3.1. Field Performance Evaluation of Straw Combines

Two stage testing was carried out. The first stage was to conduct time and motion study of combining operation. Time was recorded in three groups.

- A. Time for actual straw combining.
- B. Time when tractor was running but straw combining was not being done.
- C. Time when tractor was not working.

Specific reason for stoppages in B and C were recorded and analysed. However, no time data was recorded for straw transportation and unloading operation.

Second stage of testing involved taking samples and observations before, during and after straw combining. This included recording of crop parameters i.e. crop variety, plant population density, crop height before and after straw combining, straw length, moisture content, and expected straw recovery rate/unit area etc. and machine performance parameters i.e. travel speed, average width of cut, fuel consumption and area of field, field capacity.

III.3.2. Cylinder Performance Evaluation

The basic design of combine, the overall dimensions of cutter bar and reel, blower (size and location) diameter and width of bruising drum and concave clearance were kept constant during testing. The range and selection of levels of independent variables i.e. concave bar spacing cylinder speed and feed rate was made on the basis of the previous studies carried out on the straw combine and the level of parameters used by different straw combine manufacturers. Levels of different independent variables for study of cylinder performance for serrated tooth type and spike tooth bruising drum are given in Table 1 below:

Table 1. Levels of different independent variables

S.No. Variables	Levels		
	I	II	III
1. Concave bar spacing (C)	8	11	14 mm
2. Cylinder speed (S)	715	865	920 rpm
	23.96	28.98	30.83 m/s
3. Feed rate (F)	15	18	21.5 q/h

V-pulleys of different sizes (16.51 cm, 20.32 cm and 24.13 cm) with transmission ratios 2.38:1 : 1.95:1 and 1.62:1 were selected to vary the speed of the rotation of the bruising cylinder. Feed rate was varied by changing the forward travel speed of tractor.

Feed rate (F) of crop was estimated as follows:

$$F(\text{Kg/h}) = W * I * v$$

Where:

- w = wt. of crop per unit area (Kg/sq.m)
- I = effective width of cut (1.83 m)
- V = forward travel speed (m/h)

Selected forward speeds were 2.0 kmph, 2.5 kmph and 3.0 kmph for evaluating the effect of feed rate on straw combine performance.

Factorial (3^2) randomised block design (RBD) was used to conduct the experiments and test the significance of the variables studied and their interactions for the cylinders i.e. spike tooth and serrated tooth type.

III.3.3. Fuel Consumption

Fuel consumption was measured by fuel flow meter attached at rear guard of the tractor. Net fuel consumption was equal to the difference of the total fuel consumption for the operation of straw combine minus the fuel consumed during the idle run (no cut).

Net specific fuel consumption is the ratio of the net fuel consumption to the average feed rate.

III.3.4. Straw Quality Evaluation

Straw quality was judged on the basis of average straw length and split straw percentage. Samples collected from the trolley for each experiment were thoroughly mixed. Straw sample (approx. wt. 100-200 g) was sorted manually for unsplit straw to determine the split straw percentage. The mean length (mm) and standard deviation were recorded for each sample which indicated the average straw length.

The average length of straw 25 mm with C.V. 40 % together with splitting of straw 92-95% with C.V. 40% was considered to be acceptable quality of straw.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

IV.1. Field Performance Evaluation

IV.1.1. Crop Parameters

The important factor governing the machine performance include the initial field condition and the available straw in the field (Table 2). Hill population/m² was around 37-39 plants. The degree of variation was also very small as the standard deviation was only 0.89 hills/m². This crop stand is considered ideal except for the crop variety (PBW 222), which was a short-statured dwarf one. Crop height after wheat combining on an average was about 30 cm. with min. of 18 cm and maximum of 38 cm. Standard deviation was about 10 cm. This indicated that there was considerable length variation after wheat grain harvesting. Stalk height after the straw combining averaged around 8.5 cm. with min. of 5.0 cm and maximum of 13.0 cm. Standard deviation after straw combining was only 2.5 cm. Expected straw recovery was around 3700 kg/ha with a minimum of 25 Q/ha and maximum of 5300 kg/ha. Standard deviation was around 800 kg/ha.

Table 2: Field Observation during straw combining (Crop Variety: PBW 222)

S.N ^o .	Observation	Range	S.D.	Min.	Max
1.	Hill Population/m ²	37.6	37	39	0.89
2.	Plant Population/m ²	375.2	220	588	124.2
3.	Crop height (mm)				
a)	Before straw combining	298.8	180	380	97.4
b)	After straw combining	86.1	50	130	24.4
4.	Straw weight/m ²	368.6	250	530	81.6
5.	Speed kmph.	3.88	3.19	4.56	0.36

IV.1.2. Machine Performance

The machine was operated with a 45 HP tractor at a

speed of about 4 kmph. The effective coverage width of 2.0 m cutter bar machine worked out to be 1.7 m only. This further implied that there was an overlap of about 15%. Ideal machine capacity of the straw combine on an average was 0.52 ha/h, if the machine performed uninterrupted i.e. the time until the trolley was full followed by unhitching and hitching of next trolley without any stoppage of operations. At the indicated machine capacity, the machine had to be stopped after about 28 minutes (Table 3) for unhitching after covering an area of about 0.34 ha. Time taken for hitching and unhitching accounted for about 10 minutes. In addition, about 3 minutes time loss was observed due to field, operational and personal problems.

Table 3: Time Efficiency wheat straw combining per trolley

S.N ^o .	Description	Time spent (minutes)	Percentage total
A.	Straw bruising & trolley filling	27.53	67.8
B.	Detaching and attaching alternate trolley	10.00	24.7
C.	Time loss due to field problem	1.33	3.3
D.	Time loss due to personal factor	1.71	4.2
	Total time	40.57	100

However, if there is a constraint on the number of trolleys either due to too far storage site or due to delayed unloading of trolleys, effective machine capacity will be reduced further. Thus, if three trolleys are used and three labourers do the unloading operation the effective time to cover an area of about 0.34 ha is about 40 to 45 minutes. Thus, the actual machine capacity ranged between 0.45 to 0.50 ha/h.

IV.2. Comparison between serrated tooth type and spike tooth type bruising mechanism

IV.2.1. Crop Parameters

Wheat crop of variety SPAN-3002 was used for straw combine for this testing. Crop had an average length of cut equal to 22.3 cm (C.V. = 15.8%) and an average stalk density of the crop was 412 stubbles/sq.m (C.V. = 11.2%). The average moisture content of straw was found to be 6.33% on dry basis (C.V = 13.2%).

IV.2.2. Cylinder Performance

Serrated type bruising mechanism with blade angle of 10 degree was selected as optimised combination against spike tooth cylinder (Singh 1997). Minimum net specific fuel consumption of 1.50 cc/kg and 1.61 cc/kg was found to be for the combination having the highest feed rate of 21.5 q/hr for serrated tooth type and spike tooth type respectively. Net Specific fuel consumption was found to increase

with increase in cylinder speed in case of serrated tooth type mechanism, but decreased in case of spike tooth mechanism due to improved impact force. Average straw size was within the acceptable range except for concave bar spacing of 14 mm. Average size of straw available from spike tooth cylinder was slightly smaller in comparison to serrated tooth type mechanism in case of higher feed rate. Splitting of straw obtained with both the cylinders was within the acceptable range for both the bruising mechanism, but better splitting resulted in case of spike tooth mechanism.

Table 4: Comparative Performance of serrated & spike tooth cylinders.

Dependent	Parameters	Serrated	Spike Tooth
Net Specific Fuel Cons. (CC/Kg)	F1	2.03	2.17
	F2	1.70	1.97
	F3	1.50	1.61
Avg. Size of Straw (mm)	F1	25.57	28.87
	F2	25.96	25.45
	F3	26.17	21.47
Split Strain Percentage	F1	90.67	95.59
	F2	93.20	96.63
	F3	96.15	97.85

V. ECONOMICS

It was observed that on an average about 3 trolleys of fine wheat straw could be recovered per ha. Size of the trolley was $3.5 \times 1.8 \text{ m}^2$ with an average height of about 2.0 m. Average capacity of trolley was about 650-700 kg/hr. Thus, on average 1800 kg/ha bruised straw could be recovered with this operation as against 3500-4000 kg/ha with the conventional thresher system. As observed earlier, straw height on an average was about 70 cm. After combining the height of stubbles was observed between 24 to 38 cm. After straw combining residual straw height was between 5 to 12 cm but this is still higher than manually harvested crop. Thus, there is bound to be straw loss in comparison to manually harvested and mechanically threshed wheat straw. However, the farmers don't have any adverse opinion on this account, on the plea that height close to the ground don't attribute to good quality wheat straw.

Table 5: Field Evaluation of Straw Combining

S.No.	Description	Result
1.	Field capacity Theoretical	= 0.78 ha/hr
	Observed	= 0.52 ha/hr
2.	Field efficiency	= 66.7%
3.	Fuel consumption	= 6.45 lit/ha
4.	Straw Recovery (%)	= 50 - 55
5.	Benefit-cost ratio	= 2.52:1

Wheat straw recovery ranged between 50 to 55% in comparison with manually harvested and mechanically threshed system. Apart from uncut straw losses, some straw is also trampled and left under the tyres.

The farmers were quite satisfied with the straw recovery valued at \$ 36/ha. Additionally, the straw combines are reported to have recovered 30 kg of dean grain/ha which is more than the fuel cost of the two tractors being used for these operations.

Custom hiring rate for wheat straw combining is usually around \$ 15/ha. This resulted in a net saving of \$ 20/ha (Wheat straw @ \$ 2.0/Q). On the whole farmers expressed great satisfaction with the machine performance. This has further increased the popularity of grain combines, as it has overcome a major limitation of the usage of grain combines on wheat.

VI. CONCLUSION

Wheat straw combine is a viable machine with a cost benefit rate of 1:2.5. It can effectively cover 0.52 ha/hr thereby recovering about 50-60% wheat straw. The overall machine operation is satisfactory.

REFERENCES

1. Anon...."Annual Report 1991" of All India Co-ordinated Research Scheme on Farm Implements and Machinery (I CAR) Ludhiana Centre presented during the Annual Workshop held at Hyderabad on Nov. 12-14, 1992.
2. Ahuja, S.S; Kalkat, H.S; and Sharma V.K. 1993. A Perspective on wheat straw combine-its field performance and economic evaluation. Paper presented (FPM-93-2-96) at XXVIII Annual Convention of ISAE held at CIAE Bhopal, 24 March, 1993.
3. Singh, Manjeet 1995. Investigations into some design and operational parameters of a straw combine. Unpublished M.Tech. thesis. Department of Farm Power & Machinery, PAU Ludhiana.
4. Singh Manjeet, Ahuja S.S. & Sharma V.K. 1997. Study of selected design and operational parameters of serrated tooth type bruising mechanism of a straw combine. Paper presented at the XXXII Annual Convention of ISAE, PAU, Ludhiana, April 16-18, 1997.
5. Verma, S.R; Kalkat, H.S; and Singh, Joginder 1992. Straw combine-A new development in Agril. Machinery Agril. Engineering Today, ISAE 15-16 (1-6):24-31.

MECHANISED FARMING AND SOIL AND WATER MANAGEMENT DEMANDS IN THE SAVANNA AGRO-ECOLOGICAL ZONE OF GHANA

EMMANUEL Y.H. BOBOBEE., SAMPSON K.AGODZO ¹ AND MAHAMA SEIDU ²

ABSTRACT

Mechanised farming, including tractor operations and animal traction, is practised extensively in all the agro-ecological zones in Ghana. Tractor mechanisation was given the greatest boost immediately after just independence through the importation of large fleet of agricultural machinery and the subsequent establishment of large-scale farms scattered all over the country. These farms are concentrated in the transitional and savanna zones and selected irrigation projects in the country. Tractor mechanisation, is reported to be contributing to land degradation involving soil erosion, structure damage and fertility loss and degraded vegetation resulting from deforestation and over-use. Soil erosion hazard mapping done in 1971 revealed that out of the total 24 m hectares land area of Ghana, about 7 m ha (30%), 10.3 m ha (43 %), and 5.5 m ha (23 %) of land were said to be vulnerable to slight to moderate sheet erosion, severe sheet and gully erosion, and very severe sheet and gully erosion respectively. The land use pattern and hence the erosion hazard distribution might have changed since but the fact still remains that unsound tillage and land use patterns are major causes of land de gradation in Ghana.

This paper discusses the effects of land degradation attributable to mechanised farming in the savanna north of the country and measures needed to mitigate the adverse effects of same.

1. INTRODUCTION

Soil permeability and erodibility are two features regarded as critical outcomes of mechanisation. Mechanisation that is not planned and co-ordinated as is the case in Ghana, can cause rapid losses in soil fertility. This happens when soils which contain high organic matter and soil fertility status when pulverised become more porous, with the top soils exposed to erosion by rain. Land degradation, the reduced capacity of land for agricultural production and moisture balance caused by reduced vegetation, erosion and declining soil fertility can be attributed in some instances to unsound tillage practices. For example, Soil compaction due to the use of heavy machinery is known to hinder root development.

In Ghana, erosion on mechanised upland fields noticeable in the form of sediments in depressions contain fine soil particles washed down from higher lands. The above phenomenon is brought about through deep ploughing by tractors and other cultural practices which expose great volumes of soil to agents of erosion. Mechanisation of the top soil and subsequent erosion impoverish the soils and their productive capacity. Land areas vulnerable to different types of erosion hazard and the numbers of tractors and livestock on regional basis are shown in Table 1. Fields laid lengthwise down the slope or ploughed across, rather than along the contour are subjected mainly to sheet and nil erosion. Serious erosion in the form of deep gullies in some mechanised fields is caused by inadequate and often no transverse or "herringbone" drains, nor small bunds across steeper inclines.

Table 1. National statistics on erosion and mechanised farming.

Regions	Erosion hazard (km ²)			Tractor numbers	Cattle herd	Land area ('000 km ²)
	Sheet	Sheet and gully	Very severe sheet and gully			
Northern	19,062	19,062	23,330	2,194	454,633	70,38
Upper East	4,574	3,774	964	64	216,885	8,84
Upper West	7,288	4,470	7,148	254	224,700	18,48
Brong Ahafo	10,697	20,932	5,219	286	55,660	39,56
Volta	6,613	7,376	2,901	149	107,876	20,57
Ashanti	7,115	11,826	6,017	75	20,523	24,39
Gt. Accra	3,005	101	85	124	78,362	3,24
Eastern	3,090	1,015	2,852	163	46,714	19,32
Central	2,002	7,780	521	98	7,743	9,83
Western	2,745	16,913	3,675	44	3,981	23,92
Total	66,191	93,249	52,712	3,451	1,217,077	238,530

¹ Agricultural Engineering Department, University of Science Technology, Kumasi, Ghana.

² Agric Engineering Division, Faculty of Agriculture, University of Ghana, Legon.

The main aim of this paper is to discuss the problems of mechanisation in Ghana with particular reference to land degradation.

2. MECHANISATION RELATED LAND DEGRADATION PROBLEMS

2.1. Operators Role

Most of the negative impacts of land clearing caused by tractor cultivation are human problems traced to the operators. Tractor operators sometimes persist with incorrect alignment because it is simpler, and easier to plough on most direct line across the contour. Practices such as operators rushing on the job, poor implement adjustment before ploughing, lack of furrow wheel in most cases, and leaving unploughed fields that create depressions leading to undulating surfaces, can be laid at the doorsteps of the operator. Missing furrow wheel causes implement to sway making it difficult to plough straight. Some operators try to earn more income at the expense of quality work, caring very little about the concerns of farmers who desire mechanised services. Hiring farmers are disadvantaged in demanding quality work since most of the time tractors are generally in short supply during the short land preparation season. As the number of tractors have declined in recent years, it is expected that the demand for tractor operators will have fallen too. There are more operators than serviceable tractors. Many tractor operators are employed during off-season as vehicle or commercial drivers.

Some tractor service companies prefer to engage only seasonal operators. Individual tractor owners normally employ blood relations as permanent operators and part-time operators only seasonally.

Table 2. Results of soil water infiltration tests on the Afram Plains at several sites per location (Badawi, 1993).

Location (Soil series)	Infiltration rates (mm/min)			
	Road	Mechanised field	Traditional cultivation	Natural bush/forest
1. (Ejura)	-	0.5	-	3.5
2. (Ejura)	0.2	1.0	2.2	-
3. (Techiman)	1.0	2.0	-	6.6
4. Somusie	0.2	1.0	-	1.7
5. Somusie	0.1	1.0	1.8	3.5
6. (?)	0.3	1.1	-	2.3
7. (Amatin)	0.5	1.3	-	14.0
8. Sutawa	0.2	-	5.7	3.6
9. Denteso	0.7	1.7	-	3.5
10. Denteso	0.2	-	4.0	15.0
11. (?)	2.0	3.5	-	12.0
12. (?)	1.7	0.7	-	3.2
13. (?)	1.5	-	3.3	12.0
Σ	8.6	13.7	17.0	80.9
#	12	10	5	12
Mean	0.7	1.4	2.6	6.7
As a % of Potential	10	21	39	100

2.2. Impedance to infiltration

Due to high cost of machinery and spare parts, most tractors have worn-out tyres that slip and cause smearing effect thus impeding infiltration of water and root development. Environmental assessment in a study carried out by Badawi.(1993) on the Afram Plains as shown in Table 2, produced evidence of large reduction in water infiltration rate on mechanised fields compared to traditional cultivation and natural forest. The rate of water infiltration (mm/min) give an example of severe compaction in cultivated lands (mechanised fields and traditional cultivation) and tractor roads versus natural bush or forest soil in the transitional zones of the Afram Plains.

Soil erosion was clearly evident in only a few of the mechanised fields. Significant erosion as a result of mechanical action was seen on the roads, usually in the form of deep gullies running down the slopes in the roadway and along the roadsides.

2.3. Land Clearing and land Degradation Problems

Some perceived problems causing land degradation in mechanised fields include incorrect alignment of fields and plough direction, and consequent erosion. The impact of tractor tillage and land degradation from farmers point of view is summarised in Table 3 below. Mechanisation will have reduced the rate at which native vegetation could regenerate and restore fertility, and there is a possibility of farmers abandoning such fields. When fine top soils dry after rains, soil surface crusts are created reducing germination. Also harrowing of dry soils produces fine soil tith and dust that are easily subjected to leaching and erosion during heavy rains. Erosion, the use of cover crops for retention of Soil moisture, and retaining some trees in the field for enhancement of fertility, are amongst relevant research subjects being examined at Nyankpala Savanna Agricultural Research Institute (SARI).

Table 3. Impact of tractor tillage and land degradation in Northern Ghana.

Activity	Impact as reported by farmers
1. Ploughing up and down slope	1. Encourages erosion and speed runoff
2. Improper implement adjustment	2. Hard pan formation, reduced infiltration and root development, increased draught resistance
3. Worn out tyres	3. Encourages erosion and runoff, increased risk of soil surface crust, and leaching of fine soil particles
4. Harrowing and reduced soil clod sizes	4. Exposure of great Soil volume to erosion.
5. Too deep ploughing	5. Deep burial of top soil and organic matter
6. General Mechanisation	6. Removal of vegetative cover

2.4. Subsistence Farming

Majority of tractor owners/farmers do not treat farming as business, rather they see it as a way of life, therefore most farmers operate at subsistence level. Most tractor owners tend to consider the gross income less the fuel and lubricants cost as profit. Usually sufficient funds are not set aside for repair and maintenance. In some instances, when a tractor breaks down, farmers are compelled to sell their animals to raise funds for repair and maintenance.

2.5. Donor Assistance

Another problem area is the existence of too many makes of tractors in the system without corresponding stock of spare parts. Most tractors come into the country as packages under donor-assisted projects, and after project lifespan, spare parts availability becomes scarce. Over-aged tractors with low efficiencies are likely to cause damage to the soils during field operations.

2.6. Population Pressure and Land Fragmentation

The growing population pressure is limiting the possibilities for shifting cultivation with very long fallow periods in traditional land use systems thus subjecting many farmlands to rapid degradation. Land areas are decreasing per farming family leading to fragmentation of land. Machine manoeuvrability and efficiency become key problems on such small patches of land, causing soil structural damage during field operations.

2.7. Lack of Training and Research

At the inception of mechanisation in the 1960s, when Government imported large numbers of agricultural machinery, there were only three training institutes at Navrongo for the Northern sector, Ejura for the forest and central sector, and Ohawu in the Volta Region for the eastern and coastal sectors. Initially most of the operators were drivers drafted from the transport sector.

Agricultural research in Ghana focuses on the biological and socio-economic sciences to the disadvantage of the physical and engineering sciences. Thus there is no serious research into tillage practices with engineering content being undertaken by any of the seven agricultural related research institutes in the country. This situation means agricultural extension staff of the Ministry of Food and Agriculture do not receive sufficient backstopping in mechanisation related problems from the research front.

3. SOLUTIONS

One of the basic premises for sustainable mechanised farming is the recognition that environment and commercial farming are not exclusive of one another, but are mutually reinforcing. Any general prohibition of agricultural development whether by mechanisation or traditional methods for purposes of nature conservation is unlikely to be sustained and supported by farmers. Given the short rainy season (period of land preparation) in the savanna north of the country, there will be demand for faster means of seedbed preparation to offset any expensive timely costs of operations.

The expansion and sustainability of tractorization will require land clearing and therefore controls which will result in reduced environmental damage such as erosion, soil structure damage, and loss of soil fertility are needed.

The fact that tractor operators decide how to plough inconsiderate of farmers opinion and field layout, the traditional land tenure system which does not regulate the individual's agricultural land use, and free and communal grazing of animals, most farmers are adopting animal traction for land preparation. Deep tractor ploughing especially when the soil is dry leaves top soil loose, dusty and erodible. The rising interest in the adoption of animal traction technology may be due to other factors such as high cattle population density in the transitional zone and the savanna north, the open nature of the vegetation, and the high cost of owning and running tractors. Main reasons include: timeliness of operation, expansion of farms, and convenience of land preparation.

Land degradation caused by mechanised farming can be reduced if the operators understand the basic principles of general agriculture, soil fertility and water management and knowledge of appropriate tillage equipment. Incentive laden packages should be given to operators for doing quality work. Thus training, research and legislation should be employed to raise awareness of land degradation in mechanised agriculture.

3.1. Training for mechanised farming

A key to successful mechanised farming is continuous education and training for managers, farmers and operators. The building of awareness in decision-makers, farmers and operators of the need to take account of land use management principles at the conceptual stages of the farming project cycle is an important goal since the impacts are likely to impose themselves later as costly constraints.

Training programmes should be tailored in content and form to suit their target groups. For example, tractor and animal traction operator training programmes in the north of Ghana should include instruction in the basic maintenance and repair concept, land conservation and management practices.

Tractor owners should be trained in machinery management, soil and water conservation and management. In addition to the above, training programmes should be determined and agreed upon with farmers on the most appropriate methods of mechanisation for the different farming systems, be demand-driven (need based) with participating farmers sharing experience in arriving at solutions. Farmers should have the options to make choice.

3.2. Research

Mechanisation should be undertaken to sustain the physical and chemical properties of the soil. Research should help to determine mechanisation effects on agronomic production with respect to: soil compaction and ploughpan formation and effects on water infiltration and moisture availability, trials on soil preparation practices and improved organic matter management, physical soil conservation structures such as bunding, the use of cover crops for retention of soil moisture, agro-forestry and enhancement of fertility and, extent of soil erosion noticed on some fields are amongst the subjects to be examined to answer questions on land degradation. Establishment of runoff plots on arable lands will be needed to examine the extent of erosion on mechanised fields. Tillage research should encompass tillage practices that conserve soil moisture and reduce soil erosion on mechanised fields.

3.3. Policy measures

Farmland planning guidelines are needed to design layouts for areas of natural vegetation, identify natural waterways, road location and soil and water conservation structures. To support government decentralisation plans, it is necessary to establish at district and community levels appropriate structures and controls over the use of mechanisation.

Mechanisation of virgin lands should be subjected to prior planning and approval from the Agricultural Engineering Services Department of the Ministry of Food and Agriculture. (AESD/MOFA). Mechanisation resource mapping should be undertaken by the AESD, indicating

areas which are most and least desirable for tractor and animal traction.

4. CONCLUSION

Poorly managed mechanised farms are likely to cause problems of land degradation. Long and medium term remedial measures are possible through improved education and training on land degradation and conservation, and policies based on the prediction of environmental impacts of mechanised farming.

Lack of operator training is responsible for tendency to apply truck driving skills to ploughing, by rushing to get the job completed as soon as possible, by using high ploughing speeds with no depth control devices (usually, the furrow wheel for depth control is missing, disc are worn), and, no regard to slope and field layout.

Soil cultivation is the prime human activity which provides the basis for our daily bread. This is reinforced by the local names given to the land by some communities in Ghana. Probably, our future will depend on how well we are able to take care of the soil resources, to utilise and conserve them (Sundsbo, 1991). Sustainable development is relevant not least for the agricultural sector in Ghana. The soil must be tilled in such a way that food can be produced efficiently and sufficient for all, and yet at the same time in such a way that there is no loss of nutrients and topsoil or impairment of soil structure, which result in reduced future production potential.

Knowledge and research are key factors in the efforts to achieve productive and environmentally favourable agricultural systems. The responsibility for turning the necessary knowledge into action, according to Sundsbo (1991), lies with the political authorities.

REFERENCES

1. Badawi, S. (1993) Report on environmental impact assessment of agricultural mechanisation in the Afram Plains of Ghana. An F.A.O./M.O.F.A. study No. GCP/GHA/024/ITA. 96pp.
2. Soil Research Institute (1971). Soil erosion hazard map of Ghana, SRI, Kumasi, Ghana.
3. Sundsbo, S (1991). Soil cultivation in relation to our common future and sustainable global development. Soil and Tillage Research, 21:159-166.

MARQUAGE ISOTOPIQUE NATUREL DE LA VAPEUR D'EAU ISSUE D'UN COUVERT VEGETAL

Z. BOUJAMLAOUI¹, T. BARIAC²

RESUME

L'utilisation de la méthodologie isotopique nous a permis d'examiner l'influence de la plante sur son environnement, et, en particulier le rôle joué par la vapeur d'eau issue du réservoir d'eau foliaire sur la modification du signal isotopique de la vapeur d'eau atmosphérique local. L'expérimentation que nous avons traitée ici a été effectuée dans des conditions naturelles et au cours d'un cycle nyctéméral complet. Le prélèvement a concerné les échantillons de l'ensemble plante-atmosphère d'une parcelle cultivée en maïs (station de Bioclimatologie, INRA, Grignon, Yvelines, France).

INTRODUCTION

Ces dernières années, plusieurs travaux (Washburn et Smith 1934 ; Bariac, 1988 ; Yakir et al., 1989 ; Walker et Brunel, 1990 ; Brunel et al., 1992 ; Bariac et al., 1991, 1994 ; Boujamlaoui, 1993, entre autres) ont permis de compléter les recherches relatives aux transferts hydriques dans l'ensemble plante-atmosphère, par utilisation des isotopes stables de l'eau à savoir, oxygène-18 (¹⁸O) et deutérium (²H).

Cette recherche se propose donc, d'appliquer la méthode des isotopes stables de l'eau (deutérium et oxygène 18) à l'étude des interactions couvert végétal-environnement. Nos premiers résultats confirment les travaux de plusieurs auteurs à savoir que l'évolution de la composition isotopique du réservoir d'eau foliaire est tributaire des conditions climatiques de l'environnement de la plante. Par la suite nous allons montrer que la plante affecte aussi son environnement par modification du signal isotopique de la vapeur d'eau local.

I. MATERIELS ET METHODES

I.1. Protocole expérimental

Suivant un pas de temps d'une heure, nous avons

relevé l'évolution des paramètres microclimatiques :

- température de l'air.
- humidité relative de l'air.

Ces relevés ont été effectués à chaque niveau d'insertion foliaire du plant maïs (9 à 11 feuilles).

Suivant le même pas de temps (1 heure) nous avons échantillonné :

- un plant de maïs :
 - * feuilles entières à différentes hauteurs et que nous avons numéroté de L1 à L10 entre l'atmosphère libre et le sol.
 - * panicule, épillet et collet.
- la vapeur d'eau toutes les 2 heures, à différentes hauteurs dans et au-dessus du couvert végétal (0,4 m, 1,2 m et 4,0 m). Le type de prélèvement adopté est le prélèvement par ampoule. Cette technique consiste en l'ouverture pendant quelque minute sur le terrain et au niveau atmosphérique que l'on désire d'une ampoule sous vide.

I.2. Méthodes analytiques

La détermination de la teneur en oxygène-18 est réalisée selon le protocole décrit par Epstein et Mayeda, 1953.

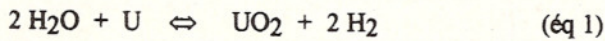
L'analyse isotopique en deutérium est réalisée selon

¹ Laboratoire de Chimie Analytique Minérale et Agricole, I.A.V Hassan II, BP 6202, Rabat-Instituts, Maroc.

E-mail : Jamlaoui@iav.refer.org.ma.

² Laboratoire de Biogéochimie Isotopique U.P.M.C, 4, Place Jussieu 75252, Paris, France.

les protocoles décrits par Bigeleisen et al., 1952 et Friedman et Hardcastle, 1970. L'eau est réduite sur l'uranium à une température de 800°C.



Pour les petites quantités d'eau, Les teneurs en oxygène 18 sont déterminées par utilisation du couplage Isoprep 18 - Optima.

Les résultats isotopiques sont déterminés au spectromètre de masse tout en tenant compte des corrections appropriées. Ces résultats sont exprimés en unités " δ_i ", par référence à l'étalon international "V-SMOW", (Gonfiantini, 1978).

$$\delta_E = [(R_E/R_S)-1]*1000 \quad (\text{éq 2})$$

R_E : rapport isotopique de l'échantillon.

R_S : rapport isotopique du standard.

L'erreur analytique est de $\pm 0,1\%$ dans le cas de l'oxygène-18 (^{18}O) de l'eau et de $\pm 0,5\%$ dans le cas de deutérium (^2H).

II. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

II.1. Evolution des paramètres microclimatiques

Afin d'étudier la répartition spatiale et temporelle de la température et de l'humidité relative de l'air, nous avons reporté sur la figure 1 l'évolution de ces paramètres au cours du temps. Sur cette figure, on observe des humidités relatives de l'air proches de la saturation et des températures minimales au début de chaque matinée (à 05h00 heures 13,7 °C pour la feuille L6 et 14 °C pour la feuille L10). Par contre, les fortes valeurs de températures et de déficit hygrométriques sont enregistrées au cours de la journée (à 17h00 pour la feuille L6 (70,7% et 30,1°C) et à 16h00 pour la feuille L10 (70% et 29,8°C)).

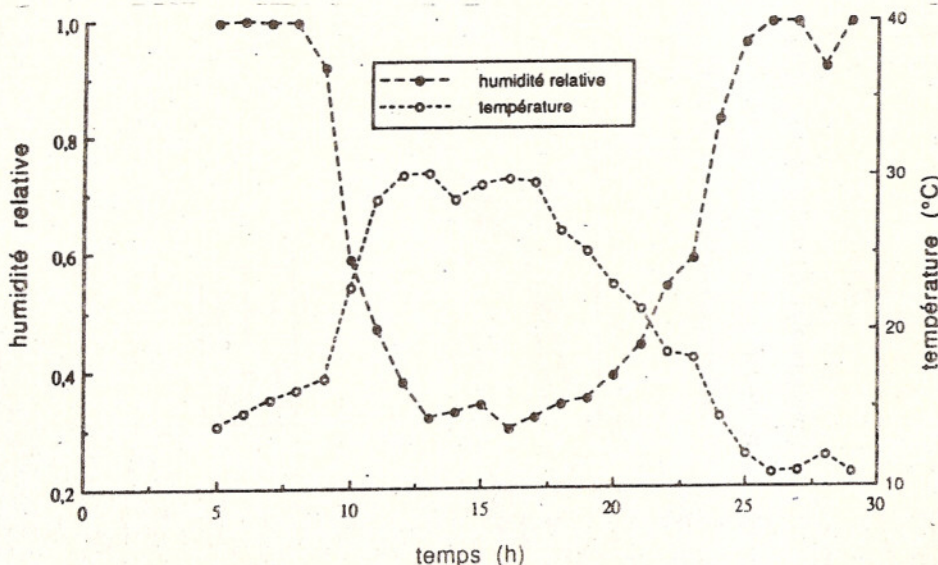


Figure 1 : Evolution au cours du temps, des paramètres microclimatiques (température et humidité relative de l'air) au niveau de la feuille L6.

II.2. Evolution des paramètres isotopiques

a- teneur en isotopes lourds de l'eau foliaire :

L'évolution temporelle de la composition isotopique de l'eau foliaire (figure 2), montre un accroissement rapide des teneurs en isotopes lourds depuis la matinée jusqu'au milieu de la journée, suivi d'une décroissance progressive à partir d'une valeur maximale pendant le reste du cycle nyctéméral. Il s'agit de la variation de cette composition sous l'effet des paramètres climatiques de l'environnement de la plante, en particulier le paramètre hygrométrique. D'une manière générale, l'enrichissement isotopique observé est provoqué par les phénomènes transpiratoires. Dans le cycle de l'eau, les fractionnements isotopiques sont essentiellement liés aux changements de phases et à la diffusion des espèces isotopiques en phases liquide ou gazeuse. Ces fractionnements aboutissent à des différenciations entre les espèces isotopiques de l'eau, d'où un enrichissement de la fraction liquide restante du réservoir foliaire sous l'effet de la transpiration.

b- teneur en isotopes lourds de la vapeur d'eau :

L'évolution de la composition isotopique de la vapeur d'eau à différents niveaux du couvert végétal est montrée en figure 3 :

- une répartition des teneurs isotopiques pratiquement uniforme au début de la matinée,
- une diminution générale de ces teneurs au cours de la journée jusqu'à 14h00, puis une augmentation brusque à 16h00, directement suivi d'une diminution progressive pendant toute la période nocturne,
- au-dessous du couvert végétal les échantillons prélevés à 40 cm du sol sont plus enrichis que ceux prélevés à 120 cm,
- durant la période diurne, la vapeur d'eau au sein du couvert végétal (40 cm) est plus enrichie que la vapeur d'eau atmosphérique (400 cm). L'amplitude de cette variation s'est atténuée progressivement durant la période nocturne.

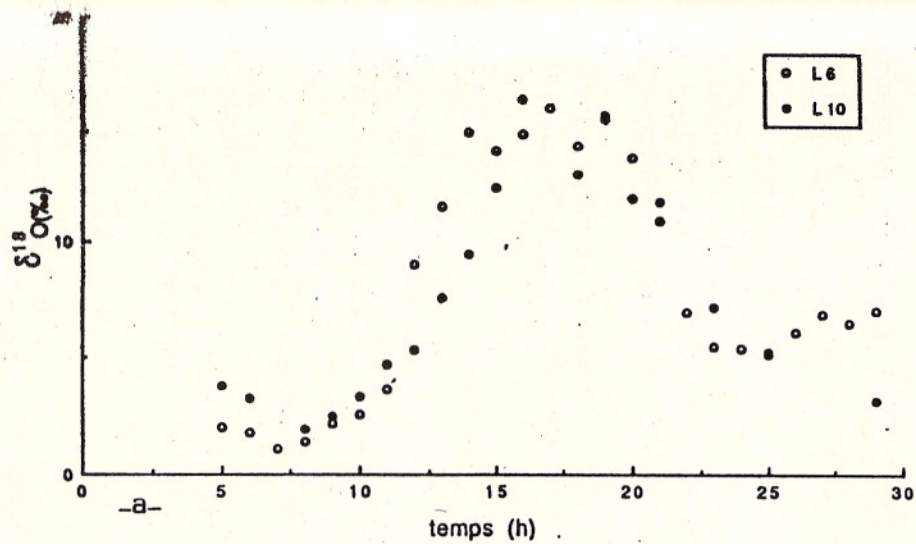


Figure 2 : Évolution au cours du temps, de la teneur en isotopes lourds du réservoir d'eau foliaire (a: oxygène-18, b: deutérium).

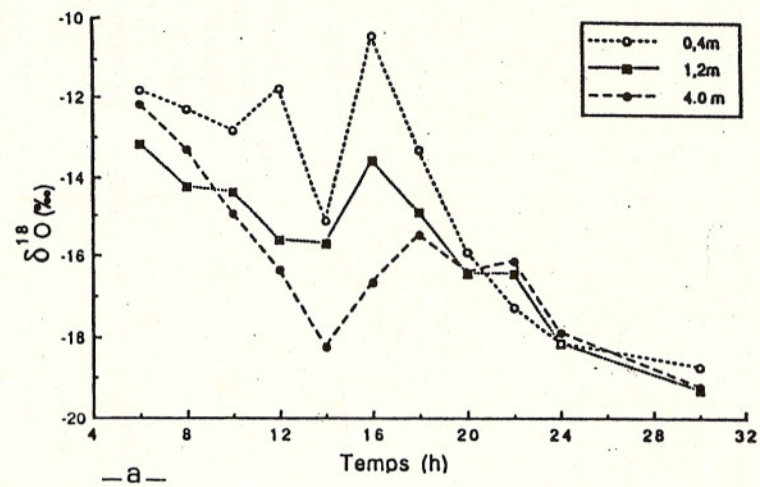
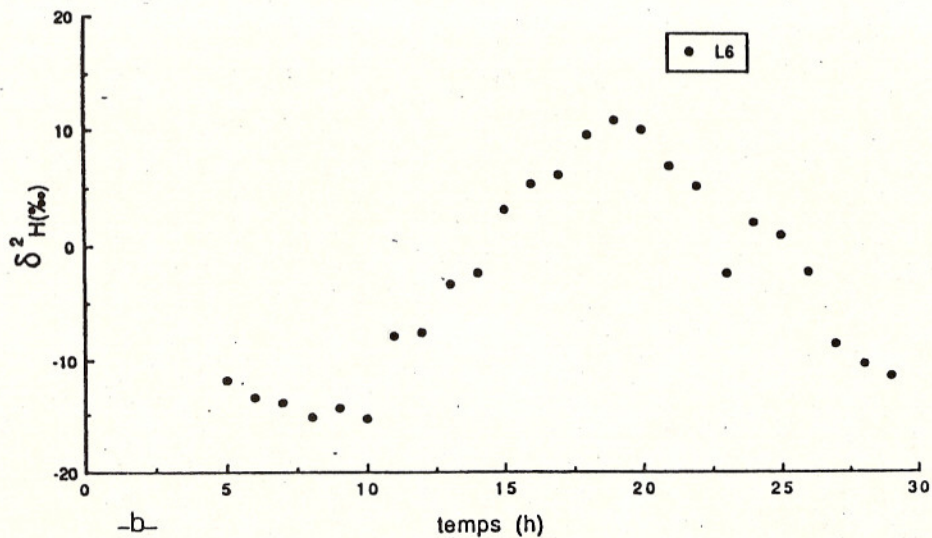
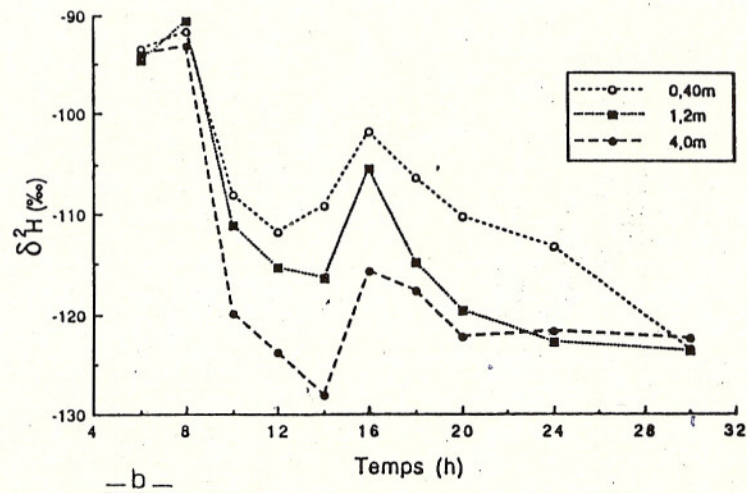


Figure 3 : Évolution au cours du temps, des teneurs en isotopes lourds de la vapeur d'eau libre, prélevée à l'intérieur et au dessus du couvert végétal. (a: oxygène-18, b: deutérium).



La composition isotopique de la vapeur d'eau évolue donc dans l'espace et dans le temps. L'enrichissement observé peut être expliqué par une contribution de la vapeur d'eau issue du réservoir d'eau foliaire. Cette vapeur est plus enrichie en isotopes lourds que la vapeur d'eau régionale. En effet, la feuille restitue vers l'atmosphère libre une vapeur de composition isotopique moyenne identique à celle du collet, lorsque le réservoir d'eau foliaire présente un état isotopique stationnaire (Zimmermann et al., 1967).

Rozanski et al., 1982 ; Walker et Brunel., 1990 ; Bariac et al., 1991; Brunel et al., 1992, ont mis en évidence la variabilité spatiale et temporelle de la vapeur d'eau atmosphérique. Ces auteurs ont observé l'augmentation de la teneur en isotopes lourds de cette vapeur. Ce phénomène a été attribué à la contribution de la vapeur issue des réservoirs d'eau continentaux (lac ou couvert végétal).

La diminution observée sur nos profils au début de la journée peut s'expliquer par l'arrivée d'une masse de vapeur régionale, plus appauvrie en isotopes lourds, que la vapeur d'eau issue du couvert végétal. Du fait de la différence de masse entre ces deux vapeurs, l'atmosphérique impose donc sa teneur en isotopes lourds sur les différents niveaux de prélèvements. Seule une très forte transpiration permet de diminuer l'influence de la vapeur d'eau régionale, comme c'est le cas au milieu de la journée (16h00).

II.3. Relation $^2\text{H}-^{18}\text{O}$

Craig 1961, a montré que les teneurs en deutérium (^2H) et en oxygène -18 (^{18}O), dans les eaux météoriques, sont corrélées suivant une relation d'équation :

$$\delta^2\text{H} = a \delta^{18}\text{O} + b \quad (\text{éq 3})$$

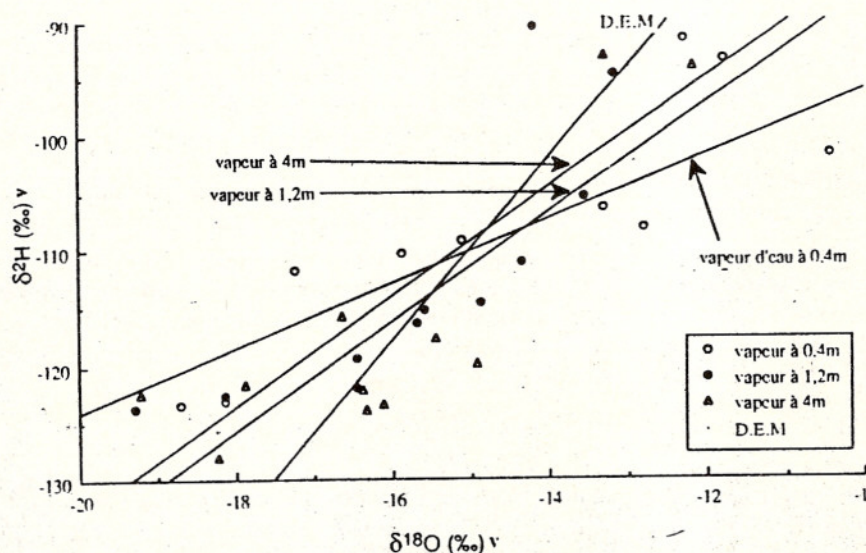


Figure 4 :

Représentation dans un diagramme $^2\text{H}-^{18}\text{O}$, de la composition isotopique de la vapeur d'eau prélevée à différents niveaux du couvert végétal

Si la valeur de la pente de cette droite est égale à 8 pour toutes les masses nuageuses, celle de l'ordonnée à l'origine "b", diffère selon l'origine de ces masses.

Nous avons reporté sur la figure 4, la relation entre les teneurs en deutérium et en oxygène-18, à différents niveaux du couvert végétal :

$$\begin{aligned} &\text{à } 0,4 \text{ m} \\ \delta^2\text{H} &= 2,81 \delta^{18}\text{O} - 67,94 && (\text{éq 4}) \\ R &= 0,79 \\ n &= 9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{à } 1,2 \text{ m} \\ \delta^2\text{H} &= 4,80 \delta^{18}\text{O} - 37,44 && (\text{éq 5}) \\ R &= 0,81 \\ n &= 9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{à } 4 \text{ m} \\ \delta^2\text{H} &= 4,79 \delta^{18}\text{O} - 39,69 && (\text{éq 6}) \\ R &= 0,81 \\ n &= 9 \end{aligned}$$

La valeur de pente au niveau 0,4 m est inférieure à celle calculée aux niveaux 1,2 m et 4,0 m. Cela pourrait revenir à l'hétérogénéité isotopique de ces masses d'air qui proviennent de différents mélanges. En particulier, au niveau 0,4 m, il y aurait influence de la vapeur d'eau issue du sol, en plus de la vapeur issue du couvert végétal.

D'autres explications de ces équations pourraient se résumer à la limitation de mélange entre la vapeur d'eau transpirée et la vapeur d'eau régionale par la couverture végétale. Ce mélange est nettement confirmé au niveau 1,2 m dont la relation linéaire (éq 5), est similaire à celle de l'atmosphère libre au niveau 4, 0 m (éq 6).

Nous avons constaté que les points représentatifs de la période diurne se répartissent à la partie droite de la droite des eaux météoriques et les points représentatifs de la période nocturne se répartissent à gauche de cette droite.

Ceci pourrait s'expliquer par l'influence du couvert végétal sur la vapeur d'eau atmosphérique, lors de la transpiration. En effet, à l'état isotopique stationnaire la composition isotopique de la vapeur d'eau issue du réservoir foliaire est égale à la composition isotopique de l'eau d'absorption racinaire. C'est donc à la double origine de la vapeur d'eau mesurée (vapeur d'eau atmosphérique, vapeur issue du couvert) que cette répartition doit être attribuée.

CONCLUSION

Ces expérimentations mettent en évidence l'influence réciproque de la plante avec son environnement. En effet, les conditions climatiques influencent l'évolution de la composition isotopique du réservoir d'eau foliaire et réciproquement le signal isotopique de la vapeur d'eau local est modifié par la composition isotopique de la vapeur issue de la chambre sous stomatique, en particulier, dans la période de forte transpiration.

La composition isotopique de la vapeur d'eau, mesurée à un niveau donné dans l'atmosphère du couvert, doit donc être considérée comme la résultante d'un mélange entre :

- la vapeur transpirée, dont la composition isotopique moyenne est identique à celle de l'eau du collet, dans le cas où le réservoir foliaire serait à l'état isotopique stationnaire ;
- une vapeur préexistante, dont la composition isotopique est imposée par l'histoire de la vapeur d'eau régionale.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- 1- BARIAC, T. 1988. Les isotopes stables (^{18}O , ^2H) de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère : Conséquence pour la vapeur d'eau atmosphérique. Thèse Doct. Etat, Univ. P et M. Curie, Paris, 359 P.
- 2- BARIAC, T., DELLENS, E., GERBAUD, A., ANDRE, M., MARIOTTI, A. 1991. La composition isotopique (^{18}O , ^2H) de la vapeur d'eau transpirée : Etude en conditions asservies. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 55 : 3391-3402.
- 3- BARIAC, T., GONZALEZ-DUNIA, J., KATERJI, N., BETHENOD, O., BERTOLINI, J.M., et MARIOTTI, A. 1994. Variabilité spatio-temporelle de la composition isotopique de l'eau (^{18}O , ^2H) dans le continuum sol-plante-atmosphère 2. Approche en conditions naturelles.
- 4- BOUJAMLAOUI, Z. 1993. Continuum sol-plante-atmosphère : Influence de l'évapotranspiration sur les bilans isotopiques (^{18}O et ^2H) sous climat tempéré et climat aride. Thèse Doct. d'Univ. UPMC Paris, 150 P.
- 5- BIGELEISEN, J., PERLMAN, M. ET PROSSER, H. C (1952). Conversion of hydrogenic materials to hydrogen for isotopic analysis. *Anal. Chem.*, 24, 1356-1357.
- 6- BRUNEL, J. P., SIMPSON, H. J., HERCZEG, A. L., WHITEHEAD, R. and WALKER, G. R. 1992. Stable Isotope Composition of Water Vapor as an Indicator of Transpiration Flux From Rice Crops. *Water Resources Research*, VOL. 28, NO. 5, P 1407-1416.
- 7- CRAIG, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. 133 :1702-1703.
- 8- EPSTEIN, S. and MAYEDA, T. (1953). Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 4 : 213-224.
- 9- FRIEDMAN, I. and HARDCASTLE, K. (1970). A new technique for pumping hydrogen gas. *Geochim. Cosmo. Acta.* 34 : 125-126.
- 10- GONFIANTINI, R. (1978). Standards of stable isotope measurement in natural compounds. *Nature*, 271: 534-536.
- 11- ROZANSKI, K., SONNTAG, C. and MUNNICH, K.O. 1982. Controlling stable isotope composition of European precipitation. *Tellus* 34 : 142-150.
- 12- WALKER, C.D. and BRUNEL J.P. 1990. Examining evapotranspiration in a semi-arid region using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *J. Hydrol.*, 118 : 55-75.
- 13- WASHBURN, E.W. and SMITH, E.R. 1934. The isotopic fractionation of water physiological processes. *Science*, 79 :188-189.
- 14- YAKIR, D., de NIRO, M.J. and RUNDEL, P.W. 1989. Isotopic inhomogeneity of leaf water: evidence and implications for the use of isotopic signals transduced by plants. *Geochimica and Cosmochimica Acta.* 53 : 2769-2773.
- 15- ZIMMERMANN, U., EHHALT, D. and MÜNNICH, K.O. 1967. Soil water movement and evapotranspiration: Changes in the isotopic composition of the water. In "Isotopic in Hydrology ". *Proceed. Symp., I.A.E.A. Vienna*, 567-585.

SAUVEGARDE DE LA ZONE AGRUMICOLE EL GUERDANE UNE NOUVELLE GENERATION DE PROJET D'IRRIGATION AU MAROC¹

M.FAQUIR², D.ABAINOU, H.MOUMADI ET L.HACHIMY³

RESUME

Le développement du secteur irrigué dans la plaine du Souss s'est fait principalement par le biais d'une intense exploitation de la nappe souterraine, occasionnant un déficit progressif passant de 80 millions de m³/an en 1970 à 250 Mm³/an ces dernières années et entraînant un rabattement important et généralisé du niveau de la nappe, atteignant une moyenne de 2 m/an dans la zone d'El Guerdane. Cette situation met ainsi en péril l'un des plus importants vergers agrumicoles du Maroc (16.000ha), en raison des coûts de pompage et de surcreusement de plus en plus exorbitants.

Les pouvoirs publics, en concertation avec les agrumiculteurs concernés ont initié l'idée d'un projet de sauvegarde basé sur un transfert d'eaux superficielles qui viendraient en supplément des eaux souterraines et une utilisation optimale et contrôlée de ces ressources en eau. Ce projet consiste à alimenter une superficie de plantations d'agrumes de 10.000 ha en eau durant la période allant de mai à septembre sur la base d'une dotation moyenne d'appoint de 4000 m³/ha. Le volume qui sera transféré ainsi à partir du barrage Chakoukane en cours de construction, via le barrage d'Aoulouz sera de 46 millions de m³.

L'aménagement hydro-agricole consiste en la construction d'un seuil de dérivation sur l'oued Souss, d'un canal adducteur dimensionné pour un débit de 3,5 m³/s ayant un linéaire de 76 km, d'un réseau de 300 km de conduites sous pression et l'adoption de l'irrigation localisée par l'ensemble des bénéficiaires.

Ce projet est le fruit d'un partenariat entre l'Etat et les agrumiculteurs organisés dans le cadre d'une Association des Usagers des Eaux Agricoles (AUEA Almoustakbal) et basé sur une démarche participative qui associe les bénéficiaires à la conception, au financement, à la réalisation et à la gestion et l'exploitation du réseau d'irrigation. L'AUEA prendra en charge 60 % du coût du projet qui est évalué à 750 millions de Dirhams. Une fois réalisée, le projet sera concédé pour une période de quarante années à l'AUEA, qui en assurera la gestion et l'exploitation.

Mots clés : Appoint, Partenariat, Participation, Concession

ABSTRACT

The development of irrigated area in Souss valley was achieved by intensive use of the underground water sheet, that caused a significant drop of the water table from 80 millions m³/year at 1970 to 250 Mm³/year during the last years. Consequently an average decrease of 2m/year was observed in the water table at the Guerdane area. This situation constitute a real threat to one of the most important citrus grove in Morocco (16.000 ha) due to an increasing cost of pumping and excessive excavation of the wells.

Public authorities in concertation with the concerned citrus growers have initiated a project aiming the preservation of the citrus orchards in this area. The project consists of providing the farmers with water resources transferred from Aoulouz dam, to partially substitute the underground water and rational and controlled use of this water resources. This operation concern a total volume of 46 Mm³/year, such amount will insure the

¹ Preservation of the citrus groves of Guerdane, a new generation of irrigation project in Morocco

² Ingénieur agronome, Directeur de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Souss Massa (ORMVA)

³ Ingénieurs du génie rural à l'ORMVA du Souss Massa

complementary irrigation of 10,000 ha of citrus, providing 4,000 m³/ha during the critical period from September to may.

The project plan also the construction of a diverting dam downstream the existing Aoulouz dam, a feeding channel (3.5 m³/s and 76 Km long) and 300 Km of a pipes under pressure for water distribution. All the beneficiaries will have to adopt drip irrigation systems.

This project is a joint partnership between the State and the farmers organized in Association of Water Users. Within the framework of this project the beneficiaries will have to be involved in, all activities: designing, financial support, implementation and management. The total cost of the project is estimated to 750 millions Dirhams (75 millions Dollars) among which 60% will be paid for by the farmers. Under the agreement of this partnership and upon completion of the project, the water users will be entitled to take in charge the management and direct running of the irrigation network.

Keywords: Complementary irrigation, partnership, water users, preservation, concession.

1. LE CONTEXTE GENERAL

1.1. Le Contexte National : Priorité au Secteur Agricole

Le secteur agricole occupe une place prépondérante dans l'économie du Maroc, il emploie 40% de la population active, contribue à 30% des exportations et participe pour 12 à 20% dans le PIB, selon les conditions climatiques de la saison.

Le Maroc est caractérisé par la diversité des influences climatiques auxquelles il est soumis. La pluviométrie varie de 100 mm dans les zones sahariennes à plus de 1000 mm dans le Rif au Nord Ouest du Royaume. La forte variabilité interannuelle peut se traduire par des séquences de plusieurs années consécutives de sécheresse.

A partir du début des années soixante, le secteur de l'irrigation deviendra prioritaire pour les pouvoirs publics, qui ont adopté des mesures juridiques, administratives, sociales et financières visant l'accélération du rythme des équipements et à l'accroissement de la production agricole.

Cette politique a permis au Maroc de réaliser une quarantaine de barrage qui assurent la régularisation de 9,5 milliards de m³ et d'atteindre en 1997 une superficie irriguée de 1.004.000 ha dont 671.700 ha de Grande Hydraulique et 332.300 ha de Petite et Moyenne Hydraulique, soit 80% du potentiel irrigable. Une cinquantaine d'autres barrages viendront compléter le schéma de mobilisation de la grande hydraulique à l'horizon 2020.

Au Maroc, le secteur des agrumes joue un rôle socio-économique de premier plan : la superficie totale plantée est de 75.000 ha dont 27.000 ha dans le Souss Massa soit 36%. La production nationale d'agrumes oscille entre 1 et 1,5 millions de tonnes. Les exportations représentent entre 40 et 50% des tonnages produits. Les exportations d'agrumes constituent chaque année une source

importante de devises (165 millions de \$ U.S en 1994). Ce secteur fait vivre 10.000 familles de producteurs et assure l'emploi soit directement (exploitations) ou indirectement (stations de conditionnement, transport, port, agro-industries...) pour 20 millions de journées de travail environ. Les rendements sont variables selon les années, l'âge des plantations et le degré d'intensification des vergers : dans des vergers en pleine production les rendements moyens sont de l'ordre de 35 tonnes/ha pour les oranges et 25 T/ha pour les clémentines.

Le Département de l'Agriculture en collaboration avec la profession (ASPAM), ont élaboré un plan de mise à niveau 1998/2010 qui prévoit la réalisation de 34.000 ha (4.000 ha/an) de plantations dont la moitié est destinée au renouvellement des vieux vergers et la moitié d'extension en fonction des disponibilités en eau et en terres adaptées.

1.2. Le Contexte Régional : Une Agriculture d'Exportation

1.2.1. Le climat

Il est déterminé par les trois principaux domaines qui le composent : le Haut Atlas, l'Anti Atlas et l'Océan. Il varie du type humide à hiver froid sur les cimes du Haut Atlas au saharien à hiver frais en plaine (selon classification Emberger).

A Taroudant, la température moyenne annuelle est de 19,7 °C, la pluviométrie moyenne annuelle est de 227 mm, elle est caractérisée par une irrégularité interannuelle et intra annuelle (de 50 à 670 mm). L'évaporation est assez élevée, elle est de 2066 ml mesurée au Piche et 1960 mm au Bac Class A, engendrant une évapotranspiration annuelle de 1406 mm qui donne lieu à un déficit hydrique de l'ordre de 1179 mm/an, qui s'accroît de mai à septembre. Les vents sont modérés et soufflent pratiquement toute l'année avec une direction ouest est et une vitesse moyenne de 5 Km/h.

1.2.2. La plaine du Souss Massa

L'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Souss Massa (ORMVA/SM) est chargé de la mise en œuvre de la politique agricole de l'Etat au niveau de sa zone d'action, qui s'étend sur une superficie de 12.000 Km² répartie comme suit :

- Plaine du Souss : 4.150 Km²
- Plaine du Massa : 1.600 Km²
- Zones montagneuses : 6.250 Km²

Les ressources en sol se répartissent comme suit :

Tableau 1 : Répartition des ressources en sol

NATURE D'OCCUPATION	SUPERFICIE (Ha)
Superficie Agricole Utile (SAU)	228.500
• SAU irrigable	108.500
• SAU bour	120.000
Domaine forestier	580.340
Parcours et incultes	391.160
TOTAL	1.200.000

La région du Souss possède un secteur agricole très développé, orienté principalement vers les cultures d'exportation (agrumes, maraîchage...), et ce grâce aux conditions de température favorable (proximité de l'océan atlantique), au dynamisme du secteur privé et aux investissements hydro-agricoles et aux infrastructures de

Tableau 2 : Les barrages dans les bassins versants du Souss Massa

Caractéristiques	Barrage Youssef Ben Tachefine	Barrage Abdel Moumen	Barrage Aoulouz	Barrage Imi Elkhneg
Date de mise en eau	1973	1981	1991	1993
Volume de retenue	303 millions m ³	213 millions m ³	108 millions m ³	12 millions m ³
Volume régularisé	90 millions m ³ /an	69,5 millions m ³	139 millions m ³	15 millions m ³ /an
Utilisation	<p>*périmètre Massa S. équipée 18050 ha Volume 75 Mm³/an</p> <p>*périmètre Tassila S équipée 1200 ha Volume 10Mm³/an</p> <p>*eau potable Tiznit volume 5 Mm³/an</p>	<p>* Issen moderne S. équipée 8560 ha Volume 49Mm³/an</p> <p>* Issen traditionnel S. équipée 4440 ha Volume 11 Mm³</p> <p>*eau potable Agadir volume 9.5 Mm³/an</p>	<p>* El Guerdane S. à équiper 10000ha Volume 46 Mm³/an (plan directeur)</p> <p>*Oliveraie Aoulouz Superficie 5000 ha Volume 18 Mm³/an</p> <p>* recharge nappe volume 75 Mm³/an</p>	<p>*Souss traidit. 420 ha à équiper Vol. 4.5 Mm³/an</p> <p>*recharge nappe Volume 10.5 Mm³/an</p>

base (port, aéroport...) consentis par les pouvoirs publics. Le secteur agrumicole du Souss est un secteur moderne piloté par une organisation professionnelle bien structurée : il produit 50 à 60% de la production nationale et intervient pour 50 % dans les exportations du Maroc.

1.2.3. Ressources en eau superficielles

Les ressources en eau superficielles proviennent principalement de l'Oued Massa et de l'Oued Souss : ce dernier draine un bassin versant de 16.600 Km² dont les principaux affluents sont l'Oued Issen et l'Oued Iouzioua qui draine le Haut Atlas à l'amont d'Aoulouz.

L'apport moyen en eau à Aoulouz est de 185 millions de m³. Le volume annuel moyen des apports est estimé à 650 millions de m³ dont une partie est régularisée par 4 barrages (cf. tableau 2).

1.2.4. Ressources en eau souterraines

Elles proviennent principalement de la nappe libre généralisée de la plaine du Souss et des nappes profondes, notamment celle du cénomanoturonien. Ses réserves sont estimées à 37 milliards de m³ et les prélèvements annuels sont de l'ordre de 490 Mm³ en 1996/1997.

1.2.5. Périmètres irrigués

La superficie totale équipée par l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Souss Massa, est de 52.500 ha sur une superficie totale irrigable de 108.500 ha (Tableau 3).

Tableau 3 : Les périmètres irrigués dans le Souss Massa

DESIGNATIONS	Grande Irrigation	Traditionnel Réhabilité	Total
PERIMETRES PUBLICS	32.710	19.790	52.500
• Massa	18.050	1.200	19.250
• Issen	8.560	4.440	13.000
• Souss amont	6.100	1.350	7.450
• Souss traditionnel (1ère tranche)	-	10.160	10.160
• PMH de montagne	-	970	970
• Périmètres diffus	-	1.670	1.670
PRIVE	37.350	19.650	56.000
• Moderne	37.350	-	37.350
• PMH de montagne	-	4.930	4.930
• Souss traditionnel (2 ^{ème} tranche)	-	13.720	13.720
TOTAL	70.060	38.440	108.500

2. PROBLEMATIQUE DE LA NAPPE DU SOUSS : UNE NAPPE EN BAISSSE

2.1. Hydrogéologie

Par l'importance de son étendue de 4150 Km² et ses réserves évaluées à 37 Milliards de m³, la nappe du Souss joue un rôle majeur dans le développement socio-économique de la plaine du Souss.

Sur le plan hydrogéologique, la structure de la plaine du Souss est un synclinal faillé orienté Est ouest et de géométrie complexe. Ses formations lithologiques dites "formation du Souss", dont l'épaisseur varie entre 200 et 500 m, sont composées de calcaires, sables, grès, argiles, marnes et dépôts conglomératiques continentaux et reposent sur un substratum schisteux étanche. Elles constituent le principal support de l'aquifère généralisé du Souss, l'une des plus importantes nappes d'eau souterraine phréatique du Royaume.

La nappe s'écoule d'Est en ouest avec un gradient plus élevé dans les zones de recharge à l'amont que dans la plaine. La profondeur de la nappe est comprise entre 10 m et 20 m dans les secteurs des lits fossiles et peut atteindre 100 à 130 m dans les zones de piémont.

Les paramètres hydrauliques de la nappe du Souss se présentent comme suit :

- La transmissivité varie de $T = 0.2.10^{-3}$ m²/s (formations de calcaires pliocènes du Souss aval) à 6.10^{-1} m²/s (les lits fossiles du Souss).
- La perméabilité varie de $K = 10^{-4}$ m/s (formation du Souss et dépôts quaternaires) à 40.10^{-4} m/s (formation ancienne de la plaine).
- Le coefficient d'emménagement varie de $S = 1.10^{-2}$ à 1.10^{-1}

2.2. Bilan de la Nappe

Le bilan de la nappe du Souss se présente de la manière suivante :

- La recharge de la nappe du Souss évaluée en moyenne à près de 414 Mm³/an, correspondant à l'infiltration dans le lit des Oueds évalué à 294 Mm³, l'infiltration de la pluie (environ 55 Mm³), l'infiltration des eaux d'irrigation (14 Mm³/an) et de l'abouchement des nappes profondes en bordure de plaine (48 Mm³/an).
- Les prélèvements d'eau souterraine sont estimés à 490 Mm³ soit près de 120 % des apports moyens renouvelables. Ces prélèvements sont constitués principalement des irrigations par pompage et qui sont passés de 227 Mm³/an en 1982/1983 à près de 461 Mm³ en 1996/1997 correspondent à un secteur d'environ 40.000 ha. Les prélèvements d'eau potable sont évalués à 28 Mm³ en 1996/97, les sous écoulements dans l'océan sont de l'ordre de 20 Mm³/an.

La surexploitation de la nappe du Souss s'est traduite par un destockage évalué à 5.3 Milliards de m³, réparti en :

- 3 Milliards m³ durant la période 1968/1986 soit un déficit moyen de 155 Mm³/an.
- 2.3 Milliards m³ durant la période 1986/1994 soit un déficit moyen de 250 Mm³/an.

Malgré une mobilisation importante des eaux de surface et la pratique de la recharge artificielle de la nappe par des lâchers du barrage Aoulouz le long de l'Oued Souss, on a assisté à un tarissement progressif des résurgences, des sources et khettaras et un rabattement continu du niveau de la nappe. Par rapport à la situation de 1968, ce rabattement dépasse 10m dans une très grande partie de la plaine et atteint un maximum de 65 m dans la zone d'exploitation la plus intense qui est celle d'El Guerdane.

Les études menées par la Direction Régionale de l'Hydraulique du Souss Massa et Draa ont montré que la recharge de la nappe dans le lit de l'oued aura peu d'influence sur le niveau de la nappe dans la zone d'El Guerdane du fait de son relatif éloignement du lit de l'oued Souss et de la nature géologique des couches traversées. Les effets attendus de cette recharge ne concernent qu'une bande de 3 à 5 Km de large située de part et d'autre de l'oued Souss.

Cette situation a entraîné des difficultés d'exploitation se traduisant par l'approfondissement des puits et forages, ce qui met en péril tout le secteur irrigué moderne privé, qui pratique des spéculations rentables, particulièrement les cultures maraîchères et les agrumes (Clémentine, Navel, Maroc Late...) destinées à l'exportation.

2.3. Les Schémas Directeurs d'Aménagement des Eaux

Déjà en 1974, les pouvoirs publics avaient adopté un schéma directeur de développement agricole de la plaine du Souss, qui visait principalement une exploitation rationnelle de l'eau d'irrigation. Selon ce schéma, la côte d'alerte serait atteinte en l'an 2007 où il serait impérieux de procéder à l'alimentation de la nappe par infiltration des eaux de crue de l'Oued Souss laminés grâce à un barrage à réaliser à Aoulouz. L'exploitation intensive et incontrôlée des eaux souterraines, accentuée par une séquence de déficit pluviométrique entre 1974 et 1986, a entraîné une baisse de la nappe dépassant les prévisions du schéma directeur de 1974 et a conduit les départements concernés à entreprendre les mesures suivantes :

- Etablissement d'un nouveau schéma directeur d'exploitation des eaux des bassins versants du Souss et Massa, en vue de :
 - la mobilisation de toutes les ressources en eau de cette zone
 - l'exploitation optimale de ces ressources
 - limiter la surexploitation de la nappe et réduire le déficit actuellement constaté
- Avancer la date de construction du barrage Aoulouz dont la mise en eau a été effectuée en 1991, au lieu de 2007 comme prévu par le plan directeur de 1974.
- Etudier le moyen adéquat pour sauvegarder le verger agrumicole El Guerdane Ouled Teima, menacé d'abandon du fait du rabattement du niveau de la nappe au rythme annuel de 2m et sur lequel la recharge artificielle de la nappe par les lâchers du barrage d'Aoulouz n'aura pas d'effet sensible.

3. MODE D'EXPLOITATION ACTUELLE ET EQUIPEMENT DES PARCELLES

3.1. Structure des Exploitations

Le verger agrumicole d'El Guerdane est situé dans

la vallée de l'Oued Souss, et s'étend entre la ville de Taroudant à l'est et Ouled Teima à l'ouest et couvre une superficie de 16.000 ha dont 12.000 ha de plantations d'agrumes. Ces exploitations agrumicoles ont un statut foncier privé avec un mode de faire valoir direct ; leurs superficies totales sont de 11.276 ha pour 591 exploitations réparties en trois groupes :

- Les exploitations agrumicoles de moins de 5 ha représentent 32% en nombre alors qu'elles n'occupent que 5% du verger d'agrumes.
- Les exploitations agrumicoles moyennes (entre 5 et 15 ha) représentent 41,5% en nombre et 20% de la superficie agrumicole.
- Les exploitations de plus de 15 ha représentent 26,5% des exploitations et détiennent 75% des superficies agrumicoles.

Tableau 4 : Répartition des exploitations (enquête ORMVA/SM 1995)

Catégories de surface d'agrumes par exploitation	Nombre d'exploitations	Taux (%)	Surface d'agrumes par catégorie	Taux (%)
-0 à 5 ha (inclus)	188	32	545	5
-5 à 15 ha	245	41,5	2278	20
-15 à 50 ha	114	19	3032	27
-50 à 100 ha	29	5	1926	17
-> à 100 ha	15	2,5	3495	31
TOTAL	591	100	11276	100

3.2. Modes d'Irrigation

La mise en culture d'un verger d'agrumes exige un investissement initial et un fond de roulement important. L'équipement de base en monnaie courante varie de 25.000 à 55.000 DH/ha et comprend les puits ou forages, le groupe de pompage, le matériel d'irrigation et de culture. Pour les exploitations équipées en matériel d'irrigation localisé (MIL), il faut ajouter un investissement de 20.000 à 30.000 DH/ha.

L'eau d'irrigation provient exclusivement de la nappe souterraine, les moyens de captage sont en général des puits foncés manuellement avec une profondeur variant entre 80 et 100 m ou récemment des forages pouvant atteindre 230 m de profondeur.

Les moyens d'exhaure sont constitués la plupart du temps de pompes à axe vertical entraînées par des moteurs thermiques. L'électrification s'est répandue ces dernières années grâce aux programmes d'électrification rurale menée par les pouvoirs publics. Les rendements des pompes sont en général mauvais en raison du choix du matériel et de l'instabilité du niveau statique de la nappe.

Face à la baisse de la nappe, les agriculteurs adoptent certaines solutions individuelles qui entraînent une

concurrence entre les exploitations, et peuvent entraîner à moyen et long terme l'abandon d'un grand nombre de vergers. Seules, les grandes exploitations peuvent suivre ce rythme qui nécessite de plus en plus d'investissement et de technicité :

- Pour la quasi-totalité des exploitations, le surcreusement se fait annuellement et entraîne l'adjonction d'éléments supplémentaires de colonnes de pompes et donc une augmentation de la puissance absorbée et la détérioration progressive du rendement global, et par conséquent une augmentation des charges.
- Il est fréquent que les agriculteurs abandonnent un puits dont le surcreusement est peu productif ou trop cher et utilisent un puits ou un forage proche soit en propriété ou en association.
- La substitution de forages profonds, en remplacement des anciens puits représente une dépense importante de l'ordre de 1 million de DH/forage.

Le mode d'irrigation le plus répandu est le gravitaire. L'irrigation localisée a commencé à s'installer dès la fin des années soixante dix, en raison de la raréfaction de l'eau, actuellement la superficie équipée en MIL est évaluée à 2.200 ha soit 20 % seulement du périmètre agrumicole El Guerdane. Les consommations d'eau annuelles sont estimées à 14.000 m³/ha en irrigation gravitaire et à 9.000 m³/ha en irrigation localisée.

Si le coût d'équipement, qui varie entre 20.000 à 30.000 DH/ha, reste relativement élevé pour les petites et moyennes exploitations, il n'en demeure pas moins que l'irrigation localisée est une solution incontournable pour la plupart des agriculteurs en raison de l'économie en eau, d'une meilleure valorisation du m³ et des économies en main d'œuvre et fertilisants, qu'elle génère.

3.3. Les Coûts d'Irrigation

Les charges annuelles directes de pompage varient de 11.000 à 27.000 DH/ha et sont fonction de l'énergie utilisée (électrique ou thermique). Ces charges sont réparties comme suit :

- L'énergie qui varie de 8.000 à 22.000 DH/ha (thermique ou électrique, profondeur nappe ...)
- Le surcreusement représente en moyenne 21.000 DH par puits soit 1.500 à 3.000 DH/ hectare (une moyenne de 1 puits/7 à 14 ha)
- Entretien du moteur de la pompe qui est importante dans le cas des moteurs thermiques, et varie entre 20.000 à 30.000 DH/puits/an soit 1.500 à 2.000 DH/ha.

Pour une consommation moyenne de 12.000 m³/ha, le coût total au m³ varierait entre 0,90 et 2,25 DH.

A titre de comparaison, les montants facturés et les coûts de revient avec amortissement pour l'année 1997 au niveau des périmètres publics gérés par l'Office du Souss Massa, sont comme suit :

Tableau 5 : Les coûts facturés de l'eau dans les périmètres du Souss Massa

Périmètre	Coût facture (dh/m ³)	Coût de revient (dh/m ³)	Coût moyen facturé à l'hectare d'agrumes (dh/ha)
MASSA (eau barrage et stations de reprise)	0,48	1,26	5.800
SOUSS AMONT TRADITIONNEL (pompage eaux souterraines, aspersion et gravitaire)	0,39	1,37	4.680
ISSEN (eau barrage et pression gravitaire)			
• Assolé (aspersion)	0,56	0,62	
• Planté (localisé)	0,53	0,62	4.500
• Traditionnel (gravitaire)	0,18	0,62	2.160

4. RAISON D'ETRE ET CONCEPTION DU PROJET

Le maintien des exploitations de la zone agrumicole El Guerdane, nécessite de lourds investissements en surcreusement de puits et en reconversion des équipements avec une menace réelle d'abandon si aucune mesure de sauvegarde proposant une solution durable n'est prise. C'est dans ce cadre que l'ORMVA du Souss Massa a lancé l'étude du projet de sauvegarde du verger agrumicole El Guerdane en 1986.

4.1. Les Variantes d'Alimentation

Deux variantes d'alimentation ont été analysées à savoir :

- Une adduction directe par le biais d'un canal à partir du barrage Aoulouz.
- Un pompage au niveau du lit fossile à travers une série de forages.

Le peu d'influence de la recharge artificielle de la nappe au niveau d'El Guerdane a orienté le concepteur vers l'option de l'adduction gravitaire d'autant qu'elle permettra d'économiser de l'énergie en garantissant une eau sous pression au niveau des bornes d'irrigation grâce à l'importante dénivelée existante entre l'adducteur et le périmètre.

⁴ Sur la base d'une moyenne de consommation en eau de 12.000 m³/ha.

4.2. Une Irrigation d'Appoint

Les ressources en eau disponibles ne permettent pas de faire face à la totalité des besoins en eau des 10.000 ha d'agrumes évalués à 120 millions de m³, en raison de la capacité de régulation du barrage d'Aoulouz et la nécessité de maintenir un programme de recharge de la nappe par l'écrêtement des crues⁵. Aussi le projet s'est contenté d'assurer une irrigation d'appoint durant la période de pointe allant de mai à septembre où serait satisfait 30 à 50% des besoins en eau selon le mode d'irrigation adoptée. Cette dotation d'appoint fixée à 46 millions de m³ par le plan directeur d'aménagement intégré des eaux des bassins Souss et Massa, sera régularisée par le barrage Chakoukane en cours de construction à l'amont du barrage Aoulouz, en raison de la conception particulière de ce dernier. En plus de ce transfert d'eaux superficielles qui viendraient se substituer à une partie des besoins prélevés à partir des eaux souterraines, le projet de sauvegarde vise à promouvoir des techniques modernes d'irrigation plus efficaces que le mode gravitaire pratiqué sur 80 % de la superficie plantée (2.200ha en MIL seulement).

Le volume transféré correspond à une dotation de 4000 m³/ha/5 mois alors que les besoins globaux pour une campagne d'irrigation d'une durée de l'ordre de 10 mois sont estimés à 8.500 m³/ha/an en mode d'irrigation localisé (50 % des besoins) et varie de 12.000 à 14.000 m³/ha pour le mode gravitaire (30 % des besoins). Le complément de cette dotation continuera à être prélevé par pompage individuel au niveau de la nappe, les exploitations devront adapter leurs plans d'arrosage à cette utilisation mixte des ressources en eau.

Le projet ne pourrait atteindre ses objectifs de sauvegarde, sans l'application stricte des mesures de contrôle des pompages par les services de l'Etat (avec l'aide de l'AUEA), au niveau de toute la région, avec en particulier l'installation systématique des compteurs au niveau des stations de pompage. De même qu'il y a lieu d'arrêter toute extension nouvelle de vergers d'agrumes, et se limiter uniquement au renouvellement des vergers âgés.

4.3. L'Aménagement Hydroagricole

Le projet El Guerdane, comporte les ouvrages hydrauliques suivants :

- Le barrage Chakoukane d'une capacité de 50 millions de m³ en cours de construction par l'administration de l'hydraulique, il est situé à 20 Km à l'amont d'Aoulouz. Les eaux régularisées par le barrage Chakoukane transiteront par la retenue du barrage Aoulouz. Il est constitué d'une digue homogène avec un masque amont en béton, la hauteur maximale sur le terrain naturel est de 61 m, la longueur en crête de

420 m et la largeur en crête de 6 m.

- L'ouvrage de dérivation sur l'Oued Souss à 500 m à l'aval du barrage Aoulouz. La variante de piquage directe au niveau du by pass de la conduite de vidange de fond n'a pas été possible en raison de la conception particulière du barrage Aoulouz. L'ouvrage de prise a été dimensionné pour délivrer le débit nominal de 6.2 m³/s avec un niveau de plan d'eau de fréquence 20 ans correspondant à un débit de crue de 1465 m³/s. Le débit de 6.2 m³/s est réparti en 3.5 m³/s pour le périmètre El Guerdane et 2.7 m³/s pour le secteur traditionnel G1 de 5.000 ha faisant partie de la deuxième tranche de la réhabilitation des périmètres traditionnels du Souss. L'ouvrage de dérivation comprend :
 - * un seuil de dérivation sous forme d'un déversoir avec un profil type Creager de 120 m de long et une hauteur de 3 m environ sur fond de fouille à la côte 698.58m.
 - * un bassin de dissipation d'énergie de 15 m de long.
 - * une passe de dégrèvement de 2 m de large munie d'une vanne wagon.
 - * une prise d'alimentation située en rive gauche de l'oued et formée de deux pertuis rectangulaires, d'un déversoir latéral et de masques limiteurs de débit.
- L'adducteur dimensionné pour un débit d'équipement de 3.5 m³/s ayant une longueur de 76 Km avec au départ une conduite enterrée 1600 mm sur 8 Km pour la traversée des habitations d'Aoulouz. A l'extrémité aval de cette conduite est prévu un brise charge formé d'un obturateur à disque. L'autre tronçon est constitué d'un canal à ciel ouvert de profil trapézoïdal ou rectangulaire selon la nature des terrains traversés. Le tracé et la dénivelée totale (+14 m) ont imposé une multitude de chutes (80) et de coursiers (9) ainsi que des ouvrages de franchissements dont 4 traversées d'Oueds importants. Une station de filtration et de mise en charge est installée à la fin du canal adducteur à la côte 284, pour assurer une pression minimale de 20 mCE à l'aval des bornes d'irrigation, nécessaire à la pratique d'une irrigation localisée.
- Un système de régulation du canal adducteur, qui permettra une gestion rationnelle des ouvrages en particulier une limitation des pertes d'eau et une surveillance générale du réseau. Initialement le projet prévoyait un fonctionnement en continu (24/24 h) du réseau d'irrigation et toujours en pleine capacité avec de simples décharges de sécurité pour faire face à d'éventuelles variations de débit (arrêt des irrigations en période d'orage, fermeture du réseau par incident...).
- Une piste d'exploitation de 4m de largeur tout au long du canal pour en permettre l'accès aux engins de maintenance.

⁵ Les consignes de lâchure ont pour but de vider toute la retenue pour garantir un maximum d'infiltration le long de l'Oued Souss.

- Le réseau de distribution est constitué de conduites sous pression de 300 Km de linéaire et de diamètre variant de 60 mm à 1600 mm.
- L'équipement des exploitations en matériel d'irrigation localisée devra être effectué par les futurs bénéficiaires conformément à leur engagement d'adhésion au projet.

4.4. Les Coûts du Projet

Le coût total du projet y compris le barrage Chakoukane est évalué à 1,1 milliards de DH (environ 110 millions de dollars : 1\$ = 10 DH), soit un coût de 750 millions de DH (Tableau 6) pour la composante aménagement hydroagricole (canal adducteur et réseau de distribution).

4.5. Problèmes en Suspens

- Pour le réseau de distribution en conduites sous pression, le projet d'exécution ne sera définitif qu'après achèvement de l'opération de souscription et identification précise de l'ensemble des agriculteurs désirant adhérer au projet. Les caractéristiques du réseau peuvent être modifiées en particulier en ce qui concerne la charge hydraulique en tête du réseau et le diamètre des conduites.
- Le fonctionnement hydraulique du réseau d'irrigation pendant seulement une période de 5 mois/an va induire une forte sollicitation du canal et du réseau de distribution en début et en fin de chaque campagne d'irrigation ce qui peut engendrer des risques de fissuration et d'affaissement au niveau de certains tronçons du canal ainsi qu'une progressive détérioration des joints et une probable corrosion de l'armature des conduites en béton suite à l'effet de stagnation des eaux et de la variation des températures. La structure technique et de gestion du réseau d'irrigation sera confrontée également à ce problème et devra adapter ses activités à ce fonctionnement de 5 mois/an.

5. UNE MAITRISE D'OUVRAGE PUBLIQUE OU PRIVEE ?

5.1. L'Environnement Institutionnel

5.1.1. Code des Investissements Agricoles

L'Etat avait adopté en matière de mise en valeur hydroagricole une politique de type contractuel, définie dans le Code des Investissements Agricole de 1969 (CIA).

Jusqu'à présent, la quasi-totalité des aménagements hydroagricoles (Grande irrigation) au Maroc ont été réalisés dans le cadre de ce CIA, dans lequel l'Etat assure la maîtrise d'ouvrage et le financement : il se charge de l'exécution non seulement de l'équipement externe aux propriétés, mais aussi de l'équipement interne (défrichage, réseau interne d'irrigation, nivellement ...). La contribution des bénéficiaires se limitait à une participation à 40 % de l'investissement, les 60 % restants étant considérés comme une subvention de l'Etat.

La participation des bénéficiaires est répartie en :

- une participation directe de 30 % du coût de l'aménagement, payable sur une période de 20 ans dont 4 de différé (avec un taux de 4 %). Est exonérée de cette participation, la tranche 0-5 ha pour les propriétés de moins 20 ha.
- 10 % dans la redevance au m³ d'eau, cette redevance inclut également les dépenses d'exploitation et d'entretien des réseaux.

Récemment ces dispositions ont été modifiées par la loi n°23/97 promulguée par le Dahir 1/97/171 du 2 août 1997 et qui prévoit :

- Une participation de 40 % du coût moyen des équipements (au lieu de 30%)
- Le taux d'intérêt des annuités passera de 4 % à 6 %
- Abrogation des exonérations initialement prévues pour la tranche des exploitations inférieures à 5 ha.

Tableau 6 : Les coûts du projet

COMPOSANTE	COUT EN DH (millions)	COUT EN \$ U.S (millions)
Assistance technique	16,5	1,65
Ouvrage de dérivation	10	1
Canal adducteur	210	21
Réseau de distribution Régulation du canal adducteur	483,5	48,35
Bornes d'irrigation	10	1
	20	2
Coût total (y compris imprévus)	750	75

5.1.2. Les Associations des Usagers des Eaux Agricoles

Dans le cadre de la gestion participative des réseaux d'irrigation initiée par l'Etat depuis 1990 les AUEA sont des structures organisationnelles (loi n°2/84 promulguée le 21 décembre 1990), qui peuvent se constituer dans les périmètres où l'Etat procède ou a procédé à la création ou à l'aménagement d'équipement en vue de l'utilisation des eaux agricoles. L'administration et l'AUEA peuvent ainsi collaborer ensemble à la réalisation et à l'exploitation des ouvrages d'aménagement hydroagricoles. L'AUEA participe activement à toutes les phases d'élaboration des études et des travaux et à la prise de décision concernant le projet d'aménagement. Une fois réalisée, l'AUEA prend possession des ouvrages exécutés et devient responsable de la gestion et de l'entretien des ouvrages et des équipements.

5.1.3. Loi sur l'eau

Elle traduit la volonté de l'Etat de disposer d'instruments juridiques efficaces en vue d'organiser la répartition et le contrôle de l'utilisation des ressources en eau. Elle définit le cadre juridique dans lequel peuvent s'opérer les utilisations du domaine public hydraulique (autorisations, concessions...) et leurs modalités financières en particulier le paiement d'une redevance à l'Agence de bassin, dont la création est prévue dans le cadre de cette loi (loi 10/95 du 16 août 1995).

5.2. Les Alternatives Analysées

- **Maîtrise d'ouvrage publique** : Bien que le périmètre El Guerdane ne soit pas un périmètre public au sens du code des investissements agricoles de 1969, l'Office peut assurer la maîtrise d'ouvrage publique sur la totalité de l'aménagement hydroagricole (adducteur et réseau de distribution) en prenant à sa charge le financement du projet. L'Office mobilise la participation des bénéficiaires organisés dans le cadre d'une AUEA et conformément au programme de travaux arrêté en commun accord avec précision des conditions de mise à disposition de l'eau (débits, volume, période...), des conditions de participation financière au coût de l'investissement (paiement direct, échelonné, paiement au m³) et des conditions de participation aux frais de gestion et d'exploitation du réseau d'irrigation.
- **Maîtrise d'ouvrage privée** : elle passe par un contrat de concession entre l'administration gestionnaire du domaine public hydraulique (Office actuellement ou l'Agence de bassin au moment de sa création) et l'entité privée concessionnaire (AUEA ou un autre organisme privé) auquel il reviendra d'assurer le financement et la gestion des équipements nécessaires à l'utilisation de l'eau prélevée sur le domaine public au titre du contrat de concession.
- **Troisième alternative** : Partage de la maîtrise d'ouvrage entre l'Office pour le canal adducteur et un

concessionnaire privé (AUEA ou société privée) pour le réseau de distribution.

6. PARTICIPATION DES BENEFICIAIRES A L'INVESTISSEMENT

L'Association des Usagers des Eaux Agricoles Almoustakbal (avenir), a été créée en mars 1995 et devra intégrer l'ensemble des agriculteurs désirant bénéficier du projet de sauvegarde du verger agrumicole El Guerdane.

L'option de la maîtrise d'ouvrage publique sur la totalité du réseau d'irrigation a été retenue avec une très forte implication des agriculteurs dans le financement du projet. Les pouvoirs publics souhaiteraient traduire en concret l'approche participative en donnant un nouveau souffle aux AUEA, qui jusqu'à maintenant se sont limitées à gérer des périmètres de petite et moyenne hydraulique.

Le dispositif contractuel consistera pour le futur bénéficiaire à s'engager volontairement à souscrire à une obligation de paiement au prorata de la superficie plantée. Cette souscription qui devra être acquise avant le lancement des travaux, sera répartie en :

- * une souscription fixe à l'hectare
- * une redevance pour la gestion et l'exploitation du réseau d'irrigation

Le niveau acceptable de paiement des agriculteurs, ne doit pas dépasser le coût marginal actuel de l'eau qui correspond aux charges directes annuelles par m³, hors amortissement, et qui est de l'ordre de 1,30 à 1,40 DH/m³ dans le cas favorable des grandes exploitations. Ce coût devra couvrir la participation à l'investissement ainsi que les charges d'entretien et de gestion du réseau d'irrigation évalué à 0,20 DH/m³. De ce fait, la participation à l'investissement ne devrait pas dépasser 1,10 à 1,20 DH/m³ soit une échéance annuelle de 50 à 55 millions de DH pour les 46 Mm³ ou 5200 DH/ha. L'AUEA et l'administration ont convenu à un niveau de participation ne dépassant pas à un coût d'équipement à l'ha de 45.000 DH. Ce niveau de participation "acceptable" est proche des normes de participation prévues par le CIA de 1969. En tenant compte du coût du barrage Chakoukane évalué à 350 millions de DH, le coût global du projet serait de 1,1 milliards de DH et la participation des agriculteurs dans le cas CIA serait de 40% soit 440 millions de DH ou l'équivalent de 44.000 DH/ha.

C'est la première fois au Maroc qu'un projet d'une telle envergure est proposé pour être pris en charge complètement par une AUEA avec une participation financière à l'investissement de l'ordre de 60% et une souscription au projet bien avant le lancement des travaux d'aménagement. Ce projet devra être accompagné par une organisation et fonctionnement de l'AUEA adaptée à cette situation.

La Caisse Française de Développement a manifesté son intérêt pour ce projet novateur et a accordé une offre de financement de l'ordre de 252 millions de F.F à la CNCA à un taux d'intérêt de 3.5 % en vu de supporter la part de l'AUEA dans la réalisation des travaux d'aménagement hydroagricoles projetés : de son côté la CNCA serait l'intermédiaire financier entre la CFD et l'AUEA. Les modalités de financement de la part des agriculteurs, ont été axées sur les deux options suivantes :

- Prêt à l'AUEA, dans ce cas il appartiendra à cette dernière de facturer auprès de chaque agriculteur sa participation financière. Cette option exigerait la mise en place d'une garantie sous forme d'un cautionnement solidaire qui permet d'absorber des défaillances de paiement de la part de certains usagers.
- Prêt individuel avec une garantie hypothécaire, dans le cadre d'un contrat liant directement la CNCA à l'agriculteur

La première option a été écartée lors des discussions entre la CNCA et l'AUEA, vu les difficultés que pose la constitution du cautionnement solidaire.

Les simulations effectuées par la CNCA sur la base d'une participation à l'investissement de 45.000 DH/ha pour une période de remboursement de 20 ans avec 3 ans de différé et un taux de 9% a abouti à une annuité de 5.600 DH/ha, à laquelle il faudrait rajouter les frais de gestion et d'exploitation du réseau évalués à 800 DH/ha soit 6.400 DH/ha/an.

A titre de comparaison, la participation directe au niveau de certains périmètres publics réalisés après 1984, est comme suit :

Tableau 7 : Montant de la participation directe dans quelques périmètres irrigués du Maroc

Périmètres	Participation Directe à l'hectare en dh (30 %)	Annuité en dh (17 ans à 4 %)
GARET (Moulouya)	10.000	822
STI (Gharb)	8.000	658
ZEMAMRA (Doukkala)	7.000	575
TNINE GHARBIA (Doukkala)	8.500	699
SIDI SMAIL EXTENSION (Doukkala)	12.000	986
BENI AMIR (Tadla)	4.800	395
PLAINE KSAR (Loukkos)	26.382	2.169
BASSES COLLINES (Loukkos)	23.131	1.901
CUVETTE SIDI SMAIL (Doukkala)	15.056	1.238
ISSEN (Souss Massa)	25.680	2.111

Selon les premières simulations effectuées par l'Administration du Génie Rural, la participation directe au

niveau du périmètre Haut Service du Doukkala se situerait autour de 45.000 DH/ha et une annuité de 4.500 DH proche du niveau de participation adopté pour le projet El Guerdane.

7. LE MONTAGE INSTITUTIONNEL

Le montage institutionnel et financier du projet de sauvegarde de la zone agrumicole El Guerdane, nécessite la mise en place de nouvelles modalités d'organisation, de conventions et contrats liant les différents partenaires qui sont :

- Association des Usagers des Eaux Agricoles Almoustakbal
- Caisse Française de Développement
- Caisse Nationale du Crédit Agricole
- Le Ministère de l'Agriculture de l'Équipement et de l'Environnement : Administration du Génie Rural (Département de l'Agriculture) et Administration de l'Hydraulique (Département de l'Équipement)
- Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Souss Massa

La succession de ces contrats et conventions se fera de la manière suivante :

- Définition des conditions et modalités de financement de l'emprunt par la CNCA aux agriculteurs en ce qui concerne leur part au financement du projet.
- Signature des actes d'engagement individuel pour les agrumiculteurs désirant adhérer au projet et paiement d'une souscription de 5% du coût de participation de l'AUEA soit 2250 DH/ha : la superficie souscrite minimale est fixée à 8000 ha : au-dessous de ce seuil, le montant de la participation dépasserait la capacité de financement de la majorité des agrumiculteurs.
- Constitution définitive de l'AUEA dans le cadre d'une assemblée générale regroupant l'ensemble des souscripteurs et approbation du statut type et règlement intérieur.
- Convention Etat/AUEA relative au contrat programme portant sur la réalisation et l'exploitation du projet.
- Convention CFD/CNCA portant sur le financement de la part des agriculteurs (450 millions de DH)
- Contrat CNCA/AUEA, portant accord sur les conditions et modalités de financement du prêt CNCA
- Contrat CNCA/Agriculteur portant sur l'octroi du prêt individuel
- Convention d'assistance technique ORMVASM/AUEA (annuelle ou pluriannuelle), portant sur la gestion et la maintenance du réseau d'irrigation en sous traitance, en attendant la mise en place d'une structure technique et de gestion propre à l'AUEA.

L'opération de souscription sera lancée par le bureau de l'AUEA entre le 15 et 31 décembre 1997 et devra arrêter la liste définitive des agrumiculteurs désirant adhérer au projet.

8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le projet de sauvegarde du verger agrumicole El Guerdane est novateur dans ses aspects institutionnel et financier et traduit la volonté des pouvoirs publics et des agriculteurs de concrétiser l'approche participative par une effective implication des irriguants depuis la conception du projet jusqu'à la gestion et l'exploitation directe du réseau d'irrigation. C'est dans cet esprit que le projet de sauvegarde d'El Guerdane se veut être le précurseur d'une nouvelle génération de projets d'irrigation se démarquant des modalités classiques de réalisation des aménagements hydroagricoles pesant sur le budget de l'Etat.

Une partie des agriculteurs expriment leur réticence vis à vis de la formulation actuelle du projet dans ses aspects financier et institutionnel, particulièrement la garantie hypothécaire individuelle exigée par la CNCA et leur tendance à se référer aux aménagements hydroagricoles réalisés par l'Etat selon le code des investissements agricoles de 1969, omettant le caractère de sauvegarde du projet El Guerdane. Aussi il nous semble opportun d'anticiper sur d'autres maîtrises d'ouvrage notamment la concession privée (société privée ou/et AUEA) prévue par la nouvelle loi sur l'eau en donnant un nouveau souffle à ce projet porteur en ouvrant la voie aux opportunités qu'offre ce secteur vital pour notre économie nationale aux investisseurs privés ainsi qu'aux agriculteurs qui peuvent évoluer de l'état de simple usager de l'eau agricole au statut de promoteur et actionnaire d'une entreprise d'irrigation, et aux pouvoirs publics la mise au point d'une nouvelle approche de l'investissement hydroagricole.

La réussite du projet est également tributaire de certaines mesures d'accompagnement particulièrement la mise en place d'un système de suivi et de contrôle de la nappe et des extensions des vergers d'agrumes par l'ORMVA du Souss Massa en collaboration avec l'AUEA, l'Administration de l'Hydraulique et l'Administration du Génie Rural à l'instar de celui initié par cette dernière et basé sur le Système d'Information Géographique (SIG). De même que la procédure d'octroi de la subvention prévue au profit de l'équipement des exploitations en matériel d'irrigation localisée, doit être accélérée par la mise en place de mesures spécifiques en particulier la programmation d'une dotation en crédit FDA (Fond de Développement Agricole) réservée aux exploitations d'El Guerdane.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- 'Plan directeur de développement hydroagricole de la vallée du Souss', Equipement hydraulique- rapport technique N° 2 - F.A.O. par Groupement S.C.E.T INTERNATIONAL/GERSAR, Juillet 1974.
- 2- 'Etude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Souss, et Massa', Administration de l'Hydraulique par le groupement Motor Columbus/Coyne et Bellier/C.I.D/I.N.G.E.M.A :
 - Sous-Mission 1A. Analyse critique de la situation existante
 - Sous-Mission 1B. Etude des ressources en eau
 - Sous-Mission 1C. Etude de la demande en eau potable, industrielle et agricole
 - Sous-Mission 1D. Bilan ressources-besoins, Juillet 1990
 - Mission 2. Etude technico-économique, Avril 1992
 - Mission 3. Scénario économe en eau, Juillet 1994
- 3- 'Equipement hydroagricole de la zone agrumicole Oulad Teima Sebt El Guerdane. Etude de factibilité', ORMVA du Souss Massa par Equiter, Mars 1994.
- 4- 'Etude d'un barrage destiné à la dérivation de l'eau pour l'irrigation de l'olivieraie d'Aoulouz et la zone agrumicole Sebt El Guerdane-Ouled Teima, projet d'exécution', ORMVA du Souss Massa par Expert System, 1994.
- 5- 'Zone d'action de la Direction Régionale de l'Hydraulique du Souss Massa et Draa' par DRH, 1995.
- 6- 'Projet de sauvegardé du verger agrumicole El Guerdane, Mission d'expert : Diagnostic et recommandations', Rapports principal et annexes, Administration du Génie Rural et Caisse Française de Développement par Jean Rabés Consultant, Juin 1995.
- 7- 'Projet de sauvegarde du verger agrumicole El Guerdane, Mission d'expert : Etude complémentaire sur les aspects financiers, réglementaires et contractuels', Rapport principal : Administration du Génie Rural et Caisse Française de Développement par Jean Rabés Consultant et Vincent Didier Rousse(CACG), Mai 1996.
- 8- 'Equipement hydroagricole de la zone agrumicole Oulad Teima Sebt El Guerdane', ORMVA du Souss Massa par le groupement Equiter/Maroc développement/CET Moussa :
 - Projet d'exécution, lot Adducteur Aoulouz El Guerdane, Septembre 1997
 - Projet d'exécution, lot Réseau d'irrigation, Septembre 1997
- 9- 'Monographie de l'ORMVA du Souss Massa' par ORMVA/SM, Octobre 1997.

EVALUATION DE L'IMPACT DU RECHAUFFEMENT DE L'ATMOSPHERE SUR LES RESSOURCES EN EAU - APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA

YACOUBI¹, FAKHRADDINE¹, AGOUMI², SENOUSI³, CHIKRI⁴, MOKSSIT⁵

RESUME

Les ressources en eau d'un pays à climat semi-aride tel que le Maroc, présentent d'importantes fluctuations causées par les variabilités climatiques. L'édification d'un certain nombre de grands barrages a permis de réguler une bonne partie des eaux mobilisables et d'atténuer ainsi les effets des variabilités climatiques.

Cependant, d'autres préoccupations, telles que le réchauffement de l'atmosphère et son impact possible sur la ressource eau, ont vu dernièrement le jour à l'échelle planétaire. Pour évaluer l'impact de ce phénomène à l'échelle du Maroc, une recherche a été menée sur le bassin versant «Ouergha», où se trouve le plus grand barrage du royaume, «Al Wahda», qui mobilise près de 1/3 des eaux mobilisables du pays.

La première partie du travail a mis en exergue l'extrême variabilité du régime pluviométrique de ce bassin. Elle a également montré l'impact de l'épisode sec 1979-1994 sur la débitance de l'oued Ouergha. Un premier essai de modélisation a mis en évidence une excellente corrélation entre la lame annuelle précipitée et la lame ruisselée qu'elle engendre.

La deuxième partie du travail a consisté à caler et à valider le modèle hydrologique HYRRROM sur le bassin versant étudié.

La dernière partie a permis d'évaluer l'impact d'un réchauffement possible de l'atmosphère sur les débits du bassin versant de l'Ouergha.

Trois scénarios qui correspondent aux résultats les plus récents des modèles de circulation générale ont été étudiés. Les premiers résultats montrent une diminution sensible des débits, et par conséquent, des ressources en eau disponibles. Aussi selon ces premiers résultats, les réserves stockées dans le barrage Al Wahda subiraient un déficit estimé entre 8% et 20% selon les scénarios.

Ces résultats sont à prendre avec précaution, étant donné les incertitudes qui subsistent encore dans les prévisions des modèles de circulation générale à l'échelle régionale. Ils indiquent néanmoins, une tendance éventuelle du potentiel hydrique de ce bassin, et par conséquent des réserves en eau du barrage, qu'il serait judicieux d'intégrer dans la stratégie à long terme de la gestion de la ressource eau au Maroc.

¹ LPEE : Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes

² EHTP : Ecole Hassania des Travaux Publics

³ Université Hassan II

⁴ DGH : Direction Générale de l'Hydraulique (Ministère des Travaux Publics)

⁵ DMN : Direction de la Météorologie Nationale (Ministère des Travaux Publics)

INTRODUCTION

Au Maroc, les potentialités hydriques ont toujours connu de grandes fluctuations en relation avec le climat semi-aride et la fréquence des épisodes de sécheresse et des inondations que connaît la région.

De nos jours, l'impact de ces irrégularités hydroclimatiques sur la gestion de la ressource en eau est de plus en plus fort, étant donné l'accroissement considérable que connaît la demande en eau (évolution démographique, périmètres irrigués, industries... etc.).

Les variabilités climatiques font, par ailleurs, l'objet de grands travaux de recherche à l'échelle planétaire. Les résultats de ces recherches indiquent des tendances qu'il serait intéressant d'analyser : les possibilités d'occurrence de changements climatiques durant les prochaines décennies, même si elles restent incertaines, sont à suivre de près, et leur impact possible sur le potentiel hydrique national reste une question importante !

L'équilibre offre-demande en eau serait d'autant plus perturbé que notre région pourrait connaître dans les décennies à venir un réchauffement climatique dû probablement à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Un doublement des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère pourrait, d'après les Modèles de Circulation Générale, provoquer, pour le siècle prochain et pour notre région, une élévation allant de 1 à 3°C de la température de l'air à la surface de la Terre.

Cette recherche vise à donner les premiers éléments de réponse à ces différentes préoccupations pour le cas particulier d'un bassin versant marocain : «l'Ouergha». L'étude de ce bassin est d'autant plus importante qu'on retrouve à son exutoire le barrage Al Wahda, avec la retenue la plus importante de tout le Royaume de point de vue capacité de la retenue (3,7 milliards de m^3), ce qui rend l'étude d'impact des variabilités climatiques sur les ressources en eau au niveau de ce bassin versant encore plus intéressante.

I. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT ETUDIE

Le bassin versant de l'Ouergha est situé entre les monts subrifains au Nord et les monts prérifains au Sud (figure 1). Il draine la partie Sud de la chaîne du Rif et totalise une surface de 6190 km^2 . Il peut être subdivisé en trois zones topographiques : les hautes montagnes au-dessus de 1200 m NGM , les montagnes d'altitude moyenne au-dessus de 400 m NGM et les plaines des vallées tout à fait en dessous.

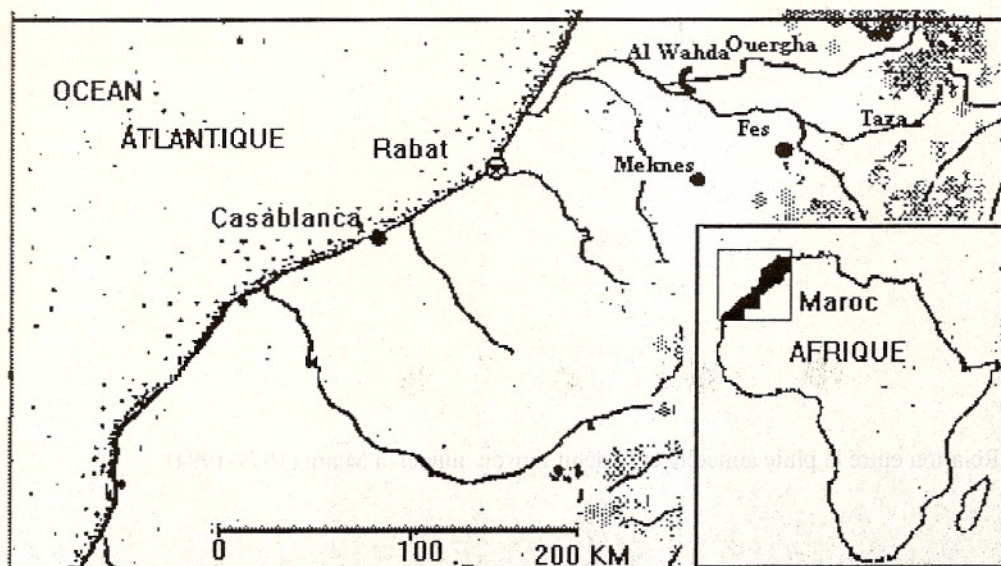
Le climat de la région est de type méditerranéen caractérisé par une concentration des pluies pendant la saison d'hivers (octobre-mai), alors que l'été est chaud et sec. La pluie moyenne annuelle est estimée à 1020 mm d'après les données de 6 stations pluviométriques réparties sur le bassin.

Le drainage superficiel du bassin versant se fait par un réseau hydrographique composé de huit principaux affluents qui prennent tous source dans la partie Nord et coulent vers le sud (figure 2). L'apport moyen annuel est estimé à $3300 \text{ Millions m}^3$. Le module annuel est de $105 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce paramètre subit de grandes fluctuations comme en témoigne la série des données disponibles depuis 1934 (figure 3). On peut remarquer que depuis 1979, la débitance du bassin montre une tendance nette à la baisse suite à une diminution notable des précipitations.

La nature des sols à prédominance argileuse et la topographie très accidentée font que le bassin versant présente un taux de ruissellement élevé (30%) qui engendre de violentes crues en période des pluies. Par la même occasion, le régime hydrologique annuel est un régime simple, du fait que le bassin réagit de façon prépondérante aux précipitations minimisant ainsi le rôle de la nappe phréatique. Ceci est illustré par la corrélation très significative qui existe entre la pluie et le débit à l'échelle annuelle (figure 4).

Figure 1 : Présentation de

la zone d'étude.



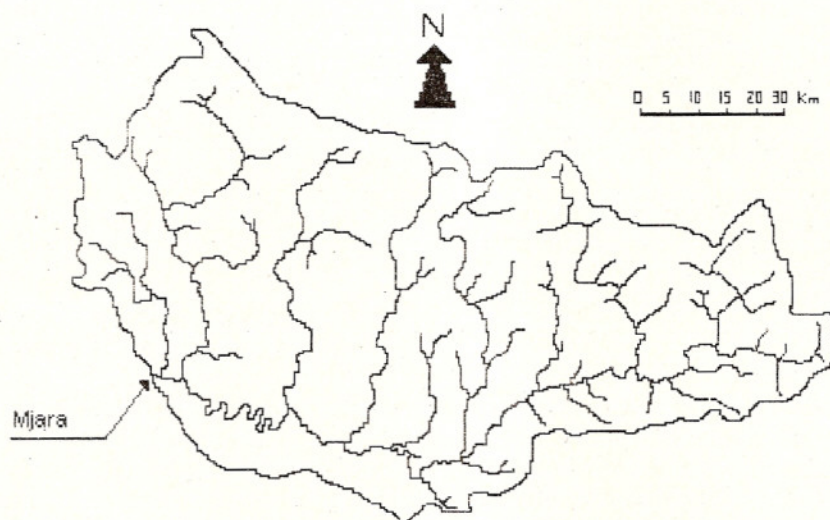


Figure 2. Le bassin versant de l'Ouergha et son réseau hydrographique.

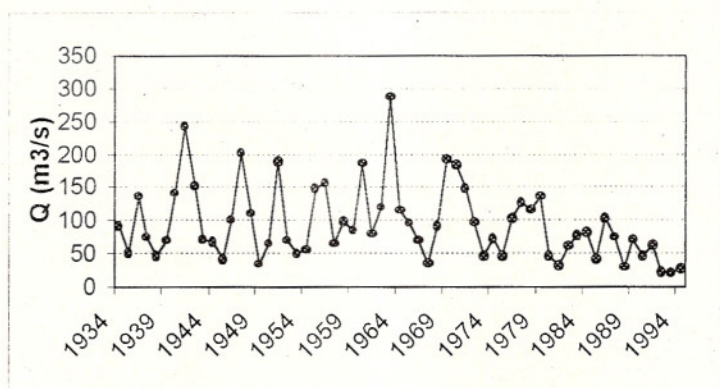


Figure 3. Evolution interannuelle des débits moyens annuels à Mjara

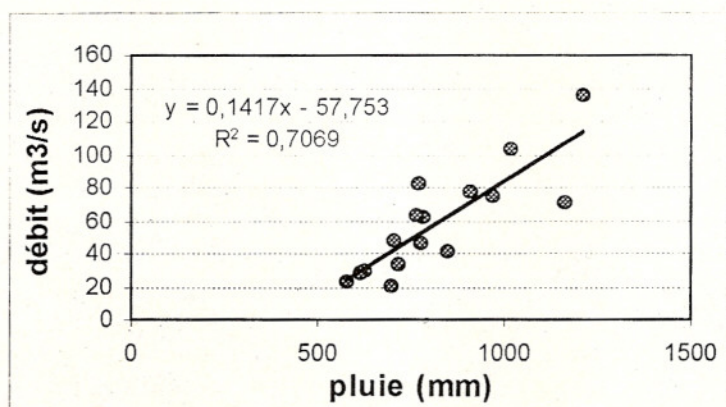


Figure 4. Relation entre la pluie annuelle et le débit moyen annuel à Mjara (1979-1994)

II. MODELISATION DES DEBITS : APPLICATION DU MODELE HYRRROM

Pour modéliser le régime hydrologique du bassin de l'Ouergha, on a utilisé le modèle «HYRRROM» qui a été développé à l'Institut d'Hydrologie de Wallingford au Royaume-Uni [H.O.M. 1989]. Il s'agit d'un modèle conceptuel pluie-débit à 9 paramètres et à pas de temps journalier. Ce modèle utilise le concept des réservoirs, tenant compte du passage de l'eau à travers le bassin versant. Ces réservoirs peuvent se remplir ou se vider durant la simulation, et contribuent au ruissellement selon le volume d'eau qu'ils contiennent. Quatre réservoirs sont considérés (figure 5) :

- réservoir d'interception
- réservoir de surface ou de ruissellement
- réservoir de sol (supérieur)
- réservoir souterrain

Les paramètres du modèle contrôlent la quantité d'eau reçue ou transitée journalièrement à travers chaque réservoir pendant la simulation. En optimisant ces paramètres, HYRRROM permet de représenter au mieux, la relation entre les précipitations et le ruissellement.

III. APPLICATION DU MODELE HYRRROM AU BASSIN VERSANT DE L'OUERGHA

L'utilisation de ce modèle a nécessité la préparation d'un fichier d'entrée avec des données journalières des

pluies, des débits ainsi que l'évaporation : les pluies journalières utilisées sont celles des 6 stations pluviométriques du bassin versant. Les débits journaliers sont ceux mesurés à l'exutoire du bassin. L'évaporation potentielle a été calculée à partir de la température de l'air par la loi de Turc. Une étude précise sur les différentes lois d'estimation de cette évapotranspiration et sur celles les plus adaptées à notre pays a été faite précédemment [R.R LPEE, 1997], [AGOUMI et al. 1997b]. La période commune disponible pour ces 3 données (débits, pluies et évaporation), et pour laquelle le modèle a été utilisé, est la période 1979 - 1994.

Même si les simulations pour les conditions naturelles ont été faites à l'échelle journalière, l'analyse des résultats est faite à l'échelle mensuelle et annuelle.

La première étape de ce travail est le calage. L'optimisation étant d'autant plus précise que la période d'observation est plus longue, une période de calage de 8 ans a été choisie. Il s'agit de la période s'étalant entre septembre 1985 et août 1993, celle-ci a été choisie du fait qu'elle englobe à la fois des années relativement humides et sèches.

Une fois le calage terminé, les paramètres du modèle ainsi optimisés ont été utilisés pour la phase suivante qui est celle de la validation. La période utilisée est celle comprise entre janvier 1979 et août 1985. Le détail des résultats intermédiaires de ces différentes simulations est présenté dans [CHAKIR et Al. 1997].

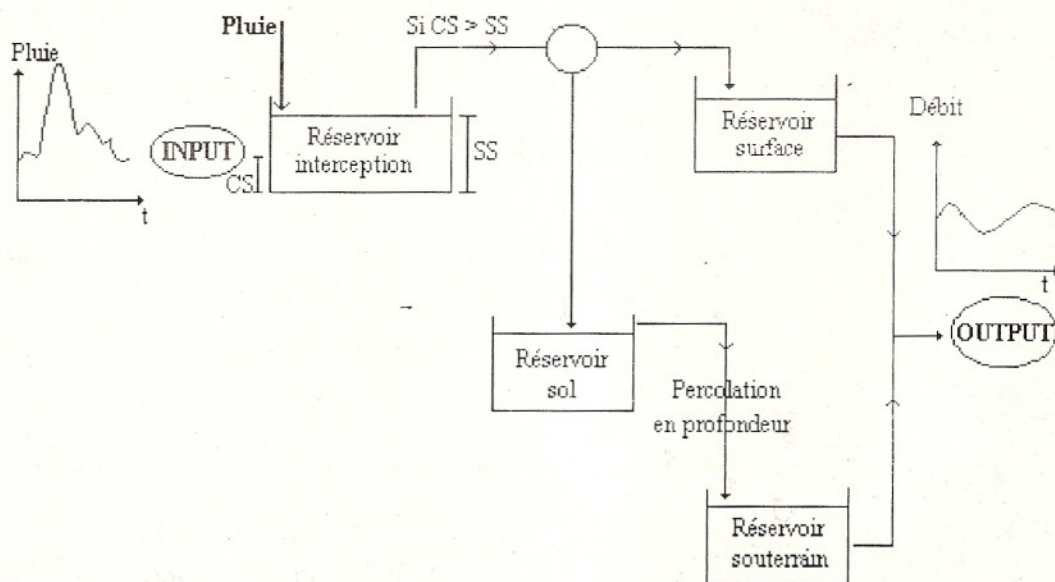


Figure 5 : Schéma conceptuel du modèle HYRRROM

Tableau 1 : Lames moyennes mensuelles et annuelle observées et calculées par le modèle hydrologique pour la période 1979 - 1994.

Mois	Calculé (mm)	Observé (mm)	Différence (mm)
Janvier	42,906	43,566	-0,660
Février	62,307	72,518	-10,211
Mars	38,097	33,709	4,387
Avril	33,629	27,997	5,632
Mai	22,612	22,975	-0,362
Juin	10,144	4,300	5,844
Juillet	9,778	7,548	2,230
Août	3,807	0,297	3,509
Septembre	4,567	1,234	3,332
Octobre	12,074	4,713	7,361
Novembre	39,371	19,095	20,276
Décembre	44,918	38,027	6,809
Année	324,09	275,980	48,229

La comparaison des lames d'écoulement observées et calculées montre une différence de l'ordre de 14% pour la lame annuelle (cf. Tableau 1).

Nous avons par la suite, à partir de ces valeurs, tracé sur la figure 6 les lames moyennes mensuelles du bassin de l'Ouergha, observées et calculées par le modèle pour la période 1979 - 1994. Nous remarquons d'après cette figure que, globalement, le modèle reproduit assez fidèlement les lames d'eau mensuelles ruisselées. Toutefois, l'écart est assez important pendant les mois d'octobre et de novembre ; ceci est probablement dû au fait qu'à cette époque de l'année qui est consécutive à la saison d'été, il y a très peu de réserves d'eaux souterraines, et l'humidité du sol est à son taux le plus bas. Les précipitations reçues par le sol seraient donc plus destinées à la recharge du sol et de la nappe qu'au ruissellement.

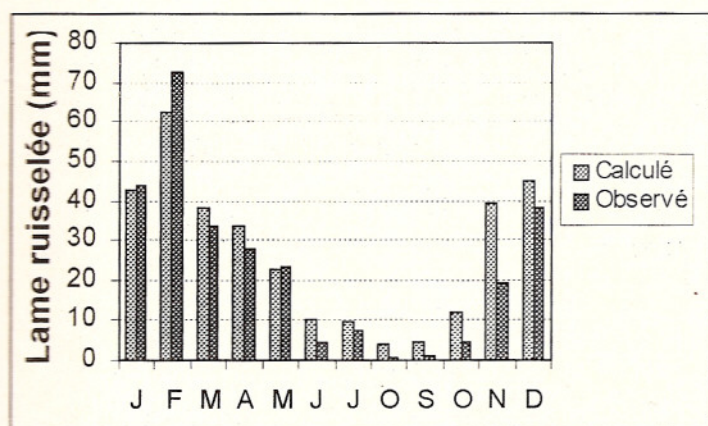


Figure 6. lames moyennes mensuelles observées et calculées pour la période 1979-1994.

Quand on compare les résultats à l'échelle annuelle on remarque que les lames annuelles calculées pour les années 1979 à 1994 se comparent assez bien aux lames observées. Il n'y a pas de sur ou sous-estimation importante de ces valeurs.

Le modèle utilisé dans notre étude aurait pu être plus précis si par exemple le réseau pluviométrique couvrait mieux le bassin versant : Les précipitations reçues par la partie Nord du bassin (la partie la plus en altitude) ne sont pas bien connues, ce qui s'est certainement répercuté sur les données de précipitations globales utilisées par le modèle. Un autre point est aussi à souligner, il s'agit de la mauvaise connaissance du comportement thermique du bassin, les données de températures utilisées sont celles de la station de Fès (cf. figure 1), qui n'est certainement pas, tout à fait représentative de tout le bassin.

IV. SENSIBILITE DU MODELE AUX VARIATIONS DE TEMPERATURE ET DE PRECIPITATIONS

Le Maroc est un pays qui se caractérise par un climat aride et semi-aride, et où les températures de l'air dépassent 40°C dans certaines régions pendant l'été, ce qui donne un poids non négligeable à l'évapotranspiration et à son influence sur le bilan hydrique des bassins versants de la région.

Ces températures pourraient connaître des niveaux plus importants selon les résultats les plus récents des Modèles de Circulation Générale [IPCC, 1995], en cas de confirmation du réchauffement planétaire, avec ce que ceci pourrait engendrer comme impact sur les ressources hydriques nationales.

Nous avons cherché à évaluer les incidences possibles du réchauffement de la région du Maghreb en cas de doublement de la concentration atmosphérique du CO₂ sur le potentiel en eaux douces du Maroc, plus particulièrement au niveau du barrage Al Wahda, qui représente à lui seul, une grande partie des eaux de surface mobilisées : il s'agit d'une infrastructure d'une grande importance tant pour la production hydroélectrique que pour l'eau potable et l'irrigation agricole.

Ces Modèles de Circulation Générale prévoient pour la région du Maghreb, pour une concentration de CO₂ double dans l'atmosphère (2*CO₂), une augmentation de la température de l'air allant de 1 à 2°C en été, et de 2 à 3°C en période hivernale. Les précipitations, selon ces modèles, pourraient soit augmenter légèrement, ou diminuer. Dans cette recherche, nous adopterons le scénario le plus pessimiste à l'échelle saisonnière, qui correspond à une diminution pluviométrique de l'ordre de 5% [JEFTIC et Al. 1992].

A partir de l'ensemble de ces éléments, nous avons constitué 3 scénarios du comportement de la température et des précipitations dans notre région que nous avons testé à l'aide du modèle hydrologique présenté ci-dessus, et ce, sur le cas particulier du bassin versant de l'Ouergha.

Les scénarios adoptés consistent à considérer les données climatiques (précipitations et température) de la

période 1979 - 1994 auxquelles nous avons porté les modifications suivantes :

Scénario 1 : $\Delta P = 0$

$\Delta T = 1^\circ\text{C}$ (en juin, juillet et août)

$\Delta T = 2^\circ\text{C}$ (en décembre, janvier et février)

pour les autres mois de l'année, le réchauffement a été obtenu par interpolation linéaire à partir des données précédentes.

Scénario 2 : $\Delta P = 0$

$\Delta T = 2^\circ\text{C}$ (en juin, juillet et août)

$\Delta T = 3^\circ\text{C}$ (en décembre, janvier et février)

de même, une interpolation linéaire a été effectuée pour les autres mois de l'année.

Scénario 3 : $\Delta P = -5\%$

$\Delta T = 2^\circ\text{C}$ (en juin, juillet et août)

$\Delta T = 3^\circ\text{C}$ (en décembre, janvier et février)

le réchauffement a été obtenu par interpolation linéaire pour les autres mois de l'année.

Sur la figure 7 nous avons tracé l'évolution saisonnière de la lame mensuelle moyenne pour les conditions climatiques actuelles ($1 \times \text{CO}_2$) et pour les scénarios 1, 2 et 3.

Scénario 1 :

Pour la période estivale, nous ne remarquons pas de changements notables, par contre, pour la période d'hiver et de printemps, nous notons une diminution de la lame mensuelle moyenne. Cette diminution est particulièrement nette pendant le mois de mars, où elle atteint une valeur de l'ordre de 12%.

Scénario 2 :

De même, nous avons tracé sur la figure 7 l'évolution saisonnière de la lame mensuelle moyenne pour les conditions ($1 \times \text{CO}_2$) et pour le scénario 2.

Les mêmes remarques pourront être faites, cependant, l'écart entre les valeurs des lames calculées et simulées est plus important, atteignant les 17% pendant le mois de mars. Notons que pour les deux scénarios 1 et 2, le calcul effectué dans l'hypothèse du réchauffement prévoit des lames d'eau à tout moment inférieures à celles relatives aux conditions actuelles. Ceci est logique étant donné que le réchauffement induirait une évapotranspiration plus importante, et par la suite un bilan d'eau déficitaire.

Notons par ailleurs une réponse hydrique différentielle du bassin versant aux changements thermiques envisagés entre l'hiver - printemps et l'été - automne. Ceci peut être attribué :

- aux scénarios considérés qui prévoient un réchauffement plus important en hiver - printemps qu'en été, d'où un impact certainement plus fort sur l'évapotranspiration en hiver - printemps.
- aux faibles valeurs des réserves hydriques disponibles pour l'évaporation en période estivale.

Scénario 3 :

Ce scénario intègre, outre l'élévation des températures, une diminution des précipitations de l'ordre de 5%. La confrontation des calculs réalisés pour les conditions actuelles et pour les conditions de ($2 \times \text{CO}_2$) indiquent cette fois une diminution systématique de la lame d'eau tant l'hiver que l'été, avec des valeurs de 45% en juillet, et 28% de la lame d'eau en mars.

Globalement, la lame d'eau ruisselée connaît une diminution pour une année moyenne de la période d'étude estimée à 54 mm, ce qui représente 19%.

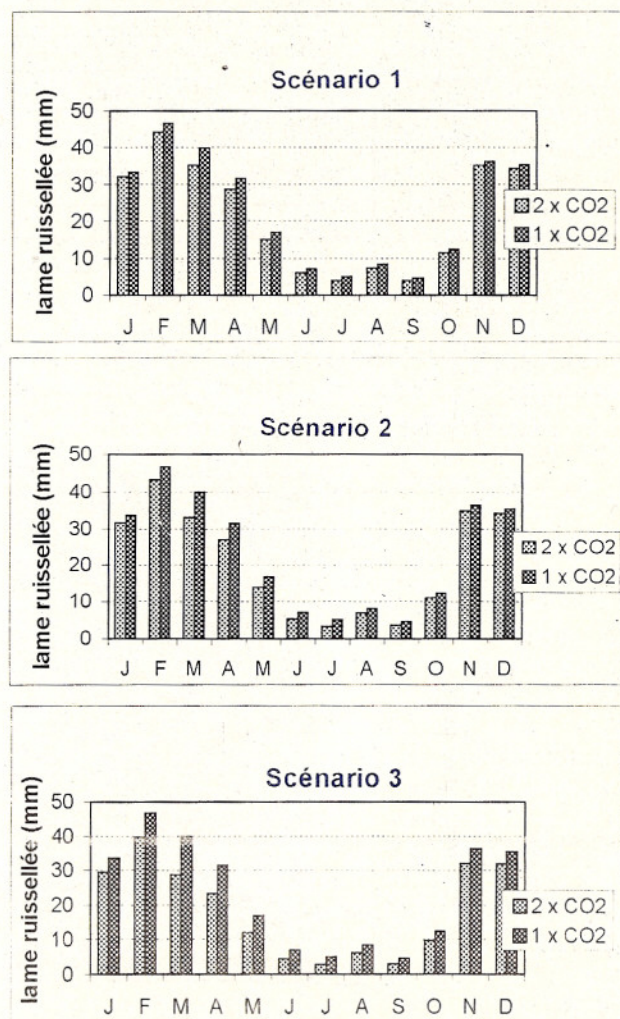


Figure 7. Comparaison des lames ruisselées mensuelles entre l'état ($1 \times \text{CO}_2$) et l'état ($2 \times \text{CO}_2$) selon les trois scénarios étudiés.

Impact possible de ces scénarios sur les réserves en eau du barrage Al Wahda :

Pour mieux cerner cet impact d'un dédoublement de CO_2 sur les apports en eau moyens annuels au barrage Al Wahda, ces 3 scénarios ont été testés.

Sur la figure 12, nous avons tracé les écarts des volumes d'eau reçus, en moyenne annuelle sur la période 1979-1994, à la retenue du barrage Al Wahda entre l'état actuel ($1 \times \text{CO}_2$) et l'état ($2 \times \text{CO}_2$) pour les différents scénarios. Nous remarquons sur cette figure que ces écarts sont plus importants lors des périodes d'hiver et d'automne, par contre, lors de la période estivale, cet écart devient moins important.

Les écarts les plus élevés ont été enregistrés pendant le mois de mars, où une différence des volumes des apports au barrage dans les conditions actuelles et dans le cas du

scénario 3 atteint presque 70 millions de m^3 .

Sur le tableau 2, nous retrouvons les apports annuels au barrage dans les conditions climatiques actuelles et dans le cas d'un dédoublement de CO_2 pour les 3 scénarios.

Le barrage AL Wahda reçoit pour une année moyenne (période 1979-1994), un apport de 1733 millions de m^3 . Cet apport connaîtrait un déficit de 8% dans le cas du scénario 1. Si le scénario 2 se réalise, ce volume reçu annuellement par le barrage baisserait jusqu'à atteindre une valeur de 1530 millions de m^3 , soit un déficit de 11%.

Dans le cas de la réalisation du scénario 3, l'impact sur les réserves en eaux serait plus important, les apports seraient fortement modifiés, allant de 1733 millions de m^3 enregistrés actuellement à une valeur beaucoup plus faible, de l'ordre de 1380 millions de m^3 , ce qui correspondrait à un déficit de 20%.

Tableau 2 : Apports annuels au barrage Al Wahda - Etat actuel et état $2 \times \text{CO}_2$ -

	BARRAGE AL WAHDA		Déficit entre 1 et 2 (10^6 m^3)	Déficit en (%)
	Etat $1 \times \text{CO}_2$	Etat $2 \times \text{CO}_2$		
Année moyenne (1979 - 1994)	Volume (10^6 m^3)	Volume (10^6 m^3)		
Scénario 1	1733	1590	143	8
Scénario 2	1733	1535	198	11
Scénario 3	1733	1381	352	20

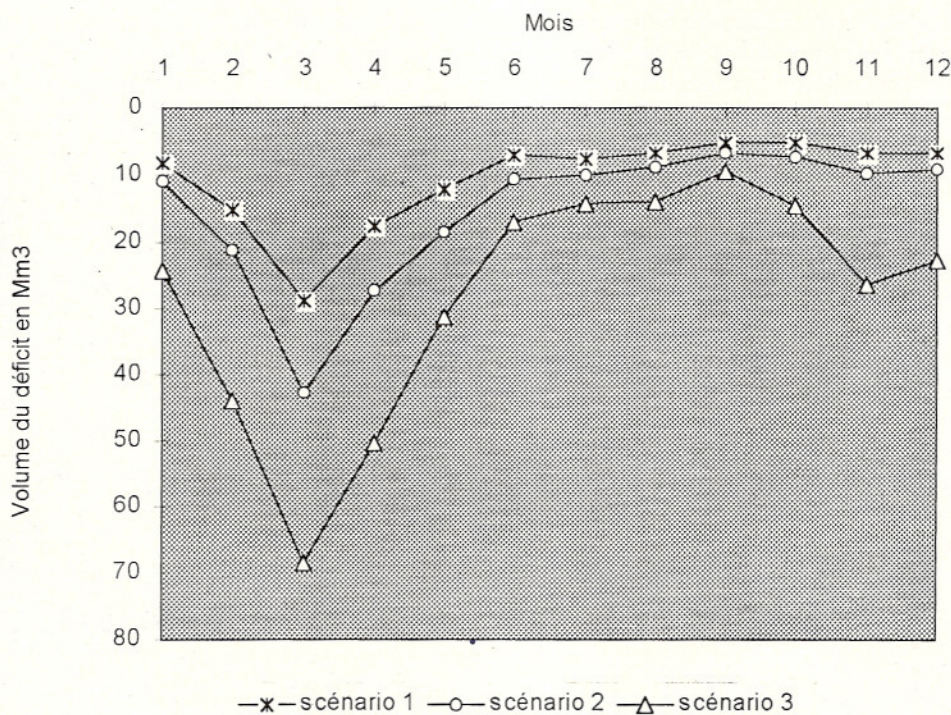


Figure 8. Ecart, en terme de volume, des apports mensuels au barrage Al Wahda entre l'état ($1 \times \text{CO}_2$) et l'état ($2 \times \text{CO}_2$).

CONCLUSION

Cette tentative de modélisation de l'interaction à l'échelle mensuelle entre paramètres climatiques (précipitations, température) et paramètres hydrologiques (débit) au niveau d'un bassin versant a globalement permis d'élaborer un outil acceptable pour l'étude et la simulation des scénarios futurs.

Les résultats obtenus auraient pu être plus précis comme cela avait été obtenu dans d'autres recherches similaires (MORIN et al. 1992) si :

→ la mesure pluviométrique couvrait mieux d'une façon homogène le bassin (la plupart des stations utilisées sont situées dans la partie sud du bassin).

→ les températures étaient mesurées de façon systématique à toutes les stations hydrologiques

→ on avait une connaissance plus précise du rôle et de la dynamique de la nappe phréatique

Les simulations réalisées dans une seconde phase de cette recherche, en vue de tester la sensibilité du potentiel hydrologique de ce bassin aux fluctuations climatiques, et en particulier aux changements globaux pouvant survenir en cas de réchauffement sont évidemment à prendre avec précaution : les incertitudes qui persistent sur les scénarios envisagés à l'échelle régionale restent à ce jour importantes.

Malgré tout, même avec les hypothèses les plus pessimistes, les calculs réalisés donnent un déficit hydrique, que pourrait engendrer le réchauffement, de l'ordre de 10%, ce qui n'est pas négligeable pour un pays qui, même sans ces scénarios de réchauffement climatique, est voué à un déficit hydrique chronique à l'horizon de l'an 2020 d'après les données les plus récentes.

Un autre usage de ce modèle pourrait être envisagé : l'utilisation des résultats les plus récents en matière de scénarios climatiques saisonniers, en vue de prévoir, à l'échelle mensuelle, le potentiel en eau du barrage Al Wahda sur lequel le gestionnaire de la ressource peut compter.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

YACOUBI, YACOUBI, SENOUSI, CHIKRI, MARIANI. (1997a) : « Variabilités climatiques et ressources en eau, cas du bassin versant de l'Ouergha » Présentation faite lors de la 5^{ème} assemblée de l'AISH.

YACOUBI, YACOUBI, SENOUSI, CHIKRI, MARIANI. (1997b) : « Comportement hydro-climatique du bassin versant de l'Ouergha : Estimation de l'évapotranspiration ». Revue Marocaine de Génie Civil, 1997.

YACOUBI, YACOUBI, HARTI, SENOUSI, CHIKRI, MARIANI. 1997. Climat et hydrologie du bassin versant de l'Ouergha. In : Actes du IX^{ème} Congrès

- Mondial de l'eau (AIRE), Montréal.
4. ALBEGEL.J et Al. (1993) : « Crues et sécheresses sur un grand fleuve tropical de l'Ouest africain : Application à la gestion de la crue du fleuve Sénégal » Science et Changements Planétaires, Sécheresse - VOL 4, N° 3.
 5. ALIBOU.J. (1997) : « Eau et Environnement » Publication du Ministère de l'Environnement.
 6. BOUCHET.RJ. (1963) : « Evapotranspiration réelle et potentielle : signification climatique » Proc. Gen. Assembly IAHS, Berkeley, Publ 62, p : 134 - 142.
 7. BOIS.PH. (1979-80) : « Hydrologie Générale » Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble.
 8. CHAKIR, MRINI. (1997) « Variabilités climatiques et potentialités hydriques du bassin versant de l'Ouergha » Travail de fin d'études de l'Ecole Hassania des Travaux Publics réalisé au LPEE.
 9. DGH / DRPE, (mai 1995) Rapport de l'étude : « Prévision des crues au barrage Al Wahda ».
 10. EL HAMZAOUI, GOUAAMAR, (1995) : « Etude d'un modèle hydrologique et son calage sur le bassin Kannoua » Travail de fin d'études réalisé à l'Ecole Hassania des Travaux Publics.
 11. H.O.M : HYRRROM OPERATION MANUAL. (1989) Institute of Hydrology, Wallingford - United Kingdom.
 12. IPCC, premier rapport d'évaluation, VOL I - août 1995
 13. JEFTIC, MILLIMAN et SESTINI. (1992) : « Climatic change and the Mediterranean ». Vol 1 et 2, UNEP.
 14. R.R LPEE, (1996a), rapport de recherche : « Comportement hydro-climatique du bassin versant de l'Ouergha : période 1934-1994 ».
 15. R.R LPEE, (1996b), rapport de recherche : « Régime pluviométrique du bassin versant de l'Ouergha »
 16. R.R LPEE, (1997), rapport de recherche : « Comportement hydro-climatique du bassin versant de l'Ouergha : Estimation de l'évapotranspiration »
 17. MANDELKERN.S, (1994) « Les conséquences hydrologiques de l'effet de serre » Rapport E.D.F. HE - 43/94/019/A.
 18. Mc GRAW-HILL, (1988) : « Applied Hydrology » Series in Water Resources and Environmental Engineering.
 19. MORIN.G, SLIVITSKY.M. (1992) : « Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie » Revue Internationale des Sciences de l'Eau, VOL 5, N° 2.
 20. NAJJAR.G. (1982) : « Méthode de cartographie de l'évapotranspiration journalière en moyenne montagne tempérée : Application au bassin versant de Ringelback (Hautes Vosges) Thèse de 3^{ème} cycle, Université Louis Pasteur - Strasbourg.
 21. PENMAN.H. (1948) : « Natural evaporation from open water, bare soil and grass » Proc. Roy. Soc., Ser A, 193, p : 120-145.
 22. SADOURNY.R. (1997) : « Le cycle de l'eau à grande échelle : impact de changements climatiques globaux » La Houille Blanche, N° 1 / 2.
 23. TURC.L, (1961) : « Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle » Ann. Agro., 12 (1), p : 13-49.

TELEDETECTION ET SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR LA GESTION ET LA RECHERCHE DE L'EAU

D. EL HADANI¹

RESUME

L'accès aux ressources en eau, notamment dans les zones arides et semi-arides, constitue un facteur primordial dans le développement économique, l'amélioration du niveau de vie des populations et leur stabilisation. Le besoin croissant de prospecter, d'exploiter, d'aménager et de gérer ces ressources requiert la connaissance et la maîtrise de plusieurs paramètres géologiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, les données d'infrastructure et socio-économiques, etc.

La télédétection, par sa capacité à couvrir de vastes territoires et à fournir des images multispectrales et multitemporales, ainsi que les systèmes d'information géographique, outil de traitement et d'exploitation des données multidisciplinaires, constituent pour les spécialistes et les décideurs des moyens de prospection, d'étude et d'aide à la prise de décision de plus en plus indispensables.

L'expérience de l'utilisation de la télédétection dans l'étude des ressources en eau montre son apport dans les aspects de cartographie, de prospection et d'aménagement, de suivi et de gestion.

Les systèmes d'information géographique, qui permettent l'intégration des images satellite avec les données exogènes, facilitent les opérations de gestion et de traitement de l'information, de modélisation et de simulation, de production de documents de synthèse.

Cette communication passe en revue l'état des connaissances dans ce domaine, à travers des études de cas, où télédétection et SIG sont d'un intérêt déterminant aussi bien sur le plan technique qu'économique.

INTRODUCTION

L'eau est un élément important pour la vie sur la terre, cependant sa distribution est inégale. En effet, 97,4 % est constitué d'océans et d'eaux salées et seulement 2,6 % d'eau douce (glaciers 1,95 %, eaux souterraines 0,614 %, lacs 0,008 %, humidité des sols 0,005 % et rivières et atmosphère 0,005 %). Seule une fine fraction, 0,014 %, (rivières et lacs, ...) est directement disponible pour l'exploitation en terme d'alimentation en eau potable, d'irrigation, d'industrie, ... (Sahai et al., 1991).

Les problèmes, qui se posent aux techniciens et aux décideurs chargés de l'exploitation et la gestion des ressources en eau, résident dans les deux aspects suivants :

- l'absence d'information adéquate pour cerner un processus qui s'étend sur de larges étendues,
- la difficulté de manipuler des informations pluridisciplinaires et multiformes (cartes, informations ponctuelles, données statistiques, ...) pour produire des documents de synthèse.

Pour remédier à ces problèmes, trois approches sont généralement utilisées :

- a- multiplier les points de mesures avec les méthodes conventionnelles,
- b- faire appel aux techniques mathématiques pour réaliser des modèles (toujours tributaires de la qualité et de la répartition des données),
- c- utiliser les nouvelles méthodes d'acquisition et de traitement de l'information (télédétection et systèmes d'information géographique).

¹ Centre Royal de Télédétection Spatiale, 16 bis, Avenue de France, Rabat, Maroc

Par rapport aux deux premières approches, la télédétection spatiale offre les possibilités suivantes :

- une vue synoptique permettant d'avoir une information sur de larges territoires au lieu d'une mesure ponctuelle.
- des résolutions spatiales et temporelles permettant de suivre l'évolution des différentes composantes du milieu (phénomènes dynamiques).
- une information disponible sous forme numérique, ce qui facilite les opérations de stockage, de manipulation et offre la possibilité de croiser des données provenant de plusieurs sources.
- une disponibilité des données sur des zones d'accès difficile.

Les images satellite et les systèmes d'information géographique, outil de traitement et d'exploitation des données multidisciplinaires, offrent aux spécialistes et aux décideurs des moyens de prospection, d'étude et d'aide à la prise de décision.

Par ailleurs, les opérations que les techniciens et les décideurs réalisent dans le domaine des ressources en eau peuvent être regroupées dans les quatre aspects suivants :

- la description, l'observation et la représentation du milieu.
- l'évaluation des ressources et l'exploration.
- l'aménagement des ressources.
- l'exploitation, le suivi et la gestion des ressources en eau.

Le présent article expose les domaines d'application de la télédétection pour l'investigation hydrogéologique

(les méthodes d'extraction et d'interprétation...) ainsi que l'apport des systèmes d'information géographique pour la gestion des ressources en eau. Des études de cas et des exemples, où télédétection et SIG sont d'un intérêt déterminant aussi bien sur le plan technique qu'économique, sont également présentés.

I. TELEDETECTION ET EAUX SOUTERRAINES

D'une manière générale un projet de prospection hydrogéologique a pour objectifs de mettre en évidence les caractéristiques suivantes du milieu (Caponera, 1988) :

- identifier les éventuels réservoirs aquifères en définissant la nature des formations géologiques.
- définir le contexte structural et comprendre son rôle dans le fonctionnement du système hydrogéologique.
- identifier et délimiter les zones de recharge et de drainage.
- comprendre l'interaction entre les eaux souterraines et les autres éléments du milieu (eau de surface, végétation, source de pollution, etc.).

Les méthodes utilisées font appel à une approche indirecte. En effet, l'étude du milieu est abordée à travers la géologie, la géologie structurale, la morphologie, l'hydrologie, ... pour bâtir un raisonnement de synthèse dans lequel l'image satellite sert de trame.

L'organigramme de la figure 1, montre la démarche suivie pour l'analyse et le traitement des images satellite pour l'extraction et l'interprétation des informations caractéristiques du milieu (El Hadani, 1992).

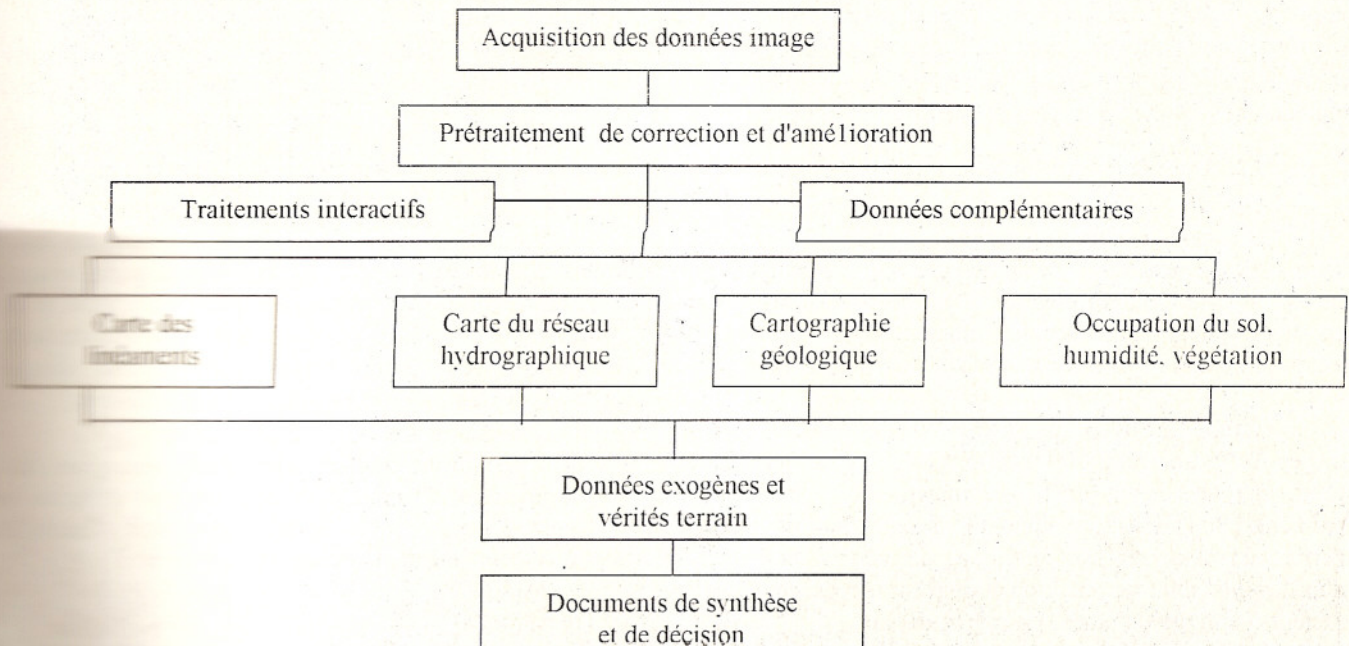


Fig. 1. Méthodologie d'exploitation des données image

1.1. Analyse des linéaments

L'expérience a montré l'intérêt des données de télédétection pour la recherche des zones fissurées dont on a démontré le potentiel aquifère, particulièrement dans les régions du socle (Scanvic, 1983).

L'approche combinant l'inventaire des linéaments sur l'image satellite, les données exogènes et les travaux de terrain, conduit à l'établissement d'une classification des fractures et à la compréhension des structures géologiques (Berard *et al.*, 1990). Cette étude des linéaments permet de répondre à deux objectifs :

- l'orientation des campagnes de reconnaissance en définissant des zones potentiellement favorables,
- la sélection de sites ponctuels pour l'implantation de forages.

Plusieurs études, menées dans des contextes différents ont montré l'intérêt et l'importance de l'analyse des linéaments sur les images satellite pour la prospection hydrogéologique. Dutarte *et al.* (1990), dans une étude réalisée au Burkina Faso, ont pu définir à partir des images SPOT des règles d'interprétation répétitives dans trois domaines complémentaires : la recherche des zones fracturées, la délimitation des zones d'infiltration et l'identification des zones ayant un potentiel agronomique. Berard *et al.* (1990), dans une étude pour l'approvisionnement en eau d'un ensemble industriel (mine d'or) au Soudan, ont montré l'apport des images Landsat combinées avec des études antérieures pour implanter des forages et mettre en évidence l'existence de nouveaux aquifères. Dans une étude des linéaments dans la région de Marahoué (Côte d'Ivoire) sur des images Landsat, Biémi *et al.* (1991) ont établi un diagramme permettant de définir les forages en milieu de socle fissuré afin de contrôler les implantations futures de forages et d'assurer leur gestion.

1.2. Analyse du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est un élément caractéristique de la texture et de la structure et constitue un critère important d'interprétation. Les formes qui lui sont associées reflètent à des degrés variables la lithologie et la tectonique d'une région (Scanvic, 1983 ; Travaglia, 1988).

L'étude détaillée du réseau de drainage est un moyen d'effectuer un partitionnement raisonné de l'espace. Cette approche, appuyée par une analyse directionnelle et par l'étude de la densité spatiale du réseau hydrographique, permet de discerner des zones où un certain potentiel d'infiltration, donc de rétention et de recharge, existe et des secteurs où le ruissellement est prépondérant.

1.3. Approche cartographique des formations géologiques

Cette phase vise à délimiter les différentes formations géologiques et à mettre en évidence leur rôle hydrogéologique. L'identification des différents types de formation sur les images satellites est basée sur l'analyse des éléments de topographie, de morphologie, de texture et de densité, la distribution de la végétation, etc.

Les difficultés et les limites de cette approche résident dans l'hétérogénéité des réponses spectrales des objets géologiques. D'une manière générale, dans les zones arides et semi-arides, l'application de cette méthodologie est facilitée par des conditions d'observation très favorables en raison de la quasi-absence du couvert végétal et des couches d'altération.

Cette approche structurale combinant le traitement et l'analyse des images satellite et des données de terrain permet :

- la détermination des zones favorables en dressant des cartes d'aptitude et en mettant à l'écart les zones *a priori* défavorables (présence probable d'un biseau salé en cas de proximité de la mer, inaccessibilité, zone à ruissellement prédominant, hauts bassins, ...),
- le choix des sites d'implantation en délimitant les zones d'infiltration potentielles, susceptibles d'alimenter les réseaux de fractures (celles que l'on cherche à recouper par les forages),
- la réduction de la prospection géophysique en mettant en évidence les zones d'accidents majeurs qui risquent le plus d'intercepter les écoulements souterrains. Leur localisation permet d'orienter les campagnes géophysiques vers l'étude des structures majeures.

II. TELEDETECTION ET EAUX DE SURFACE

La télédétection vient en apport à l'étude des eaux de surface sous les aspects de cartographie pour des besoins de gestion et d'aménagement. En effet, l'inventaire et la cartographie des eaux de surface et des informations thématiques des bassins versants à l'aide des images satellite s'avèrent intéressants pour plusieurs raisons :

- la disponibilité d'une information homogène (les informations disponibles sont souvent difficiles à regrouper parce que les documents sont variés et répondent chacun à des besoins différents),
- l'intégration avec d'autres types de données,
- la facilité de mise à jour et de suivi des évolutions.

II.1. Etude des plans d'eau

Les images satellite sont utilisées pour l'identification des plans d'eau et leur dénombrement. En effet, pour les zones déjà cartographiées, une comparaison des cartes existantes avec des images récentes permet de mettre à jour rapidement l'information cartographique. Dans les régions peu connues et difficilement accessibles, les images satellite sont un précieux outil d'investigation.

Par ailleurs, avec des prises de vue multi-temporelles, il est possible de faire un suivi de la variabilité des réponses spectrales des plans d'eau. Cette approche permet de faciliter la détection des modifications et d'orienter les contrôles sur le terrain.

II.2. Etudes de bassins versants

L'aménagement des bassins versants couvre plusieurs aspects qui concernent l'interaction entre les eaux de surface et le milieu environnant. Les images de télédétection servent pour produire de l'information et des données pour les besoins de planification et l'exploitation. Sur la base des images satellite, différentes composantes du milieu peuvent être cartographiées :

- la carte d'occupation des sols qui fournit une information cartographique et statistique sur chaque thème étudié dans un bassin versant.
- la cartographie du réseau hydrographique ou de drainage qui donne des caractéristiques géomorphologiques du terrain.
- la cartographie géologique et l'analyse structurale.

Les résultats obtenus par cette approche permettent d'intégrer, d'analyser et de synthétiser des quantités importantes d'informations qui facilitent la tâche aux gestionnaires des bassins versants.

D'autres applications sont également réalisées à partir des images satellite, mais leur niveau d'opérationnalité reste limité en fonction des conditions du milieu et des caractéristiques des images utilisées. On peut

enter le suivi de l'humidité des sols, le suivi des stocks neigeux des hauts bassins, le contrôle de l'envasement des estuaires, le suivi des inondations, etc.

III. SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

L'intégration, le croisement et la superposition des données de télédétection et d'autres variables hydrogéologiques peuvent être facilités par le développement d'un système d'information géographique (SIG). Ce système remplirait les fonctions suivantes :

- une fonction de stockage des informations après homogénéisation des données géo-codées et classées.
- une fonction de traitement et de vérification, de gestion et de mise à jour.
- une fonction de distribution et de communication rapide des données numériques.
- une fonction d'orientation des schémas directeurs pour l'aménagement, l'exploitation et la gestion des ressources en eau.

L'emploi de cet outil (SIG) se justifie par la complexité du processus de gestion des ressources en eau qui implique plusieurs intervenants et opérateurs et dépend de divers facteurs (physiques, naturels, socio-économiques, climatiques, ...) qui doivent être intégrés pour atteindre les objectifs de gestion et d'aménagement.

Les techniques des SIG sont exploitées pour établir des relations spatiales entre les différentes couches d'information : lithologie, structure, géomorphologie, occupation des sols.... De cette manière, les interactions entre ces composantes sont analysées et interprétées pour faciliter la prise de décision (sélection de zones ou sites favorables, choix d'un plan d'aménagement, confrontation de solutions, ...).

Le tableau 1 montre l'apport des systèmes d'information géographique à différents niveaux de gestion des ressources en eau.

Tableau 1 : Apport des SIG pour la gestion des ressources en eau

ACTIONS	APPORTS DU SIG
Inventaire des ressources existantes	- Intégration des cartes issues des images satellite - Numérisation des cartes existantes - Mise à jour
Identification de nouvelles ressources	- Traitement de l'information thématique (carte géologique)
Linéaments, réseau hydrographique,...	- Elaboration de carte de synthèse (étude multivariable)
Solutions et options	- Données socio-économiques - Population/agriculture/industrie - Distribution des ressources par rapports aux besoins - Etablissement de scénarios

IV. ETUDE DE CAS

IV.1. Eaux souterraines

A l'échelle régionale et internationale, plusieurs pays utilisent les données de télédétection d'une façon opérationnelle pour l'étude des ressources en eau. On peut citer notamment des études réalisées dans plusieurs pays en développement, en l'occurrence le cas de l'Inde où la télédétection est utilisée pour la prospection hydrogéologique en milieu rural.

Une des missions de la "National Technology Mission on Drinking Water" du gouvernement indien avait pour but de fournir 40 litres par habitant et par jour d'eau potable, l'eau devant être accessible dans un rayon de 1,6 km des villages. Les images satellite ont été exploitées pour dresser des cartes des zones potentielles (présence d'eau souterraine) : ces cartes servant par la suite pour des études plus détaillées. Une étude comparative des résultats obtenus par les méthodes conventionnelles et les méthodes de télédétection a révélé que le taux de réussite des forages d'eau, qui était de 45 à 55% par l'approche conventionnelle, est passé à 90% pour les méthodes basées sur les images satellite (Chandrasekhar *et al.*, 1992).

En Afrique, plusieurs études ont été réalisées et ont permis d'obtenir des résultats significatifs. Au Botswana, une étude a été menée par le BRGM pour améliorer l'alimentation en eau de la capitale (Scanvic, 1992). Le but de l'étude était de définir la géométrie du réseau de fractures susceptibles de constituer des drains favorables à l'existence d'un réservoir d'eau souterraine, et plus spécialement rechercher les fractures qui n'ont pas été affectées par un colmatage hydrothermal. L'analyse de l'image satellite (Spot) a permis de dresser une carte géologique de base, d'identifier les différentes familles de fractures et de faire une étude chronologique des événements tectoniques. Ces documents ont servi pour les travaux *in situ*, et pour le choix des zones où seront implantés les forages.

Les résultats obtenus par une étude menée sur le site d'Hassai au Soudan sont exemplaires (Berard *et al.*, 1990), car l'approvisionnement en eau d'une mine d'or (unité de prétraitement) est très difficile en milieux arides où le substratum géologique est constitué de roches métamorphiques qui ne constituent que des aquifères discontinus. Deux solutions ont été envisagées : réaliser un pipe-line depuis le Nil ou le captage des eaux souterraines.

Le croisement de critères multiples, sur la base d'images satellite, a permis de sélectionner 14 zones favorables à la présence d'eau souterraine. Six (6) forages ont été réalisés avec des débits de 3 à 18 m³/h (résultat considéré très positif dans l'environnement désertique de

Hassai). Le rendement de 42%, obtenu par cette méthodologie est le meilleur depuis les premiers forages en 1983 fondés sur d'autres méthodes (Scanvic, 1992).

Au Maroc, diverses études ont exploité les données de télédétection pour des travaux de prospection hydrogéologique.

Une étude menée par la DRPE (Ministère des Travaux Publics) dans la région de Taza a montré comment, grâce à l'outil télédétection, il est possible d'optimiser par une approche multi-échelle le coût de la recherche d'eau (El Hadani *et al.*, 1993). Le traitement des documents obtenus par la synthèse des interprétations de l'image satellite, des photographies aériennes et des données géologiques de terrain, a donné des indications sur les directions principales de la fracturation et la répartition de la densité de fracturation sur les affleurements. Grâce à ces informations, il a été possible d'orienter l'implantation des profils sismiques et de limiter les zones d'étude (Roseau *et al.*, 1992).

Le CRTS a réalisé deux études dans les régions d'Ouarzazate et Agadir. L'objectif précis de ces études était d'exploiter les données de télédétection à un stade précoce de l'investigation pour fournir des informations élaborées pouvant servir à orienter les travaux de prospection. Dans la région d'Ouarzazate, les critères structuraux indiquent l'existence de discontinuités de direction NE qui s'allongent sur plusieurs kilomètres (El Hadani, 1992). Dans la zone d'Agadir, le croisement des critères structuraux et lithologiques issus de l'interprétation de l'image satellite a permis de retenir plusieurs sites considérés comme favorables, qui pourront être étudiés en détail par des travaux complémentaires *in situ* (El Hadani et Wahbi, 1994).

El Baz (1995) rapporte les résultats d'études par imagerie satellitaire qui ont permis de localiser de nouvelles ressources d'eau souterraine dans des zones fracturées à l'Est du Soudan et dans la péninsule de Sinaï en Egypte. Un rapport de l'UNESCO (1990), passe en revue les applications de la télédétection pour la gestion et le développement des ressources en eau dans plusieurs pays arabes. Ces applications concernent aussi bien la prospection hydrogéologique que le suivi et l'étude des eaux de surface.

IV.2. Eaux de surface

Concernant l'étude des eaux de surface, plusieurs types d'applications sont menés de façon opérationnelle.

- Dans le domaine de l'inventaire des plans d'eau, sur la base des images Spot et des enquêtes de terrain, le BRGM a procédé (dans une étude dans le Nord de la France) au dénombrement des plans d'eau et à

l'estimation de leurs superficies. Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence de deux paramètres, la profondeur et la turbidité, et d'élaborer une typologie des plans d'eau.

- Au Maroc, une étude faisant appel aux images satellite et au SIG a permis de quantifier les pertes annuelles de sols, la quantité de sédiments qui sera transportée jusqu'au cours d'eau, de même que le potentiel érosif pour le bassin versant de Oued Aricha dans la région de Settat (Anys *et al.*, 1992).
- Dans le domaine de l'aménagement et particulièrement pour la construction de barrages, une étude réalisée dans le bassin versant des Rheris (Centre-Est du Maroc), a permis d'élaborer des cartes de base d'occupation du sol et des conditions du sol à travers l'analyse d'images Landsat. Ces documents ont servi comme instrument de base pour les projets de construction (JICA, 1990).
- Dans le domaine de l'agriculture, grand consommateur d'eaux pour les besoins d'irrigation, les outils de télédétection et SIG jouent un rôle important pour la gestion des grands périmètres irrigués. L'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb (Maroc) a réalisé entre 1986 et 1990 une étude intégrée à des fins de meilleure gestion de l'eau et des redevances. Sur la base d'une cartographie utilisant des images satellite, les surfaces irriguées ont été mises en évidence. La superposition de cette cartographie avec la carte des titres fonciers a permis de déceler les

pompages clandestins. Cette approche a permis de réduire de 75% ces pompages non autorisés.

Les images satellite ont été utilisées avec succès pour la délimitation des zones inondées (dans les régions de plaines) en particulier lorsque les dates de prises des images coïncident avec les périodes de crue et lorsque le couvert nuageux est favorable (Travaglia, 1986). La télédétection est appliquée pour cartographier les superficies inondées et les types de paysages associés.

A un stade expérimental, dans le cadre d'un projet entre le CRTS et l'ESA (Agence Spatiale Européenne) les données SAR d'ESR1 ont été exploitées pour étudier leur potentiel pour l'estimation de l'humidité des sols (Merdas et Lichtenegger, 1994).

Le tableau 2 présente les paramètres et les données hydrogéologiques appréhendés à partir des images satellite. Notons que le choix des données image à utiliser varie en fonction du contexte et des conditions du milieu (El Hadani, 1992). Parmi les paramètres de sélection, on peut citer :

- la résolution spatiale liée à la structure et la texture du milieu et à la précision requise.
- la résolution spectrale pour une meilleure différenciation des composantes du milieu.
- la répétitivité (ou résolution temporelle) pour le suivi des phénomènes dynamiques.

Tableau II : Données hydrogéologiques extraites à partir des images de télédétection

SATELLITE	ASPECTS HYDROGEOLOGIQUES OBSERVES	ZONES D'APPLICATION
Visible Landsat TM et MSS (30 et 80 m)	Réseau de drainage, zones de recharges, fracturation, végétation, occupation du sol, géologie...	Application aussi bien dans les zones arides (approche directe) que dans les zones tempérées (approche indirecte) échelles variables : 1/200.000 à 1/100.000.
Visible SPOT XS et P (20 et 10 m)	Réseau de drainage, zone de recharge, fracturation, végétation, géologie, occupation du sol, morphologie (stéréoscopie)...	- zones arides et semi-arides (approche directe), - zones tempérées à couvert végétal (approche indirecte), échelle 1/100.000 à 1/25.000.
Micro-ondes ERS-1	Humidité des sols, propriétés hydrologiques des sols, végétation, linéament...	- zones à couverture nuageuse, - formations sédimentaires, - régions désertiques.
Thermique HCMM, NOAA Landsat.	Emergence d'eau douce en mer, détection des filons (rôle hydrogéologique), anomalies géothermiques, végétation, biomasse...	- identification de caractéristiques hydrogéologiques régionales, - zones côtières.

IV.3. Applications en SIG

Les systèmes d'information géographique (SIG) ont été utilisés dans de nombreuses applications. Les exemples présentés permettent de donner un aperçu sur les utilisations possibles :

- SIG pour la gestion des données sur les eaux de surface et la production de documents d'aide à la décision (Bower et Scott, 1992).
- Utilisation de l'outil SIG dans une modélisation mathématique pour la gestion du risque de contamination des eaux souterraines par des pesticides (Gauthier *et al.*, 1992).
- En matière d'alimentation en eau potable, le SIG a été utilisé pour évaluer les besoins en eau des zones menacées : identifier les besoins actuels et futurs, description en terme de quantité, qualité, ouvrages, installations, localisation de nouvelles ressources, etc. (Wiseman et Thomas, 1992).
- Un système d'information à référence spatiale a été élaboré sur la base des données de télédétection pour la conservation des eaux et des sols des bassins versants (Boussema *et al.*, 1992).
- À l'aide d'un SIG combinant des données issues des traitements d'images satellite (carte d'occupation des sols, linéaments, ...) et des données exogènes (carte topographique, système de drainage, géologie, profondeurs des puits...), Pieish et Akhavi (1989) ont mis en place un outil pour le suivi d'un système hydrogéologique.
- Le CRTS a réalisé une maquette d'un SIG pour la gestion des grands barrages du Maroc. Ce système permet de mettre à la disposition des décideurs des outils pour la consultation d'une base de données (fiches synoptiques, schémas, images satellite...) et pour l'élaboration des requêtes composées selon plusieurs critères de sélection ainsi que la génération de rapports et de cartes.

CONCLUSION

Par rapport aux méthodes conventionnelles utilisées pour la gestion et la recherche de l'eau, les nouvelles méthodes d'acquisition et de traitement de l'information (télédétection et système d'information géographique) présentent des avantages importants :

- Un coût nettement réduit. En effet, la démarche utilisée permet de réduire les travaux de prospection aux zones favorables, ce qui se traduit par une baisse du coût et des délais d'investigation. Une comparaison a été réalisée à l'issue de l'étude menée par la DRPE dans la région de Taza et a révélé que, en utilisant les données de télédétection, le nombre des forages de prospection a été réduit de 19 à 7 forages (environ 42%) et que le nombre de profils sismiques (étude géophysique) est passé de 5 à 3 profils (soit 45%) (El Hadani *et al.*, 1993).
- Par ailleurs, l'utilisation d'un système d'information géographique facilite les opérations de consultations des données et d'élaboration de documents de synthèse. Cet apport se traduit par un gain considérable dans les délais et donc une diminution des coûts.
- L'intégration dans un SIG de l'information multisource et multi-échelle permet de mettre au point des schémas directeurs pour une gestion intégrée qui tient compte des différents facteurs et opérateurs impliqués dans la gestion des ressources en eau. Ces schémas directeurs peuvent être exploités soit pour des applications sectorielles soit dans le cadre de projets où interviennent plusieurs départements ministériels.

Ainsi, les images satellite et les systèmes d'information géographique permettent d'envisager des méthodes de recherche et de gestion des ressources en eau plus rapides et efficaces. Ils représentent de nouveaux outils utiles et performants tant d'un point de vue technique qu'économique pour les pays en développement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Anys, H., Bonn, F., Merzouk, A. (1992). Cartographie et Calcul de l'Erosion Hydrique à l'Aide de la Télédétection et du SIG. Cas du Bassin Versant d'Oued Aricha (Settat, Maroc). *Géo Observateur* N° 2. Septembre 1992, pp. 37-51.
2. Berard, P., Castaing, C., Scanvic, J. Y. (1990). Alimentation en Eau de la Mine d'Or d'Hassai (Soudan) : Impact de l'Etude de Télédétection. *Hydrogéologie*, N° 2, pp. 101-111.
3. Biémi, J., Deslandes, S., Gwyn, Q. H. J., Jourda, P. (1991). Influence des Linéaments sur la Productivité des Forages dans le Bassin Versant de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : Apport de la Télédétection et d'un Système d'Information à Référence Spatiale. Association Québécoise de Télédétection. *Télédétection et Gestion des Ressources*, Vol. VII, pp. 41-49.
4. Biémi, J., Deslandes, S., Gwyn, Q. H. J., Jourda, P. (1991). Géologie et Réseaux de Linéaments Régionaux du Bassin Versant de la Haute Marahoué. (Côte d'Ivoire) : Cartographie à l'Aide des Données Landsat TM et du Champ Magnétique Total. Association

AMELIORATION DE LA MOBILISATION DE L'EAU DANS LE SOUSS ET LA REALIMENTATION DE LA NAPPE CAS DES BARRAGES AOULOZ ET IMI EL KHENG

ZEROUALI et EL RHAZ ¹

I. PRESENTATION

La plaine de l'Oued Souss s'étend sur une superficie de 4150 km². Elle est délimitée au Nord par la chaîne du haut-Atlas, au Sud-Est par l'Anti-Atlas et à l'Ouest par la côte de l'Océan Atlantique. Vers le sud-ouest, elle transgresse dans la plaine de Chtouka. A l'Est, la plaine est délimitée par le resserrement des deux chaînes montagneuses à proximité d'Aoulouz.

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les principales formations géologiques de la plaine du Souss, sont les formations du Souss composées de marno-calcaire et conglomérats assez perméables, les calcaires du Turonien qui leur sont sous-jacents et le lit fossile du Souss composé d'alluvions sablo-graveleuses très perméables.

Ces formations contiennent la plus importante nappe d'eau souterraine du Sud du Royaume, dont les réserves globales sont estimées à 37 Milliards de m³. Cette nappe est fortement sollicitée pour l'irrigation des exploitations agricoles, qui connaissent un important développement et dans une moindre mesure pour l'alimentation en eau potable et industrielle des agglomérations, essentiellement la ville d'Agadir.

III. PROBLEMATIQUES ET OBJECTIFS DES AMENAGEMENTS REALISES

III.1. Problématique

Le déficit du bilan en eau souterraine dans l'ensemble de la plaine du Souss, causé par les pompages excessifs pour l'irrigation et accentué par la sécheresse aiguë qui a sévi de 1971 à 1987, a entraîné une baisse importante de la nappe phréatique. Cette baisse atteint en moyenne 20 m depuis 1970 avec un maximum de 40 m dans la région de Gerdanne. Le rythme de descente du niveau phréatique varie entre 0,5 et 3 m par an suivant les zones.

L'assèchement des puits peu profonds, le tarissement des émergences qui alimentent les périmètres irrigués traditionnels, ont mis une bonne partie des cultivateurs dans une situation précaire.

L'incidence de cette situation est notable aussi bien sur le plan régional que sur le plan national. En effet, la plaine du Souss, qui comporte une superficie irriguée par pompage de près de 100.000 ha dont plus de la moitié est exploitée pour la production des agrumes et des primeurs représente les deux tiers des terres irriguées de la région d'Agadir et participe pour une part importante (environ 30 %) dans l'exportation des agrumes et des primeurs marocains.

Toute réduction dans l'activité agricole de la plaine du Souss se traduit par des réductions dans les mêmes proportions :

- De l'emploi agricole.
- De l'industrie agro-alimentaire.
- Du transport.
- De l'activité du port d'Agadir.
- Des rentrées de devises provenant de l'exportation.

De plus, de gros investissements aussi bien publics que privés ont été faits à la fin des années 70, juste avant la période de sécheresse, au moment où les études de la nappe avaient montré que celle-ci pouvait fournir les quantités d'eau voulues. Ces investissements en équipement et en plantations risquent de périr si rien n'est fait pour remonter le niveau de la nappe.

III.2. Objectifs et aménagements réalisés

La solution de ce problème, mise en évidence depuis fort longtemps, consistait en la réalisation d'un ouvrage de régulation des apports du Souss, situé à l'entrée de la plaine au site d'Aoulouz (figure 1).

Les apports au niveau de ce site, qui atteignent près de 220 Mm³ en année moyenne, sont très irréguliers, de sorte qu'ils se font pour une grande part sous la forme de crues de courte durée et brutales, dont plus de 60 % des apports sont perdus en mer.

¹ Ingénieurs à la Direction Générale de l'Hydraulique.

Le barrage d'Aoulouz permet de maîtriser les crues en diminuant les débits écoulés dans le lit du Souss à travers la plaine et en augmentant la durée de l'écoulement, de telle sorte que la plus grande partie des eaux de surface puisse s'infiltrer à travers les alluvions du Souss. Cet effet régulateur apportera à la nappe un supplément d'eau de $120 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

Le barrage d'Aoulouz est le plus important des ouvrages édifiés pour cet aménagement de recharge artificielle de la nappe du Souss.

Parmi les bénéfiques qui en découlent, on peut citer :

- Un gain de $120 \text{ Mm}^3/\text{an}$ sur les eaux qui se perdent en mer.
- La diminution des coûts de pompage.
- La réduction de l'approfondissement des puits.
- La réduction, voire la suppression des pertes pour l'économie régionale et nationale dans le cas où, à défaut du barrage, certaines cultures devraient être abandonnées à cause du coût excessif du pompage. Ce point couvre tous les bénéfiques liés à la réduction du chômage, au maintien ou à l'augmentation des exploitations agricoles et à l'autosuffisance alimentaire. Ces bénéfiques sont acquis au moindre coût puisqu'il n'a pas été nécessaire de construire un très grand réservoir (figures n°7 et 8) et que l'Oued Souss est utilisé comme moyen naturel à la fois pour transporter et pour infiltrer l'eau.

III.3. Description des barrages

III.3.1. Barrage Aoulouz

Le barrage d'Aoulouz sur l'Oued Souss est situé à environ 5 km de la localité du même nom et à 80 km environ à l'Est de la ville de Taroudant.

La retenue d'Aoulouz est dimensionnée pour un volume utile de 110 Mm^3 , et permet de régulariser environ 120 Mm^3 . Ceci est dû à la fonction même du barrage qui, pour recharger la nappe, doit être vidé après le passage de chaque crue.

La nappe joue le rôle d'un grand réservoir de stockage. Le barrage d'Aoulouz est le premier au Maroc à être géré de cette façon et sera souvent vide. La régulation à l'échelle annuelle du Souss sera donc faite au niveau du réservoir souterrain.

Le barrage d'Aoulouz est implanté dans une formation dolomitique de structure régulière, relativement simple, très fracturée et affectée d'une importante karstification de fissures. Le substratum dolomitique affleure en rive droite, il est recouvert d'alluvions sur une dizaine mètres en fond de vallée. Une terrasse ancienne dont l'épaisseur atteint 20 m par endroits masque le substratum en rive gauche sur pratiquement toute l'emprise du barrage.

Le barrage d'Aoulouz domine un bassin versant de 4450 km^2 . L'ouvrage est du type poids béton compacté au rouleau. Il est constitué d'une digue de 76 m de hauteur maximale sur fondation, d'une longueur totale en crête de 480 m, pour une largeur maximale de 59 m au niveau du terrain naturel et de 7 m en crête de l'ouvrage. Il comporte ce qui suit (Figure 2) :

- Un ouvrage de vidange de fond (figure 3) constitué par deux pertuis vannés de section rectangulaire de $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ et de 54 m de longueur susceptible d'évacuer un débit de $2 \times 525 \text{ m}^3/\text{s}$ sous le niveau normal de la retenue.
- Un évacuateur de crues à seuil libre de 186 m de longueur assurant une évacuation de l'ordre de $6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (crue décennale).
- Un ouvrage de prise d'eau usinière, constitué par deux conduites vannées de 2 m de diamètre capable d'évacuer un débit de l'ordre de $2 \times 25 \text{ m}^3/\text{s}$ sous la cote la plus basse de turbinage.
- Une galerie d'injection au pied amont du barrage de longueur totale 1265 ml dont 890 en souterrain.
- Un réseau de galeries d'accès, de drainage et de contrôle totalisant une longueur de 3135 ml dont 640 en souterrain.

La coupe type du barrage (figure n°4) comporte à l'amont un parement vertical en béton armé (BCV) épais de 1,50 au-dessous à la cote 738 NGM, et de 1,00 m au-dessus de cette cote. Le parement aval incliné 0,85 H/1 V est également réalisé en BCV sur une épaisseur de 50 cm.

III.3.2. Barrage Imi El Kheng

Le barrage Imi El Kheng situé sur l'Oued Talkjoun affluent rive droite de l'Oued Souss participe à la recharge de la nappe par le retour d'eau d'irrigation. Le but de cet ouvrage est l'irrigation des différents périmètres qui se trouvent juste à sa proximité et qui s'élèvent à près de 840 ha.

L'ouvrage est de type poids en béton compacté au rouleau de coupe type presque similaire à celui du barrage Aoulouz, de hauteur 39 m et de retenue 11 Mm^3 . Il comprend (figures n°5 et 6) :

- Une vidange de fond constituée par une conduite de diamètre $\phi 1000 \text{ mm}$, de longueur 55 m et de débit $10,9 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Une vidange demi-fond de diamètre $\phi 1000 \text{ mm}$, de longueur 35 m et de débit $10,7 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Un évacuateur de crue en surface incorporée dans le corps du barrage capable de transiter un débit de $1299 \text{ m}^3/\text{s}$.

III.3.3. Seuils de rétention

Dans le but d'améliorer la capacité d'infiltration dans la zone 2 située entre Igli et le pont de Oued Taima (environ $40 \text{ m}^3/\text{s}$), une batterie de seuils de rétention (en

nombre de 9) fut réalisée permettant d'une part de ralentir l'écoulement dans l'oued et d'autre part une meilleure répartition de l'écoulement entre les différents chenaux.

Les types de seuils réalisés sont soit en gabions remplis d'enrochement ou d'alluvions, soit en alvéole. Les alvéoles sont des caissons carrés formés des plaques en béton légèrement armées et sont remplies par du tout venant compacté (figure 1 et 9).

IV. OPTIMISATION DES OUVRAGES (BARRAGE AOULOZ)

Les études de régularisation effectuées dans le cadre de l'Avant Projet avaient pour objectif de rechercher les dispositions assurant l'optimisation des infiltrations dans la zone comprise entre les localités d'Igli et Oued Taima (zone 2). Les infiltrations dans la zone comprise entre le barrage et Igli (zone 1) étaient a priori jugées pas (ou peu) intéressantes. L'objectif étant donc de maximiser les infiltrations en zone 2 étant entendu que les eaux devaient forcément transiter par la zone 1 d'une part, sachant d'autre part que les débits d'infiltration ne peuvent dépasser des valeurs maximales au-dessus desquelles les excédents s'écoulent à l'aval. De ce fait l'exploitation optimale du réservoir doit résulter de la prise en compte des deux principes suivants :

- Nécessité de concentrer les lâchers préalablement stockés dans le barrage de façon à garantir l'arrivée dans la zone 2 d'un débit maximum Q_2 qu'elle peut infiltrer étant entendu que l'écoulement aura préalablement livré à la zone 1 son débit maximum Q_1 .
- Nécessité d'une capacité utile minimale du réservoir, tenant compte des contraintes de gestion et des équipements électromécaniques du barrage. Cette capacité permet d'effectuer une lâchure pendant une période de durée suffisante. Dans cet esprit, il a été considéré qu'une période d'une semaine pendant laquelle on lâcherait le débit maximal nécessaire envisageable soit ($Q_1 + Q_2$ m³/s) constituait un critère réaliste et satisfaisant.

Les résultats des situations effectuées pour différents débits ($Q_1 = 15, 20, 25$ m³/s) et ($Q_2 = 30, 40, 50, 60$ m³/s) pour des retenues allant de 30 hm³ à 280 hm³ (figure 7) ainsi que les résultats du coût marginal en fonction de la capacité de la retenue (figure n°8) ont permis de retenir une capacité utile de 110 hm³ et un débit maximal de 60 m³/s ($20 + 40$ m³/s) pourvu que le m³ d'eau le plus rémunérateur atteigne dans la région une valeur de 10 à 12 Dh.

V. IMPACT DE LA RECHARGE

Depuis sa mise en service, le barrage d'Aoulouz a

permis de régulariser 220 Mm³ qui ont servi à la recharge de la nappe (35 Mm³ ont été restitués comme droit d'eau pour irriguer l'oliveraie d'Aoulouz au pied du barrage).

L'impact de la recharge de la nappe par le barrage d'Aoulouz depuis le début de son fonctionnement est plus que positif même si on a eu une seule année normale (1991 - 1992) et deux années consécutives de sécheresse (1992-1993 et 1993-1994).

Parmi les effets de la recharge, on peut citer :

- * La remontée du niveau piézométrique : (Figure n° 10)

Les lâchers d'eau dans le lit de l'Oued Souss ont engendré des remontées notables du niveau piézométrique de la nappe, qui peuvent être ponctuellement très importantes après chaque lâcher.

- * Atténuation de la baisse de la nappe près de l'Oued Souss

Pour l'année 1991-1992 durant laquelle le plus important volume d'eau a été lâché, la piézométrie de la nappe montre une baisse variable de 0.5 m à 2 m au maximum, alors que pour les années précédentes où il n'y a pas eu de recharge, la baisse a atteint 5 m, ceci témoigne d'une réduction notable de l'ampleur de la baisse essentiellement dans les zones proches de l'Oued Souss.

- * Augmentation des débits des sources : (Figure n°11)

La source de la rive droite de l'Oued Souss, situées en aval immédiat du barrage ont vu leurs débits s'accroître de près de 80 % à sa mise en eau.

- * Augmentation du débit du drain Freija : (figure n°12)

Le drain Freija situé dans le lit de l'Oued Souss, près de la ville de Taroudant, a vu son débit qui était presque nul avant la recharge, atteindre une valeur instantanée de 250 l/s, lors des lâchers de mai 1996.

- * Irrigation des périmètres traditionnels d'Aoulouz :

Le barrage Aoulouz a permis de fournir les droits d'eau d'irrigation de l'oliveraie d'Aoulouz près du barrage : 1800 ha, même durant les deux dernières années d'extrême sécheresse.

- * Irrigation d'appoint des périmètres traditionnels :

Les lâchers d'eau effectués en absence de pluie ont permis aux agriculteurs des périmètres traditionnels longeant l'Oued Souss de pratiquer des irrigations d'appoint en dérivant l'eau dans les séguias traditionnelles.

FICHE SYNOPTIQUE

BARRAGE AOULOZ

DONNEES GENERALES

1. Maître de l'ouvrage : Ministère Des Travaux Publics
 2. Maître d'Œuvre : Administration de l'Hydraulique
 3. Projeteur : Bureaux d'études
 INGEMA COYNE & BELIER
 4. Laboratoire : L.P.E.E
 5. Entrepreneur G.C : MATRAP-SEPICO (pilote) - PICO
 6. Entrepreneur : MC (Kénitra) -
 (Electromécanique) SOREFAM (Portugal)

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU BARRAGE

1. Type : Poids en béton
compacté au rouleau
 2. Terrain de fondation : Calcaires dolomitiques
 3. Hauteur maximale au-dessus
du terrain naturel : 59 m
 4. Hauteur maximale au-dessus
du fond de fouilles : 76 m
 5. Longueur en crête : 480 m
 6. Largeur en crête : 7 m
 7. Fruits du parement amont : vertical
 8. Fruits du parement aval : 0.85 pour 1
 9. Volume du corps du barrage : 850.000 m³

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE LA RETENUE

1. Altitude de la retenue normale : 761.50 NGM
 2. Altitude au niveau maximal exceptionnel : 767.84 NGM
 3. Aire de la retenue au niveau normal : 5.1 km²
 4. Aire de la retenue au niveau
maximal exceptionnel : 6.4 km²
 5. Capacité totale de la retenue : 110 hm³
 6. Apports solides moyens : 1.2 hm³/an

CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES ET HYDROLOGIQUES

1. Températures extrêmes en année normale : 1 à 42°C
 2. Aire du bassin versant naturel : 4.450 km²
 3. Précipitation annuelle moyenne : 360 mm
 4. Débit annuel moyen de la rivière : 6.84 m³/s

OUVRAGES ANNEXES

1. Dérivation provisoire

- * Type : chenal à l'air libre et pertuis
 * Débit : 1600 m³/s

2. Ouvrages d'évacuation Des crues

- * Type : surface du barrage
 * Types de vannes : seuil libre
 * Débit maximal : 5776 m³/s
 * Fréquence de crue de projet : 1/10,000

3. Ouvrages de vidange

- * Type : 2 pertuis vannés dans
le barrage
 * Débit maximal normal : 525 m³/s
de chaque pertuis
 * Débit maximal exceptionnel : 600 m³/s

4. Ouvrages de restitution de petits débits

- * Type : 2 conduites Φ 100 vannées
dans le barrage
 * Débit maximal normal : 30 m³/s
de chaque conduite

5. Ouvrages de prise usinière

- * Type : 2 conduites Φ 2000 vannées
dans le barrage
 * Débit maximal normal : 25 m³/s
de chaque conduite

FICHE SYNOPTIQUE

BARRAGE IMIN EL KHENG

DONNEES GENERALES

Maitre d'Œuvre	: Direction Générale de l'Hydraulique
Projeteur	: Bureau d'étude Equiter
Laboratoire	: LPEE
Province	: Taroudant

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU BARRAGE

1. Type	: poids en béton compacté au rouleau
2. Terrain de fondation	: formation calcaire marneuse
3. Hauteur maximale sur TN	: 32 m
4. Hauteur maximale sur fondation	: 39 m
5. Longueur en crête	: 169.75 m
6. Fruit du parement amont	: 0.2/1V
7. Fruit du parement aval	: 0.8/1V
8. Volume du barrage	: 118.000 m ³

CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE LA
RETENUE

1. Niveau de retenue normale	: 541.5 NGM
2. Niveau des plus hautes eaux	: 546.3 NGM
3. Aire du plan d'eau en RN	: 165 ha
4. Aire du plan d'eau en PHE	: 265 ha
5. Volume de retenue normale	: 11 Mm ³
6. Apports solides moyens	: 102.000 m ³ /an

CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES

1. Aire du bassin versant	: 292 km ²
2. Apports moyens	: 12 Millions de m ³

OUVRAGES ANNEXES

1. Evacuateur des crues

- Type : surface du barrage
- Type des vannes : seuil libre
- Débit maximale : 1299 m³/s
- Fréquence de crue de projet : 1/10.000

2. Ouvrage de vidange

2.1. Vidange de fond

- Type : conduite circulaire Φ 1000 implantée
en rive gauche
- Débit : 10.9 m³/s

2.2. Vidange de demi fond

- Type : conduite circulaire Φ 1000 implantée
en rive droite
- Débit : 10.7 m³/s

BASSIN VERSANT DU SOUSS

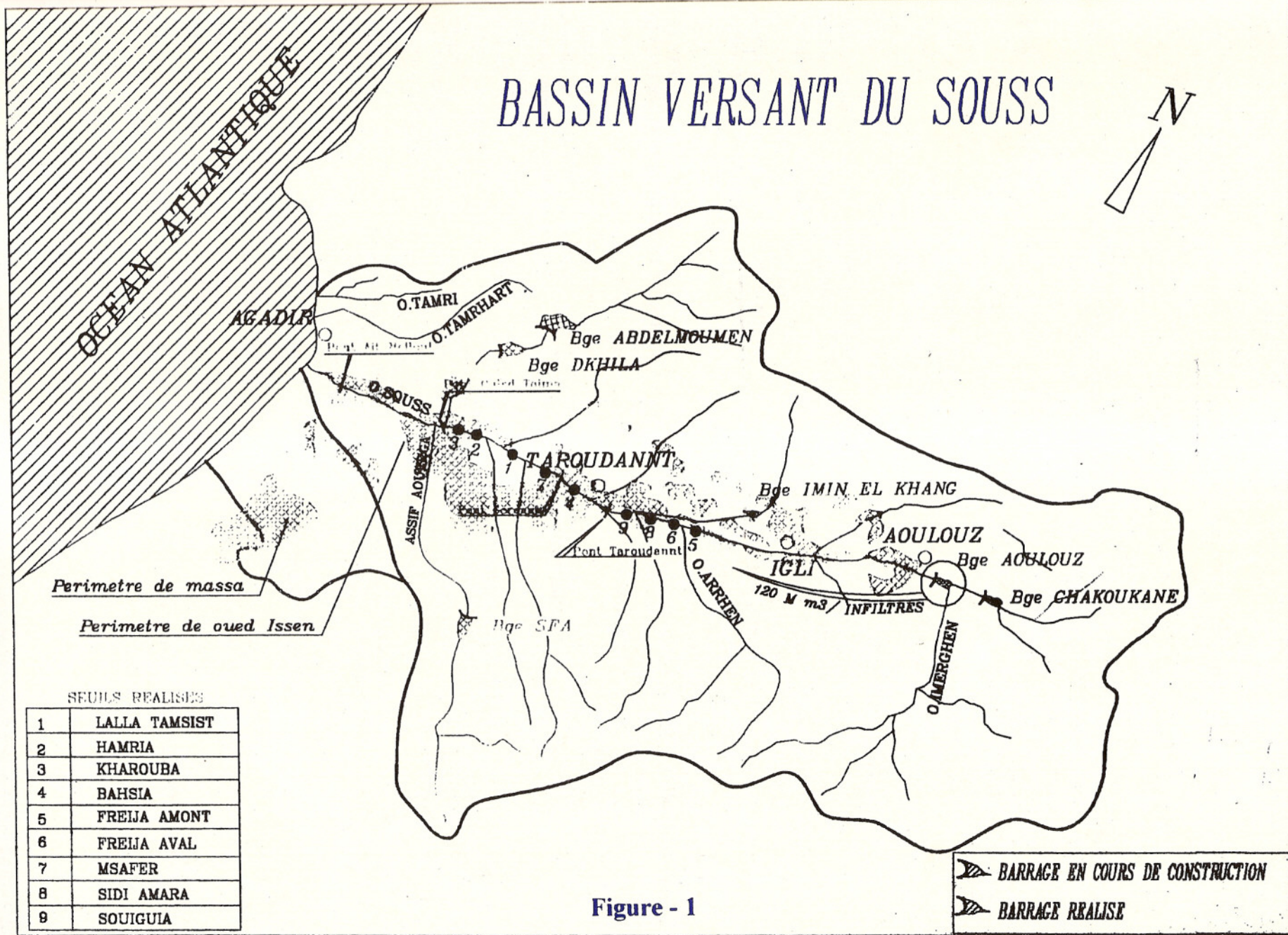


Figure - 1

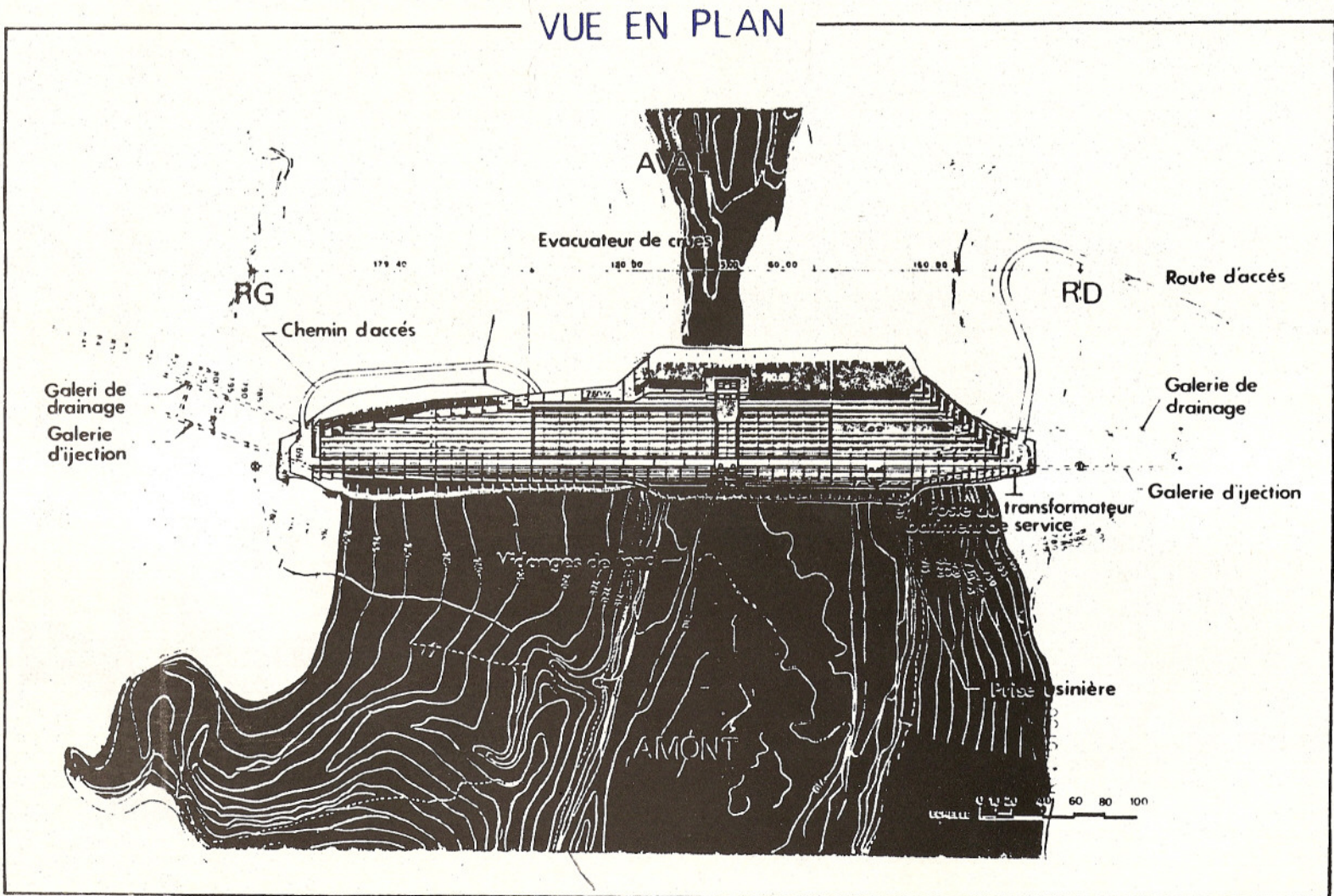


Figure - 2

Barrage Aoulouz

COUPE TYPE (Partie Deversante)

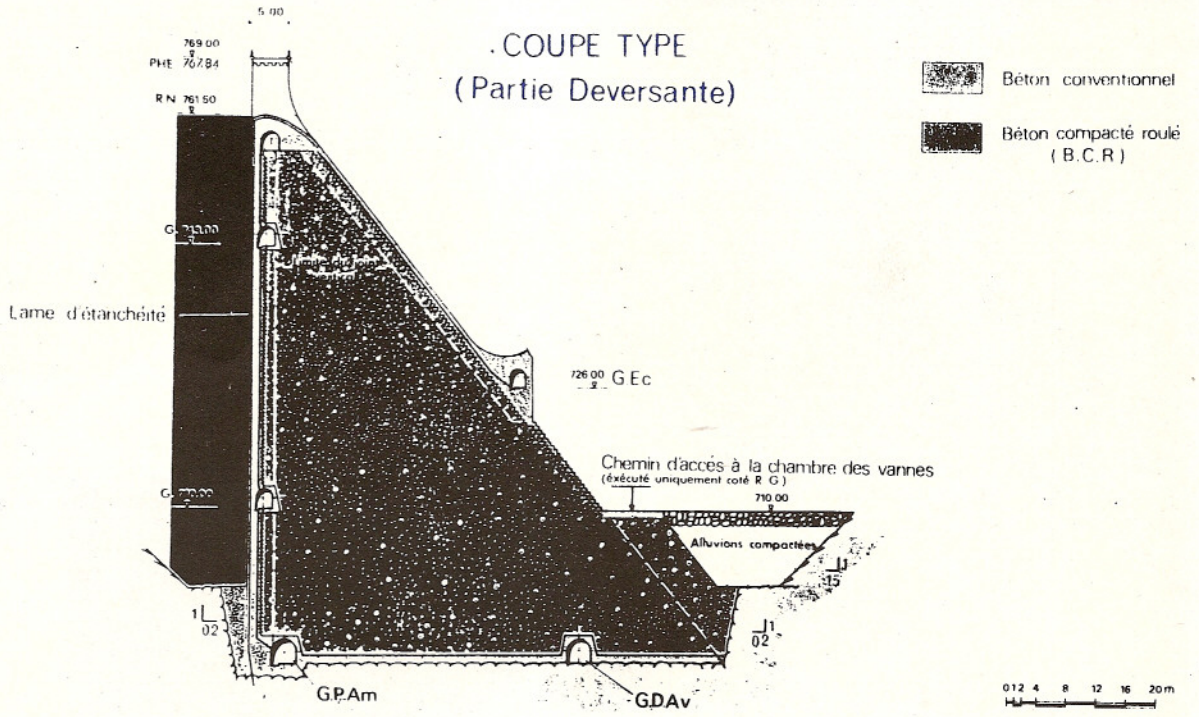


Figure - 4

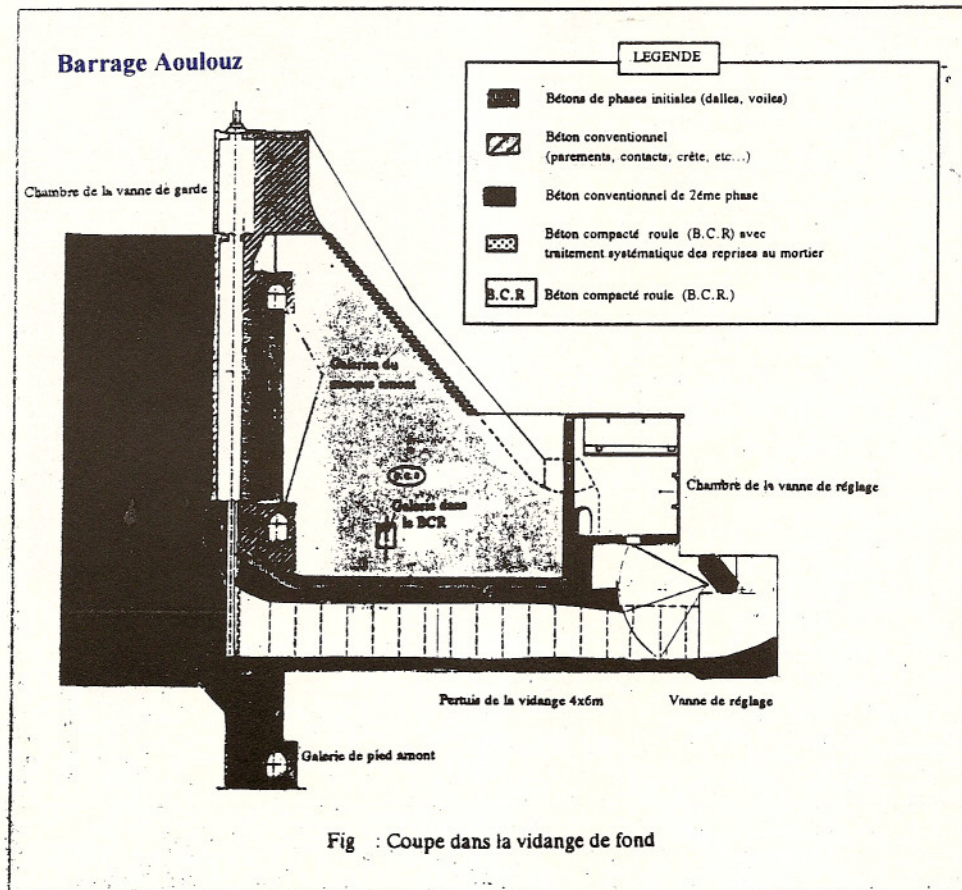


Fig : Coupe dans la vidange de fond

Figure - 3

Barrage Imi El Kheng

VUE EN PLAN DES OUVRAGES

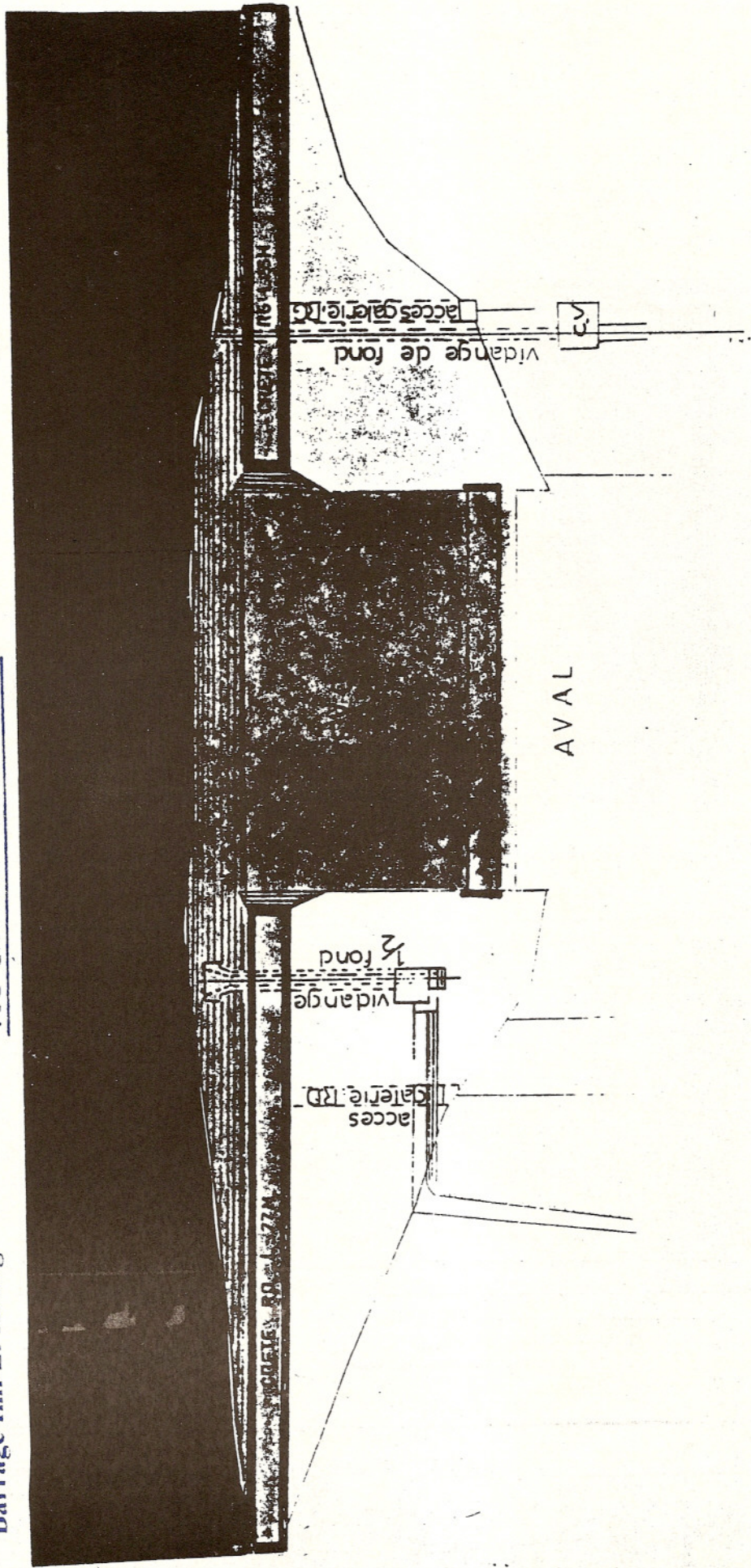
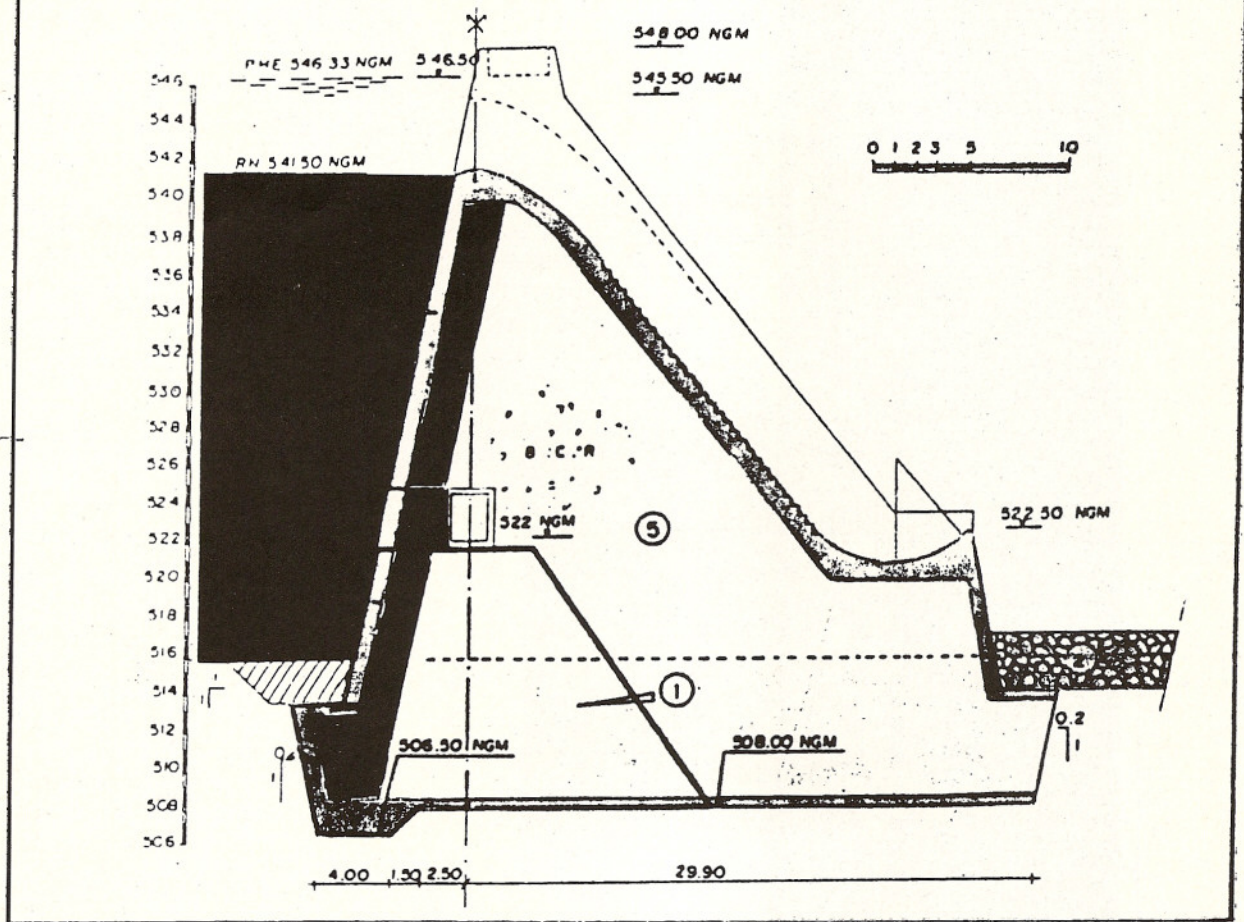
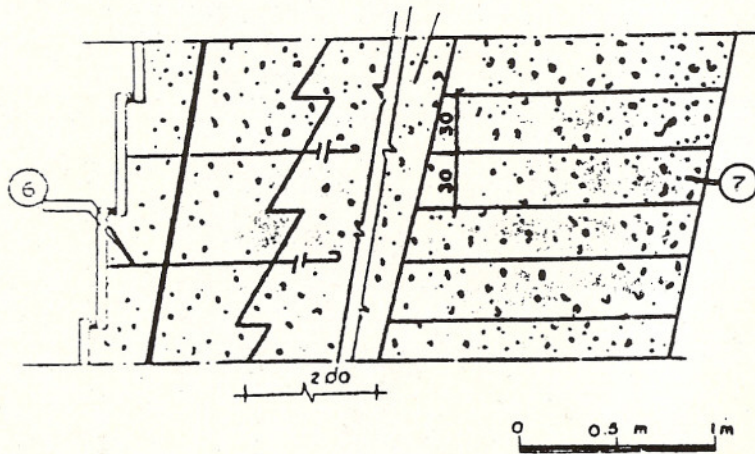


Figure - 5

PROFIL EN TRAVERS TYPE



DÉTAIL

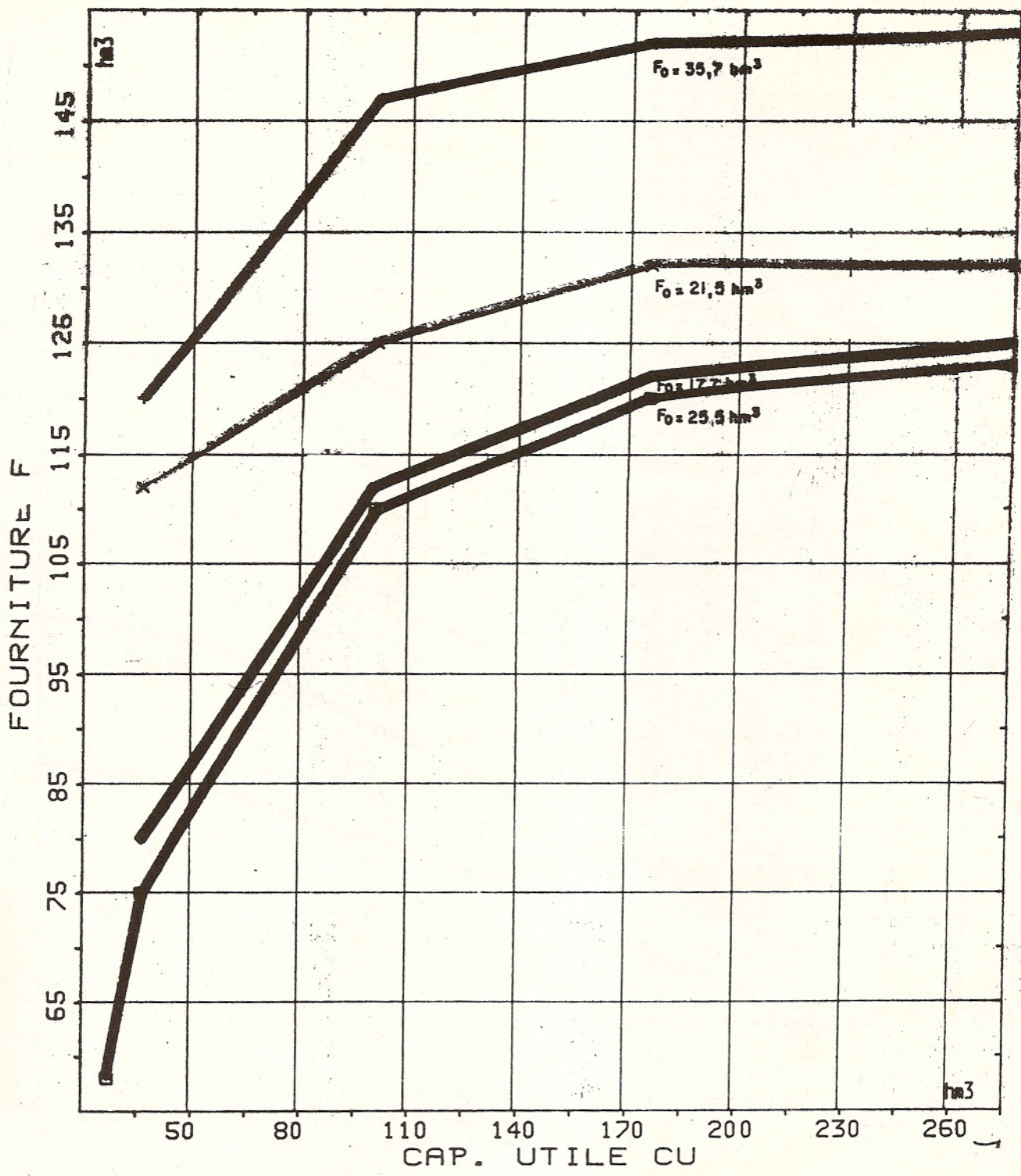


LÉGENDE

- ① : Barrage de 1^{ère} phase
- : Tapis d'enrochement
- : Béton conventionnel
- : BCR "traité"
- ⑤ : BCR
- ⑥ : Ancrage 12 ; l = 2,50 m
- ⑦ : Béton de reprise

Figure - 6

Barrage Imi el Kheng



$Q_1/Q_2=15/60$ m³/s
 $Q_1/Q_2=25,60$ m³/s
 $Q_1/Q_2=20/40$ m³/s
 $Q_1/Q_2=15/30$ m³/s

Q_1 m³/s = débit max. d'infiltration dans zone 1
 Q_2 m³/s = " " " " " 2

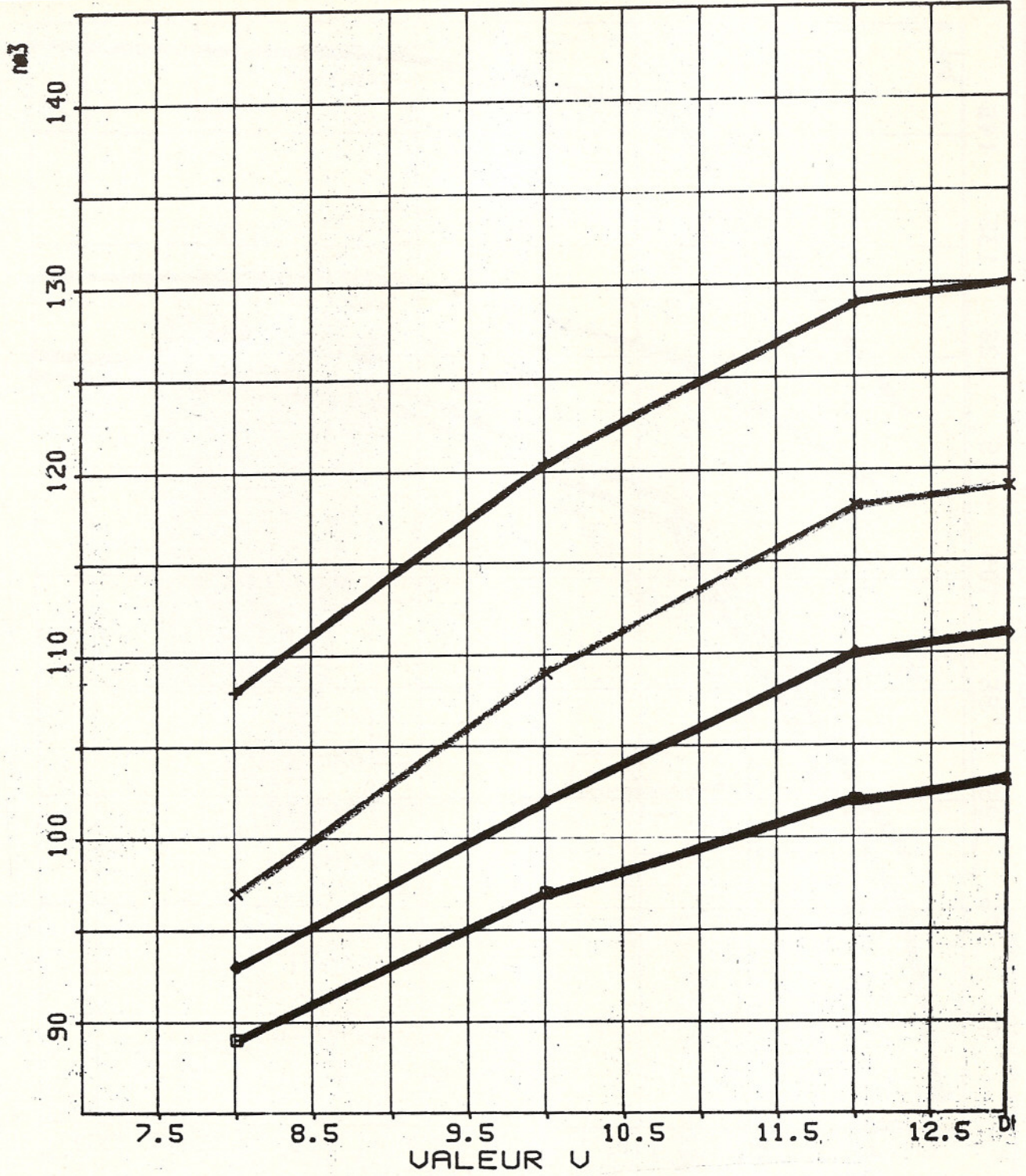
F_0 = Infiltration moyenne annuelle naturelle en zone 2 (pas de barrage)

BARRAGE D'AOULOZ

FOURNITURE F EN FONCTION DE LA CAPACITE UTILE CU

AVRIL 85

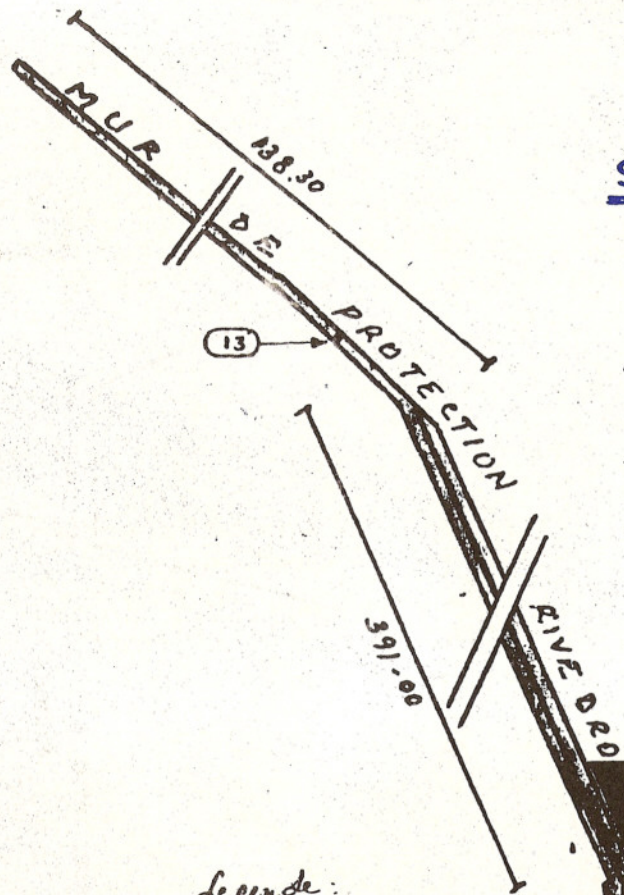
FIG.1



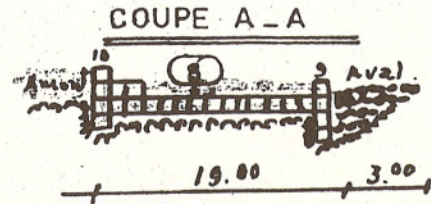
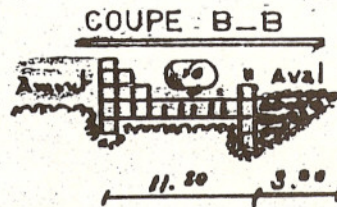
Q1/Q2=15,30
 Q1/Q2=15,60
 Q1/Q2=20,40
 Q1/Q2=25,60

BARRAGE D'AOULOZ
 Capacité optimale C en fonction de
 la valeur v du m³ d'eau marginal
 AVRIL 65 **FIG 2**

SEUIL SIDI AMARA — SCHEMA D'EXECUTION



Légende:
 (13) cote locale



Vue en plan

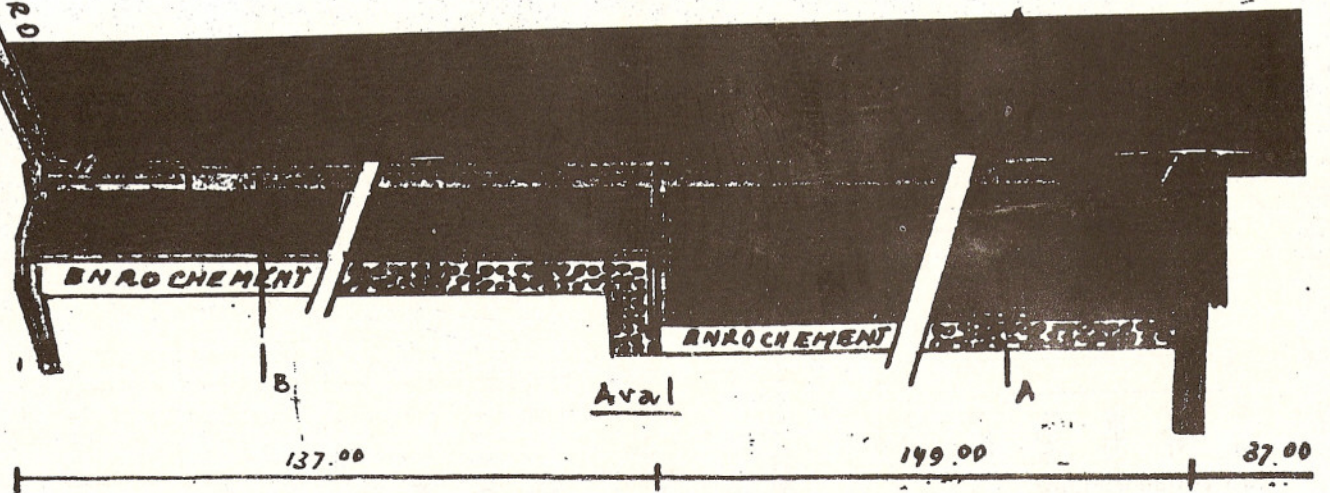


Figure - 9

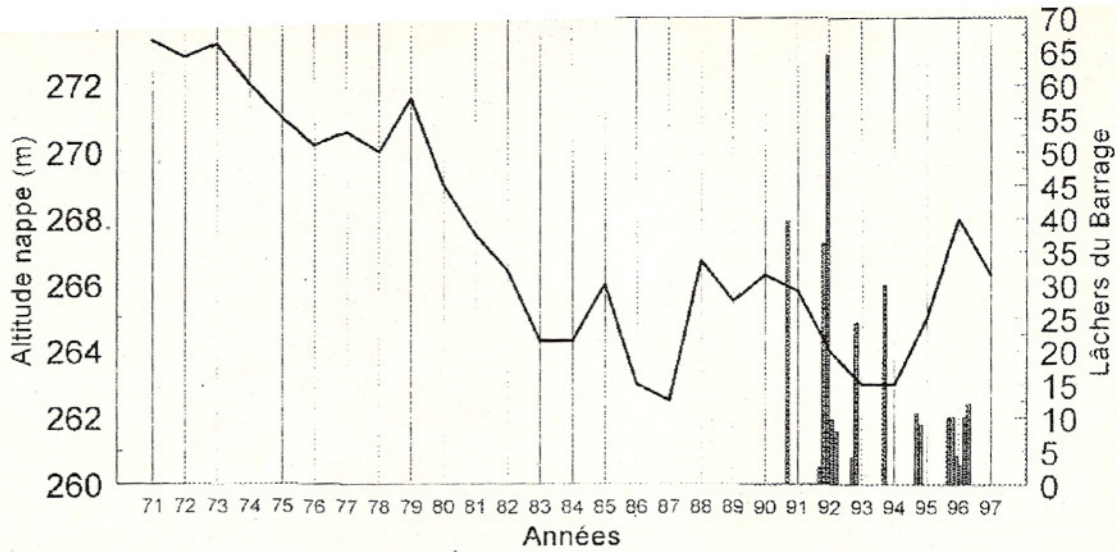


Figure 10 : Evolution du niveau piézométrique de la nappe du Souss Amont

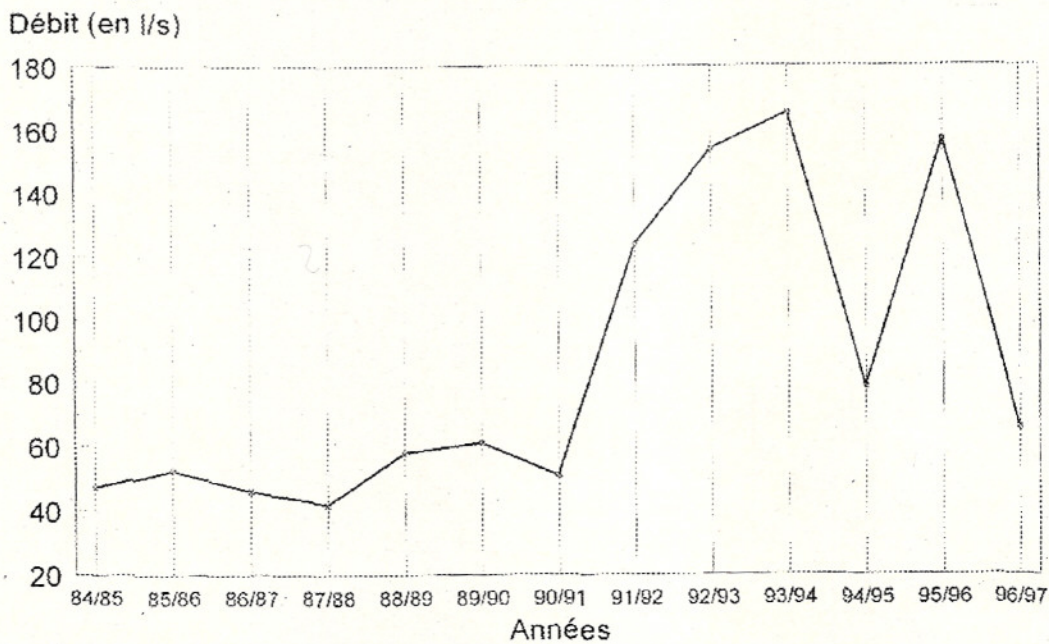


Figure 11 : Evolution du débit de la source Ain Tiar

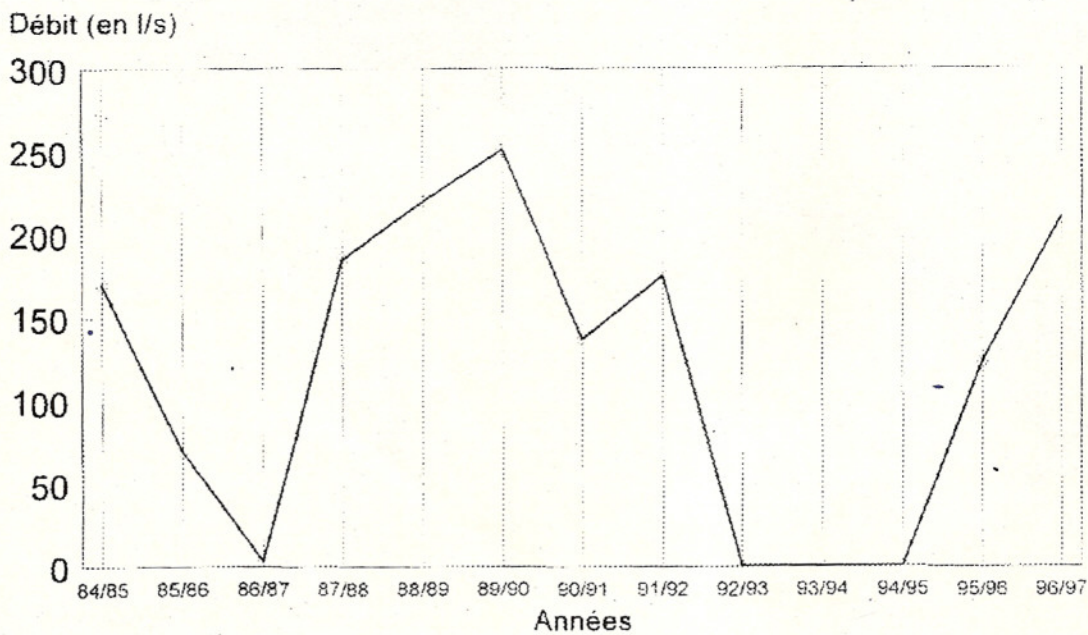


Figure 12 : Evolution du débit du drain Freija

USE AND UTILITY OF PERFORMANCE INDICATORS IN IRRIGATION MANAGEMENT: CASE STUDY OF MOULOUYA SCHEME - MOROCCO

A. EL KASSIMI¹, H. BELGUENANI², R. HAFIANE³

RESUME

INTERET ET UTILISATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE DANS LA GESTION DE L'IRRIGATION : CAS DU PERIMETRE DE LA MOULOUYA - MAROC

La présente communication met en relief l'intérêt de l'utilisation des indicateurs de performance dans le gestion de l'eau d'irrigation dans le cas du périmètre de la Moulouya.

L'identification des paramètres de performance durable appropriés et adéquats est une tâche très complexe qui nécessite la collecte de données fiables et représentatives dans l'espace et dans le temps. La collecte et le dépouillement de ces données engendrent des coûts considérables en moyens humains et matériels.

Le choix des indicateurs et paramètres à utiliser dans l'évaluation des performances de la gestion de l'eau d'irrigation dépend étroitement de leur utilité, de leur fiabilité et des difficultés de collecte de données.

Dans le cas du périmètre de la Moulouya, plusieurs indicateurs de performance concernant l'efficacité globale de distribution, les performances de production, financières, environnementales et socio-économiques ont été identifiés et analysés. Leur traitement montre l'efficacité de la gestion de l'eau d'irrigation appliquée par l'ORMVAM ces dernières années et lui permettent d'évaluer ses performances et d'établir des programmes prévisionnels appropriés.

Mots clés : Indicateurs de performance, intérêt et utilisation, périmètre de la Moulouya

SUMMARY

This paper focuses on the use and utility of performance indicators for irrigation water management in the case study of Moulouya scheme. Identifying suitable and adequate factors for sustained performance of the operating agency is a complex task. It requires collecting reliable data in representative timely and special distribution.

Data collection involves considerable costs on manpower and infrastructure. Numerous constraints, such as financial and technical support and staff involving motivation, are encountered for computing indicators. This shows the needs to be taken into account to facilitate this task.

Selecting useful performance indicators and parameters depends on their use, on how difficult is to collect data and on their consistency. In the case study of Moulouya scheme, various performance indicators concerning water delivery, agricultural, financial, environmental and socio-economic performance are tested. The setting of these parameters is considered as a reliable tool for the operating agency, ORMVAM, to evaluate the current management performance and set short, mid and long term programs for improvement.

Key-words : Irrigation performance indicators, Use and utility, Moulouya scheme.

¹ Rural Engineer, Irrigation Network Operation Bureau, ORMVAM

² Hydrogeology Engineer, Irrigation Network Operation Bureau, ORMVAM

³ Rural Engineer, Irrigation Methods Bureau, ORMVAM

1. INTRODUCTION

This paper aims to test the use and utility of various performance indicators for irrigation water management in the case study of Moulouya scheme. Identifying suitable and adequate factors for sustained performance of the operating agency is a complex task. It requires collecting reliable data in representative timely and spatial distribution.

This document presents the main constraints encountered for computing various indicators and shows the needs to be taken into account to facilitate this task.

For a better understanding of the irrigation context, the paper provides an overview of the irrigation setting of the Moulouya scheme. To avoid misunderstanding of results, explanations are given and supported in some cases by field measurements and investigations.

ORMVAM is carrying out a research program on irrigation performance jointly with Infrastructure, Hydraulic and environmental Engineering (IHE) and

International Irrigation Management Institute (IIMI). Its main interim results, after being updated and corrected, are completed with other indicators and interpretations.

2. MOULOUYA SCHEME

The Regional Agricultural Development Office of Moulouya (Office régional de Mise en Valeur Agricole de la Moulouya, ORMVAM) is an institution established by Royal Decree in 1966 as a public establishment with financial autonomy. It is placed under the supervision of the Department of Agriculture.

The area of jurisdiction of ORMVAM is located in the provinces of Berkane and Nador in the North-East of Morocco covering 335 000 hectares of mountains and plains. It is bordered in the North by the Mediterranean sea, in the East by the Oued Kiss (border with Algeria), in the South by the Beni Snassen Mountains and in the West by the Rif mountains.

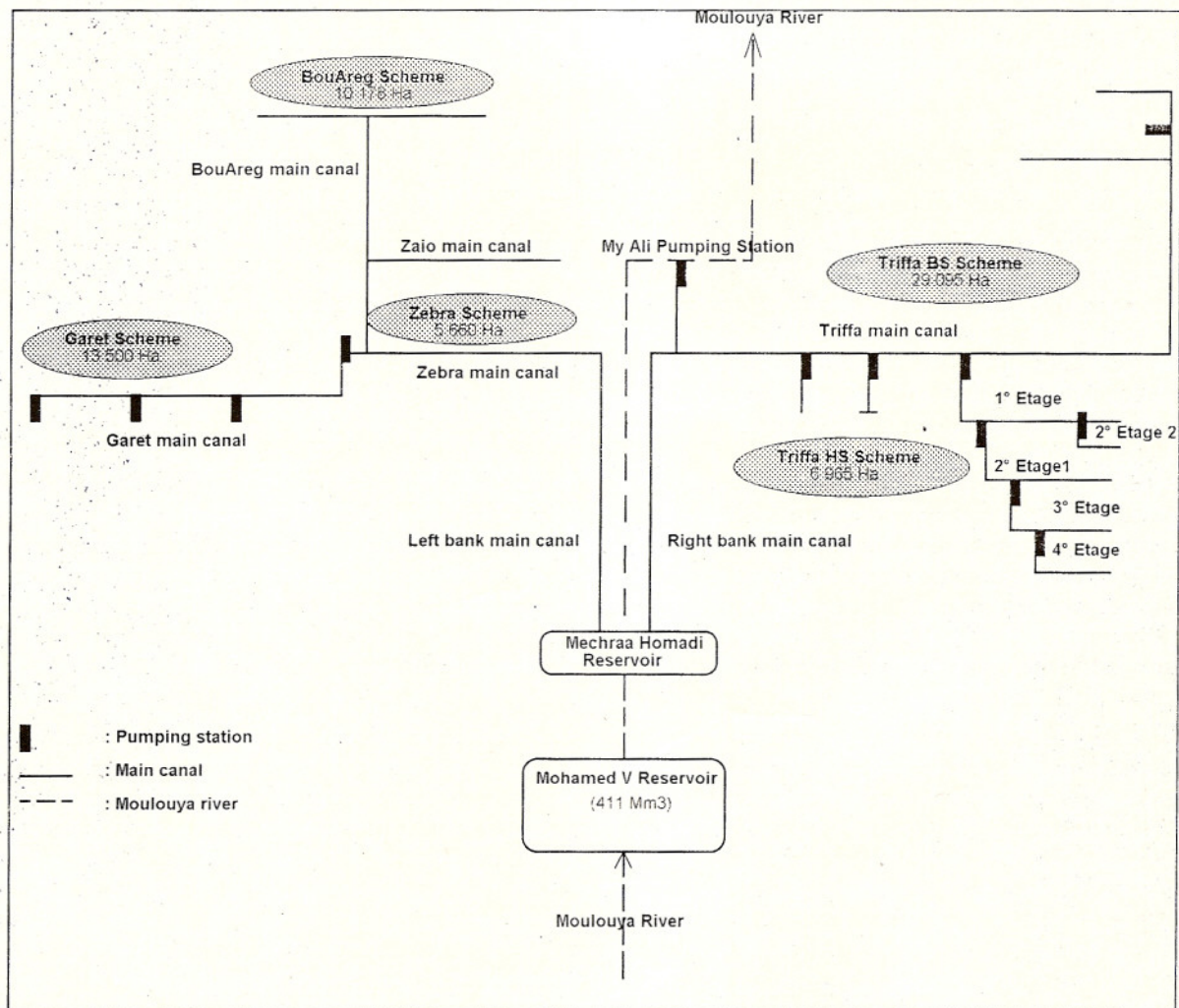


Fig. 1 : Synopsis of the Moulouya Scheme

The climate in the area is semi-arid Mediterranean with a low and irregular average annual rainfall of 300 mm. Rainfall is concentrated between November and April. The average annual evaporation registered with a Class A evaporation Pan is about 1467 mm in Boughriba.

The four plains which form the irrigated area are the Triffa plain on the right bank of the Moulouya river (Berkane Province) and the Zebra, Bouareg and Garet plains on the left bank (Nador Province).

The soils of the irrigated area are locally known as brown soils and are of great agronomic value, especially those in the Triffa and Bouareg plains. The dominant soil classes in the Moulouya scheme are isohumic soils (96070 ha), unweathered minerals (7000 ha), salsodic soils (1960 ha), hydromorphic soils (218 ha) and vertisols (130 ha).

The total area of 335 000 ha consists of 110 000 hectares cultivable land and 225 000 ha of forests, built-up and uncultivable area. Of the cultivable land, 71 000 hectares is irrigated of which 5600 ha in small scale irrigation schemes.

2.1. Studies and research

To improve its management performance, ORMVAM undertook various studies regarding water management and organization. In the following will be presented the objectives of these main studies and the collaborative research program undertaken by ORMVAM with foreign institutions.

- Management and information system study (*SIG*): Its main purpose is to introduce analytical accountancy and a new organization of ORMVAM.
- Improvement of operating of irrigation and drainage systems. This study aims to diagnose irrigation schemes and to suggest solutions to improve irrigation procedures and methods.
- Computer assisted maintenance study (*GMAO*): Its purpose is to introduce preventive computer assisted maintenance for pumping stations.
- Regulation of Triffa main canal study: Its purpose is to improve regulation of the main canal in Triffa scheme.
- Research Program on Irrigation Performance (RPIP): it is a joint program among the International Irrigation Management Institute (IIMI) and the International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Engineering (IHE). The expected objective is to identify those factors which are of main importance for adequate and sustained performance in Moulouya scheme. The main results of this program will be presented in the following sections and completed with other indicators and comments.

2.2. Water Resources

Surface water comes mainly from the Moulouya river with an average annual runoff of 860 mcm. The discharges are regulated by the Mohammed V reservoir (operational since 1967) with an initial capacity of 730 mcm, presently reduced to a live storage capacity of 411 mcm due to an annual estimated sedimentation rate of 12 mcm.

The Mechraa Homadi reservoir is operational since 1957 with an initial live capacity of 40 mcm. The continuous sedimentation phenomena resulted in a remaining live storage capacity of only 10 mcm.

Downstream of Mechraa Homadi dam, a new pumping station, called Moulay Ali station, has been constructed for supplementary supply from return flows and outflow from rocky aquifers between the dam and the pumping station. It has a capacity of 3.9 m³/s and allows theoretically an average annual volume of 70 mcm to be pumped 95 meters up from the Moulouya river into the Triffa main canal. The pumping station is operational since April 1995.

The water availability for irrigation is highly dependent on the runoff in the Moulouya catchment. Periods of reduced availability occur frequently.

Groundwater is developed in all systems except the Zebra plain where no phreatic water is available. The salinity of groundwater differs from system to other. The Triffa plain has good quality groundwater (from 0.8 to 2 g/l) in sufficient quantity estimated at an annual renewable of 70 mcm. It is used by farmers in times of water scarcity and for supplementary irrigation.

2.3. Irrigation Network

The diversity of the irrigation network can best be illustrated by the following classification (BCEOM-Maghreb Projets, 1995):

A- Delivery from Barrage to tertiary level by gravity:

A1: gravity distribution up to farm level (66.2%)

- Triffa Gravity system 27 511 ha
- Bouareg 10 138 ha
- Zebra 5 660 ha

A2: pressurized on farm level (1.7%)

- Triffa+BouAreg 1 107 ha

B- Delivery from Barrage to tertiary level lifted by pumping:

B1: distribution by gravity (11.5%)

- Triffa pump. Scheme 7 482 ha

B2: pressurized conveyance sprinkler (20.6 %)

- Garret 13 500 ha

The main canals are trapezoidal, concrete lined canals. Water level control is done by fixed or movable regulators: AMIL Upstream Control gates, duckbill weirs, Mixed Control Neyrpic gates and AVIO Downstream Control gates.

~~Secondary and tertiary canals are also lined with~~
circular prefabricated concrete ones. They are of good state due to frequent maintenance interventions. Flow regulation is done by fixed weirs in combination with baffle distributors as outlets.

The lining of the main canal (partly concrete, partly masonry) is at various places seriously cracked causing significant losses of water. Actually an ambitious rehabilitation program is undertaken by ORMVAM. At km 19 of the right bank canal a new intake has been constructed for supplementary water from the Moulouy Ali pumping station. Higher areas are served by twelve (12) pumping stations.

Though the right bank main canal was designed for 18 m³/s, problems occur if the discharge exceeds 14.5 m³/s. Like-wise for left bank main canal designed for 17 m³/s if discharge exceeds 13 m³/s. Operation is done in the freeboard and some overtopping can consequently occur. The most important reasons are the improper functioning of the water level regulators and the roughness of canal banks.

The regulation of water level is becoming complicated due to various interventions in the system during its lifetime. This is regarded as one of the main obstacles for efficient water delivery. For that reason a study has been undertaken on the regulation of the Triffa main canal and derived works are presently undertaken (construction of a reservoir at the downstream of the Triffa main canal with a capacity of 30 000 m³).

The turnouts to the secondary canals in the main canal are Baffle Distributors of L or C type. These are supposed to deliver water at a constant rate ($\pm 5\%$ of the normal discharge). Turnouts of the secondary and tertiary canals are baffles of type X or XX with water level regulated by duckbill weirs. The turnouts to farmers are usually "modules" of type X or TOR gates.

2.4. On farm Irrigation Systems

The most important irrigation method used in the Moulouya scheme is the traditional "Robta" system where small basins (2m x 3m) with 3 to 5 ridges are made and crops are planted on the sides of these basins. This system requires permanent attention of the irrigator. Moreover, the density of crops is less compared with the furrow system.

~~Farmers continue to keep this traditional method and seem~~
to be hesitant to change to furrow irrigation because of the

cost for the required land leveling and difficulties to manage furrow discharges.

Furrow irrigation is propagated by ORMVAM via field center for agricultural development (CMV: Centre de Mise en valeur) as this method is under present conditions considered as the most efficient in terms of land use (28 % higher intensity than Robta system), water use and

The orchards are irrigated in small basins at each tree. However, some farmers started with furrow irrigation and the present scarcity of water inc farmers' interest for this technique

Table 1 : Irrigation methods in Moulouya Scheme (

Surface irrigation	50 637
Sprinkler irrigation	14 328
Micro-irrigation	285
Pivot	148
Total	65 398 Ha

2.5. Procedures of Water Distribution

The basic principles of water distribution is that each land title owner will receive a predetermined volume of water per irrigation. This volume depends on the crop and the time of year. Water is released through ORMVAM managed turnout (*prise*) to a number of farmers. Farmers take the flow in turns, they take water released at a time and for a duration as agreed with the water master (*aiguadier*), person responsible of distribution.

Depending on the water availability and requirements, ORMVAM decides on the implementation of an irrigation cycle (*tour d'eau*), its duration and the flow for the various crops to be applied. The start time of the irrigation cycle is based on the need for irrigation.

There is no arranged cropping pattern. Farmers are free to select their crops. An inventory of the crops in the cropping plan is made per farmer for each irrigation cycle. This is registered and serves as a basis for water allocation. The only regulatory mechanism in the cropping plan is the priority for irrigation for crops in case of water scarcity. Tree crops have the first priority as they represent long term investments of farmers. Second are the industrial crops which serve as an input for the local agro-industry, followed by fodder crops for cattle. Last on the list are cereals and vegetables.

ORMVAM developed a list of unit water requirements per crop in cubic meter per mound which is converted in duration of delivery in hours of the irrigation flow (main density, 20 l/s or 30 l/s. Reduction of delivery rate is possible to avoid overflowing the mounds and/or the unit irrigation rates (*doses*).

For every irrigation cycle, the *aiguadier* prepares for his area of jurisdiction the irrigation cycle program (*feuille de tour d'eau*) on which are indicated the start and the end of delivery to each farmer. Then he combines the releases to the various turnouts in such a way that the dis-

charge in the parent canal will become more or less constant. To the accumulation of all water masters' requirements, a certain discharge is added to provide for losses. It is different for each secondary canal. The total results in the discharge to be released at the head of the secondary canal.

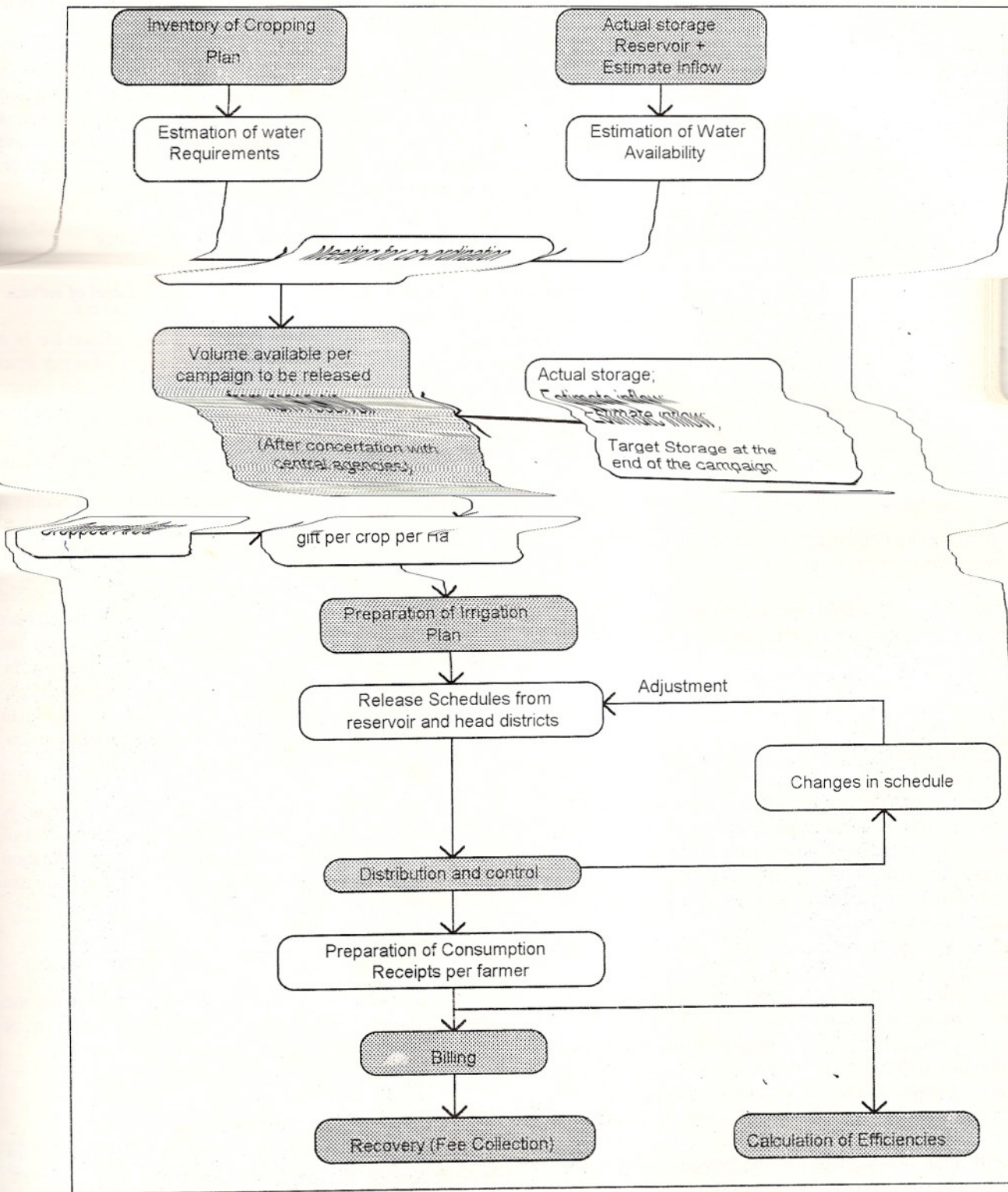


Fig. 2 : Process of Water Allocation, Distribution and Cost recovery

Requests are forwarded to the *garde des eaux* (supervisor of main canal section and responsible for a certain number of turnouts on the main canal) and the CMV. At present the CMVs forward their request to *Subdivisions* (ORMVAM field management antenna) which inform the ORMVAM Service for the management of the irrigation and drainage network (Service de la Gestion des Réseaux d'Irrigation et de Drainage, SGRID). The operation Bureau of SGRID processes the requests and a schedule for release from the reservoir is made. This schedule takes into account filling time, response time and an amount for losses ranging from 20 to 25 % depending on called discharge for the whole system and season.

Monthly, after the deliveries, farmers have to sign a note of acceptance of their share of water (*feuille de contrôle*). Based on this, the payments will be determined by the *Tarifification bureau* of SGRID. In case of non delivery to a certain farmer, he gets priority for the next delivery. If non delivery is due to disturbed flows because of damage or maintenance works, the farmer will get a receipt or "*Bon de récupération*" on which his additional gift is officially stated. Additional requests from farmers can only be granted in case of sufficient availability of water.

The following procedures are followed at ORMVAM for the organization of water distribution: the preparation, implementation and evaluation of the irrigation cycle (*tour d'eau*).

- (a) Check status of the land owner (*Dépositaire*);
- (b) Inventory of the actual cropping areas (Recensement des cultures);
- (c) Use of the unit irrigation rates per crop and per hectare;
- (d) Determination of the duration of irrigation per land title (*Titre foncier*) by the *aiguadier*;
- (e) Preparation of the distribution plan per district by *aiguadier* and *chef aiguadier*;
- (f) Calculation of the discharges to be released at the head of the secondary canals by *garde des eaux*;
- (g) Preparation of the operation schedules for the pumping stations for higher areas;
- (h) Distribution of the operation schedules for secondary canals and pumping stations;
- (i) Preparation of the schedule for releases from the reservoir;
- (j) Distribution of irrigation notes to farmers by *aiguadier*. This notes contain the date and hour for opening and closure of the turnout at their fields, the duration and discharge of delivery;
- (k) Start of the irrigation cycle by opening of the secondary and tertiary offtakes by *garde des eaux* and *aiguadiers*;
- (l) Verification and signing of the consumption receipt (FC: *feuille de contrôle*) by farmers;
- (m) Monthly preparation of the consumption receipts per land title, district, CMV and the whole scheme;
- (n) Calculation of overall system efficiency.

3. PERFORMANCE INDICATORS: USE AND UTILITY

Various performance parameters and indicators were tested on their suitability for irrigation management. The next sections will describe the use and utility of these indicators in the case study of Moulouya scheme.

Computing performance indicators has become a powerful tool for ORMVAM to set prediction operational programs. Selecting useful indicators and parameters depends on their use, on how difficult is to collect data and on their consistency. Collection of data involves however, considerable costs on manpower and infrastructure.

3.1. Water Delivery Performance

3.1.1. Level of service

The actual level of service is defined as the ratio between the actual volume of water released for agriculture at the reservoir and at Moulay Ali pumping station and the gross volume of water required in the standard year. For a normal campaign, ORMVAM estimates the net water requirements for the whole system at 410 mm per year. This target volume is further specified for monthly requirements.

The intended level of service is defined as the ratio between the intended volume for delivery and the gross volume of water required for the standard year. The intended volume to be delivered is determined per campaign in September of each year. It is based on the storage level in the reservoir and a statistical analysis of the inflow for the remaining period of the campaign. ORMVAM prepares a proposal based on a cropping plan and storage in the reservoir on the first of September. Then, Scenarios are analyzed based on probabilistic inflows

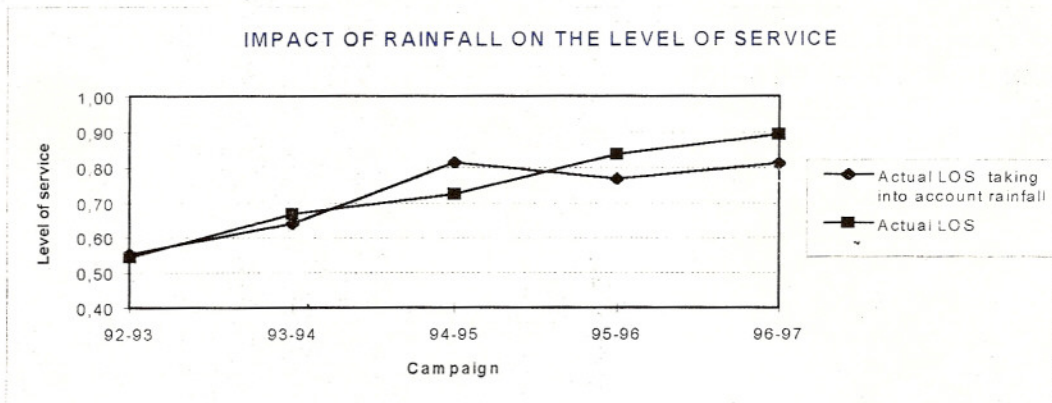
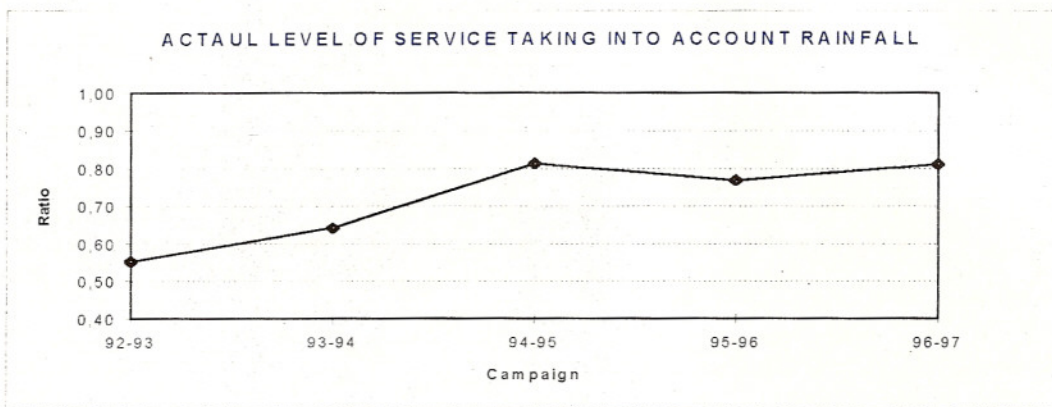
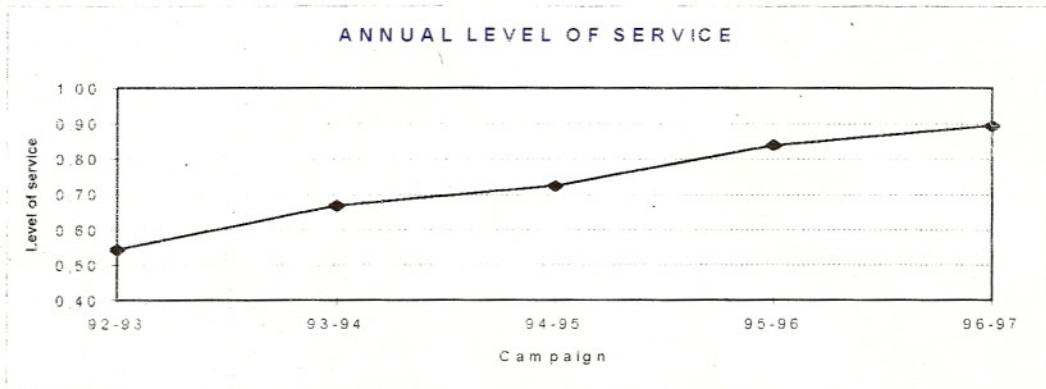
Since the regulating volume of the reservoir is continuously decreasing due to sedimentation, the level of service is also gradually decreasing. Only in combination with an indicator for water availability or water scarcity can this indicator be of use.

The utility of this indicator is limited.

In order to attenuate the effect of rainfall on the actual level of service, it is suggested to define it as follows:

$$\text{Actual Level of Service} = \frac{RW + (R - IR)}{IRW}$$

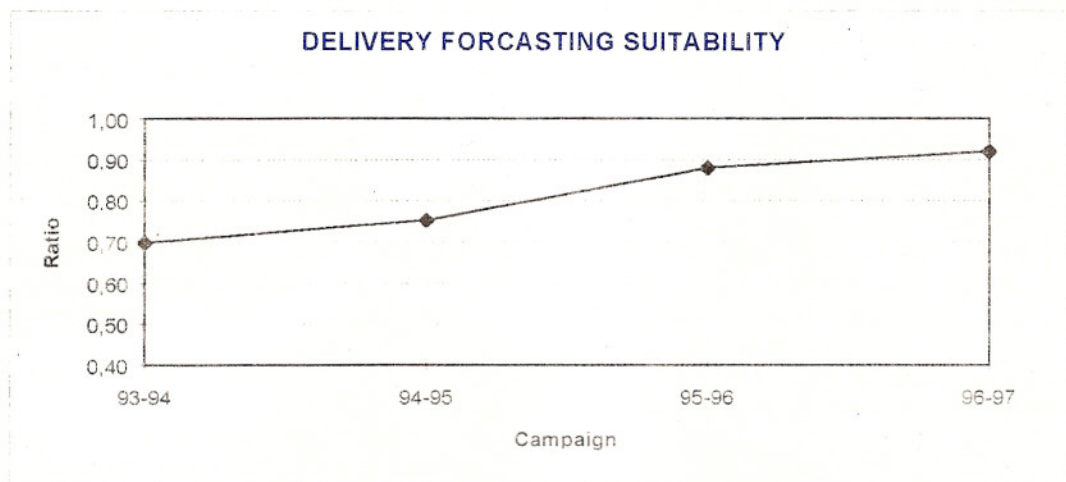
Where RW is the actual volume of water released for agriculture, R is the assigned volume to effective rainfall, IR is the intended effective rainfall (Effectiveness coefficient is estimated at 70 % and the intended rainfall is estimated at 300 mm per year) and IRW is the intended volume of released water.



3.1.2. Delivery forecasting suitability

It is defined as the ratio between the actual released volume from the reservoir and the intended estimated volume at the beginning of each agricultural campaign in the first of September.

This indicator shows how much ORMVAM is making good estimation of the volume to be released. The graphic above indicates an improvement of delivery forecasting. BCEOM stated that the prevision of ORMVAM is for the moment pessimistic during the agricultural campaign. In the near future a more reliable tool will be developed.



3.1.3 Overall efficiency

Demands for planning the releases from the reservoir are based on the crop water requirements using Blaney Criddle-formula. The availability of water determines how much of the demand can be provided. Because of the relative scarcity of water, the demands can not always be fulfilled.

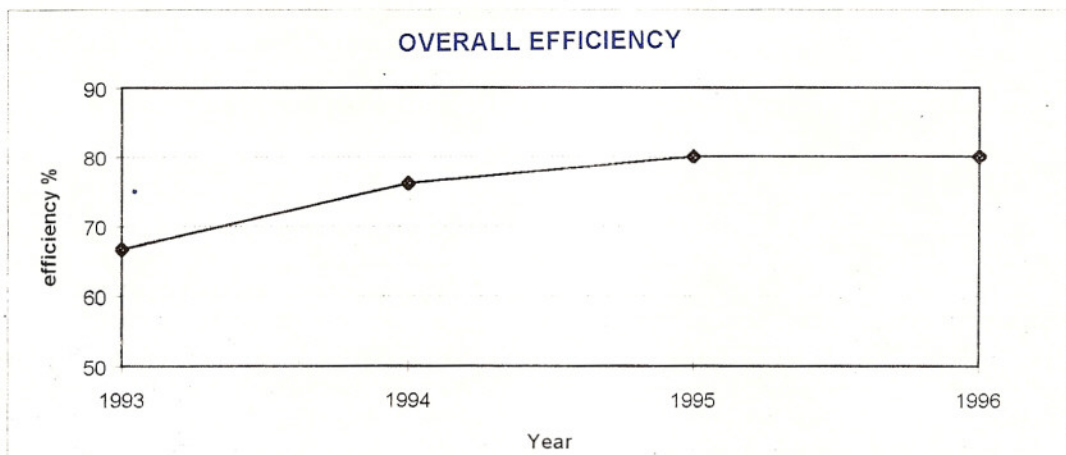
At present, discharge interring the system can not be properly measured due to the nature of intakes which are not managed by ORMVAM. Measuring weirs are expected to be installed in the upstream of main canals to measure more accurately the interring discharges.

For the time being, the used indicator of system efficiency is the ratio between the volume of water received by the users at the turnout and the volume of water released from the reservoir for irrigation (for right and left bank an extra volume of 31.5 mcm. is annually released for non-agricultural purposes). This is an indication of the

efficiency of main, secondary and tertiary canals under management of ORMVAM based on the releases.

At present, to determine the discharge to be released from the reservoir, the cumulative discharges at the turnouts are multiplied with a factor of 1.25 to 1.30 to provide for losses. This means an overall intended conveyance efficiency up to farm level of 77 % to 80 %. The extra water released at the head of the distribution systems is specific for each sector to cover its specific losses.

The following graphic shows a clear evolution of the overall efficiency since 1993. This is explained by the performance oriented management introduced by ORMVAM as a powerful improving tool. Concerning the low efficiency value recorded in 1993, it is mainly due to drought and water shortage during this campaign. In fact, the billed volume was reduced to 95 mcm, where the water volume needed to fill the canal reaches increases due to low frequency and prolonged irrigation intervals.

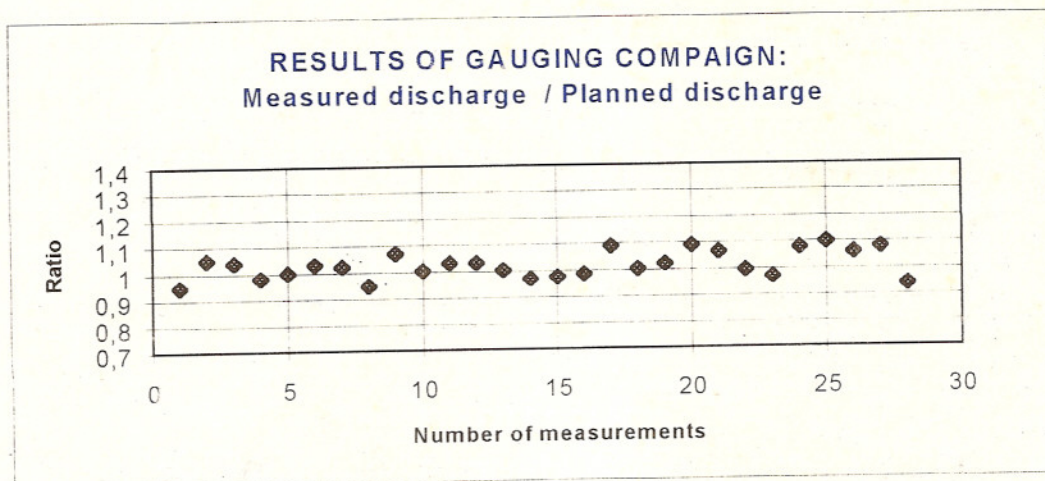


To have reliable results when calculating efficiencies, it is necessary to check if the volume billed to users is really the volume delivered. For this reasons, within the Research Program on Irrigation Performance (RPIP), ORMVAM installed a flow measuring weir in district 22 of Triffa scheme to verify the accuracy of this turnout (more than 800 l/s). By the same way, ORMVAM undertook a gauging campaign in September 1997 using Replogle flume (Broad crested weir) to find out if the volume billed is the precise volume of water delivered to users. Concerning the duration of irrigation, it is controlled by farmers themselves (users) and is therefore considered as the precise duration used for billing. Table 2 : Results of flow measurements in district 22 of Triffa scheme.

	Irrigation cycle N°2 of October 1995	Irrigation cycle N°2 of March 1996
Measured volume using flume - m ³ (a)	869 688.7	910 480
Planned volume - m ³ (b)	836 424	898 780
Ratio - % (a - b) x 100 / b	3.97	1.29

NB: These results show that the secondary off take of district 22 is very accurate in both irrigation cycles.

The gauging campaign of the turnouts at farm level shows their good accuracy. The results are presented in the following graphic. (These results must be taken with caution because the number of measurements is not representative).



3.1.4. Water delivery capacity.

This indicator is defined as the ratio between the actual capacity of the main canal and the peak consumptive demand that needs to be carried at a particular period. It can be applied at different systems levels and is considered as a measure of weather the canal can provide the required irrigation service.

Actually, its value in the case of Moulouya scheme is:

- Right bank main canal : 1
- Left bank main canal : 1.04

This shows that in both cases the capacity of the canal is just enough to provide the required level of service during a critical irrigation duration. These results should be taken with caution because it must be linked with the irrigation scheduling features (mainly duration) of the whole area. In fact, the duration of irrigation cycle has increased from 12 days to 19 days for some districts in the right bank area. It is, then suggested to define this parameter as the ratio of the actual canal capacity and the initial designed capacity in terms of discharge, assuming that the duration of irrigation cycle corresponding to the initial designed capacity is the suitable one for providing crop water requirements in relaxed condition.

Using this approach, the values above become:

- Right bank main canal : 0.81
- Left bank main canal : 0.76

These results show the urgent need for rehabilitation of the regulation infrastructures to increase the canal capacity.

3.1.5. Adequacy

The adequacy is defined as the degree to which the volume to be delivered at farm level to meet needs of crops is actually delivered.

The average crop water requirements was calculated more than 20 years ago using Blaney-Criddle formula. Even this region knew many climatical changes and even Blaney-Criddle formula was improved, the gross field irrigation requirements are not yet updated. These deliveries once fulfilled are regarded as adequate.

The timely and spatial distribution of rainfall makes it very difficult to establish its effectiveness. Further study on effective rainfall is necessary because the occurrence of rainfall is taken into account in the decision whether or not to start, reduce or stop irrigation. For example, during the month of November 1997 two irrigation cycles were stopped after the occurrence of important rainfall. This situation influences not only the adequacy as defined above but also the overall efficiency because stopping irrigation means great losses of water (during the first irrigation cycle of November 1997 almost 1 mcm was lost, add to this the volume needed to fill the canal during the following irrigation cycle; around 350 000 m³).

In the determination of adequacy values, the following assumptions are made:

- Effective rainfall coefficient is estimated to 70 % as better information on effectiveness of rainfall is

presently not available.

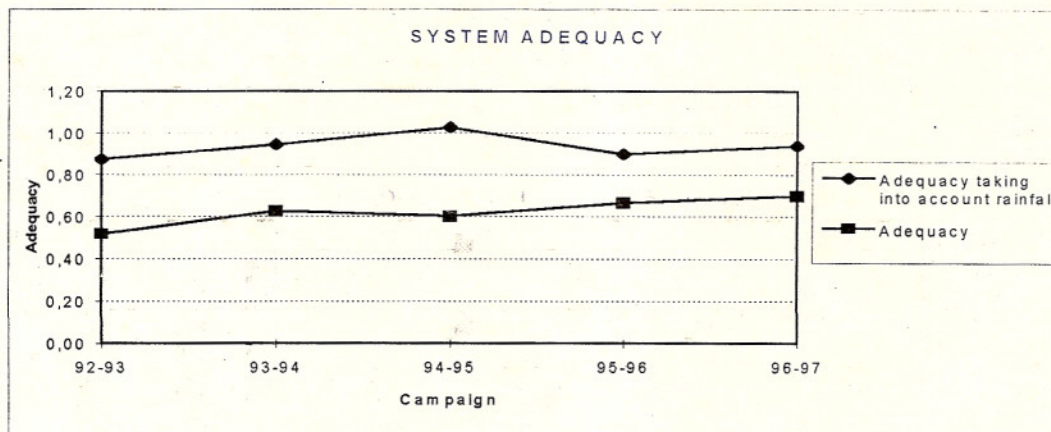
- Contribution of groundwater is not included because no reliable monitoring system is available to observe groundwater abstractions.
- The unit irrigation rates are constant per irrigation cycle.

3.1.6. Reliability

For the irrigation cycle of July 1995 all gate setting, time of opening and closure, were recorded within RPIP program in three districts (S10, S22 and Ain Chebbak of Triffa scheme) and were compared with the intended opening and closure times as recorded in the irrigation plans. This investigation mentioned that timeliness is excellent (=1) at farm level. Gate setting are changed exactly in time. As mentioned above, this situation is imposed by users who control ORMVAM's field staff.

A better method is to indicate the not timely delivery. This can be done *via* the 'bon de récupération' or special random reliability surveys done by ORMVAM field inspectors. An investigation on the reasons of not timely delivery during the months of September and October 1997 in four districts (S22, S23, Ain Chebbak and B5 of Triffa scheme) indicates that these situations are mainly due to water level control problems in main canals or breakdown of pumping stations.

To enable exact gate setting changes, a detailed release schedule is made for each turnout at the main canal. The discharges are presented in time units of one hour.



3.1.7. Scarcity Factors

Adequacy, water productivity, irrigated area and production are determined by the availability in time of water at the reservoir. For optimum productivity a certain storage level in the reservoir must be available at the beginning or end of each agricultural campaign. This level will be the target level. Decision on reduced gifts, prolonged irrigation periods, exclusion of irrigation are all based on actual storage level and on a statistical analysis of the expected inflow for the remaining campaign.

In the decision making procedure, the ratio "actual inflow/target inflow" is used next to the storage level for determination of the releases and the allocation of water to crops. It is, therefore useful to introduce the Deficit Inflow Ratio (DIR) and the Deficit Release Ratio (DRR) defined as follows:

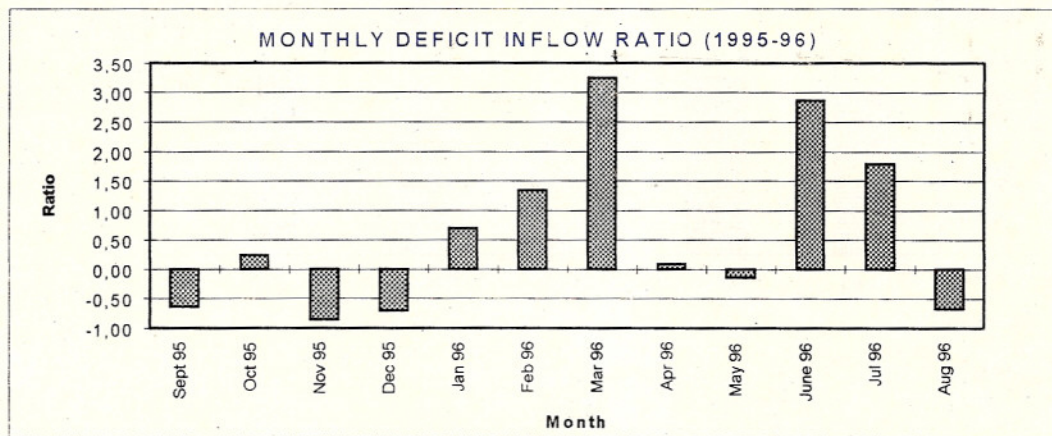
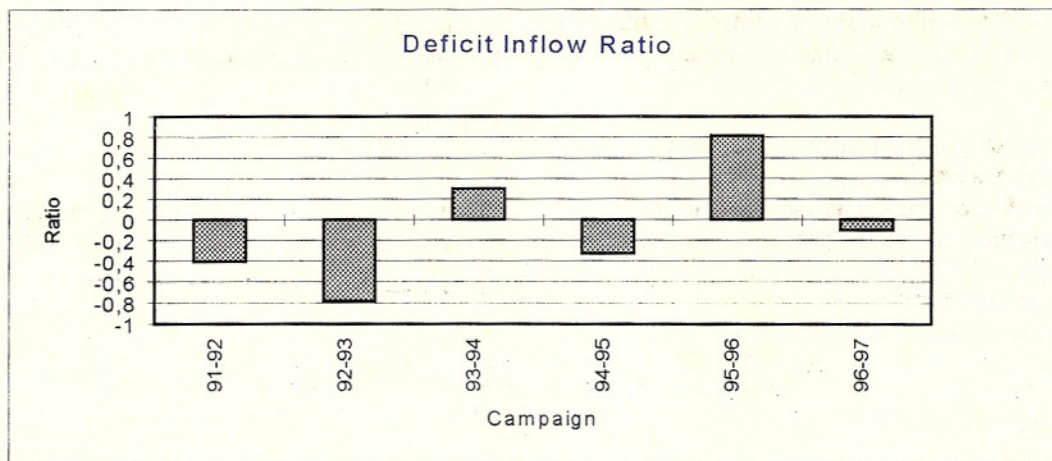
$$DIR = \frac{\text{Actual inflow} - \text{Average inflow}}{\text{Average inflow}}$$

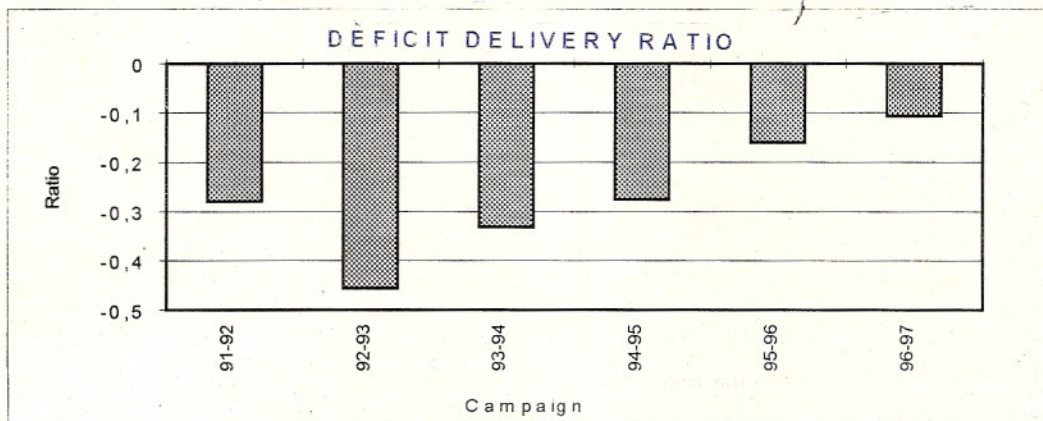
$$DDR = \frac{\text{Actual Release} - \text{Average Gross Requirements}}{\text{Average Gross Requirements}}$$

At present, no explicit relationship between storage levels and delivery decisions are available. This is usually a result of negotiations with users and other agencies involved.

The DIR shows that the reservoir knows big fluctuations of inflows. When calculated on annual basis, the values of the DIR must be taken with caution. For example for 1995-96, the graphic above shows a big availability of water in terms of total annual inflow (around 80% more than the annual average inflow). However, when calculated on monthly basis, as shown in the graphic below, the DIR indicates a big irregularity of inflows, and for more reliable result interpretation, the DIR values must be combined with the capacity of the reservoir.

In the graphic below, the DDR shows a considerable improvement of deliveries (around 35%) during the last five years. The scarcity factors are important as secondary indicators. Where service levels can be more or less than 1, scarcity factors have to indicate that this is due to water shortage, excess rainfall or mismanagement.





3.2. Agricultural Performance

3.2.1. Cultivated area

The main crops in the Moulouya irrigated area are tree crops, industrial crops, vegetables and wheat. Citrus, sugar beet and potatoes are the most important ones. Cropped areas are obtained from the inventory of cropping plans. Development of remote sensing techniques for crop surveys might be a viable option for the near future.

The value of the parameter is presented for the whole area. It clearly shows variation over the years. Tree crops don't show any important fluctuations due to constrained availability of water. These results show the effects of drought on vegetables and wheat areas. In case of drought we note that:

- Farmers move to more economic crops in term of water use;

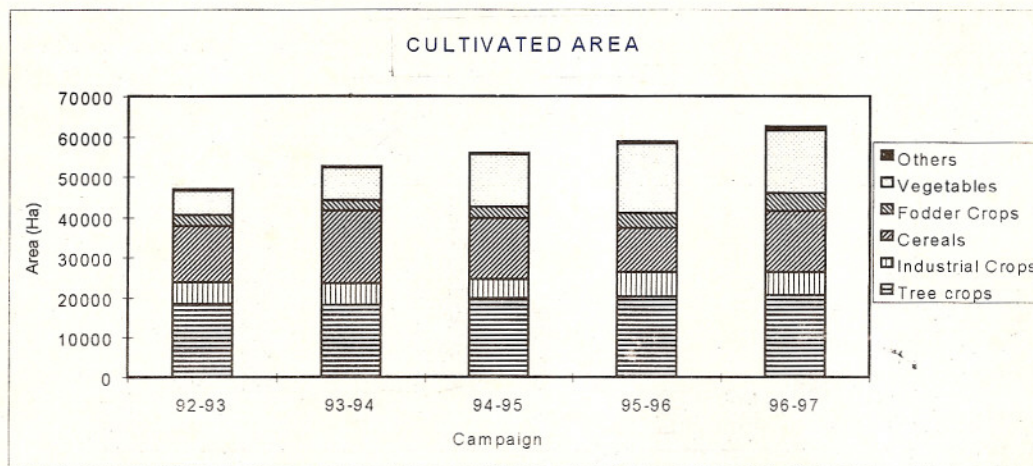
- Priority is given to tree crops in the water delivery policy;
- Vegetables are of low priority because of their relatively high consumption of water.

3.2.2. Cropping intensity

Cropping intensity is defined as the ratio between actual cultivated area per year and developed area defined as the net irrigable area.

The value of this indicator must be interpreted with caution.

The area with perennial crops is around 30% of the total cultivated area and is not very sensitive to fluctuations of water availability. The effect of water shortage is however, clearly shown in cropping intensity where area variations are found in crops like vegetables and wheat.



The target level for cropping intensity uses the ratio "target production area over original net area". These are reported annually in the water delivery program at the beginning of each campaign.

3.2.3. Yield

Yield of citrus, sugar beet, potatoes and other crops show a clear evolution during the last five years. This indicates the big effort done by ORMVAM in terms of improving farming techniques and introduction of high productivity seed. It shows also the good experience of farmers in the Moulouya scheme.

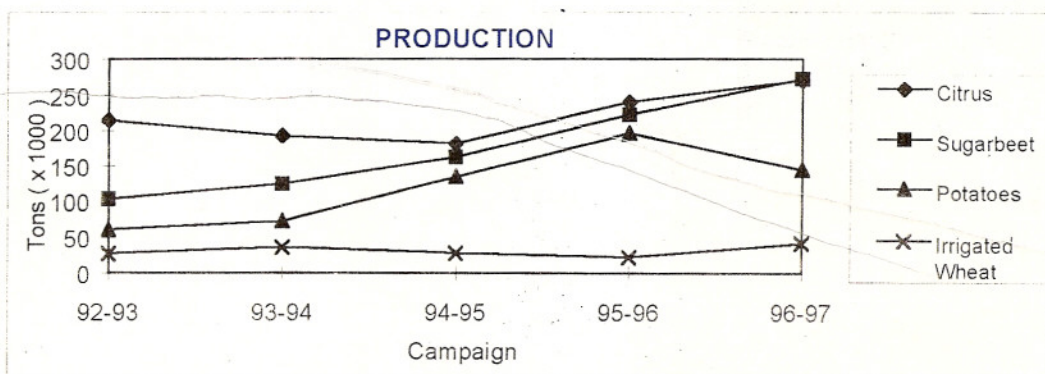
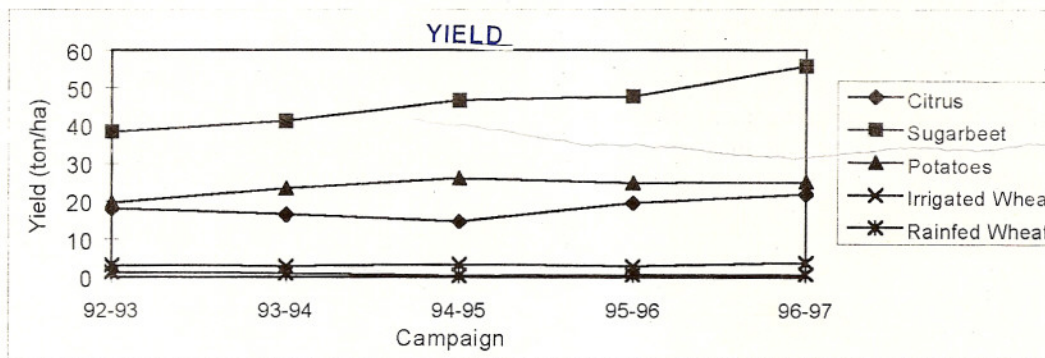
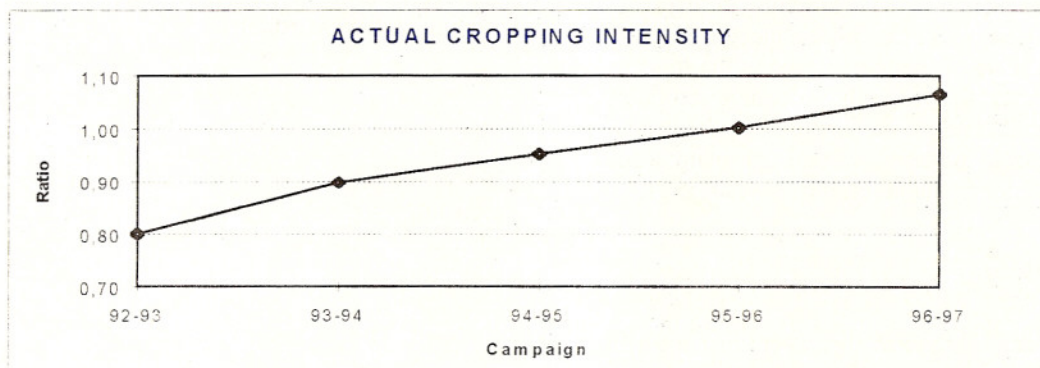
To allow analysis of the influence of water management on yield, relative yield can be introduced. It is defined as the ratio between the actual yield and the

average yield over a certain representative time period. Relative yield also must be used with caution as the variations can also be caused by other factors than water (such as diseases, changed varieties, market situation).

The analysis of the effect of rainfall on yield shows that for citrus and potatoes, no important trend can be distinguished. For irrigated wheat and non-irrigated wheat the trends are clear. The yields of wheat cultivated in the irrigation scheme tends to increase with increasing rainfall.

3.2.4 Production

Production is defined as yield multiplied by productive area. Production figures of the important crops are obtained from field investigations carried out by CMVs.



3.3. financial performance

3.3.1. Cost and value of water

The cost and value of water per cubic meter can be computed in several ways. The cost is computed by including or excluding central office overhead and amortization cost. ORMVAM makes calculation for cost of water for the different plains based on data derived from general accountant figures. However the analytical accountancy recently introduced provide more precise data. The following components are included in cost computation:

- Energy cost for pumping stations.
- Maintenance cost.
- Operational cost.
- Amortization which is based on the economic lifetime of the infrastructure.

The value of water is difficult to express in monetary terms. One approach can be the gross value of production per volume of water delivered at the farm gate. Using this parameter, the real value of water can be over estimated because it is based on supply from the irrigation system but, especially in periods of scarcity many farmers use groundwater. In fact, not all production can be assigned to surface water.

3.3.2. Financial autonomy

The financial autonomy for system management is defined as the ratio between the ORMVAM generated income from water sales and users share in investment cost (*participation directe*) and the total budget for system management.

With the newly introduced accountancy system, a specified allocation of budget lines to the management of the irrigation and drainage infrastructure has become

possible. This includes actual operational costs and amortization. This indicator is representative only in years where water is not a constraint.

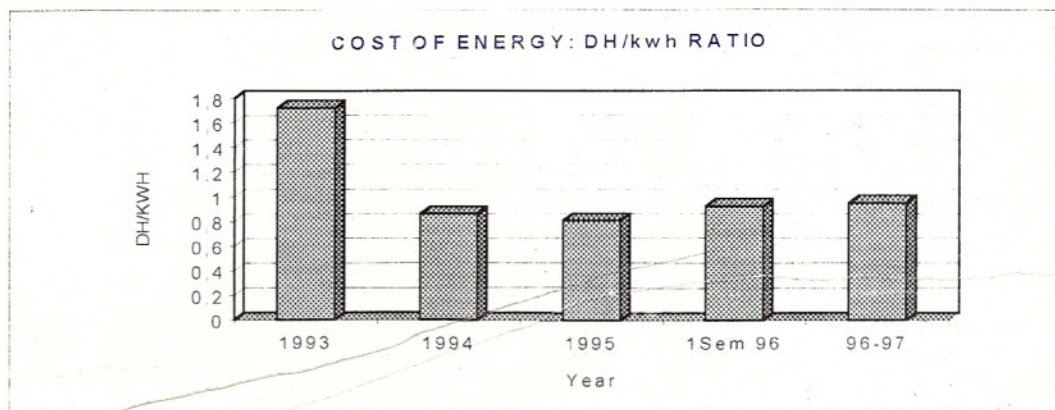
When used on annual basis, this indicator give big fluctuations because of the availability of water sales and the relative constant price of water. In dry years a low level of autonomy will be found whereas in years where water was available enough, a relative high level of financial autonomy can be reached. It is therefore suggested to have a definition of level of autonomy using a progressive average for a period of say five years.

The costs of system management are related to the funds available. At present, the level of maintenance, mainly curative, is below the required level. This might indicate a higher level of financial autonomy than is actually the case. A better denominator could be the total required cost for system management. However, this is at present difficult to establish.

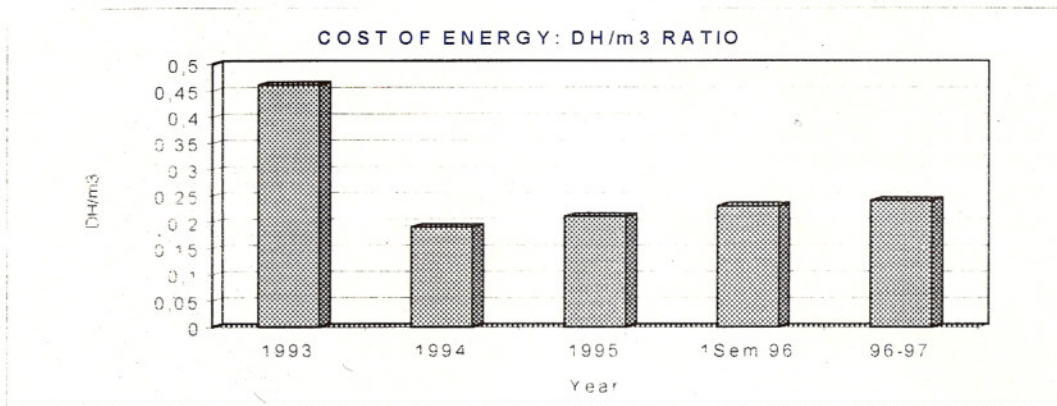
3.3.3. Cost of energy

The assigned budget for pumping station energy is very important. For this reason it is interesting to define indicators to know if there is problems of mismanagement. Actually ORMVAM uses the following indicators:

- The ratio DH/KWH defined as the ratio between the total amount spent for energy (DH) and the total consumed energy (KWH).
- The ratio DH/m³ defined as the ratio between the total energy budget (DH) and the total pumped volume of water (m³).
- The ratio DH/m³/hmt: It indicates for each pumping station, the cost of lifting one cubic meter of water pumped one meter up. It is usually used for comparison between pumping stations performances.



1 US \$ = 9.70 DH



1 US \$ = 9.70 DH

These results show the important decreasing of energy cost especially in 1994. This can be explained by the fact that in 1993, the drought reduced considerably the delivered volume of water and by the same way the pumped volume for higher areas when the contract with ONE (office who produces Energy) obliges ORMVAM to pay a prefixed amount of money without taking into account energy consumption. Since 1994 the cost seems to increase due to a raise of the energy price. Combined with the energy price, these results will in reality show an important improvement of the energy management. These factors are very sensitive to the delivery forecasting of water in the beginning of the campaign. When correlated to the delivery forecasting suitability, it shows the effective good management in case of good delivery forecasting.

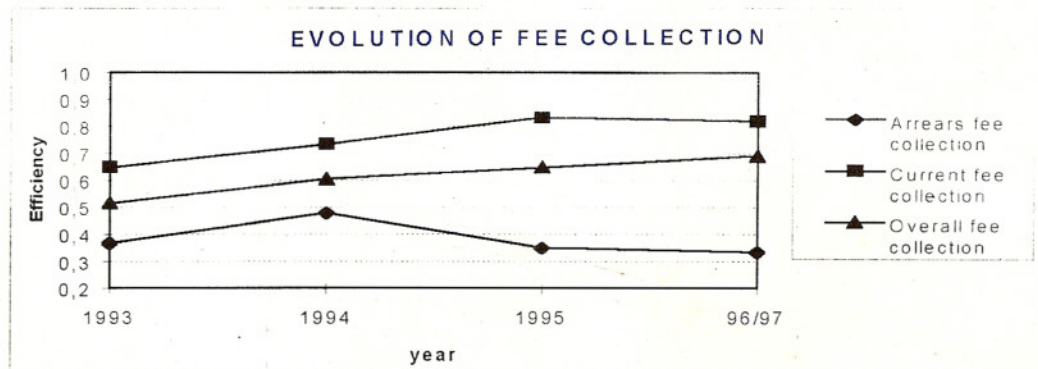
3.3.4. Financial viability

The budget allocated for system operation and maintenance seems just sufficient to keep the system in functioning order. A certain degree of deterioration is noted

as the budget does not sufficiently include preventive maintenance. This parameter is in this stage not further elaborated because the estimation for budget requirements is still too difficult.

3.3.5. Fee Collection Efficiency

Fee collection consists of recovery of water sales and part of investment costs (*participation directe*). ORMVAM is using the ratio between *emissions* and recovery sum and distinguishes three ratios concerning this indicator: the current fee collection efficiency (per year), the global fee collection efficiency including previous years and the arrears fee collection. The first ratio indicates the actual big effort done by ORMVAM in terms of recovery. The second ratio indicates the effect of previous years' fee collection (arrears fee collection) on the total fee collection efficiency. The third one shows the existence of no more recoverable arrears fees. This can explain the decreasing of the arrears fee collection. Results are given in the graphic below.



3.4. Environmental Performance

Data are available on groundwater levels in the Moulouya scheme for a period of 20 years. Water quality surveys in wells have been carried out during the extreme drought in 1993 to determine the priority of well owners on water deliveries. Farmers with saline water were allowed to mix the groundwater with irrigation water. Farmers with fresh water were denied or given reduced surface water supplies.

3.5. Socio-economic Performance

Within RPIP program, a survey was organized to obtain data for socio-economic performance indicators, productivity and profitability of irrigated agriculture on farm level. Data for the agricultural campaign 1994-1995 were collected through ORMVAM field staff of the right bank *sub-divisions* using preprinted questionnaire with questions on land ownership and marketing cost.

Results indicate that the yield of various crops does not clearly relate to the size of the cultivated area. This can be explained by the fact that agricultural practices for small and medium scale private farms are almost identical. The financial result of farming differs very much for all sizes of cultivated areas due to variation in selling prices and yields.

These results also have to be interpreted with caution because the number of respondents (60) is not representative for the Moulouya scheme (65 398 ha with around 9 528 landowners). Using this kind of indicators means that a considerable effort is required on a regular basis. Therefore, direct indicators are to be developed to evaluate socio-economic performance without the necessity for labor intensive socio-economic surveys.

REFERENCES

1. BCEOM - Maghreb Projets. 1995. Etude d'amélioration de l'exploitation des systèmes d'irrigation et de drainage du périmètre de la Moulouya: Diagnostic.
2. El Gueddari A., El Ghali A., El Kassimi A., Belguenani H., Hofwegen P. van. September 1996. Protocole d'accord entre l'état et l'ORMVA de la Moulouya. International seminar: Research Programme on Irrigation Performance. Cairo - Egypte.
3. Hofwegen P. Van, Belguenani H., El Kassimi A. 1996. Use and Utility of Performance Indicators. Triffa Scheme Secteur 22. ORMVAM. IHE-IIMI-ORMVAM. Research Programme on Irrigation Performance. IHE - Delft, Netherlands.
4. ICID - CIID, Mai 1994. Groupe de Travail sur la performance de l'irrigation et du drainage. New Delhi, India.

PRELIMINARY EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE HYDRIC RESOURCE IN THE QUEQUEN SALADO BASIN

CARMEN E. FIORENTINO, JUAN D. PAOLONI Y MARIO E. SEQUEIRA¹

ABSTRACT

This work presents a qualitative evaluation of the water of river Quequén Salado (Province of Buenos Aires, Argentina) and its afluent. The principal discharge occurs in the Atlantic Ocean after flowing along 175 km, with the basin covers an estimated of 8000 km². The objective of the paper is to classify the water for a major and better use, taking into account the impact and ecological changes produced by pollution along brooks and rivers. This mentioned interactions reflected its chemistry composition. The remarkable fluctuations produced modify the water quality, being necessary to analyse it. Considering the analyses carried out and having as a reference the arsenic, boron and fluorine in the water resource superficial, a precise monitoring of groundwater to correlate results and to determine probable pollution source is programmed. Its use for cattle and agriculture having as a reference settled of F.A.O.

Keywords: Evaluation Environmental Impact, hydric resources

INTRODUCTION

The Quequén Salado river has a mixed regime of feeding, because its principal tributary, the Pillahuinco Grande brook has its headwaters in the Ventania orographic system, while its other afluent as the Indio Rico and Santa Clara brooks begin to drain on the Pampean Plains.

It is located in the south-east of the province of Buenos Aires, Argentina and it flows between parallels 38°S and 39°S and the 60°W and 61° 30'W with a north-south orientation and runs over about 175 km (Fig. 1).

In its origin, the plain tributaries show a gorge of 0.50 m, while in the lower section where they discharge their water to the main course the gorge reaches 10 m. The river basin covers an estimated area of 8000 km² and it is geologically formed by a covering of cenozoic depositions and a small sector of outcropping rocks from Ventania (Krusse, et al. 1997).

The rivers generally show a mixture of chemical concentrations in their waters, owing to the different courses the drains that feed them take. The remarkable fluctuations produced, modify the water quality, being necessary to analyse it, in order to determine the adverse environmental effects (Turner and Barr, 1989) (Milos Holy, 1974).

Considering the above-mentioned, there appears as an objective the evaluation of the environmental impact, both from the determined and the undetermined sources of contamination of the hydric resource, in order to get a higher and better profit from it.

MATERIALS AND METHODS

The basin delimitation is done from topographic charts of IGM (Military Geographic Institute) and photomosaics of INTA (National Institute of Agropecuarian Technology) in 1:50000 scale, making up the reference map.

Through a sampling carried out throughout three years along the river and its afluent, its waters are characterised both physically and chemically. Temperature and dissolved oxygen were determined in situ and, in the laboratory, routine analyses and those to determine specific elements like arsenic, boron, nitrates and phosphates were done, thus obtaining a general vision of the chemical composition of their waters (Clesceri et al. 1992).

Such samplings were taken in two different climatic periods, with maximal and minimal rainfall registers.

¹ Lecturer Assistant and Professors, Agronomy Department, Universidad nacional del Sur, San Andrés 850, (8000) Bahía Blanca, Argentina. E-mail: fiorenti@criba.edu.ar

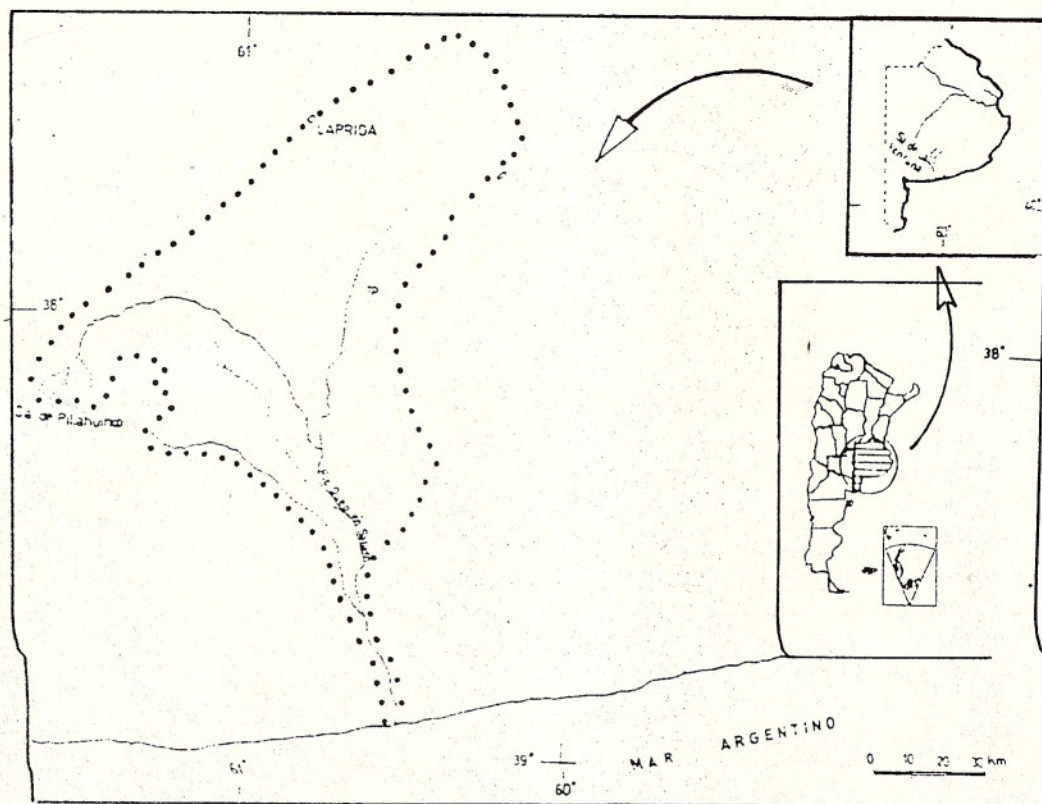


Figure 1: Reference Map

Considering the analyses carried out and having as a reference the contaminants found, a precise monitoring of the underground waters to correlate results and to determine probable pollution sources is programmed (I.G. y M. et al 1981)

The results are processed by means of graphs to obtain an immediate interpretation.

RESULTS AND CONCLUSIONS

In the season of minimal rainfall registers, the resulting electrical conductivity is, generally, higher than for the other period considered. The tendency in the affluent is to duplicate the observed values in the headwaters, before draining their waters in the Quequen Salado river. As regards the latter, something totally different occurs: it reaches higher concentrations in the headwaters, because it is originated in the depressed plains, where lacunar areas of high saline content are found.

Instead, for the period of frequent rain, both in the principal course as in the tributaries, the electrical conductivity varies increasingly toward the outfall.

The underground waters present a lower electrical conductivity to that found in the surface waters, showing an increase toward the inferior part of the basin (Fig.2).

With respect to pH, it varies from acid in the waterhead to alkaline in the outfall, and the same happens both in the superior and inferior part of the basin.

The nitrates concentration is higher in the affluents than in the river. In the underground waters its presence acquire higher amounts than those found in the river course. The applied nutrients in agriculture are considered the origin sources which through lixiviation and draining would contaminate the waters.

A similar situation would occur with the phosphates found, whose origin would result from the utilisation of fertilisers and pesticides.

Both the phosphates and nitrates in the surface hydric resource, favour the algae and aquatic plant development provoking an exhaustion of the dissolved oxygen that affects the biocenosis development (Fig.3).

The arsenic ion is observed in the underground waters in a 70 % of the samples, instead its presence in the surface resource is shown in the principal course and in the Indio Rico affluent varying its concentration from year to year. This indicates us that the probable source is the soil material, owing to the dissolution of volcanic glass, present in the basin sediments (Teruggi, 1982) (Etchichurry, et al 1994) (Fig. 4).

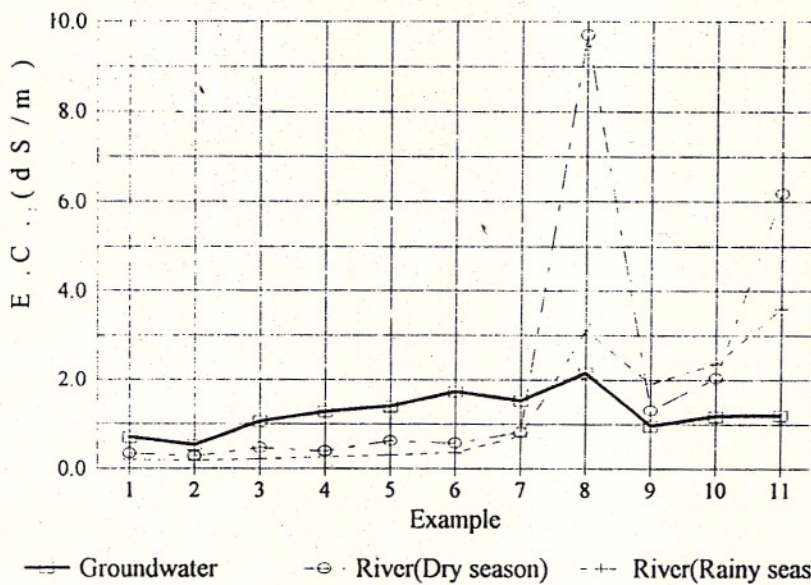


Figure N°2:
Electrical Conductivity
Average 1994/96

Figure 3:
Nitrate-Phosphate.
Dissolved Oxygen-
Average 1994/96

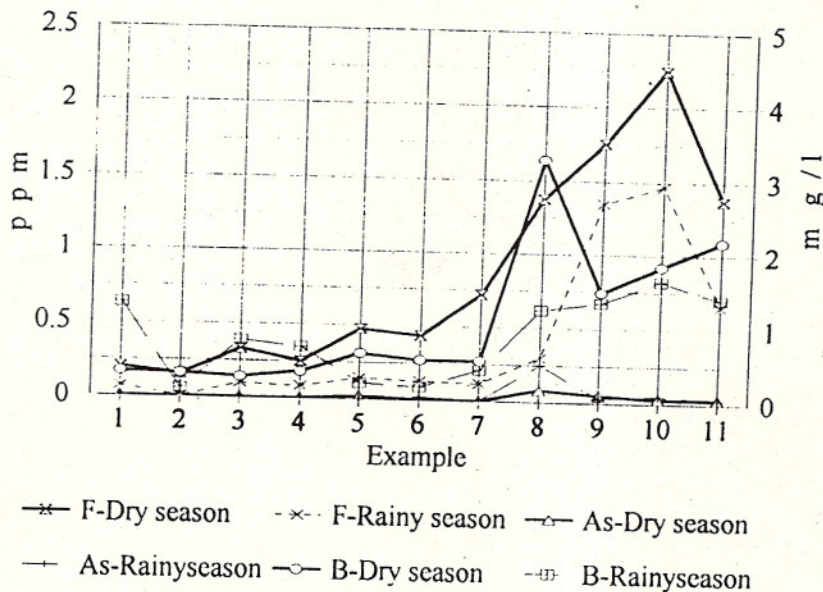
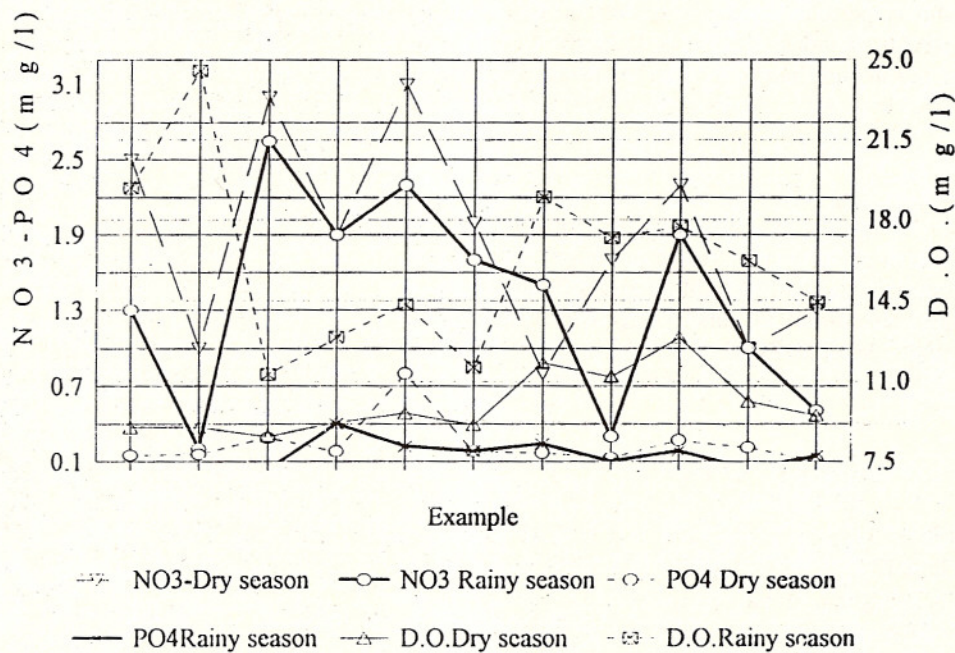


Figure 4:
Arsenic-Boron-Fluorine
Average 1994/96

Boron is found both in the superficial waters and in the underground waters, being somewhat higher in the waterhead of the resources. Its presence might be a consequence of rainfall from oceanic origin and stormy fronts from the south-east.

As regards the ion fluorine, it is considered characteristic of a natural pollution originated by hydrolysis of tophaceous and feldspatic sediments (Bonorino, 1994). (Fig 4).

Although the waters may be utilised in agriculture taking into consideration the relative tolerance of the cultures to salinity, limitations exist for certain cultures sensible to boron, arsenic and fluorine concentrations (Ayers, R. S. y Westcot, D. W., 1987) and so, they are not suitable for human use owing to those very contaminants.

Its use for cattle is considered satisfactory, except in those extraordinary periods where the saline concentration exceeds the 8dS/m. Besides, its use is restricted in spots where arsenic, boron and fluorine exceed the levels of toxic substances settled by F.A.O. (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1987).

Finally we can say that from this preliminary evaluation of the quality of the Quequen Salado river waters, where both natural and antropic pollution exist, an index of environmental quality would be found through the received impact in order to take corrective measures (Conesa Fernández Vitora, 1997).

REFERENCES

1. Ayers, R.S. y Westcot, D.W.(1987). LA CALIDAD DEL AGUA EN LA AGRICULTURA. FAO, Riego y Drenaje N°29, Roma, Italia, pp. 1-12, 77-83.
2. Bonorino, G.A y Carrica, J.C. (1991). ELEMENTOS MENORES Y TRAZAS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SISTEMA HIDROTHERMAL PROFUNDO DE BAHIA BLANCA. Rev. Asoc. Geolog. Argentina XLVI, Argentina, pp. 3-4.
3. Clesceri, L.S., Greenberg, A.E. y Trussell (1992). METODOS NNORMALIZADOS DE ANALISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES. Diaz de Santos, Madrid, España. II pp. 58, 63, 65. III pp. 96, 143, 167. IV pp. 12, 77, 106, 107, 179, 230.
4. Conesa Fernández, V. Vitora (1997). CONCEPTOS GENERALES- METODOLOGIA PROPUESTA-GUIA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL. Mundi Prensa, Madrid, España, pp. 21-43, 200-201, 270.
5. Etchichury, M., Fresina, M., Forzinetti, M. y Tofalo, O.(1994). EL ARSENICO COMO CONTAMINAME NATURAL. DEPARTAMENTO DE SAN CRISTOBAL, PROVINCIA DE SANTA FE. 2do. Seminario sobre la Geociencia y el Cambio Global. Asoc. Geolog. Argentina. Actas resumen pp. 11-13.
6. Instituto Geológico y Minero de España-Instituto Tecnológico de Massachusett-Gobierno de España (1981). CONTAMINACION DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. FAO, Riego y DrenajeN° 31, Roma, Italia, pp. 10-19,43-48,56-59.
7. Kruse, E. Laurencena, P. Deluchi, M. y Varela, L. (1997). CARACTERIZACION DE LA RED DE DRENAJE PARA LA EVALUACION HIDROLOGICA EN LA REGIÓN INTERSERRANA (Peia. de BLENOS AIRES). I Congreso Nacional de Hidrogeología, Bahía Blanca, Argentina. Actas pp. 133-144.
8. Milos Holy (1974). PROBLEMAS MESOLOGICOS QUE PLANTEAN EL FOMENTO Y LA UTILIZACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS. EL AGUA Y EL MEDIO AMBIENTE. FAO, Riego y Drenaje N° 8, Roma, Italia, pp. 13-16, 31-36.
9. Teruggi, M. (1982). DICCIONARIO SEDIMENTARIO.Vol. I Rocas Clásticas y Fibroclásticas. Edit. Librant. Buenos Aires, Argentina. pp. 1-104.
10. Turner, A.K. and Barr, C.L. (1989). RIVER POLLUTION - A CASE STLDY. Glasgow University. pp. 4-64.

A LAND INFORMATION SYSTEM FOR THE AGRICULTURAL ENVIRONMENT

JOHAN DESMET¹

SUMMARY

Geoinformation technology has become an essential tool for sustainable development of natural resources and for land management in general. The collection of data and its incorporation into Geographical Land Information Systems (GIS) forms the basis for the spatial analysis of the many land use aspects of development and management of land. With these new techniques it is possible to visualise on a map the changes occurring with land, the land readjustment programmes and the environmental issues as well as the economic aspects of land management.

Belgium has surveyed its soils on a scale of 1/5000 and has published those maps on a scale of 1/20 000. Geographical Information Systems (GIS) have made it possible to realise a large scale Land Information System (LIS) based on those digital soil maps and on a detailed, metrically corrected cadastral map (scale 1/2000). From the suitability maps for the various cultivation groups, the inclusion of data on the situation of agriculture in the LIS and through thematic processing an agricultural map is obtained, which can serve as a basis to balance agricultural and environmental interests.

Keywords: Land Use Planning, Geographical Information System (GIS), Digital Soil Map

1. INTRODUCTION

The agricultural sector in Europe is confronted with different challenges which can form a threat to the income-position, the continuity of the farms and the viability of the rural region. The pressure on the sector is increased strongly by the GATT-agreement and the imposition of production quota. The increasing regulations concerning the environment and nature-protection require important investments and reduce the production possibilities. On the other hand the other sectors are claiming a part of the open space for nature, recreation, traffic and industry.

Belgium is the only country in the European Union that has surveyed its soils in such a detail viz. On a scale of 1/5000 and that has published these on maps at a scale of 1/20 000. These detailed maps lay dormant during the seventies and the beginning of the eighties but are now experiencing an unusual interest, not only in agricultural circles but also among environmentalists. Undoubtedly the introduction of Geographical Information Systems (GIS) at reasonable prices has contributed to this renewed interest.

The potential of information contained in the soil maps has not been fully exploited, the time-consuming work to link soil data on the analogue maps to other environmental data was largely responsible for this.

2. ANALYSIS OF THE AGRICULTURAL STRUCTURE

2.1. The Land Information System (LIS)

Based on this experience a research project was started aimed at working out a structural analysis on the possibilities for the local development of agriculture and horticulture at municipal level (area : approx. 6.000 ha). With the help of an interdisciplinary team this project was carried out and resulted in a better insight in the local agricultural sector.

A detailed enquiry into the agricultural situation was carried out by the local council among the inhabitants employed in agriculture and horticulture. The data that were

¹ Research officer, Research Group: "Land Management" - Research Institute of Agricultural Engineering - Burg, Van Gansberghelaan 115 - B - 9820 MERELBEKE, BELGIUM

gathered in this way were checked for correctness and if necessary corrected or adjusted to the real situation. The results of this municipal enquiry on the agricultural and horticultural situation were entered into municipal Land Information System (LIS) using GIS.

The other layers in this Land Information System were built up by digitising the soil maps (scale 1/20 000), the ecological maps (scale 1/25 000), the regional zoning maps (scale 1/25 000) and the "Nature Main Structure" which is a land cover map (scale 1/100 000). Based on the digital soil maps and because of the straightforward structure of the soil legend, thematic maps were drawn by carrying out a selection on one of the three basic characteristics viz. texture class, drainage class, profile development. From the thematic map on texture class it is easy to locate the light and heavy soils. These simplified thematic maps generate a greater interest from the farmers than the traditional soil maps.

With updating the soil maps it is important to project the regional zoning maps onto the soil maps, as the area of agricultural land on the latter no longer corresponds with the present situation. Through the zoning maps the final destination of the land is fixed by a national law and this makes it easy to distinguish between agricultural land and non-agricultural land. By means of digital overlay techniques, applied to the zoning maps, it becomes possible to judge the claims made by the various sectors (among others agriculture and nature conservation). Ecological maps showing the biologically valuable and highly valuable areas are therefore digitally projected. This classification was done for each ecotope on the basis of four criteria: 1. rarity, 2. biological quality, 3. vulnerability and 4. replaceability. Those ecological maps contain a wealth of biological information gathered through systematic surveying and description of the vegetation types and the flora and fauna elements.

2.2. Physical Soil Suitability

To establish the agricultural value of the land it is essential to determine its potentiality at reconversion to other crops. This may open new perspectives for a diversification of agriculture.

It is here that the physical soil suitability from matrixes fits in for all the soil series of the seven cultivation groups namely: grassland (1), arable land (2), extensive vegetable growing (3), intensive vegetable growing (4), vegetable growing in glasshouses (5), fruit growing (6), tree nurseries (7). Those soil series consist of a combination of soil texture, drainage classes and profile development.

From the derived suitability maps for the seven cultivation groups and through thematic processing an agricultural and horticultural map is obtained that can serve as a basis to balance the agricultural and environmental interests.

2.3. Relation between Soil type Suitability and Agricultural Income

In the Flemish part of Belgium the agricultural and horticultural sector is dynamic, well structured and there are a comparatively great number of viable farms. Due to the adge structure of the managers and the relatively high pressure of succession, the agricultural area in Flanders is scarce.

Because of the liberalisation of the world trade and the increase in international competition after the reform of agricultural policies, the extensive agricultural production offers less perspectives.

In order to maintain the competitiveness of the enterprises, expressed in terms of spending power, at an acceptable level, two possibilities exist: extension and intensification of the management plan.

Safeguarding the chances of extension and reconversion assumes the reservation of good agricultural land for promising horticultural land, suitable for a large variety of alternative crops. To guarantee reconversion it is essential that agricultural crops, maintains its agricultural destination.

Soils with a polyvalent soil suitability create a wider range of chances for development of the enterprises. Agricultural production on soils suitable for a particular crop guarantees certainty for quality and yield, competitiveness and a more environmental-friendly use of fertilisers and products for protection.

2.4. Structural Analysis of Agriculture at Municipal Level

A very typical application of such a Land Information System at municipal level is the study of the influence of the Flemish Regulations for Environmental Licensing and more in particular the consequences of the distance rule as mentioned in this act. This distance rule stipulates that pig houses and poultry houses cannot be exploited (depending on number of animals and score obtained by a particular exploitation) within a certain distance of housing zones, extension zones for housing, park and recreation areas.

The map shows the various buffer zones that were created around these areas mentioned on the local zoning map. In this way it is possible to pinpoint the agricultural enterprises that are situated within this distance and establish which measures that are necessary to comply with the environmental regulations.

This can then be visualised on a map as the results of the questionnaire on agriculture are included in the Land Information System. Profitability of each agricultural and horticultural enterprise has been evaluated on the basis of useful agricultural area, cultivation plan, size of the herd

and average level of labour income for the various specialisation

Enterprises can therefore be classified in one of the following three categories:

- viable enterprises with a sufficiently large annual income.
- enterprises that approach this economic size of scale and that can be made more profitable by a restricted intensification of the activities:
- non-viable enterprises.

Within the framework of the Flemish Nature Development Plan, the Nature Main Structure has been worked out for the entire Flemish territory and this can serve as a basis for the whole of a future territorial environment and nature policy. Four distinct zones were defined on the map of the Green Main Structure viz.:

1. green nuclei, which consist of nature reserves where nature is of prime importance;
2. nature development zones, i.e. valuable land where nature conservation must be a priority;
3. corridors or linking areas, which must guarantee a safe migration of organisms from one protected zone to another;
4. buffer zones, which must screen off protected areas from interfering and polluting human influences.

2.5. Structural Analysis of Agriculture at Regional Level

The same technique as that for the structural analysis of agriculture at municipal level is now being investigated for application at regional level. The same basic conditions as those laid down in the Structure Plan of Flanders were included in the regional structure plan, viz. protection of the open space, revaluation of the urban network and control of mobility.

The agricultural sector is at this moment the only sector developing a sectoral structure plan in a digital way. At regional level the digital base map consists of the network of axes of the public roads (scale 1/10 000). In this network of public roads the cadastral parcels are fitted in on a separate overlay.

The agricultural area is divided into five different types of rural zones. This classification is based on soil suitability for various cultivation, spatial structure of the rural zone and nature of the agricultural activities. Guidelines are stipulated for each of these types of rural zones:

1. Rural zone with additional restrictions regarding nature and landscape conservation.

These are unbuilt areas or low density development areas with a high scenic or natural value. It are mainly

wooded areas with adjacent or enclosed agricultural parcels. The existing settlements are mainly land-linked enterprises which are given the possibility to expand their existing activities. New settlements however are not permitted

2. Homogeneous rural zone.

These are open spaces with scattered enterprises and with hardly any other buildings. Mainly land-linked enterprises are found here. Horticultural activities are mainly focusing on extensive vegetable growing. The conditions stipulate that existing activities are allowed to expand and that conversion is possible, excl. vegetable growing under glass and intensive horticulture not linked to land.

3. Rural zone with mixed urbanisation and specific agricultural suitability, in which glasshouses and intensive, not land-linked horticulture are not allowed.

These areas are characterised by a large diversity of agriculture and horticulture. Glasshouses are hardly or not found in these areas. This situation must remain as such to conserve the landscape.

4. Rural zone with mixed urbanisation and specific agricultural suitability, no restrictions for glasshouses.

These areas with scattered buildings are characterised by a large diversity of agricultural and horticultural enterprises, incl. horticulture, tree nurseries, glasshouses. Besides farms, residential buildings and small enterprises are found. Some low density development areas with a specific suitability for alternative cultivation such as intensive vegetable growing fit in this type of zone and no restrictions are imposed on these activities.

5. Rural zone with disintegrated structure, adjoining an urbanised area.

Mostly built-up areas or isolated agricultural land surrounded by non-agricultural land. The conditions for rural zones stipulate no restrictions for this type of rural zone.

4. CONCLUSION

By implanting the results of a municipal questionnaire on agriculture in a GIS several interesting agricultural applications became possible. The differentiation of the open rural space is proposed to give priority in areas to agriculture, soil-linked horticulture, glasshouses and areas with extensive compensated agriculture including measurements for landscape protection.

Governments have with this relatively new technique a powerful instrument in their striving towards a maximum protection of the remaining rural sites enabling in this way a coexistence between agriculture and nature conservation.

L'APPROCHE HYDRAFORM TECHTABIN DE PROMOTION DE LA CONSTRUCTION EN MILIEU RURAL

ABDERRAFIE YOUSFI¹, ABDEIAZIZ SLAOUI ANDALOUSSI², V ROBERT J.F PLATTNER³

RESUME

L'approche HYDRAFORM / TECHTABIN est une vision promotionnelle globale visant le développement efficace du bâtiment en milieu rural à travers un système de construction techniquement performant, économique, hautement conservateur d'énergie, de grande qualité d'environnement, mobilisant les populations locales, utilisant les matériaux locaux et stimulant la promotion de l'entrepreneuriat des jeunes et compétences sans emplois en milieux ruraux.

Dans cette perspective, cette approche combine les dimensions technologiques, socio-économiques et entrepreneuriales requises pour un développement soutenu et généralisé du bâtiment rural, à savoir :

- **Une technologie appropriée; un équipement efficient et simple d'utilisation stimulant l'autosatisfaction des besoins locaux en construction.**

Cet objectif est réalisable grâce à l'introduction d'un SYSTEME DE CONSTRUCTION EN TERRE STABILISEE utilisant des briques multiformes, qui s'emboîtent verticalement et horizontalement assurant le montage de murs à sec, sans joints de mortiers entre les briques et sans besoins de crépissage des façades des murs. Les constructions sont résistantes, de haute qualité d'isolation thermique et phonique, rapides et faciles à réaliser.

- **Des plans d'exécution types adaptés aux besoins de construction du milieu et des guides simplifiés, d'appréciation et de contrôle des matériaux, briques, structures édifiées et des programmes de formation et d'encadrement appropriés des utilisateurs du système facilitant la mobilisation des compétences locales au développement de la construction régionale.**

- **Un programme compréhensif et suffisamment coordonné de promotion de l'entrepreneuriat des jeunes professionnelles et sans emplois locaux pour la création de projets d'entreprises de construction en capitalisant les atouts du système HYDRAFORM / TECHTABIN et en mobilisant les appuis requis publics, des institutions de financements, des ONG et autres opérateurs économiques.**

L'approche HYDRAFORM / TECHTABIN est initiée et soutenue par l'office pour le Développement Industriel (ODI-Maroc) dans le cadre de ses activités professionnelles de mise en relations et transfert de technologie entre expertises de pays africains à travers son programme d'Assistance Internationale aux PME (PAIPME) mis en œuvre en coopération avec le programme des Nations Unies en Afrique (PNUD-ONUDI).

¹ Ingénieur en Génie Civil, Spécialiste d'ouvrage d'art et d'entretien des bâtiments, Président Directeur MEGEC (Marocaine d'Etudes et Génie Civil) et de TECHTABIN (Technologiat Taine Lil Binae)

² Ingénieur Agro-Economiste Chef du Département d'Assistance Internationale aux PME à l'O.D.I-Maroc et Conseiller Technique Principal du Programme PAIPME PNUD-ONUDI en Guinée

³ Ingénieur Electromécanicien, Spécialiste en Equipement de construction en terre stabilisée, Directeur Fondateur de la Société Hydraform, Africa (LTD)

INTRODUCTION

Dans le cadre de ses activités de mise en relations entre expertises marocaines et internationales, l'Office pour le Développement Industriel, à travers son programme d'Assistance Internationale aux PME (PAIPME), a stimulé le transfert de technologie HYDRAFORM au Maroc en invitant ce groupe d'expertises sud-africaines à étudier la possibilité de lancement et d'adaptation de son procédé aux besoins de construction notamment rurale au Maroc. A cet effet, l'ODI a encadré la création par des promoteurs marocains spécialisés dans le domaine de construction, la société TECHTABIN qui a engagé une expertise spécialisée marocaine depuis 3 ans à l'étude d'adaptation de procédé HYDRAFORM au développement du bâtiment rural marocain. Au titre d'un programme d'études comparatives de procédés de construction internationaux, la construction en terre stabilisée HYDRAFORM répandue actuellement dans plusieurs pays africains a retenu l'intérêt de TECHTABIN de par la simplicité de sa technologie et de ses équipements utilisés, de l'effet de mobilisation des populations locales au processus de construction et notamment de la rapidité et économie du coût des bâtiments réalisés.

Ce procédé mis au point par le groupe HYDRAFORM-AFRICA (LTD) par des Ingénieurs allemands, autrichiens et sud africains a répondu aux besoins de construction à coût modéré requis par les pouvoirs publics sud-africains pour résoudre le problème de l'habitat social des pauvres parmi la majorité des populations noirs.

Toutefois, cette dimension technologique apportée par le savoir-faire HYDRAFORM s'est avérée insuffisante pour résoudre les problèmes spécifiques du Maroc en constructions rurales, il reste à adapter ce savoir-faire aux constructions marocaines pour stimuler son utilisation par les entrepreneurs en campagne voire les populations locales afin d'assurer leur autosatisfaction en bâtiments spécifiques ruraux.

Pour atteindre cet objectif, TECHTABIN a entamé un projet de programme de promotion et de développement de la construction rurale partant de la solution technique HYDRAFORM en amorçant trois principales actions :

- La rationalisation des utilisations du Procédé HYDRAFORM par la mise au point de plans d'exécution types adaptés aux besoins spécifiques ruraux de construction.
- La mise au point d'un programme de formation des entrepreneurs et utilisateurs de procédés HYDRAFORM.
- Le lancement d'opérations de standardisation des composantes de constructions pour faciliter le processus de montage des bâtiments par les entrepreneurs et utilisateurs finaux.

- La mise à la disposition des pouvoirs publics, autorités locales, ONG, bailleurs de fonds et organisations internationales de solutions techniques adaptées pour faciliter et stimuler l'entreprenariat en milieu rural notamment des jeunes et professionnels sans emplois dans le domaine de construction.

TELLES SONT LES BASES DE COOPERATION DES GROUPES HYDRAFORM / TECHTABIN ET LA VISION A MOYEN TERME DE CETTE APPROCHE DE PROMOTION DE LA CONSTRUCTION EN MILIEU RURAL.

LE PROJET DE PROGRAMME D'ACTION HYDRAFORM / TECHTABIN

CONSTAT DE SITUATION

L'analyse des structures anciennes de construction marocaines en terre stabilisée par des éléments liants locaux telles la paille, la chaux... justifie d'une maîtrise ancienne, d'œuvre, d'aménagement architectural et urbanistique (kasbahs, murailles, etc...). Les artisans anciens étaient répandus parmi les populations rurales et prouvaient d'expertises pointues d'appréciation des matériaux terre, des méthodes de construction, des mélanges des terres et liants traditionnels et surtout l'édification de structures durables actuellement difficilement reproductibles en raison du manque de ces compétences rurales en la matière.

A l'heure actuelle, les moyens de construction utilisés en milieu rural Marocain sont rudimentaires, très peu rationnels, mal maîtrisés et n'assurant pas le minimum de confort et de protection vis-à-vis des intempéries.

On constate le manque de règles architecturales et urbanistiques ou de développement d'ensemble assurant les services et les éléments de viabilité collégiale de la communauté rurale.

Plusieurs travaux de recherche sur le développement de la construction en terre ont été entrepris par le Laboratoire Public d'Essais et d'Etude en construction (LPEE) et ses organismes affiliés sans aboutir à une phase d'industrialisation ou à une capitalisation de ces recherches au titre de programmes promotionnels de construction rurale au Maroc.

Par ailleurs, des recherches et expérimentations européennes plus approfondies, bien qu'ayant abouti à la mise au point de technologies pertinentes et à l'industrialisation d'équipements performants n'ont pas pu être vulgarisées auprès des masses de populations rurales des pays en voie de développement pour répondre à leurs besoins de développement généralisé des constructions

rurales sur les plans technologiques et économiques.

Par contre, l'expérience sud-africaine en techniques de construction pour les sans-abri et les populations rurales est riche de solutions techniques pertinentes adaptables aux conditions spécifiques des P.V.D dont le Maroc.

En fait, l'ère post-apartheid a permis à ce pays dont les ressources humaines, financières et en moyens de recherches ne font pas défaut, l'épanouissement de plusieurs concepts de construction visant la satisfaction des besoins sociaux en logement à coût modéré estimé en millions d'unités à satisfaire à moyen terme.

Dans cette perspective, le Gouvernement sud-africain a projeté un programme de construction de 1 million de logements pour les pauvres au titre duquel un appel aux expertises internationales a mobilisé et a distingué le procédé HYDRAFORM parmi une cinquantaine de solutions techniques proposées aux Gouvernements sud-africain. (Approchés sur le terrain par le groupe TECHTABIN).

Ce concept HYDRAFORM, actuellement introduit dans plusieurs pays africains, d'Amérique Latine, et en Inde a abouti à la mise au point de programmes de construction spécifiques d'écoles, dispensaires, lieux de culte, bâtiments d'exhibition, d'entreposage, habitat social, secondaires, stations de carburants etc... notamment en milieux ruraux et dans les agglomérations para-urbaines.

La capitalisation de la voie de solution technique et technologique HYDRAFORM au titre d'un programme d'action global intégrant les dimensions socio-économiques et entrepreneuriales aux acquis du concept HYDRAFORM devrait stimuler un développement efficace et généralisée de la construction en milieu rural dans les P.V.D et P.M.A.

L'approche HYDRAFORM / TECHTABIN explicite cette vision promotionnelle dans ce document pour le cas du Maroc et fait appel aux principaux partenaires, techniques, financiers et publics pour contribuer à sa mise en œuvre.

CONTENU DE L'APPROCHE HYDRAFORM / TECHTABIN

Cette approche est le résultat d'études approfondies par TECHTABIN pendant 3 ans du procédé HYDRAFORM et des modalités de son lancement et adaptation aux besoins de développement de la construction en milieu rural.

Ces études ont concerné les aspects fondamentaux dudit système de promotion à savoir :

- La maîtrise du produit de construction HYDRAFORM du point de vue technique, résistance structurelle, appréciation des matériaux dans le but d'obtenir des briques de qualité et de maîtriser un savoir-faire de montage du mur et du bâtiment entier.
- Suivi sur le terrain de la certification du procédé HYDRAFORM par les centres de recherches et laboratoires d'essais sud-africains pour analyser les types de constructions certifiées par les autorités compétentes sud-africaines. (Ref. Document de certification du concept de construction HYDRAFORM).
- Réalisation de plans types de construction avec des guides d'exécution facilitant la tâche de réalisation du bâtiment rural avec ce procédé. (Ref. plan type 1, fig.3).
- Mise au point d'actions de formation d'entrepreneurs potentiels au niveau de la maîtrise des matériaux sol. du procédé de fabrication HYDRAFORM.
- Mise à disposition des jeunes entrepreneurs d'un package d'assistance intégrée pour la réalisation de projets «Produits En Main» comportant la fourniture d'équipement, la formation, l'accompagnement de terrain durant la première construction, la mise à disposition des guides d'exécution de constructions types et l'assistance à la préparation d'aménagement de base pour l'exécution de grands chantiers avec ledit concept (Cas de reconstruction ou de déménagement de villages entiers par des intempéries naturels etc...).

RESULTATS ATTEINTS

Le concept de construction HYDRAFORM - Produits et Techniques

• La Brique HYDRAFORM

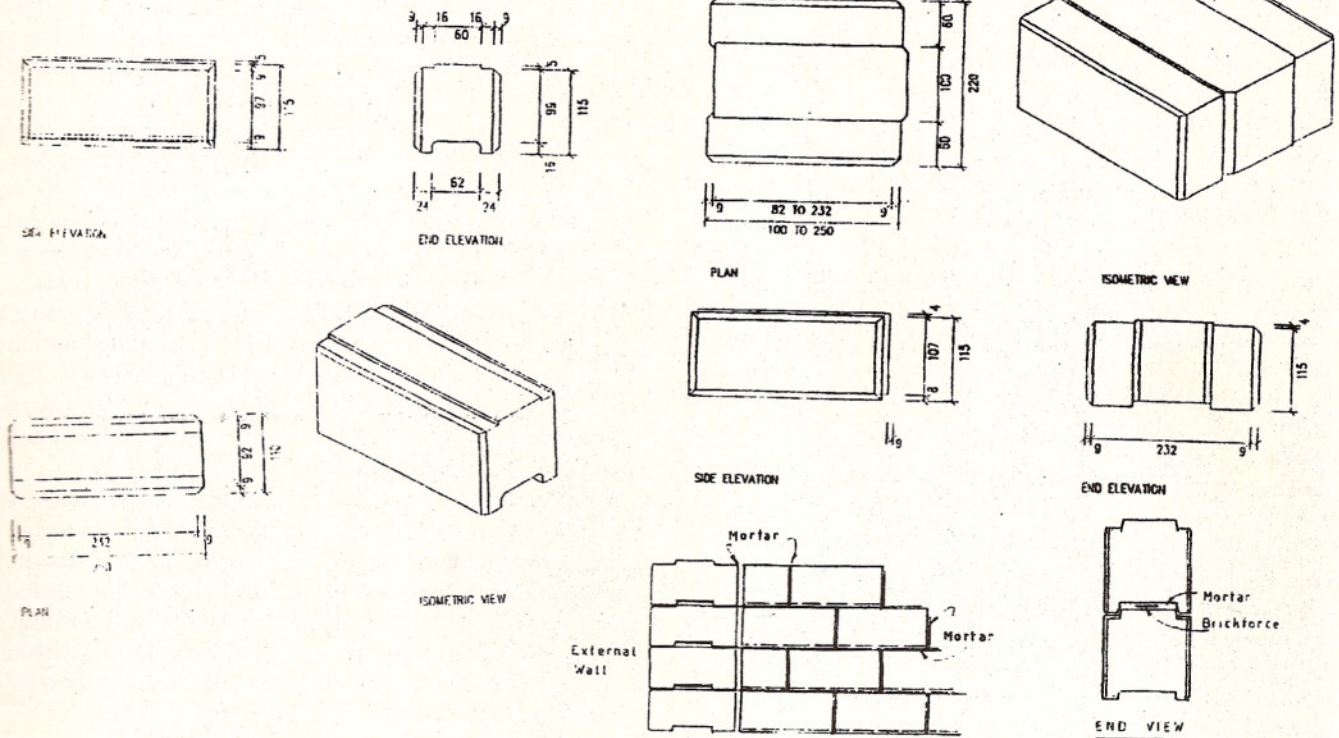
Le savoir-faire HYDRAFORM est pratiquement basé sur l'ingénieuse conception et production mécanisée d'une brique en terre stabilisée avec du ciment ou d'autres liants locaux (i.e. chaux) obtenue par hypercompression.

L'optimisation de cette brique sur les plans de la forme (Ref. Schéma), dimensions, poids (10 à 13 kg) et la parfaite irrégularité de ses surfaces d'appui permettent d'assembler par interpénétration des briques les unes sur les autres (verticalement et horizontalement) sans mortiers et de réaliser une économie considérable de temps, de main d'œuvre et de sable, graviers et ciment considérés comme des matériaux coûteux en milieu ruraux.

Figure 1

Brique de 110 mm de largeur

Brique de 220 mm de largeur



• Performance de la brique

- Les briques de 220 mm de largeur sont produites en deux qualités ayant des résistances nominales à la compression à 28 jours de 4 et 7 Mpa respectivement. Quant aux briques de 110 mm de largeur sont produites en une qualité de 4 MPa.
- Résistance à la compression de 7 MPA à 5 % de ciment. 9 MPA à 7 %, 12 MPA à 10%.
- Le contenu de ciment dans les briques varie normalement de 4 à 7 % du poids à sec de la terre pour

les briques de 4 Mpa. Il est de 7 à 10 % pour les briques de 7 Mpa.

- Absorption maximum d'eau de 2 % après 28 jours de submersion dans l'eau.
- Rétrécissement négligeable.

Sur la base de tests comparatifs de résistance réalisés sur des briques standards HYDRAFORM avec des quantités de 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 % de ciment. (Toutes les briques ont été prélevées du même mélange et ont le même âge). Les résultats atteints sont illustrés aux tableaux ci-après :

BRIQUES HYDRAFORM

BRIQUES STANDARDS HYDRAFORM

% CIMENT	DIMENSIONS DES BRIQUES			POIDS (Kg)	CHARGES MAXIMUM (KN)
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)		
2.5 %	225	220	113	12.355	26.3
2.5%	227	220	113	12.560	29.3
5.0%	233	220	113	12.705	42.6
5.0%	227	220	113	12.410	47.9
7.5%	230	220	113	12.575	60.0
7.5%	230	220	113	12.595	70.5
10.0%	230	220	113	12.595	70.5
10.0%	230	220	113	12.515	87.1

ECRASEMENT APRES TEST DE PENETRATION

7.5%	232	220	113	12.550	68.5
7.5%	230	220	113	12.505	64.9
10.0%	226	220	113	12.340	78.7
10.0%	227	220	113	12.365	84.7

% CIMENT	DIMENSIONS DES BRIQUES			POIDS (Kg)	ABSORPTIO N % D'EAU	ECRASEMEN T (MPa)
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)			
2.5%	220	115	72	3.810	12.3	2.83
2.5%	220	115	72	3.540		2.13
2.5%	220	115	72	3.520		3.15
5%	220	110	72	3.715	12.0	4.73
5%	220	115	72	3.685		4.24
5%	220	115	72	3.675		3.99
7.5%	220	116	75	3.720	11.9	5.40
7.5%	220	117	72	3.605		5.57
7.5%	220	117	70	3.605		5.58
10%	220	105	72	3.850		7.39
10%	220	105	72	3.725		7.74

TESTS STANDARDS DE PENETRATION

% CIMENT	TESTS STANDARDS DE PENETRATION				CHARGE D'ECRASEMENT APRES PENETRATION MAXIMUM (KN)
	Test 1 (Blows)	Test 2 (Blows)	Test 3 (Blows)	Average (Blows)	
2.5	9	9	-	9.0	-
2.5	8	-	-	8.0	-
5.0	18	15	-	16.5	-
5.0%	14	13	14	13.7	-
7.5%	19	19	12	16.7	64.9
7.5%	11	15	19	15.0	68.5
10.0	20	20	-	20.0	78.7
10.0	20	22	20	20.7	84.7

BRIQUES DEMI-LONGUEUR

% CIMENT	DIMENSIONS DES BRIQUES			DATE DU TEST	POIDS (Kg)	ABSORPTION % D'EAU	CHARGE MAX (KN)
	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)				
2.5%	107	220	115	1994-05-05	5.935	-	12.1
5%	103	220	113	1994-05-05	6.155	-	16.1
7.5%	103	220	113	1994-05-05	6.140	-	21.5
10%	102	220	113	1994-05-06	6.120	-	23.6

SOURCES : SOILLAB : (PTY) LTD : Reg.No. 71/00112/07 : République d'Afrique du Sud

TECHNOLOGIE ET EQUIPEMENT

TECHNOLOGIE

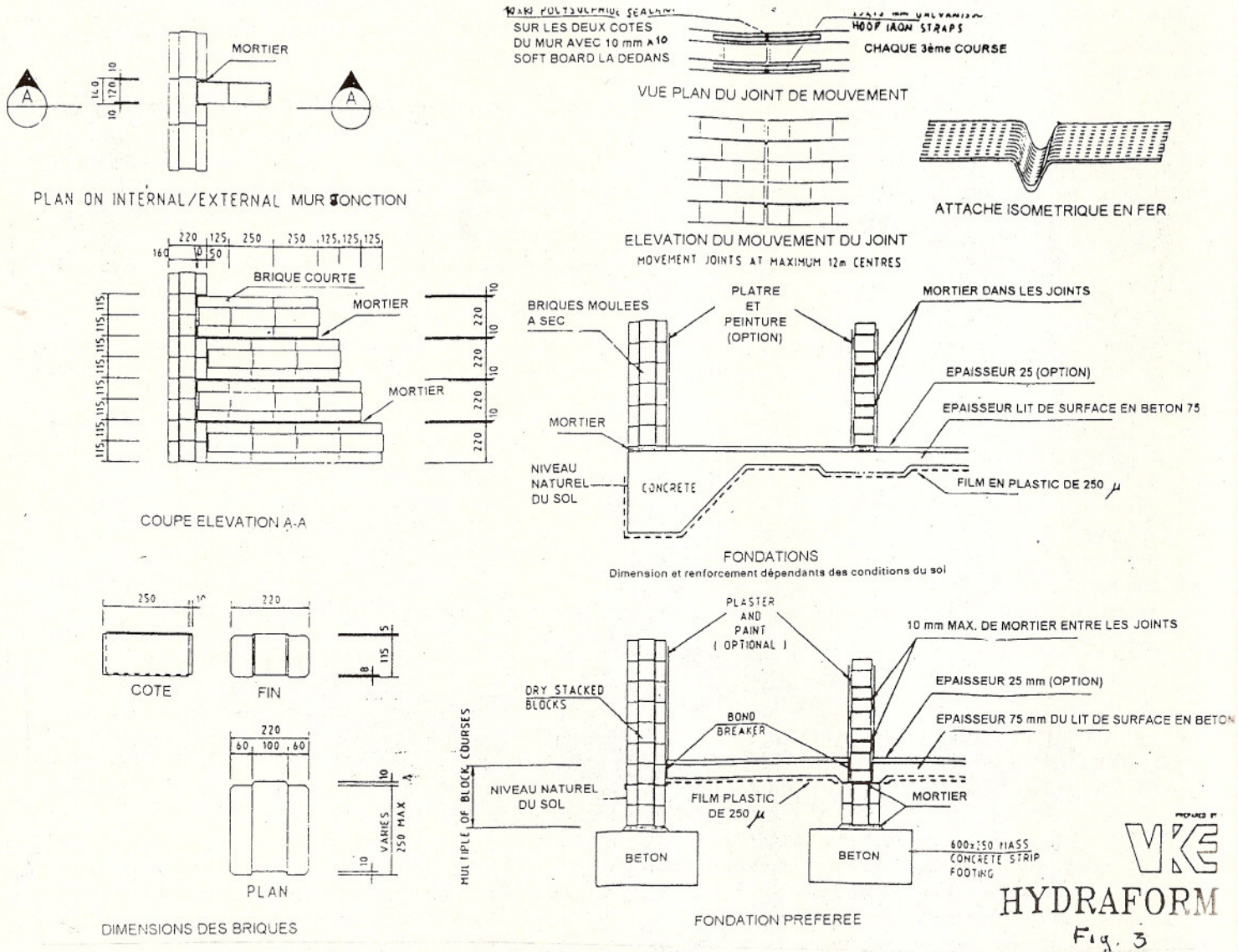
La plupart des nouvelles technologies utilisent les principes des briques d'ADOBE et PISE même si elles réduisent le procédé de production à quelques heures. Ces procédés, les plus répandus sur tous les continents reposent sur le malaxage de la terre d'argile et d'eau jusqu'à obtenir

un mélange homogène et suffisamment malléable pour être calé dans un moule. Ces briques sont généralement séchées pendant quelques jours avant leur utilisation.

Avec la Technologie HYDRAFORM, les briques sont produites quasiment à sec (2 % d'humidité maximum) cela explique également que les briques pourraient être utilisées immédiatement, par un personnel non spécialisé en raison de la construction sans joints de mortiers entre ces briques. (Ref briques HYDRAFORM fig.1).

LE XIII^{ème} CONGRES INTERNATIONAL DE GENIE RURAL EST UNE OCCASION INDIQUEE POUR ENCLENCHER DES ACTIONS DE MISE EN RELATION ENTRE LES PROMOTEURS DU GROUPE MAROCO-SUD-AFRICAIN HYDRAFORM/

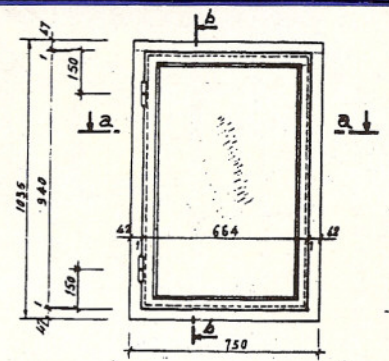
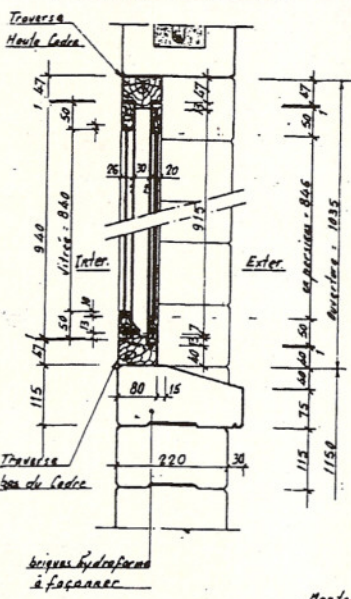
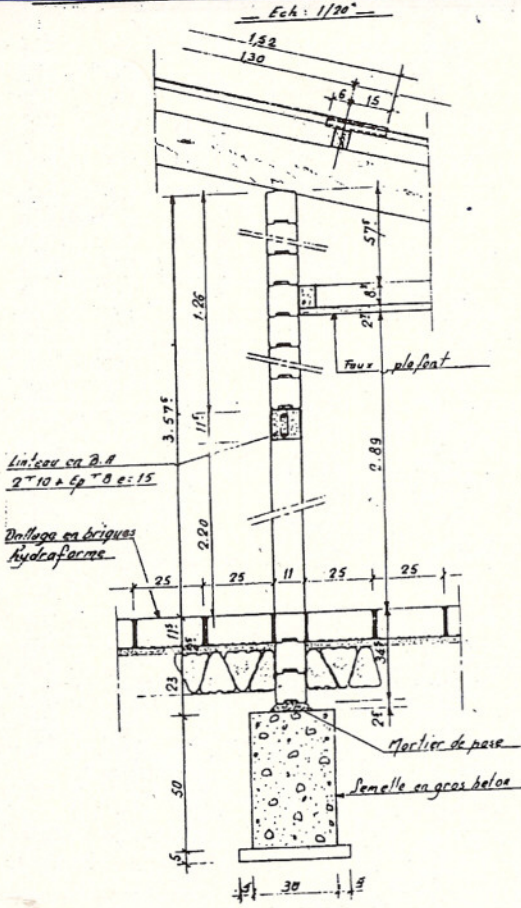
TECHTABIN ET LESDITS PARTENAIRES D'APPUI NATIONAUX ET INTERNATIONAUX SUS INDIQUES DANS LE BUT DE METTRE AU POINT ET LANCER LE PROJET DE PROGRAMME OBJET DE LA PRESENTE PROPOSITION.



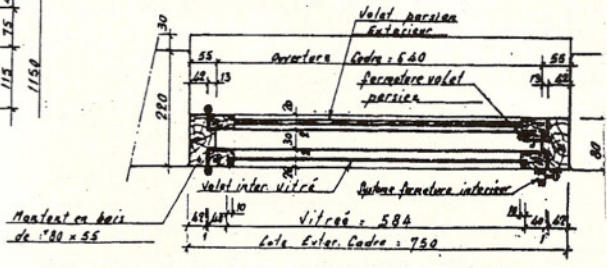
HYDRAFORM

HYDRAFORM

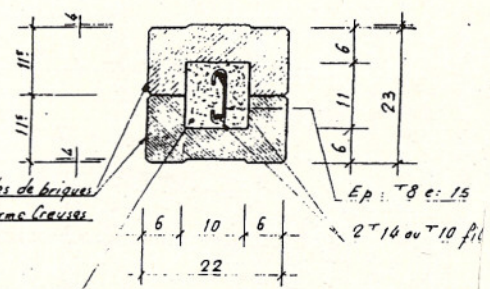
Fig. 3



Coupe: a-a



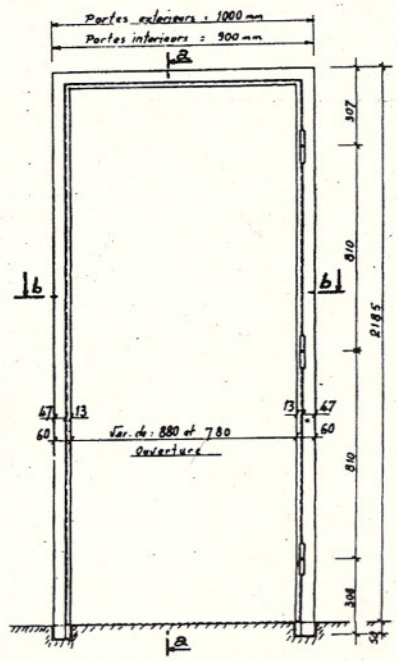
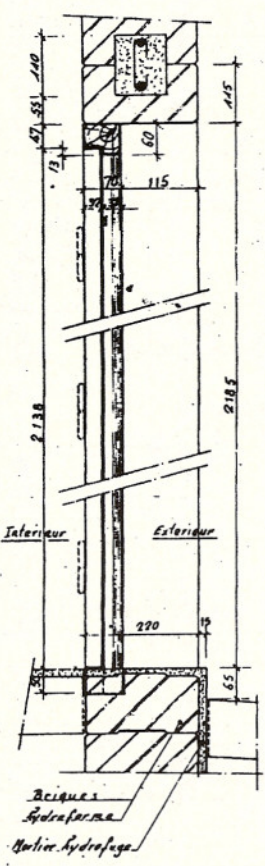
SECTION a-a



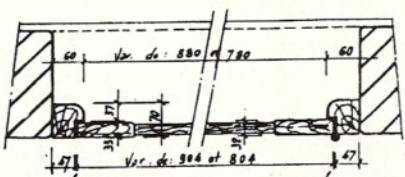
Linéau en béton armé
faulé dans les briques
hydroforme creuses

Coupe: a-a

Elevation Cadre Portes



Coupe: b-b



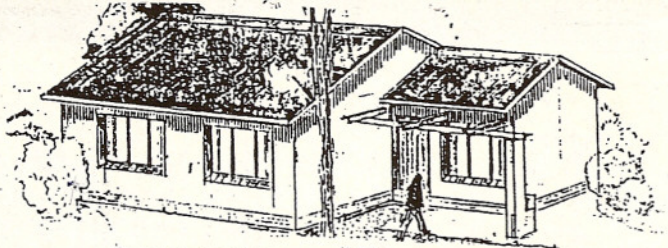
CONCEPT DE CONSTRUCTION HYDRAFORM

PLAN D'EXECUTION TYPE
(Maison 66,6m²)
préparé par :

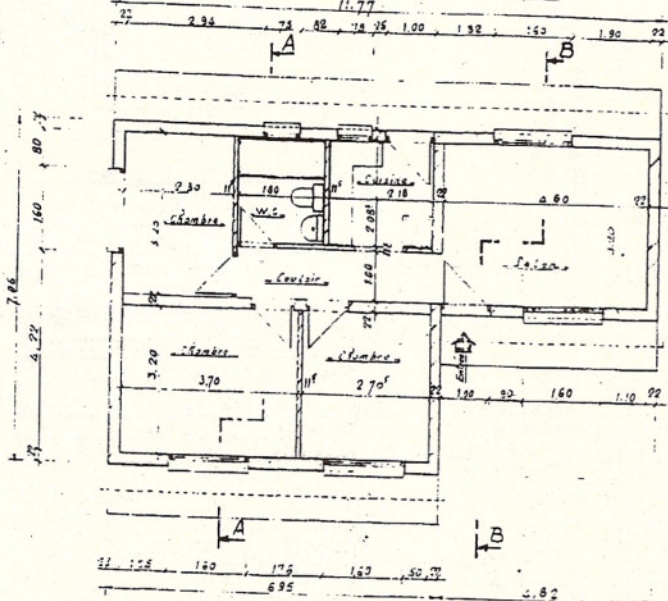
MEGEC-MAROC

Pour :

TECHTABIN - MAROC
TECHNOLOGIAT TAINE LIL BINAË

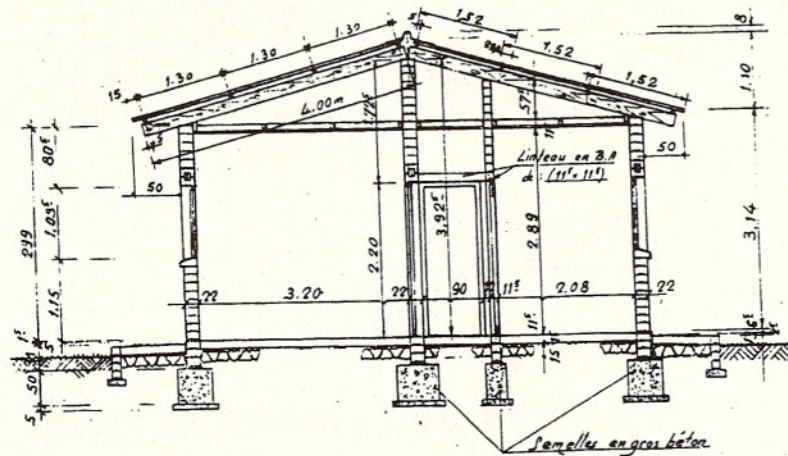


DETAIL SUR MUR EXTERIEUR



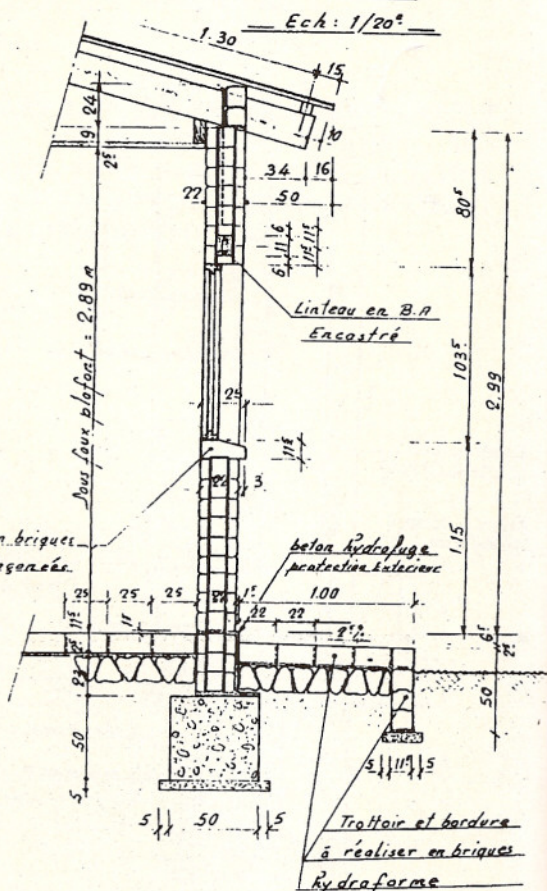
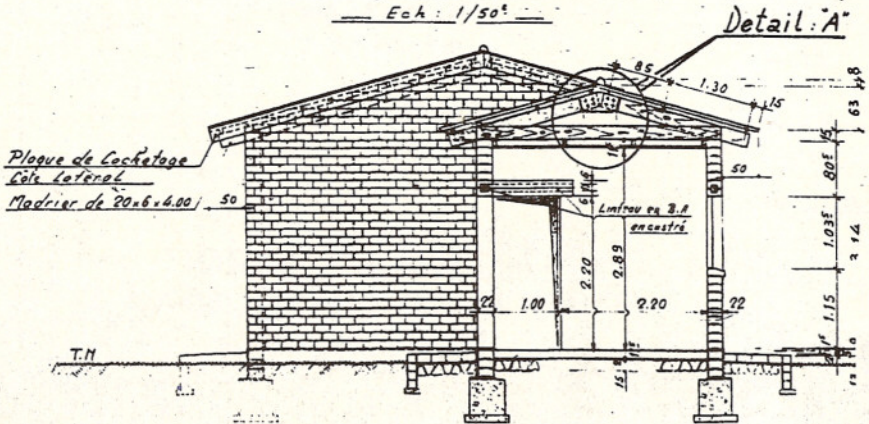
COUPE : A-A

Ech: 1/50^e



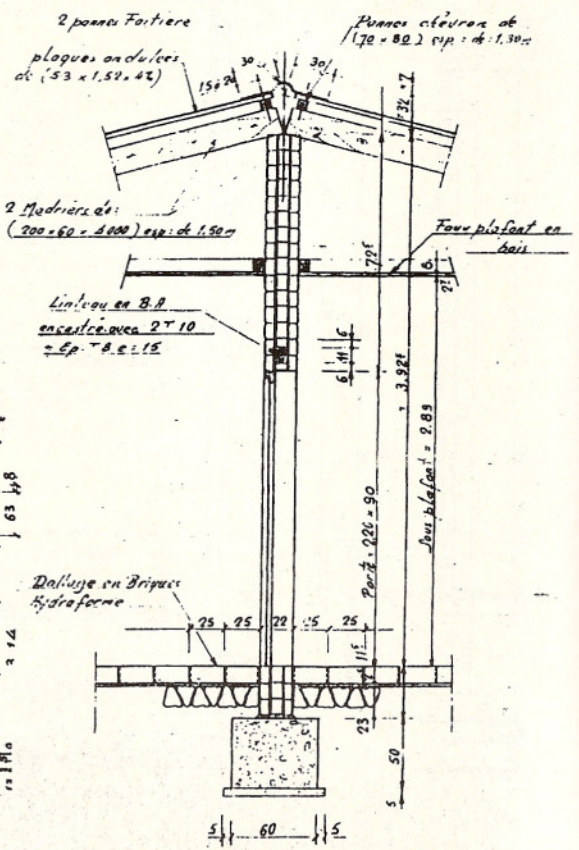
COUPE : B-B

Ech: 1/50^e



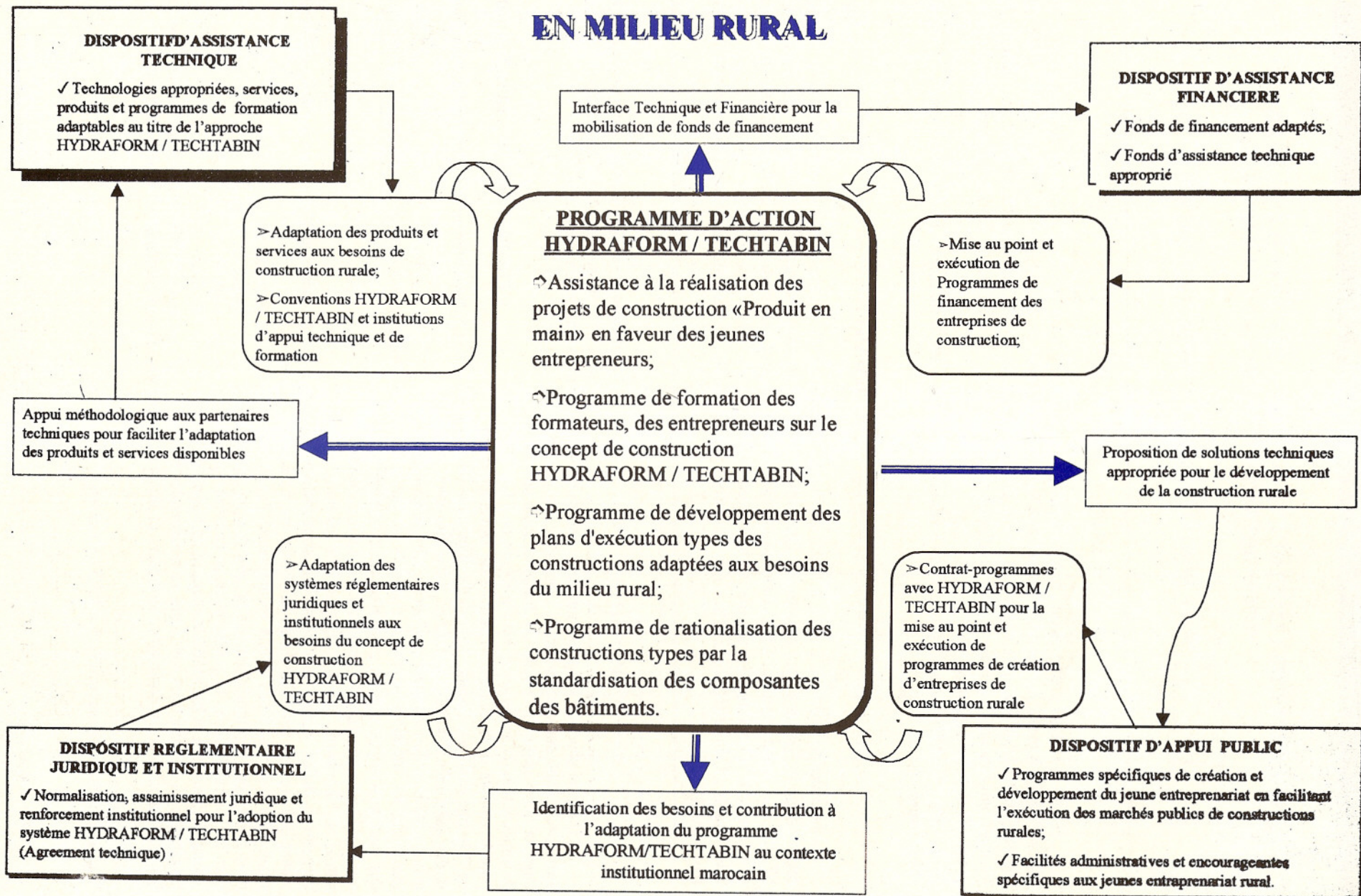
DETAIL SUR MUR CENTRAL

Ech: 1/40^e



PROJET DE SCHEMA D'ORGANISATION ET DE COORDINATION DU PROGRAMME D'ACTION HYDRAFORM / TECHTABIN DE PROMOTION DE LA CONSTRUCTION

EN MILIEU RURAL



APPUI A L'AUTO-CONSTRUCTION : CONSTRUCTION D'UNE BERGERIE EN BLOCS D'ADOBE A TIZITINE (REGION DE MEKNES)

M. EL KORTBI, H. OUISSI, N. YAMANI et A. NACHIR¹

RESUME

Dans le but de promouvoir et de vulgariser la construction en terre, un projet de construction d'une bergerie en blocs d'adobe a été concrétisé à Tizitine dans la région de Meknès. Le présent article résume les différentes étapes de réalisation à savoir Reconnaissance du site et des matériaux de construction susceptibles d'être utilisés - Identification du matériau terre et élaboration du bloc d'adobe - Conception architecturale - Définition des dispositions constructives et détails de leur exécution.

Mots clés : Construction - Terre - Bloc - adobe - Bergerie - Identification - Eucalyptus (Bois) - Pierres - Roseaux - Couverture - Mur.

SUMMARY

In order to promote and to popularize the earth construction, a sheepfold construction with adobe blocks have taken shape in Meknes area (Tizitine). The present article summarizes the different stages of realization examination of site and earth material-Identification of earth material and elaboration of adobe block-architectural design-the constructions layout and the details of their execution.

Key words : Construction - Earth - Adobe - block - Sheepfold - Identification - Eucalyptus (Wood) - Stones - Reeds - Roof - Wall.

INTRODUCTION

Dans un souci de vulgarisation de la construction en terre, nous nous sommes proposés d'apporter notre assistance et notre savoir faire dans ce domaine, dans un projet de construction d'une bergerie dans la région de TIZITINE, pour le compte de la Société Nationale de Développement de l'élevage (SNDE). Compte tenu de l'éloignement du Site et des difficultés d'accès à la ferme : Lieu du projet, nous avons opté pour la technique de l'adobe afin de réduire au maximum les investissements en matériels de production des matériaux en terre et en main d'œuvre qualifiée. Nous avons utilisé le matériau du Site après son identification in-situ et au laboratoire, conçu et dimensionné les murs de la bergerie et défini toutes les dispositions constructives en tenant compte des potentialités de la région en matériaux localement valables. Nous avons recommandé l'utilisation de la paille pour le renforcement de la terre dans la fabrication des blocs d'adobe, la pierre pour la construction du massif de fondation et du soubassement, le bois rond d'Eucalyptus dans les structures verticales et horizontales telles que : Poteaux, poutres, chaînages, supérieurs et linteaux et

les roseaux et la terre dans la couverture. Cette bergerie de $30 \times 6 \text{ m}^2$ de superficie a la forme d'un U. Elle a été construite par des ouvriers de la ferme.

I. PRODUCTION DES BLOCS D'ADOBE

I.1. Le matériau terre : identification géotechnique

Le matériau terre est prélevé sur le Site. Ses caractéristiques géotechniques sont mesurées au laboratoire.

I.1.1. Granularité

Les résultats de l'analyse granulo-sédimentométrique sont :

Graviers	11 %
Sables	19 %
Limons	40 %
Argiles	30 %

Ces différentes proportions pondérales sont illustrées par la courbe granulométrique de la figure n°1.

¹ Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes (LPEE), Casablanca - Maroc

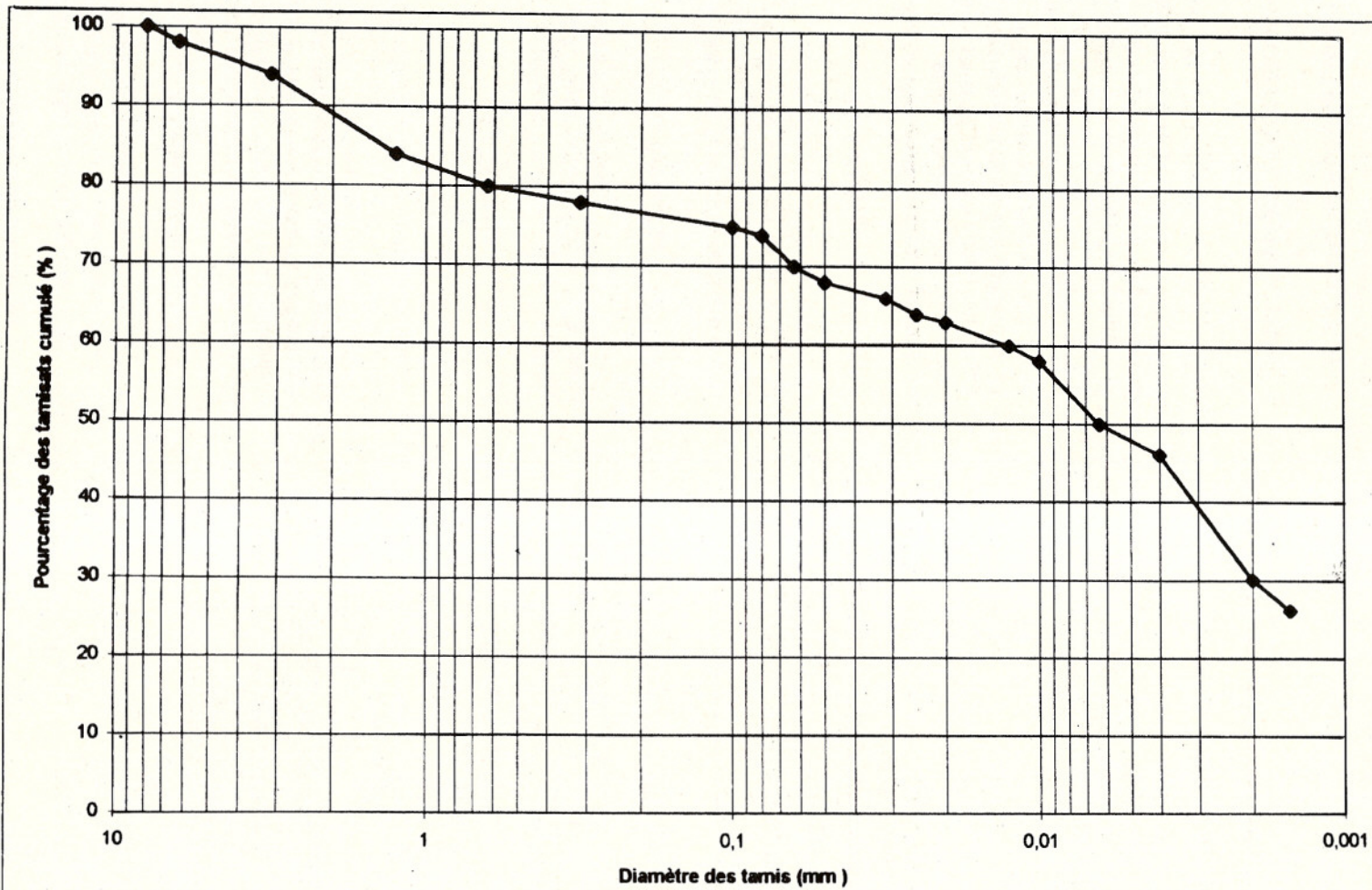


Figure n°1: Courbe granulométrique de la terre utilisée

L1.2. Limites d'Atterberg

Limite de liquidité (LL) : LL = 43,5 %
 Limite de plasticité (LP) : LP = 26,48 %
 Indice de plasticité (Ip) : Ip = 17,02 %

L1.3. Analyse chimique

Le matériau terre analysé est composé essentiellement de minéraux silico-alumineux et d'oxydes représentant 92,85 %. Les matières organiques sont présentes dans une proportion de 1,20 %.

L2. Les blocs d'adobe - paramètres de production

L2.1. Mélange

La terre de Tizitine est renforcée de paille (1,5 % en poids). L'eau de gâchage correspond à 25 % en poids.

L2.2. Production

Le mélange est pétri avant d'être mis en forme dans des moules en bois de dimensions intérieures $40 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ et $30 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$.

L2.3. Séchage

Les adobes produites sont séchées au soleil un temps suffisamment long pour qu'elles ne puissent plus fluer sous leur propre poids. Ce temps ne pourra être inférieur à 24 heures. Elles sécheront ensuite sur chant pendant au moins 3 jours.

L2.4. Dimensions des blocs produits

Bloc unité : $40 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$

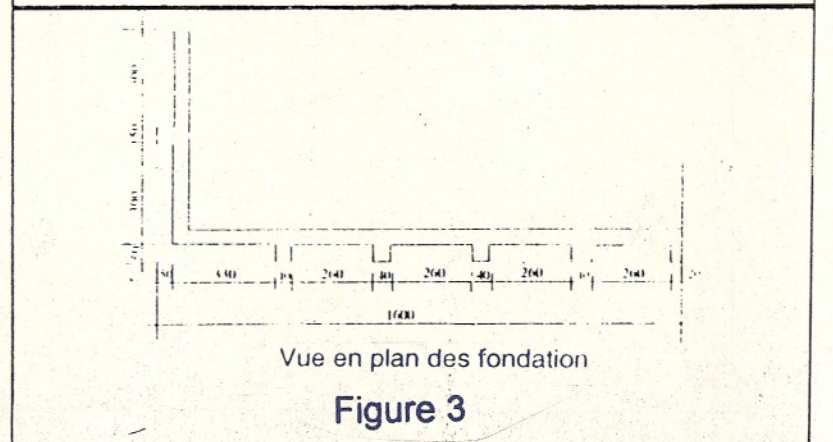
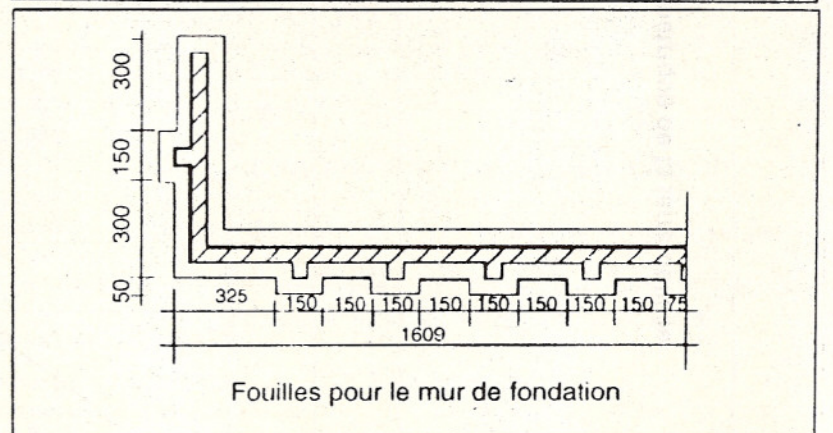
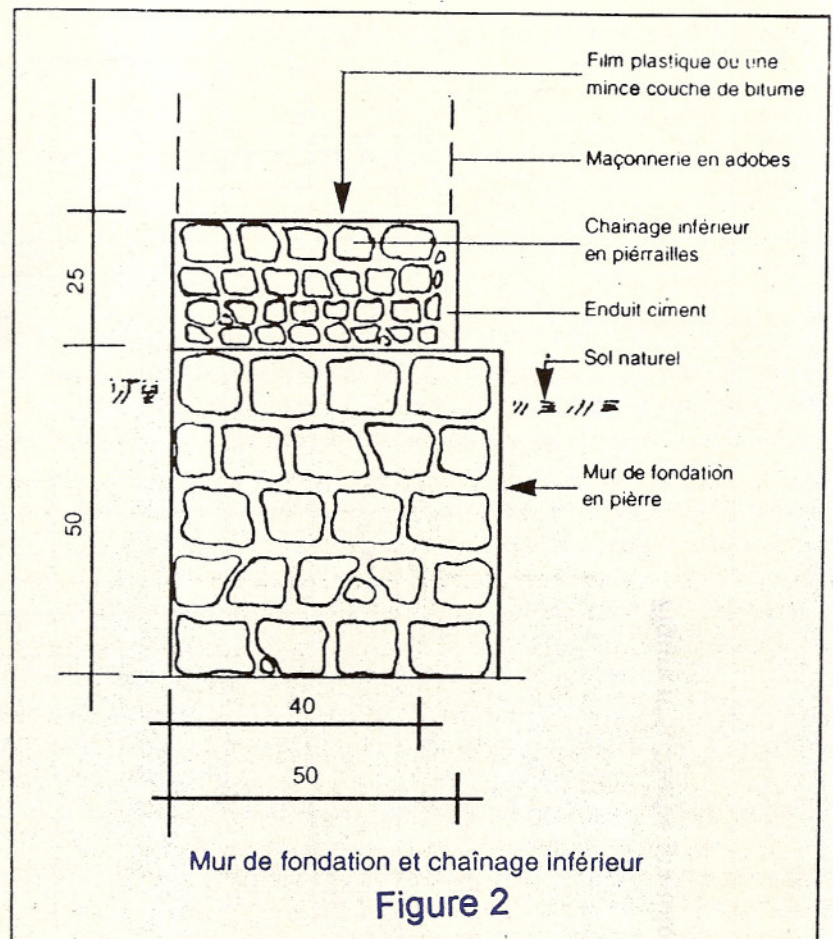
Bloc 3/4 : $30 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$.

II. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

II.1. Massif de fondation (figure 2 et 3)

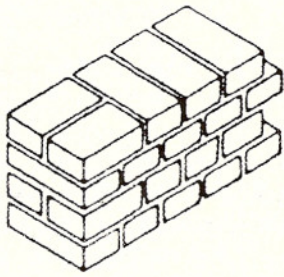
Le massif de fondation est constitué de :

- Mur de fondation en maçonnerie en pierres locales hourdées avec un mortier de ciment dosé à 450 kg/m^3 , de profondeur 50 cm et de largeur 50 cm.
- Soubassement en maçonnerie en pierres locales, large de 42 cm et épais de 20 cm.



II.2. Maçonnerie en élévation

II.2.1. Corps du mur



- Blocs d'adobe hourdés avec un mortier en terre - paille.
- L'appareillage des blocs est décrit par le schéma de la figure 4 pour une partie courante du mur, et le schéma de la figure 5 au niveau des angles de la bergerie.
- Le mur comporte des contreforts extérieurs en maçonnerie de blocs d'adobes sur toute sa hauteur. Ils ont une base rectangulaire de dimensions $40 \times 50 \text{ cm}^2$ et sont distants de 2.6 m. L'appareillage des blocs au niveau de chaque contrefort est décrit par le schéma de la figure 6.

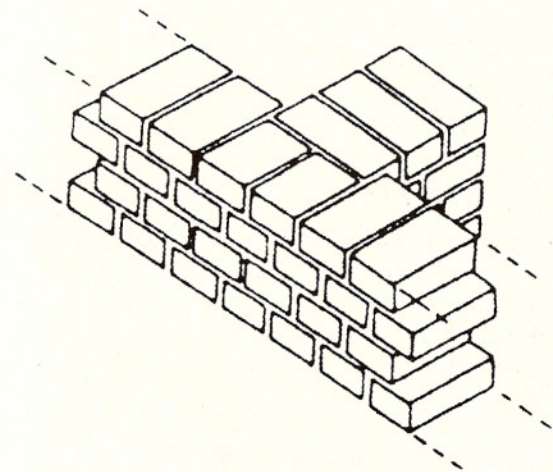
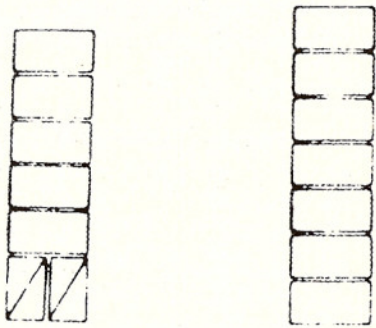


Figure 4 : Appareillage des blocs : Partie courante du mur

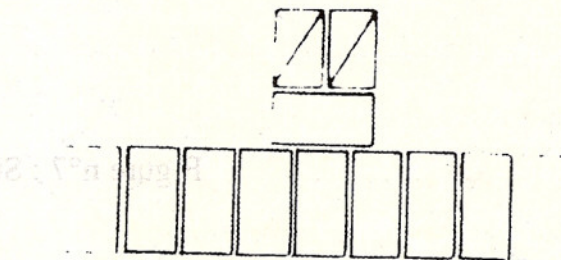
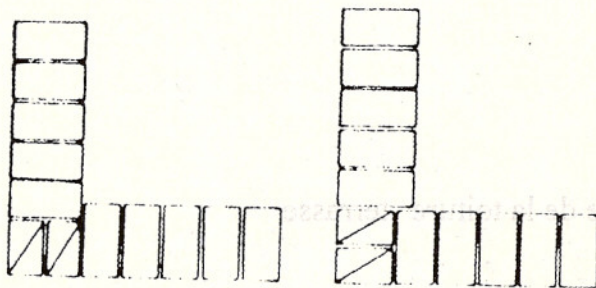
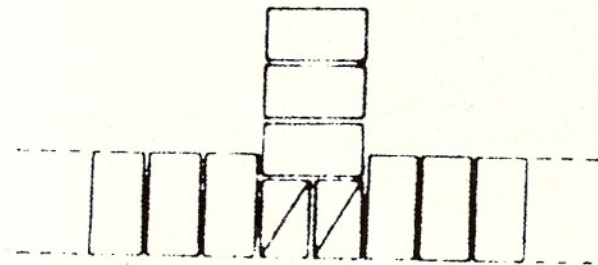
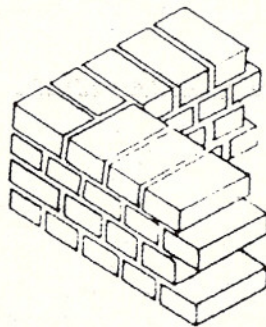


Figure 5 : Appareillage des blocs au niveau des angles

Figure 6 : Appareillage des blocs au niveau des contreforts

II.2.2. Sommet du mur

Le mur en blocs d'adobe est ceinturé au niveau de son sommet avec un chaînage en rondins en bois d'Eucalyptus de diamètre moyen de 15 cm. Ces rondins sont centrés le long de la face supérieure de l'enveloppe et maintenus stables à l'intérieur d'un coffrage perdu en maçonnerie de pierres. Le chaînage sert essentiellement d'appui aux poutres en bois d'Eucalyptus utilisées dans la couverture.

II.2.3. Les ouvertures

Seul le grand mur en maçonnerie en blocs d'adobe comporte des fenêtres de petites dimensions. Les linteaux sont en rondins en bois d'Eucalyptus surmontés d'un lit de blocs.

II.3. La toiture

Pour couvrir la bergerie, nous avons opté pour une toiture traditionnelle. Les rondins en bois d'Eucalyptus utilisés dans la poutraison ont une longueur moyenne inférieure à la petite portée de l'enceinte qui est de 6 m. Nous avons érigé des poteaux et des poutres intermédiaires pour réduire cette portée et rendre l'utilisation de ces rondins possible.

II.3.1. Les poteaux

Ce sont des rondins en bois d'Eucalyptus traité au CREOSOTE, alignés en deux rangées et schématisés avec des carrés noirs sur la figure 6. Ils sont ancrés dans le sol et maintenus dans une position verticale grâce à un système de blocage en bois identique à celui de la figure 7.

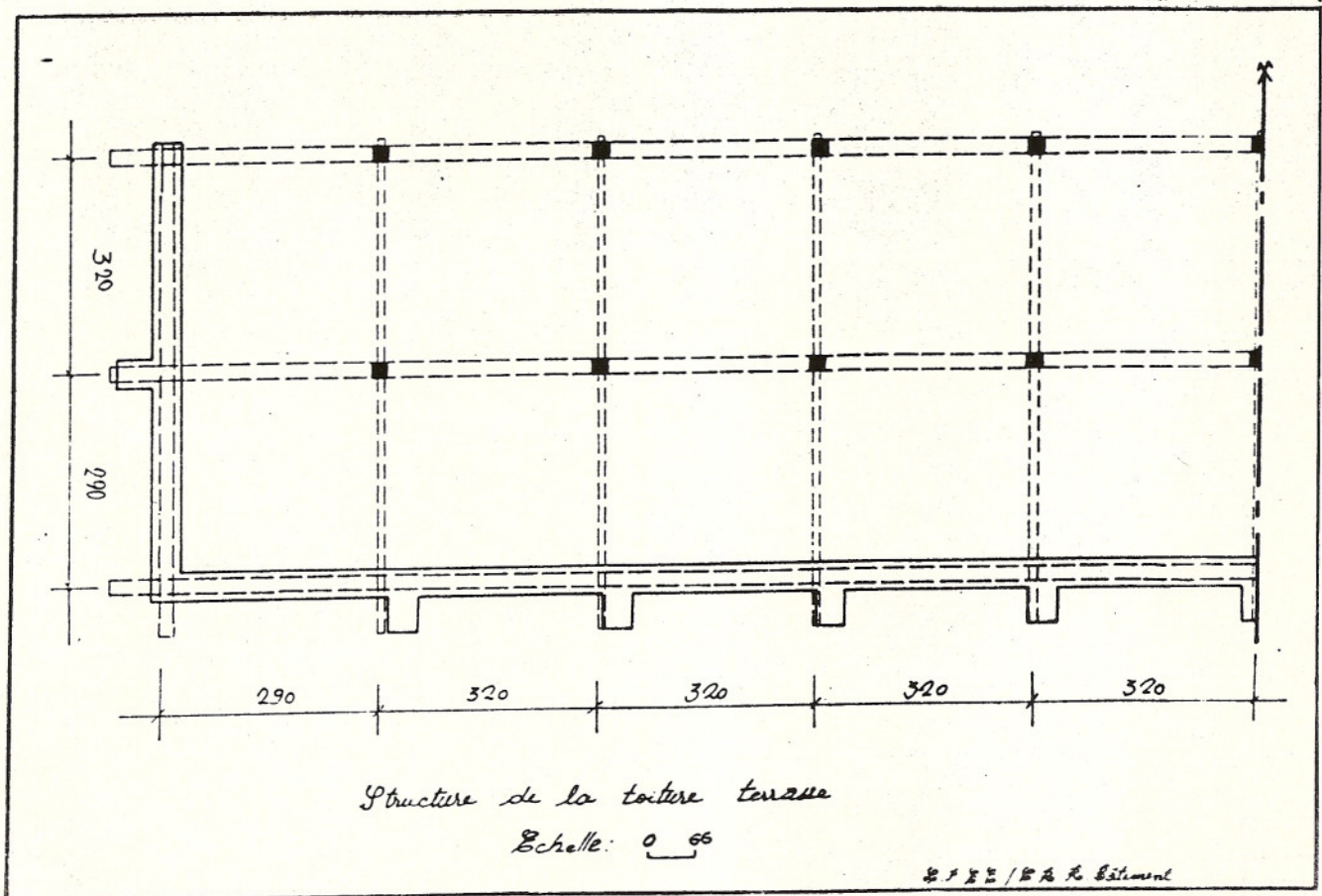


Figure n°7 : Structure de la toiture -terrasse

II.3.2. Les poutres intermédiaires

Elles sont également en rondins en bois d'Eucalyptus. Elles sont schématisées par des pointillées sur la figure 7. Leur système d'assemblage au niveau de chaque poteau est décrit par les schémas des figures 8 et 9.

II.3.3. Le complexe multicouche de la couverture

Le complexe multicouche de la couverture comporte :

- La poutraison : Rondins en bois d'Eucalyptus de 7 cm de diamètre moyen.
- Le hourdissage : Un lit de roseaux reliés avec une ficelle et recouvert d'une couche de paille.
- Une étanchéité intégrée constituée d'un film en plastique posé sur le lit de paille lissée avec de la terre fine.
- Une couche de forme en terre - paille.
- Une couche de surface en terre stabilisée avec de la chaux.

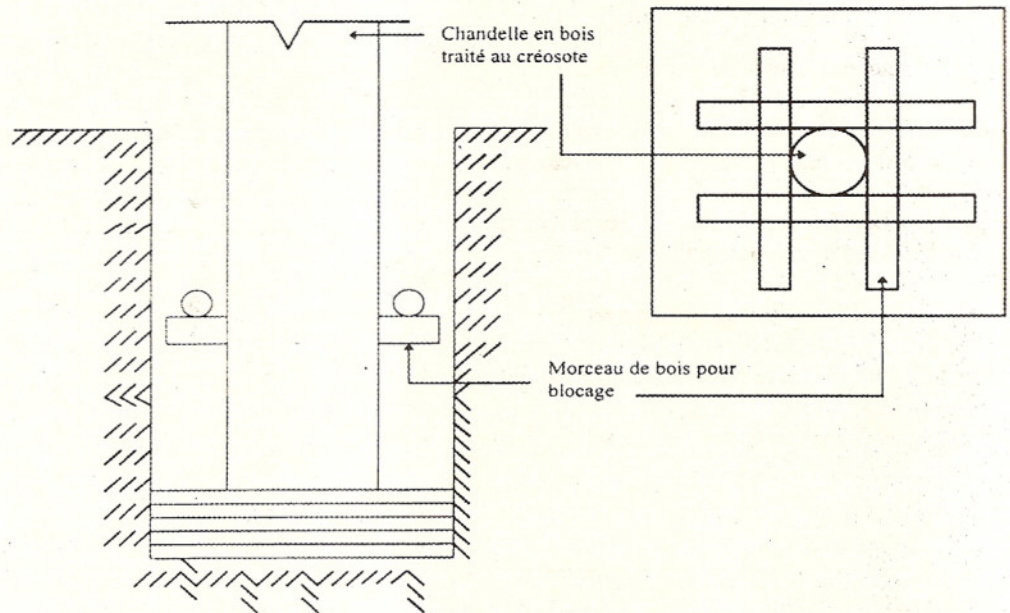


Figure 8 : Système de blocage des poteaux.

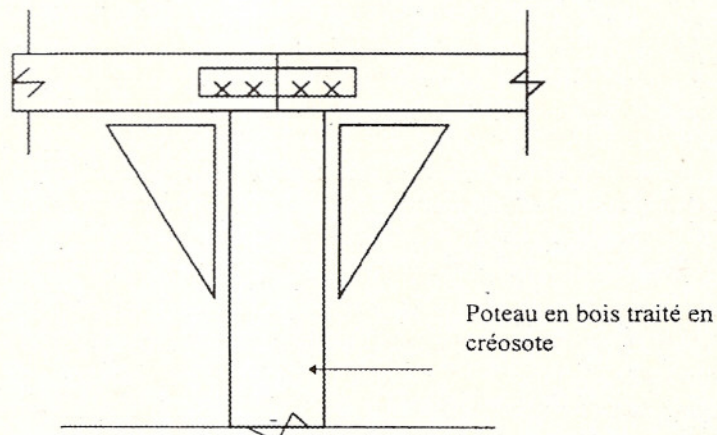


Figure 9 : Système d'assemblage au niveau du poteau.

LE PILOTAGE DE L'IRRIGATION PAR L'INTERMEDIAIRE DE LA THERMOMETRIE INFRAROUGE

RACHID TOUZANI¹

RESUME

L'analyse des mesures de température de canopée, obtenues par la thermométrie infrarouge à courte distance, a confirmé l'importance qu'elles ont prises dans la planification de l'irrigation. Son évolution au cours du temps a notamment mis en évidence le comportement d'homéotherme limité de certaines cultures. La planification de l'irrigation peut être définie en terme de deux composantes. La première est «le temps» ou moment opportun de l'apport d'eau, alors que la deuxième est «la quantité». Dans cet article, nous avons décidé d'utiliser l'indice de stress hydrique des cultures (CWSI en anglais), déterminer de manière empirique, pour déterminer à quel moment, les cultures doivent être alimentées en eau. Les résultats de son estimation ont montré la simplicité de son utilisation mais aussi la nécessité de la prise en compte de paramètres clefs de l'évapotranspiration tels que le rayonnement solaire et la vitesse du vent. D'autre part, l'estimation de la composante «quantité» ou en d'autres termes de l'évapotranspiration, a été réalisées par différents modèles utilisant la température de surface et qui sont fréquemment utilisés dans la littérature scientifique. Nos résultats ont montré que les modèles de Shuttleworth-Wallace et de Bartholic s'avéraient être les plus précis lorsque les données du lysimètre pesable étaient utilisés comme référence. Enfin, la perspective d'une automatisation simple et précise basées sur la température de surface semble évidente.

Mots clés : Irrigation, Infrarouge thermique, Température de surface, Evapotranspiration, Stress hydrique, Planification de l'irrigation

ABSTRACT

The Canopy temperature measures analysis obtained by infrared thermometry (near remote sensing) has confirmed their importance in irrigation scheduling. Their evolution through time showed the homeothermic behaviour of some plants. The irrigation scheduling can be defined in terms of two components. The first to take into account is «time», or the opportune moment of irrigation, the second is «amount». In this article, we decided the use of the crop water stress index (CWSI), developed empirical, to determine the moment of water supplying. The results of the CWSI estimation showed the simplicity of its using, but also the necessity of the consideration of key parameters of evapotranspiration such as solar radiation, wind velocity. On the other hand, the estimation of the amounts - evapotranspiration - has been accomplished thanks to different models that use the surface temperature and that we frequently meet in scientific literature. Our results showed that Shuttleworth-Wallace and Bartholic models come out to be the most precise when data from weight lysimeter were regarded as the reference. In conclusion, the perspective of a simple and precise computation of irrigation, based on the surface temperature seem evident.

Keywords: Irrigation, Infrared thermometry, Temperature surface, Evapotranspiration, Water stress, Irrigation scheduling.

¹ Ingénieur Agronome spécialisé en Génie Rural.

INTRODUCTION

Dans un contexte caractérisé par l'exigüité des ressources hydriques, l'expansion du monde industriel, l'explosion démographique et la nécessité d'accroître la production alimentaire, il est devenu absolument impératif de pouvoir *optimiser l'efficacité de l'eau d'irrigation utilisée dans la production agricole*.

L'objectif principal de l'irrigation est de répondre au stress hydrique par l'application d'une quantité supplémentaire d'eau. Sa planification intelligente permettrait une meilleure gestion de l'eau.

Il existe différentes techniques de planification de l'irrigation basées sur des mesures d'humidité du sol ou encore des paramètres atmosphériques. Leur utilisation est devenue courante mais intuitivement, on peut admettre que des méthodes qui seront basées sur la plante seront plus efficaces car elle touche la pièce maîtresse du système Sol-Plante-Atmosphère. La mesure de la température de surface par la thermométrie infrarouge fait partie de ces méthodes. Son avantage réside dans le fait qu'elle est non destructive, qu'elle ne nécessite aucun contact entre le capteur et la plante, et qu'elle permet des mesures rapides et précises sur des surfaces d'une importance appréciable. A notre sens, la télédétection à courte distance ou rapprochée est actuellement plus facilement manipulable que la télédétection satellitaire. Elle permet de diriger des irrigations à la parcelle.

L'utilisation de la température de canopée comme un indicateur du stress hydrique est basée sur l'hypothèse que, lorsque l'eau devient limitante dans le sol, la transpiration est réduite et la température de la plante augmente. A ce

moment, cette température tend à devenir supérieure à celle de l'air. Ce concept qui paraît simple à première vue nécessite beaucoup de recherches avant d'être admis par la communauté scientifique (Jackson R.D., 1985).

Erhler (1973) a mis en évidence que pour une culture bien alimentée, il existait une relation linéaire entre la différence de température canopée-air et le déficit de pression de vapeur. Cette relation a été vérifiée sur toute une série de cultures et de conditions de pressions de vapeur. De cette façon, pour n'importe quel déficit de pression de vapeur de l'atmosphère et pour une situation de stress hydrique de sol donnée, il correspond un écart de température canopée-air ($T_c - T_a$). Dans le cas où la plante ne manque pas d'eau et transpire à son potentiel, les écarts de température canopée-air sont minimaux $(T_c - T_a)_{inf}$ quelque soit le déficit de pression de vapeur, et la relation linéaire citée ci-dessus forme ce que l'on appelle communément "la limite inférieure" (Idso et al., 1981a et 1981b). Par conséquent, pour des plantes sévèrement atteintes par le stress hydrique, il fut logique de penser qu'une telle limite existait aussi. Lorsque l'atmosphère est saturée en vapeur en eau (DPV=0), la transpiration ne s'arrête pas même si elle est très faible. A cet instant-là, il existe toujours un gradient de pression de vapeur (GPV) entre le feuillage et l'air. Ce n'est que lorsque ce gradient sera nul que la transpiration s'arrêtera et placera la plante dans des conditions de stress extrêmes. Il est donc clair que pour éliminer ce gradient, le déficit de pression de vapeur devra être négatif et l'air sursaturé de vapeur d'eau. Par extrapolation de la « limite inférieure » aux valeurs négatives de DPV, on arrive à un point où le GPV s'annule, et qui correspond aussi à l'écart de température maximale entre canopée et air $(T_c - T_a)_{sup}$ et forme en fonction du déficit de pression de vapeur, "la limite supérieure". Ces deux limites sont représentées à la Figure 1.

Fig.

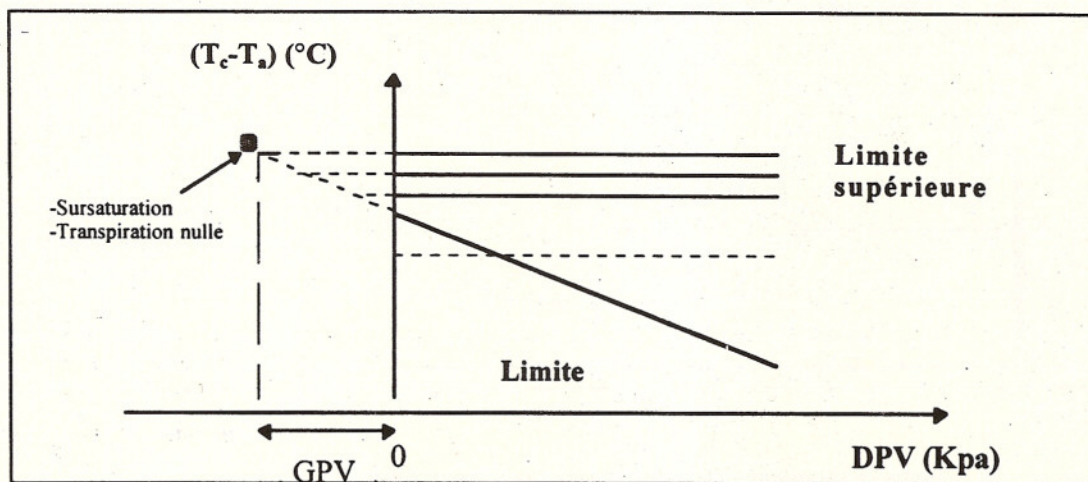


Figure 1 - Représentation des limites inférieure et supérieure.

Lorsque l'écart de température entre la canopée et l'air est mesuré au midi solaire, $(T_c - T_a)$, l'indice de stress hydrique des cultures *empirique* s'exprime de la manière suivante :

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{inf}}{(T_c - T_a)_{sup} - (T_c - T_a)_{inf}} \quad (1)$$

Cet indice variera de 0, lorsque la culture transpire à son potentiel, à 1 lorsque la culture est sévèrement atteinte par le stress hydrique.

En ce qui concerne l'estimation de l'évapotranspiration, nous utiliserons quatre modèles à base thermodynamique dont le paramètre central se trouve être la différence de température canopée-air. Ces quatre modèles sont basés sur l'équation du bilan d'énergie. Le passage du premier au dernier modèle montre une complexité croissante, notamment au niveau du nombre de paramètres utilisés.

Le premier est le modèle de Bartholic (Stone L.R. et Horton M.L., 1973) :

$$\lambda ETBa = \frac{(R_n - G)}{\left[\frac{1 + \gamma(T_c - T_a)}{e_{sc} - e_{sa}} \right]} \quad (2)$$

Où $\lambda ETBa$ est le flux de chaleur latente en W/m^2 , R_n est le rayonnement net en W/m^2 , γ est la constante psychrométrique en $Pa/^\circ C$, e_{sc} est la pression de vapeur saturante à la température de surface du couvert en Pa et e_{sa} est la pression de vapeur saturante à la température de l'air en Pa. Dans ce modèle, Bartholic supposait que l'on se trouvait dans des conditions de stabilité neutre c'est-à-dire que toutes les entités

sont transportées de manière égale et que les coefficients de diffusion de chaleur et de vapeur dans la couche limite étaient égaux. Il ajoutait à son raisonnement l'hypothèse que le couvert végétal était une surface humide sans déficit de pression de vapeur et ainsi, que la pression de vapeur du couvert peut être donnée par la pression de vapeur à saturation à la température du couvert.

Le deuxième modèle est celui de Blad-Rosenberg (Stone L.R. et Horton M.L., 1973) :

$$\lambda ETBr = R_n - G - \frac{(\rho \cdot c_p \delta T)}{r_a} \quad (3)$$

Où $\lambda ETBr$ est le flux de chaleur latente en W/m^2 , R_n est le rayonnement net en W/m^2 , G est le flux de chaleur dans le sol en W/m^2 , r_a est la résistance aérodynamique en s/m, ρ est la densité de l'air en kg/m^3 et c_p est la capacité calorifique de l'air en $J/kg^\circ C$. L'apparition du terme de résistance au transport dans l'air donne sa particularité à ce modèle.

Historiquement, la majorité des modèles d'évapotranspiration était développée pour des cultures bien alimentées en eau. Sans aucun doute, le plus rigoureux entre ceux-ci est celui de Penman (1978) qui mène à l'utilisation du terme d' "évapotranspiration potentielle". Son modèle fut établi sur une feuille. Pour généraliser l'équation de Penman à un couvert végétal en situation de stress hydrique, Monteith (1965) incorpora un terme de résistance de couvert, r_c , pour décrire l'effet qu'ont les stomates partiellement fermés sur l'évapotranspiration. Son passage à un couvert végétal se justifie par le fait qu'il considère que celui-ci peut être représenté adéquatement comme étant une seule feuille dont la surface foliaire est égale à l'indice foliaire du couvert entier mais placée au niveau $d+z_0$ (fig.2).

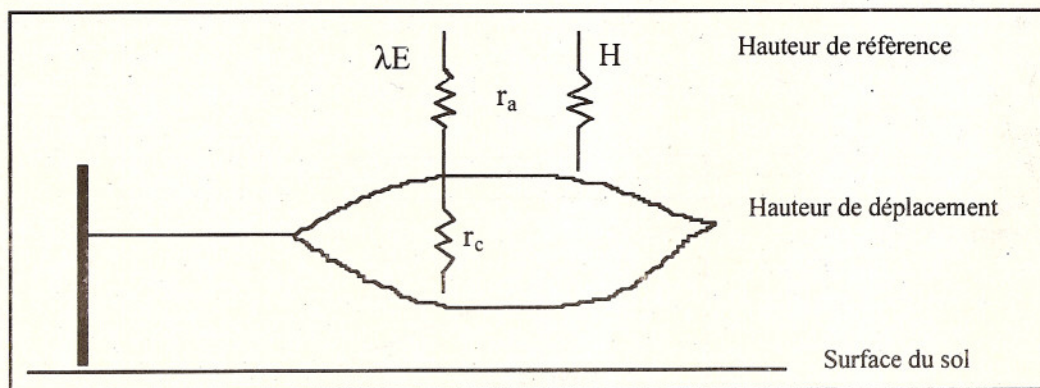


Figure 2 - Formulation des résistances du modèle de Penman-Monteith

Cette dernière condition est nécessaire pour placer au même niveau la source de vapeur d'eau, de chaleur et de quantité de mouvement. Dès lors, cette condition n'aura un sens que dans le cas d'un couvert végétal total ou d'un sol nu. Le cas d'une végétation clairsemée n'est donc pas repris par le modèle de Penman-Monteith (Stannard I.D. et Musy A., 1990) qui peut se représenter de la manière suivante:

$$ET_{mo} = \frac{(\rho \cdot c_p) De_a}{r_s} + R_n \Delta \left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_s} \right) \right) \quad (4)$$

\leftarrow Terme 1 \leftarrow Terme 2 \rightarrow

Où Δ est le rapport des pressions saturantes aux températures de canopée et d'air (De_a / DT) en ($kpa.K^{-1}$), alors que r_c est la résistance de la canopée en s/m. Le premier terme est la composante adiabatique et le deuxième est la composante non adiabatique. Faute de moyen d'estimation de la température de surface à l'époque (1965), Penman avait éliminé cette dernière de l'équation du bilan d'énergie. Cependant, l'estimation de ce paramètre sera réalisée pour le calcul de Δ et de r_a .

Comme nous l'avons dit ci-dessus, aucun de ces modèles n'a pris compte de la possibilité d'une végétation clairsemée. Par conséquent, l'introduction d'un quatrième

modèle s'avère nécessaire. Le modèle de Shuttleworth-Wallace (Shuttleworth W. J. et Wallace J.S., 1985) répond à cette exigence. En effet, durant les premiers stades de croissances, les cultures sont clairsemées et l'hypothèse d'une grande feuille n'est plus valide. Les flux provenant de la canopée sont perturbés par les flux provenant du substrat en dessous (Sol ou eau). Ce problème est particulièrement important au moment du stress quand l'évaporation du couvert végétal est réduite. Le modèle de Shuttleworth-Wallace tient compte de ce problème. Il est similaire à celui de Penman-Monteith, d'une part dans le concept utilisé et, d'autre part, dans les données requises. Il traite les cultures clairsemées comme un système à deux composantes gouverné par la balance énergétique et les principes aérodynamiques. Sa mise en place se base sur trois hypothèses importantes :

1. Il y a une similarité numérique entre la résistance du volume stomacal et une intégration de la composante des résistances stomacales en conditions sèches ;
2. Le mélange aérodynamique à l'intérieur des cultures est suffisamment bon pour autoriser l'existence hypothétique d'"un flux d'air de canopée moyen" ;
3. Les résistances aérodynamiques sont identiques pour les chaleurs sensibles et latentes.

La formulation des résistances est montrée schématiquement à la figure 3.

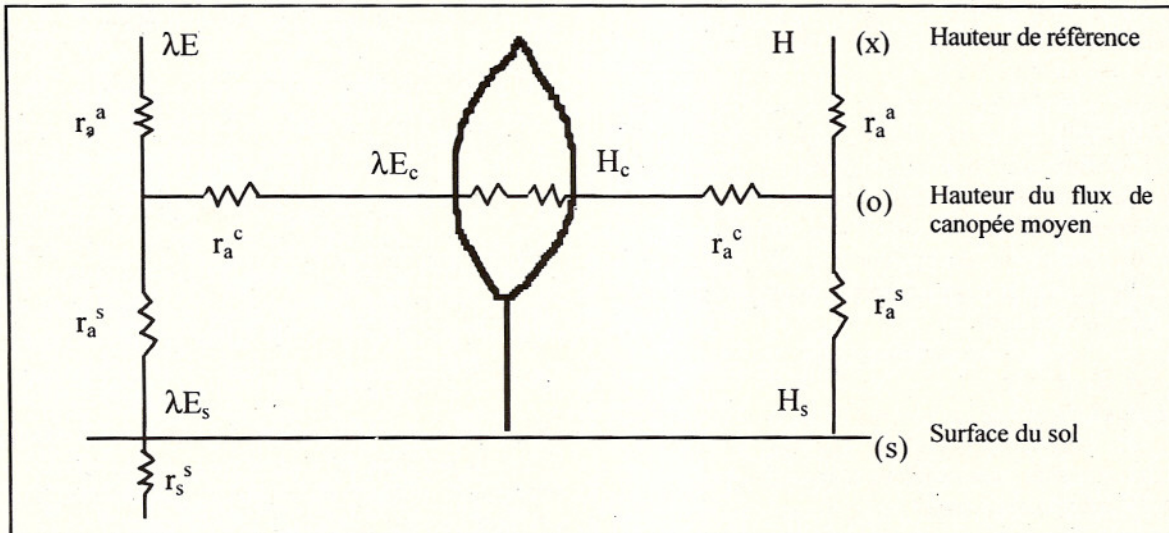


Figure 3 - Formulation des résistances du modèle de Shuttleworth-Wallace.

Les flux nets de chaleur sensible (H) et de chaleur latente (λE) sont composés de ceux émanant du sol (H_s , λE_s) et ceux émanant du couvert végétal (H_c , λE_c). Les composantes sensibles sont séparées par une seule résistance et les composantes latentes sont séparées par deux résistances en série, entre leur source et le flux d'air de canopée moyen. Entre les hauteurs de flux de canopée moyen et de référence se positionne une résistance, r_a^u . Le flux d'air de la canopée se produit à une hauteur $d+z_0$, où d est la hauteur de déplacement de la quantité de mouvement de la culture et z_0 la longueur de rugosité de la culture. Alors que la résistance du bulbe stomacal de la végétation (r_s^s) n'est pas une notion nouvelle, la résistance de surface du substrat (r_s^s) apparaît pour la première fois. Elle reflète le fait que la couche d'air adjacente à la surface du sol n'est pas forcément saturée d'eau, du moins si la surface du sol n'est pas humide en-dessous d'une couche de sol sèche d'épaisseur croissante. Finalement, le modèle de Shuttleworth-Wallace se présente comme suit :

$$\lambda E T_{sw} = C_c P_m c + C_s P_m s \quad (5)$$

Où $P_m c$ et $P_m s$ sont respectivement les équations de Penman-Monteith pour les canopées fermées et pour les sols nus alors que C_c et C_s sont des coefficients d'extinction du rayonnement net. Ces différents paramètres sont donnés par les expressions suivantes :

$$P_m s = \left[\Delta A + (\rho C_p d - \Delta r_s^c A_s) / (r_s^a + r_s^c) \right] \left[\Delta + \gamma \left(1 + r_s^c / (r_s^a + r_s^c) \right) \right]^{-1} \quad (5a)$$

$$P_m c = \left[\Delta A + (\rho C_p d - \Delta r_s^c A_s) / (r_s^a + r_s^c) \right] \left[\Delta + \gamma \left(1 + r_s^c / (r_s^a + r_s^c) \right) \right]^{-1} \quad (5b)$$

Où : A est le flux d'énergie total quittant une surface végétale couvrant totalement le sol sous forme de chaleur sensible et latente en W/m^2 , A_s est le flux d'énergie total quittant le sol sous forme de chaleur sensible et chaleur latente en W/m^2 et d est le déficit de pression de vapeur à la hauteur de référence en kpa.

$$C_c = (1 + R_c R_a / R_s (R_c + R_a))^{-1} \quad (5c)$$

$$C_s = (1 + R_s R_a / R_c (R_s + R_a))^{-1} \quad (5d)$$

Où : R_a , R_c , R_s sont des combinaisons de résistances données par les relations suivantes :

$$R_a = (\Delta + \gamma) r_a^u \quad (5e)$$

$$R_s = (\Delta + \gamma) r_s^s + \gamma r_s^c \quad (5f)$$

$$R_c = (\Delta + \gamma) r_c^c + \gamma r_s^c \quad (5g)$$

En dehors des paramètres mesurables, il a été nécessaire de réaliser une sélection des formules permettant le calcul des autres. A titre indicatif, elles seront présentées successivement.

- Estimation des composantes du bilan d'énergie

Pour estimer l'ETR, il est nécessaire de calculer les composantes du bilan d'énergie. Celui-ci se présente de la manière suivante :

$$R_n - G - H - \lambda E = 0 \quad (6)$$

Où R_n est le rayonnement net en Wm^{-2} , G est le flux de chaleur dans le sol en Wm^{-2} , H est le flux de chaleur sensible en Wm^{-2} et λE est le flux de chaleur latente en Wm^{-2} . On considérera que l'ET représente le flux de vapeur converti en mm d'eau par jour (mm/j).

A) Rayonnement net.

$$R_n = (1 - a) R_s - \epsilon_c \rho (T_c + 273)_4 + \epsilon_a \sigma (T_a + 273)^4 \quad (7)$$

Où : R_n est le rayonnement net en Wm^{-2} , R_s est le rayonnement solaire en Wm^{-2} , ϵ_c est l'émissivité du couvert, ϵ_a est l'émissivité de l'atmosphère, α est l'albédo et σ est la Cste de Stephan-Boltzman ($5.57.10^{-8} Wm^{-2} C^{-1}$). L'émissivité de l'air est estimée de la manière suivante :

$$e_a = 0.51 + 0.066(e_a/100)^{0.5} \quad (8)$$

Où : e_a est la pression de vapeur actuelle de l'air en kpa.

B) Flux de chaleur dans le sol.

$$G = (0.1 - 0.042 h_c) R_n \quad (9)$$

Où : h_c est la hauteur de la culture en m.

C) Flux de chaleur sensible.

$$H = r C_p (T_c - T_a) / r_a \quad (10)$$

Où : r_a = résistance aérodynamique (sm^{-1})

- Autres paramètres

A) Déficit de pression de vapeur.

$$DPI = e_s - e_a \quad (11)$$

Où : e_s est la pression de vapeur saturante de l'air en kpa et e_a est la pression de vapeur actuelle de l'air en kpa. La pression de vapeur saturante est estimée de la manière suivante :

$$e_s = 0.611 \exp(17.27 T_a / T_a + 237.3) \quad (12)$$

Où : T_a est la température de l'air en °C, alors que la pression de vapeur actuelle s'estime comme suit :

$$e_a = e_{sh} - \gamma (T_a - T_{hu}) P \quad (13)$$

Où : e_{sh} est la pression de vapeur saturante à la température

humide en kpa. Y est égal à 0.0008 pour une ventilation naturelle ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) et 0.0012 pour une ventilation intérieure ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) alors que P est la pression atmosphérique en kpa et T_{hu} est la température humide en $^{\circ}\text{C}$.

B) Pente pression de vapeur saturante-température.

Elle sera estimée par la relation de Jackson (1988) :

$$\Delta = 45.03 + 3.014 T + 0.05345 T^2 + 0.00224 T^3 \quad (14)$$

Où : T est égal à $(T_c + T_a)/2$ ($^{\circ}\text{C}$)

C) Constante psychrométrique.

$$\gamma = 0.00163 P / \lambda \quad (15)$$

Où : P est la pression atmosphérique en kpa et λ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau en Mj Kg^{-1} .

$$P = 101.3 - 0.01055 (Alt) \quad (16)$$

Où : Alt est l'altitude en m.

$$\lambda = 2.501 - 0.002361.T_a \quad (17)$$

Où : T_a est la température de l'air en $^{\circ}\text{C}$.

D) Résistance aérodynamique.

En condition atmosphérique neutre, elle sera estimée par l'équation suivante (Thom et al., 1977) :

$$r_a = (\ln(z-d+z_0)/z_0)^2 / k^2 U \quad (18)$$

Où : z est la hauteur de mesure de la vitesse du vent en m, d est la hauteur de déplacement du plan de référence en m, z_0 est la hauteur de rugosité en m et k est la Cste de Von Karman (0.4). Le paramètre d est égal à $0.63 h_c$ alors que $z_0 = 0.13.h_c$ (hauteur de la culture en m). L'équation 18 est obtenue à partir d'un profil de vent. Toutefois, lorsque les conditions atmosphériques sont stables ou instables (engendrées par un gradient de température), il est nécessaire de considérer un profil de température en plus du profil de vent. La résistance aérodynamique doit être corrigée :

$$r_{ac} = (\ln(((z-d+z_0)/z_0) + CM)) \cdot (\ln(((z-d+z_h)/z_h) + CH)) \quad (19)$$

Où : z_h = hauteur de rugosité liée au flux de chaleur sensible ($z_0 = 0,2.z_h$), CH est le facteur de correction de stabilité lié à la chaleur sensible et CM est le facteur de correction de stabilité lié à la quantité de mouvement. Ces

facteurs de correction sont donnés par les équations suivantes :

En conditions instables.

$$\begin{aligned} CH &= 2 \cdot \ln((1+(1-16.S)^{0.5})/2) \\ CM &= 0.6 CH \end{aligned} \quad (20)$$

Où S = paramètre de stabilité.

En conditions stables,

$$CM = CH = 4.7 S \quad (21)$$

Le paramètre de stabilité est donné par l'équation suivante :

$$S = (-k z g H) / (\rho C_p u^{*3}) \quad (22)$$

Où : z est la hauteur de mesure de la température de l'air et de la vitesse du vent en m, g est l'accélération gravitationnelle en ms^{-2} , H est le flux de chaleur sensible en Wm^{-2} et u^* est la vitesse de friction en ms^{-1} ($= (U/r_a)^{0.5}$).

E) Résistance potentielle du couvert.

Son estimation peut être réalisée par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} r_c &= r_s / 0.5 LAI \\ LAI &= 5.5 + 1.5 \ln(h_c) \end{aligned} \quad (23)$$

Où LAI est l'indice foliaire et h_c est la hauteur de la culture en m. Toutefois, nous utiliserons une valeur de 15 s/m donnée dans la littérature (Abdul-jabar A.S. et al., 1985).

Les équations de calcul des résistances pour le modèle de Shuttleworth-Wallace ne seront pas décrites ici (pour plus de précision, voir Shuttleworth W.J. et Wallace J.S., 1985).

METHODE ET DISPOSITIF DE MESURE

- Description des sites d'expérimentation

Les expériences ont été conduites sur deux sites : la station lysimétrique de Louvain-la-Neuve (Belgique) et la station expérimentale d'Asrir (Sud Marocain). Chaque site a été équipé de capteurs infrarouges fixes, permettant la mesure de la température de canopée. Les caractéristiques de ces capteurs sont reprises au tableau I.

Tableau I- Caractéristiques du capteur IR RAYTEK :

marque	gamme	précision	réglage émissivité	focale	sortie
RAYTEK TX	-18/+500 $^{\circ}\text{C}$	+/- 1%	0.1 à 1.00	15:1	4-20 mA

Ces caractéristiques répondent à nos critères :

- Gamme de mesure de température : elle est proche de notre gamme de travail c'est-à-dire -10 à 50°C;
- Précision : le dixième de degré étant difficile à obtenir par mesure infrarouge thermique, il sera considéré que 0.2 à 0.3 °C est suffisant comme précision globale ;
- Réglage de l'émissivité : pour estimer la température d'un corps végétal, l'option réglage de l'émissivité est nécessaire ;
- Focale : comme c'est une mesure moyenne qui nous intéresse ici, le spot mesuré doit être assez grand.
- Sortie : une sortie standard est nécessaire pour pouvoir connecter les capteurs à un système d'acquisition automatique. La plupart des équipements sont munis d'une sortie 4-20 mA qui, une fois transformée en variation de tension, peut-être enregistrée dans un data-logger.

Les capteurs infrarouges présentent une réponse spectrale dans la gamme de longueur d'onde de 8 à 14 mm.

Site 1

Sur ce site, nous utilisons le lysimètre pesable de la station agrométéorologique de Louvain-La-Neuve.

Le lysimètre de LLN (Fig.4) est une cuve circulaire

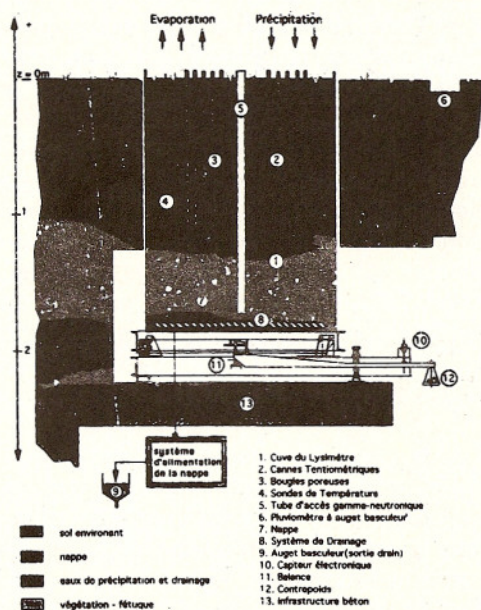


Figure 4 - Lysimètre de Louvain-La-Neuve (Génie Rural LLN, 1994).

de 1 m² de section, hermétique sur les côtés et percée d'un trou à sa base pour la récolte des eaux de drainage. Il fait partie d'une cave bétonnée qui comprend un trou pour son emplacement et celui d'un système de balance, ainsi qu'un espace pour l'accès et les appareils de mesures.

Le système de balance répond aux contraintes de démultiplication de poids et de précision, par un jeu de deux bras de leviers en série et un capteur d'efforts en fin de course.

Durant l'expérimentation, le couvert végétal était constitué de fétuque. Le capteur infrarouge est installé à 1.5 m au-dessus du lysimètre et permet de viser verticalement une surface de 70 cm².

La station agrométéorologique de l'asbl PAMESEB installée près du lysimètre fournit de façon continue les paramètres suivants :

- vitesse du vent à 2 m (m/s)
- direction du vent
- température sèche et humide à 1.5 m (°C)
- radiation solaire (W/m²)
- pluviosité

Site 2

Les essais sont menés à la station expérimentale d'Asrir (Zagora) (Fig.5), dans la vallée du Drâa, au Sud-Est Marocain.

Les capteurs infrarouges sont venus compléter la station agrométéorologique automatique déjà implantée. C'est dans le cadre du projet SIGMADRAA, projet de coopération de l'AGCD coordonné par l'unité de génie rural de Louvain-La-Neuve, qu'il nous sera possible de disposer de cette station.

De cette façon, les mesures agrométéorologiques se feront en continu à partir de la station. Les paramètres enregistrés sont identiques à ceux mesurés par la station PAMESEB.

Trois parcelles seront utilisées dans le cadre de nos expériences. Chaque parcelle a une dimension de 6 m de large et 12 m de longueur. Le matériel végétal qui les occupe est du blé dur. Chacune de ces parcelles est caractérisée par un régime hydrique différent :

- parcelle 1 : culture bien alimentée en eau
- parcelle 2 : culture modérément stressée
- parcelle 3 : culture complètement stressée.

Pour atteindre ces différents régimes hydriques, l'irrigation est menée comme représenté à la figure 6.

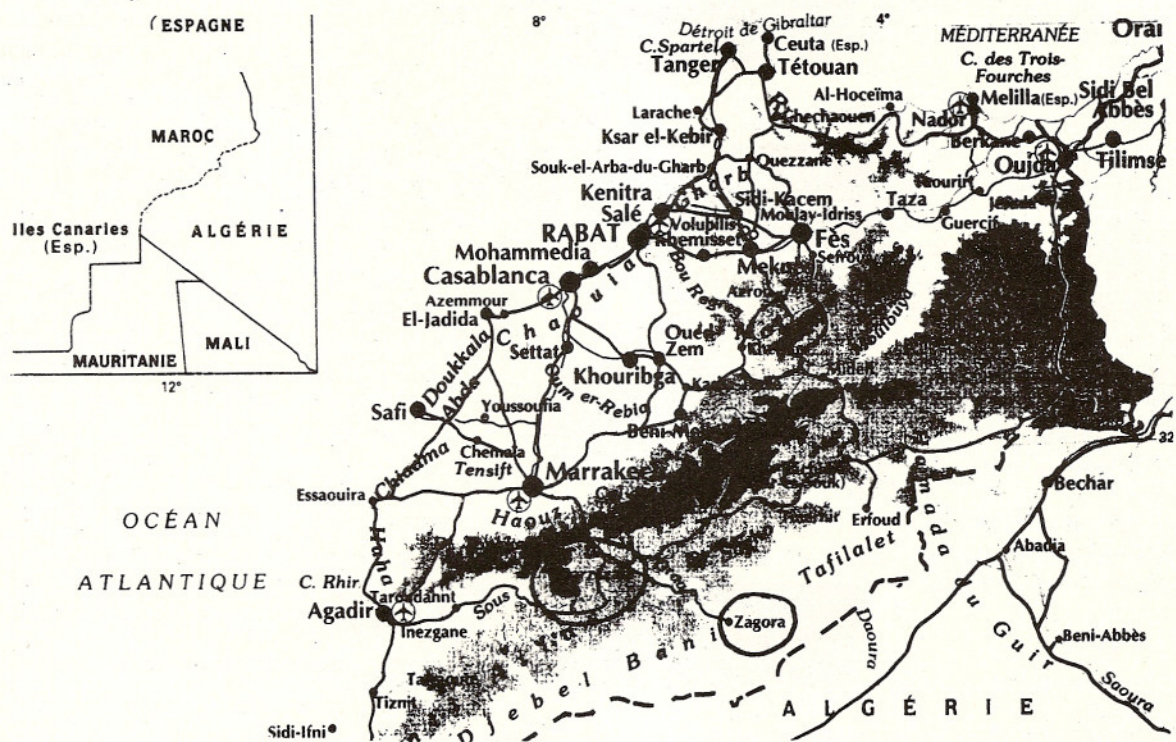


Figure 5 - Situation géographique de la Station expérimentale d'Asrir.

Traitements	Semis	Tallage	Début gonflement	Début épiaison	Début floraison	Maturité	Nombre d'irrigation
parcelle 1	Irrigation lorsque le cumul des ETM blé est de 60 mm						
parcelle 2	+	+		+			3
parcelle 3	+		+				2

Figure 6 - variation du régime d'irrigation.

Les capteurs infrarouges décrits ci-dessus ont été remplacés. Chacune des parcelles a été équipée d'un capteur dont le focale est 7:1. Ils ont été disposés à une hauteur de 2 m 50 et avec une inclinaison de 300, au-dessus des cultures de blé.

- Le système d'acquisition

Acquisition et collecte des données

Sur les trois sites, l'acquisition des données est réalisée par un data-logger du type «PS-2000» commercialisé par la société C2MS. Ce data-logger est contrôlé par un ordinateur personnel du type PC à l'aide du logiciel Pilot (fourni avec le data-logger) soit par RS232 soit par modem.

Il permet la configuration du ou des canaux d'acquisitions (pas de temps, équation de transformation, etc.) ainsi que la lecture instantanée et la vidage des

données stockées.

Transfert des données du PC vers le Macintosh

Les données brutes sont collectées quotidiennement par le PC depuis le PS-2000 soit par réseau téléphonique soit sur le terrain par un portable. Elles sont stockées temporairement dans des fichiers de type DbaseIII, puis transférées sur plate-forme Macintosh afin d'être analysées et transformées en valeurs physiques.

Traitement des données

A l'aide du logiciel Igor pro, on transforme ces données en valeurs physiques traitables. Cette opération est effectuée par l'écriture de macrocommandes.

Les mesures infrarouges vont passer par la chaîne d'opérations représentée sur la figure 7, depuis la valeur brute jusqu'à la valeur physique.

Comparaison de l'ET estimée à l'ET lysimétrique.

Sur ce site, un lysimètre est disponible. Il est donc possible de réaliser une comparaison entre les valeurs observées qu'il fournit et les valeurs estimées par les différents modèles. Pour réaliser cette comparaison, nous avons effectué une analyse statistique. Il a été considéré que les variables à expliquer sont les valeurs estimées par les différents modèles et la variable explicative est la valeur mesurée par le lysimètre. La relation liant les variables à expliquer (Y) et la variable explicative (x) peut s'écrire comme suit :

$$E(Y) = g(x) \quad (24)$$

Cette fonction g dépend de paramètres qu'il conviendra d'estimer. La différence entre Y et sa valeur attendue E(Y) est appelée résidu et notée ε. Dans notre cas, nous utiliserons un modèle de régression linéaire de la forme suivante :

$$E(Y) = b_0 + b_1 x \quad (25)$$

Dans ce modèle, b_0 et b_1 représentent les paramètres qu'il faudra estimer alors que b_0^0 , b_1^0 sont les paramètres estimés. On représentera par Y_i , la $i^{\text{ème}}$ observation et par Y_i^0 , la valeur estimée obtenue en remplaçant dans la fonction g(.) les paramètres par leurs valeurs estimées. La différence $Y_i - Y_i^0$ est appelée résidu expérimental.

La méthode d'estimation des paramètres b_0 et b_1 consiste à choisir comme estimateurs les valeurs qui rendent minimum la somme des carrés des résidus :

$$SCR = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i^0)^2 \quad (26)$$

Pour savoir quel modèle donne les meilleurs résultats, quelques critères nous sont disponibles :

1) Comparaison des SCR de chaque modèle d'estimation. Celui-ci nous informe sur la part de variabilité de Y non expliquée par la variable prise en considération. Le modèle théorique donnant les résultats les plus proches de ceux du lysimètre est celui ayant le SCR le plus petit:

2) Le coefficient de corrélation multiple qui mesure l'intensité de la relation liant la variable expliquée et les variables explicatives. Il est défini comme suit (il doit être le plus grand possible) :

$$R^2 = (SCY - SCR) / SCY \quad (26 \text{ bis})$$

Où SCY est la somme de carrés des écarts relative à la variable Y.

3) L'erreur standard d'estimation (ESE) qui doit être la plus faible possible.

L'analyse de la régression permet de trouver b_0^0 , b_1^0 , R^2 et ESE. Alors que l'analyse de la variance fournit SCR. Ces deux types d'analyse seront réalisées par le logiciel SYSTAT. Les principaux résultats sont présentés au tableau 2.

Résultats obtenus sur le site 2

Analyse des facteurs d'influence de la température de canopée. A l'aide d'une irrigation différentielle, il a été possible d'obtenir des parcelles dont les niveaux de stress diffèrent. La vision de la figure 14 permet de remarquer que la température de la canopée de blé de la parcelle stressée est la plus élevée quelque soit le moment de mesure. Ceci est d'autant plus vrai aux environs du midi solaire. En réalité, plus le niveau de stress est élevé, plus la température de canopée prends des valeurs importantes. Cependant, ça n'est pas la règle générale. Le soir, cette tendance n'est plus la même et vers minuit la température du couvert stressé atteint une valeur plus basse que celle du régime modérément stressé. Il serait intéressant d'expliquer cette évolution de la température de surface par la fenêtre cinétique de fonctionnement optimale des enzymes (TKW). Il est bon de rappeler que dans le cas du blé, cette fenêtre a comme limites: [+/-17.5 °C, +/-23 °C]. Les cultures essaient de se maintenir aux alentours d'une température normative de +/-21 °C qui correspond à la température centrale de la TKW. En réalité, le refroidissement transpirationnel ne se produit pas lorsque la température de la canopée de blé est inférieure à la limite inférieure de la TKW c'est-à-dire 17.5 °C.

Tableau 2-Estimations de l'évapotranspiration.

	b_0	b_1	SCR	R multiple	ESE (mm/jour)
Etbartholic	0	0,578	30,264	0,937	0,763
Etbladrosenberg (ra)	1,365	0,967	154,079	0,649	1,738
Etpenmanmonteith (ra)	1,208	0,898	122,574	0,664	1,55
Etshuttlewothwallace	0	0,637	29,592	0,949	0,794
Etbladrosenberg(rac)	0	0,948	71,599	0,944	1,173
Etpenmanmonteith (rac)	0	0,968	69,058	0,948	1,152

Les figures 14 et 15 permettent d'utiliser ces concepts. Lorsque le rayonnement solaire est maximum (12h00- 14h00), la température de l'air tend à devenir plus grande que la limite supérieure de la TKW. A ce moment-là, les parcelles bien alimentées en eau et modérément stressées possèdent suffisamment d'eau que pour se permettre de transpirer et de diminuer leur température. Cette condition est évidemment essentielle pour que la plante puisse avoir un comportement d'homéotherme limité. Dans le cas de la parcelle stressée, cette condition n'est plus respectée et le refroidissement transpirationnel n'est pas possible. De cette façon, la température de la canopée atteint des valeurs élevées aux environs du midi solaire. Pendant la période nocturne, l'entrée d'énergie n'est plus suffisante et les cultures de blé n'arrivent plus à se maintenir dans la TKW. Dès que la température de canopée atteint une valeur de +/- 17°C, le refroidissement transpirationnel ne se produit plus (Figure page suivante).

Sur la parcelle bien alimentée en eau, il est utile de

représenter la relation entre la température de canopée et la température de l'air (Fig. 16). Même lorsque celle-ci atteint une valeur de 30°C, la température de canopée arrive à se maintenir en-dessous de la température limite supérieure. Cependant, la température de canopée augmente avec la température de l'air. Il est important de remarquer que celle-ci est toujours supérieure à celle de la canopée de la parcelle stressée. La figure 17 montre l'évolution de la température de l'air en fonction du déficit de pression de vapeur (DPV). Cette figure fut aussi empiriquement observée. La température de l'air augmente avec le DPV. Or ci-dessus, nous avons vu que la température de canopée était quasiment toujours supérieure à celle de l'air, en tout cas, cela est vrai lorsque le rayonnement est suffisant. De cette façon, on peut s'attendre à ce que la différence de température canopée-air diminue avec le DPV. La baseline qui sera obtenue plus tard en sera l'illustration. Ces deux figures nous permettent aussi de savoir que la température de canopée augmente avec le déficit de pression de vapeur.

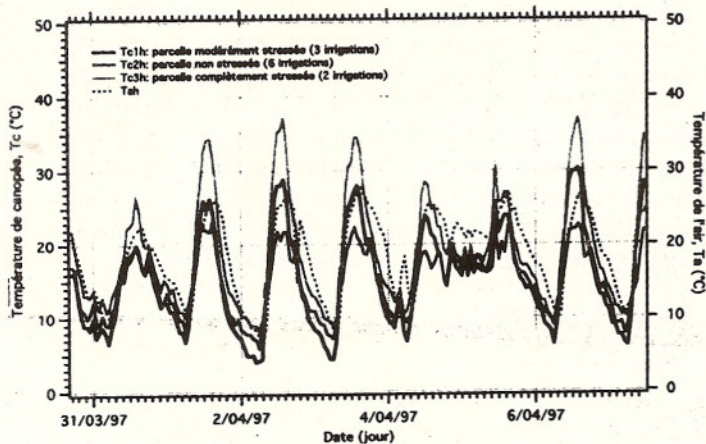


Figure 14 - Evolution de la température de canopée et de la température de l'air avec en fonction du temps.

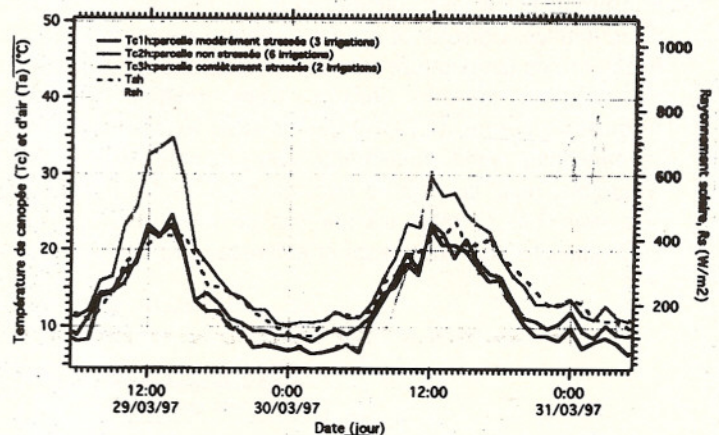


Figure 15 - Evolution de la température de canopée et du rayonnement solaire en fonction du temps.

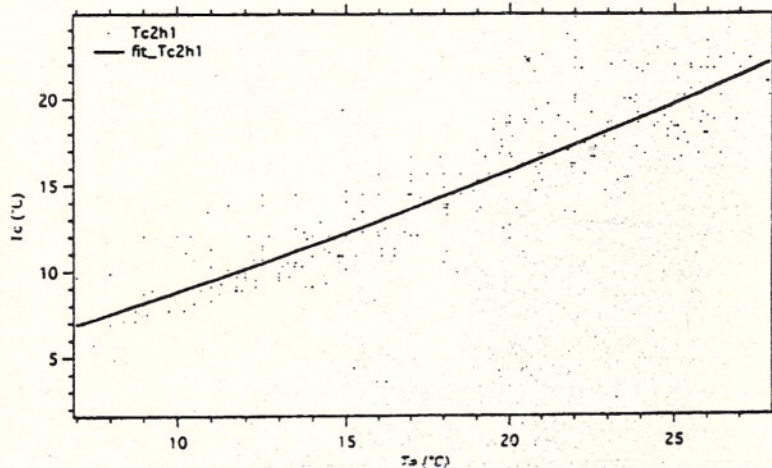


Figure 16 - Evolution de la température de canopée avec la température de l'air.

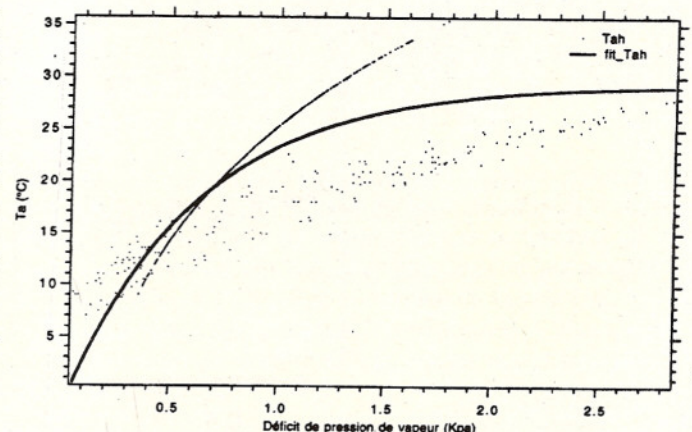


Figure 17 - Evolution de la température de l'air en fonction du déficit de pression de vapeur.

La figure 18 montre l'évolution de la différence de température canopée-air en fonction du déficit de pression de vapeur pour la parcelle modérément stressée et stressée. La forme des relations obtenues pour ces deux régimes est la même mais avec des différences de température canopée-air plus élevée pour le couvert stressé. Pour le couvert modérément stressé, dès le lever du soleil (vers 5h00) la température de la canopée commence à augmenter. Ce réchauffement par rapport à l'air dure 3 à 4 heures puis la canopée commence à se refroidir par rapport à l'air. Ce refroidissement relatif est presque une fonction linéaire du déficit de pression de vapeur jusqu'à 3 à 4 heures avant le coucher du soleil, après quoi la différence de température canopée-air commence à se diriger vers une valeur qui est spécifiée par la balance radiative nocturne. Cette valeur persiste jusqu'au matin. Ces observations peuvent s'expliquer par la réaction des stomates aux variations d'illumination. Actuellement, il est reconnu que les stomates des cultures de la plupart des régions agricoles ferment la nuit et s'ouvre graduellement au matin en réponse à une illumination croissante. Tant qu'un seuil critique d'ouverture n'est pas atteint, les plantes ne transpirent pas à leur potentiel pour un niveau de réserve d'eau donnée. Lorsque ce seuil est atteint vers 8h00 AM, la différence de température canopée-air diminue et on obtient une relation presque linéaire. Cette relation persiste jusqu'aux environs de 14h30 qui est aussi le moment où le rayonnement subit une chute considérable (Fig. 15). Toutefois, pour la parcelle stressée cette explication perd son sens. Les cultures n'ayant pas de ressources en eau suffisantes ne peuvent transpirer et baisser leur température.

Jusqu'au seuil critique d'ouverture des stomates, l'évolution de la différence de température canopée-air est quasiment la même que celle obtenue pour la parcelle modérément stressée.

A ce moment-là, les cultures de cette dernière parcelle transpirent et diminuent leur température alors que celles de la parcelle stressée ne peuvent diminuer leur température par transpiration. De cette façon, les deux courbes se différencient jusqu'à ce que la quantité de rayonnement reçu diminue.

Stress Degrée Day (SDD). Le premier indice qui utilisait la température de canopée fut le stress degré day. C'est une valeur journalière de l'écart ($T_c - T_a$) mesurée au moment du maximum de température de surface (généralement au midi solaire). La figure 19 montre l'évolution de cet indice de stress en fonction du temps pour des parcelles modérément stressée et stressée. Dans le cas du premier régime stressé, le *SDD* prend toujours des valeurs positives. Alors que pour la parcelle modérément stressée, il est négatif jusqu'au 16 Mai. En réalité, il est considéré que lorsque cet indice prend des valeurs positives les cultures sont stressées, dans le cas inverse, elles ne le sont pas. Cet indice reflète donc bien les différences de régimes appliqués aux parcelles. Il est à noter que Idso (Jackson R.D. et al., 1977) a montré que sous climats arides, les rendements diminueraient si le *SDD* devient positif. Cependant, cet indice ne prend pas compte de facteurs environnementaux tels que *DPV*, R_s et U (vitesse du vent). Or ces facteurs ont montré avoir une importance réelle sur les mesures de température de canopée.

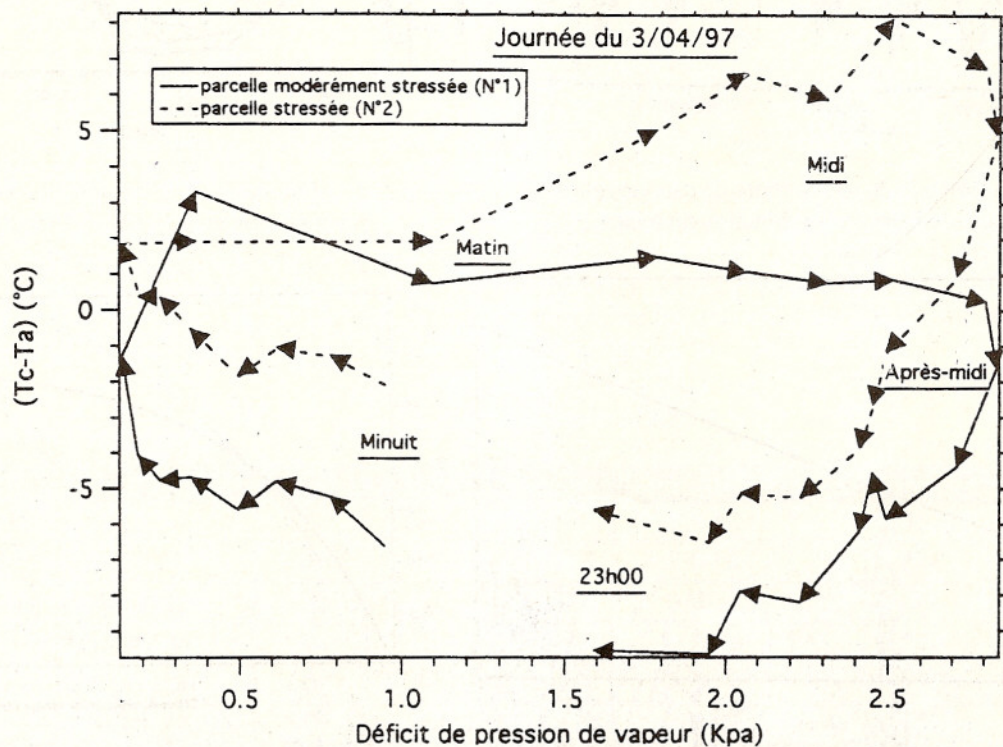


Figure 18 - Evolution de la différence de température canopée-air en fonction du DPV.

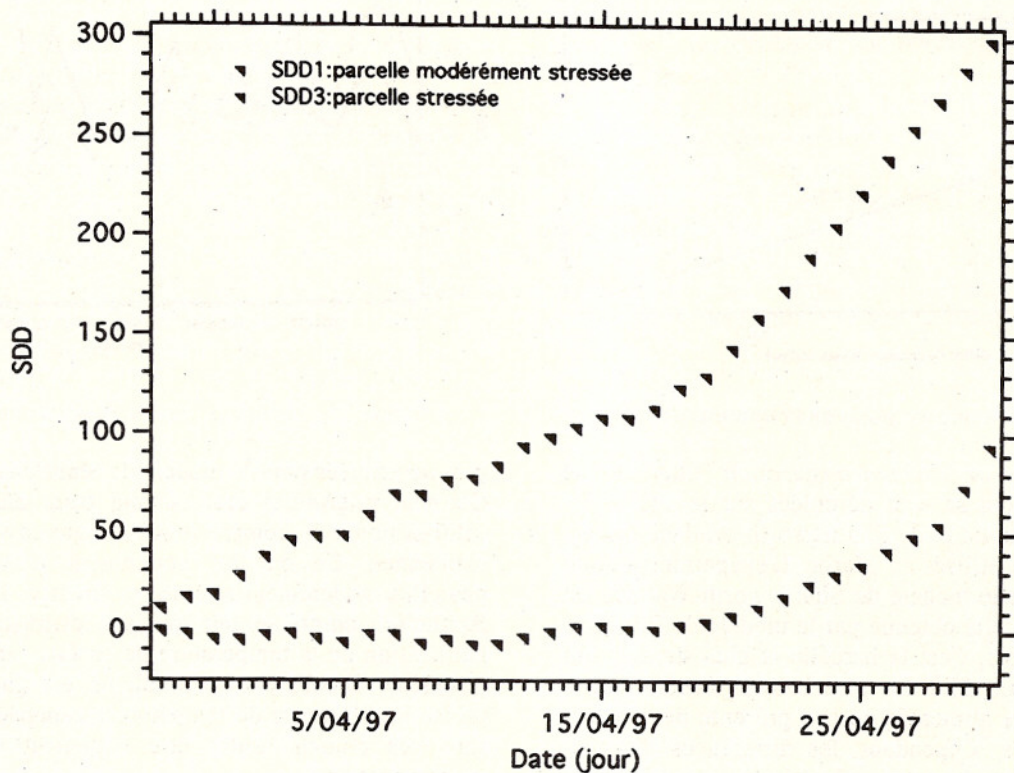


Figure 19 - Evolution du SDD au cours du temps.

Crop Water Stress Index (CWSI). Pour déterminer la limite inférieure (baseline), nous avons travaillé sur les résultats obtenus sur la parcelle 2 (bien alimentée en eau : 6 irrigations). Une irrigation ayant eu lieu le 1^{er} avril, il a été décidé de prendre quelques points de différence de températures canopée-air et DPV peu de temps après cette date. Ces points ont été choisis au midi solaire. La figure 20 montre la baseline obtenue. Son équation est la suivante :

$$(Tc - Ta)_{inf} \cong 6.7527 - 4.8265 \times DPVh$$

De cette façon, la limite supérieure est donnée par l'équation suivante :

$$(Tc - Ta)_{sup} \cong 6.7527 - 4.8265 \times DPVh$$

Connaissant ces deux limites, il nous est possible d'estimer le *CWSI* de manière empirique sur les parcelles 1

et 2 (Fig.21). Cet indice a été calculé au midi solaire (12h00 et 13h00). Nous considérerons que la parcelle est stressée si le *CWSI* est supérieure ou égal à 0.4 (Abdul-Jabbar A.S., 1985). La figure 21 montre que la parcelle est presque continuellement stressée. Cependant, elle ne l'est pas à tout moment. Ceci n'était pas montré par le *SDD*. Le *CWSI* pour la parcelle modérément stressée reste inférieure à la limite que l'on s'est donné (0.4) jusqu'aux environs du 16 Mai. Effectivement, ceci a aussi été montré par le *SDD*.

Les valeurs négatives prises par cet indice peuvent être expliquées par l'utilisation des coefficients de régression obtenus lors de l'estimation de la baseline. Il semble que le *CWSI* soit beaucoup plus sensible au niveau du stress que le *SDD*. La prise en compte du facteur DPV y en est pour beaucoup. Cependant, pour les deux indices, il serait nécessaire de prendre en compte les autres facteurs environnementaux.

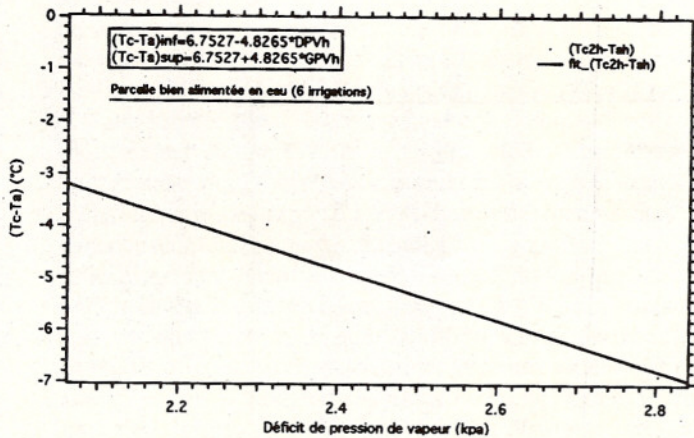


Figure 20 - Représentation de la limite inférieure.

Estimation de l'évapotranspiration. Etant donné les expériences qui se sont déroulées sur le site 1, les modèles de Bartholic et de Shuttleworth-Wallace ont été choisis pour être utilisés au Maroc. L'évapotranspiration (ET) estimée par le modèle de Shuttleworth-Wallace est plus élevée que celle obtenue par le modèle de Bartholic (Fig.22). Toutefois, c'est la parcelle la plus stressée qui atteint des valeurs d'ET les plus basses. Tandis que la parcelle la mieux alimentée en eau présente des valeurs d'ET importantes. Cependant, les différences d'évapotranspiration selon le régime hydrique sont beaucoup

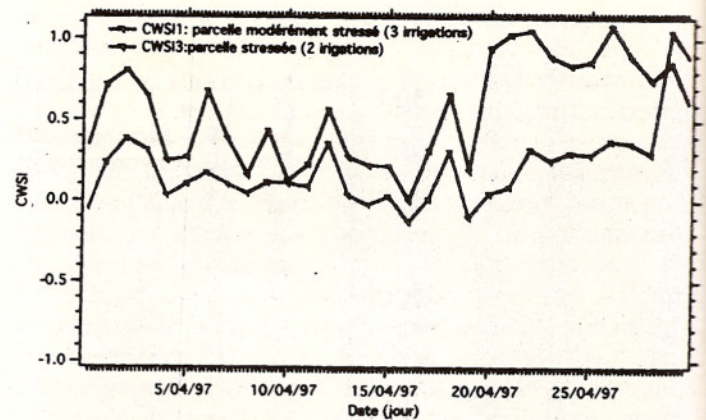


Figure 21 - Evolution du CWSI au cours du temps.

plus accentuées pour le modèle de Shuttleworth-Wallace. On peut interpréter ceci comme étant dû au fait que celui-ci prend en compte le sol lorsque la végétation est clairsemée. Ce qui est notamment le cas pour les parcelles modérément stressée et stressée. Le modèle de Bartholic, malgré le fait que son estimation nécessite l'utilisation de la température de surface, se montre très insensible à celle-ci. Le problème est que ce modèle utilise la différence de température canopée-air qui peut sous ces climats arides être nettement inférieure au rayonnement net.

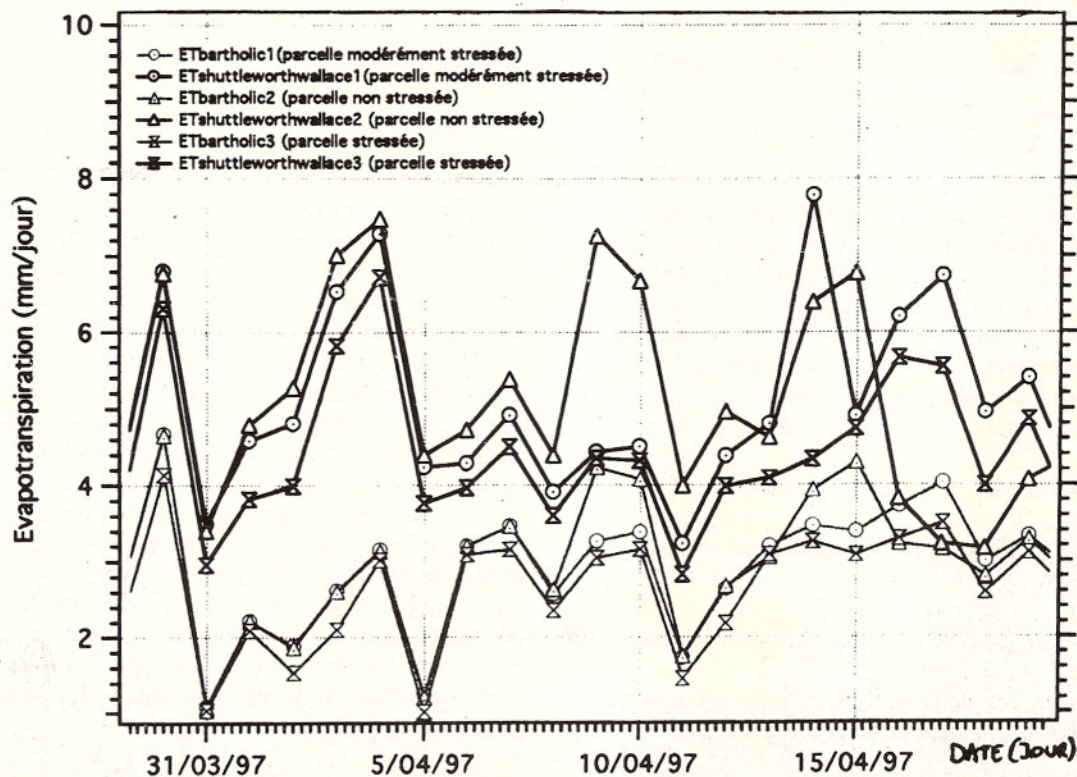


Figure 22 - Evolution de l'ET en fonction du temps.

Sous les conditions arides de la station expérimentale d'Asrir, il a été possible d'obtenir des résultats concluants quant à l'utilisation de l'indice de stress hydrique des cultures (*CWSI*). Son estimation empirique a l'avantage d'être simple car elle utilise un nombre réduit de paramètres. Cependant, il est nécessaire que cet indice prenne compte de facteurs clés responsables du processus de l'évapotranspiration tels que le rayonnement et la vitesse du vent. Des méthodes d'estimation du *CWSI* utilisant ces facteurs ont été données dans la littérature mais elles doivent être vérifiées expérimentalement. En l'absence de valeurs de référence d'*ET* sur ce site, il est difficilement réalisable de comparer les valeurs d'évapotranspiration obtenues par les différents modèles d'estimation. Cependant, il ressort que le modèle de Shuttleworth-Wallace se montre plus sensible aux variations du régime hydrique.

• Modèle de Bartholic

Il y a une remarque à faire concernant le paramètre b_0 qui est une constante. Il est important de savoir si cette constante est nulle afin de savoir si la droite de régression passe par l'origine. De cette façon, on remarque par les résultats de la régression que l'on peut accepter à un niveau de signification de 5 % l'hypothèse que la constante soit nulle (car la plus-value est supérieure à 0.05). Nous avons donc réalisé une régression (Tableau 2) sans constante qui nous a conduit au modèle suivant :

$$ET_{\text{bartholic}} = 0.578 ET_{\text{lysime\^tre}} \quad (27)$$

Ce modèle de régression est accepté car l'analyse de la variance a montré que l'hypothèse $b_1 \neq 0$ ($H_0: b_1 = 0$) est acceptée avec un niveau de signification de 5 % ($p = 0.00$). Le modèle de Bartholic est celui qui présente le plus de stabilité avec celui de Shuttleworth-Wallace. En effet, il possède un coefficient de corrélation multiple élevé ($R=0.937$) et une erreur standard d'estimation faible ($ESE = 0.578$ mm/jour). La part de variabilité des valeurs obtenues non expliquées par les valeurs du modèle estimées grâce aux paramètres de régression est faible ($SCR=30.264$).

• Modèle de Blad et Rosenberg

Au tableau 2, les valeurs ont été obtenues pour le modèle utilisant la résistance aérodynamique non corrigée (r_a) et corrigée (r_{ac}).

Dans le cas du modèle non corrigé, la constante n'est pas nulle et le modèle se présente comme suit :

$$ET_{\text{bladrosenberg}} = 1.365 + 0.967 ET_{\text{lysime\^tre}} \quad (28)$$

Alors que pour le modèle corrigé, la constante est nulle :

$$ET_{\text{bladrosenberg}} = 0.948 ET_{\text{lysime\^tre}} \quad (29)$$

Ces deux modèles de régression ont été acceptés avec un niveau de signification de 5 % (ce qui est d'ailleurs le cas pour tous les modèles). Il apparaît que cette correction améliore l'estimation réalisée par ce modèle. Toutefois, l'erreur standard d'estimation ($ESE = 1.173$) et la somme des carrés des résidus ($SCR=71.599$) demeurent trop élevés.

• Modèle de Penman-Monteith

De nouveau, les estimations ont été réalisées pour les résistances aérodynamiques non corrigées et corrigées. Les mêmes conclusions peuvent être tirées. Lorsque cette résistance n'est pas corrigée, la constante ne peut pas être considérée comme nulle et le modèle estimé est le suivant :

$$ET_{\text{penmanmonteith}} = 1.208 + 0.898 ET_{\text{lysime\^tre}} \quad (30)$$

Dans l'autre cas, le modèle estimé se présente comme suit :

$$ET_{\text{penmanmonteith}} = 0.968 ET_{\text{lysime\^tre}} \quad (31)$$

L'efficacité d'estimation est plus élevée que pour le modèle de Blad et Rosenberg. Il semblerait qu'indirectement l'introduction du paramètre de résistance de canopée a eu un effet positif. Cependant, l'erreur d'estimation ($ESE = 1.152$ mm/jour) et la somme des carrés des résidus ($SCR 69$) demeurent trop élevés.

• Modèle de Shuttleworth-Wallace

C'est le modèle le plus consistant et le plus stable. C'est celui qui est le plus adapté. La constante peut être considérée comme nulle. Le modèle de régression se présente comme suit :

$$ET_{\text{shuttleworthwallace}} = 0.637 ET_{\text{lysime\^tre}} \quad (32)$$

En effet, ce modèle présente le coefficient de corrélation ($R=0.949$) le plus élevé mais aussi l'erreur standard d'estimation ($ESE=0.794$) et la somme des carrés de résidus ($SCR=29.592$) les plus faibles.

Les modèles les plus complexes ne sont pas les plus précis. Le modèle de Bartholic a l'avantage d'être très simple et ne nécessite que des mesures de rayonnement solaire, température de canopée, température sèche et humide. L'estimation de l'évapotranspiration réelle est actuellement réalisée soit à partir d'un lysimètre pesable, soit en corrigeant l'évapotranspiration potentielle par un coefficient cultural spécifique à chaque culture et à chaque stade de développement. Toutefois, l'utilisation d'un lysimètre n'est pas toujours possible (coût trop élevé) et l'utilisation d'un coefficient cultural est parfois imprécise.

L'analyse statistique et sa simplicité font du modèle de Bartholic, un moyen avantageux pour mesurer l'évapotranspiration réelle. Cependant, le modèle de Shuttleworth-Wallace donne des résultats encore plus proches de ceux du lysimètre. Mais sa complexité augmente. Il est donc nécessaire de faire un compromis entre simplicité et précision.

CONCLUSION

La synthèse bibliographique a mis en évidence que les techniques de télédétection offraient de grandes possibilités dans le pilotage de l'irrigation. Nous avons montré que l'estimation de la *température de surface* d'un couvert végétal était réalisable par la télédétection rapprochée. Cependant, une étude des différents paramètres affectant la température de surface est nécessaire. Si l'on veut augmenter la précision des résultats, le développement des techniques dans le domaine du micro-ondes serait un progrès notoire pour la mesure de température de surface. Le *Crop Water Stress Index empirique* a l'avantage de ne nécessiter que la mesure de peu de paramètres lorsque la limite inférieure et supérieure ont été estimées. Cependant, des recherches doivent encore être réalisées pour qu'il puisse tenir compte de facteurs clefs de l'évapotranspiration tels que le rayonnement et la vitesse

du vent. Son application au contrôle de l'irrigation demande que des recherches soit également réalisées pour déterminer les seuils critiques de cet indice de façon à déterminer les stades végétatifs où l'apparition du stress pourrait avoir une répercussion négative sur le rendement. Pour déterminer les quantités d'eau nécessaire au bon développement des cultures, il faut pouvoir déterminer *l'évapotranspiration*. A l'inverse du CWSI, l'estimation de cette dernière doit être plus précise que simple. Une erreur dans l'estimation du CWSI aura des conséquences moins importantes sur le moment d'apport d'eau que celles provoquées par la mauvaise estimation de l'évapo-transpiration sur les quantités d'eau nécessaires. De cette façon, le modèle de Shuttleworth-Wallace doit pouvoir être développé en conditions semi-aride ou aride. En règle générale, des essais sur des lysimètres de haute précision couvrant une large gamme de conditions climatiques permettraient d'aboutir à des résultats satisfaisants, en utilisant des stations agrométéorologiques complétées de capteurs infrarouges.

IRRIGATION SOUTERRAINE EN LIMONS DE BRESSE

R. BOUZIGUES¹, J.C. FAVROT¹, J.C. CHOSSAT², M. KHADIRI³, E. LALANNE⁴

RESUME

Afin de vérifier dans un LUVISOL REDOXISOL, les conséquences hydrologiques et les performances agrotechniques de l'irrigation souterraine⁵ - qui consiste à recharger une nappe par apports d'eau à l'aide d'un réseau de drains enterrés - un dispositif expérimental a été installé en 1993 dans une exploitation agricole située sur limons de Bresse. Sur le plan scientifique, à partir de l'injection d'eau dans le sol résultant de ce mode d'arrosage, l'objectif a été d'identifier et de quantifier les transferts d'eau, notamment ceux intervenant au sein des horizons argilluviaux BTg.

Pour cela, de juin à août, des relevés tensio-piézométriques pluri-journaliers et une observation périodique de profils racinaires, ont été effectués dans une parcelle de maïs, arrosée à l'aide d'un réseau de drains installé depuis 1970. Les données recueillies montrent que l'eau apportée par les drains recharge en fait - à travers les horizons argilluviaux BTg - une nappe souterraine associée à un aquifère sableux lenticulaire, apparaissant entre 150 et 250 cm de profondeur. Début juin (maïs au stade 5 feuilles), cette nappe remonte par arrosage jusqu'à 100 cm de profondeur à l'interdrain. Elle prend alors une forme concave avec une perte de charge dépassant 40 cm entre la tranchée de drainage et l'interdrain. Les remontées capillaires atteignent 30 cm à l'interdrain et réhumidifient la base de l'horizon argilluvial. Durant le mois d'août, en période de forte demande climatique, la nappe, malgré un arrosage continu, s'abaisse progressivement au-delà de 130 cm de profondeur et la frange capillaire n'est plus observée le front racinaire du maïs situé à 80 cm de profondeur ne bénéficie plus d'une alimentation hydrique optimale. Cette recharge insuffisante de la nappe provient du débit limité d'alimentation en eau du réseau, dû au diamètre trop faible du collecteur, calibré initialement pour le seul drainage. Dans la tranchée de drainage, malgré une saturation prolongée liée à la mise en charge rapide des drains après apport d'eau, il n'y a pas de dégradation apparente de la structure du sol.

Mots clés : Sols hydromorphe - LUVISOL - Redoxisol - Limon -Bresse - Drainage - Irrigation - Recharge de nappe - Irrigation souterraine.

SUMMARY

SUBIRRIGATION: WATER FLOW AND ROOT DYNAMIC IN LOAMY SOIL (LUVISOL-REDOXISOL) OF BRESSE

In France, the use of underground irrigation, in the form of groundwater creation or recharge by the input of water using a subsurface drain network, is relatively recent. This means of watering has been successfully tested on hydromorphic alluvial soils along the Rhône and Aude rivers, as well as in the sandy podzolic soils of the Landes and the Médoc regions. In other countries, this technique has been widely developed, notably in the United States, since the end of the 1970's, under the term 'subirrigation', and in the polders of Holland. Nevertheless, it has not yet been experimented in luvisol-redoxisol type hydromorphic (tabl. 1 et 2) soils, widespread in France and

¹ Laboratoire de Science du Sol - Centre INRA, 2 place Viala - 34060 MONTPELLIER Cedex 01

² Division Ouvrages et Réseaux Hydrauliques - Groupement CEMAGREF de Bordeaux - B.P. 3 - 33611 GAZINET Cedex

³ Ingénieur stagiaire à l'ENGREF de Montpellier. Actuellement, Chef du Service des Aménagements de la Direction Provinciale de l'Agriculture de Taounate - Maroc.

⁴ Chambre d'Agriculture de Saône et Loire - 71270 AUTHUMES

⁵ Au Maroc, cette technique reste méconnue, d'où l'intérêt sollicité par l'un des coauteurs (M. KHADIRI) à diffuser cette communication à l'occasion du XIII^{ème} congrès de la CIGR (Rabat - Février 1998). Auparavant, cet article avait paru dans la revue française : "Etude et gestion des sols", N°2, 1994.

throughout Europe. These soils, however often drained, meet most of the conditions required for the implementation of subirrigation: flat topography nearby water resources and permeable surface horizons. To check the feasibility of this technique an experimental system was set up in 1993 in a farm located on Bresse silt (fig. 1). The objectives, other than the technical aspects, aimed at using the injection of water into the soils, which is characteristic of this kind of watering, to identify and quantify better the water transfers there, whether convective (percolation by preferential paths) or diffusive (capillary rises). The aim was also notably to specify the hydric behavior of the argilic horizons by means of the rise or absence of rise of summer groundwater comparable to that caused by the logging during the rainy season. From June to August 1993, tensiometric and piezometric (fig. 2) readings were taken several times a day and a periodic observation of root profiles was performed in a plot of maize, watered using a drain network installed since 1970. The data collected (fig.4 et 8) show that the water brought in by the drains in fact recharges - through the Btg argilic horizons - groundwater associated with a lenticular sandy aquifer: appearing between 150 and 250 cm in depth. Since June this groundwater has risen by watering to a depth of 100 cm at the mid drain (5-leaf stage maize). It then becomes concave, with a loss of head exceeding 40 cm between the drainage ditch and the mid drain. The capillary rises reach 30 cm at the mid drain and rehumidify the base of the argilic horizon. During the month of August, in the period of high climatic demand, the groundwater: despite constant watering, drops progressively below 130 cm and the capillary fringe is no longer observed: the root front of the maize, situated at a depth of 80 cm, no longer benefits from an optimal supply. This insufficient groundwater recharge thus comes from the excessively low diameter of the network main, initially sized for drainage alone. At the time of rainy periods (mid-June), the groundwater rises up to a depth of 50 cm and, paradoxically (gate closed downstream from the main), the drains nevertheless provide its lowering. In the drainage ditch, prolonged saturation related to the rapid loading of the drains after water input, failed to reveal any apparent degradation of the soil structure.

Key words: Stannic LUVISOL - Bresse - Drainage - Subirrigation - groundwater recharge.



Dispositif expérimental

En France, le recours à l'irrigation souterraine, sous forme de création ou de recharge d'une nappe par apports d'eau à l'aide d'un réseau de drains enterrés est relativement récent (Chossat *et al.*, 1987 Chossat et Favrot 1990). Ce mode d'arrosage a été testé avec succès en sols alluviaux hydromorphes de bordure du Rhône (Meunier, 1987 ; Procopo Burian, 1991) et de l'Aude (ChowToun, 1990), ainsi que dans les sols podzoliques sableux des Landes (Dupin, 1981) et du Médoc (Hargous, 1987). Ailleurs, cette technique est largement développée, notamment aux Etats-Unis depuis la fin des années 1970, sous le terme de "subirrigation" (Strickland *et al.*, 1981 ; Smith *et al.*, 1985 Wright et Adensen, 1987 ; Belcher et Kittleson, 1987 ; Skaggs, 1991) et dans les polders de Hollande (Visser, 1992).

Ce mode d'arrosage n'a toutefois, pas encore été expérimenté en sols hydromorphes du type LUVISOL-REDOXISOL (AFES, 1992) ou lessivé à pseudogley (CPCS, 1967), largement répandus en France et en Europe (Jamagne et Begon, 1984). Ces sols, souvent drainés, répondent pourtant à la plupart des conditions nécessaires pour la mise en œuvre de l'irrigation souterraine : topographie plane, ressources en eau proches, horizons de surface perméables... Pour en vérifier la faisabilité, un dispositif expérimental a été installé en 1993 dans une exploitation agricole située sur limons de Brosse. Les objectifs recherchés débordent cependant les seuls aspects techniques. Il s'agit aussi d'utiliser l'injection d'eau dans les sols, propre à ce mode d'arrosage, pour mieux identifier et quantifier les transferts d'eau, de type convectif (percolation par des chemins préférentiels) ou diffusifs (remontées capillaires). Il s'agit notamment de préciser le comportement hydrique des horizons argilluviaux (AFES, 1992) à travers la formation ou non d'une nappe estivale, comparable à celle qui provoque l'engorgement de ce type de sols en saison pluvieuse. Cette approche complètera l'analyse des restitutions de réseaux expérimentaux de drainage utilisée également dans les mêmes sols pour caractériser les transferts dans les horizons BTg (Zimmer *et al.*, 1991).

Sur le plan technique, le but du suivi a été d'évaluer dans quelle mesure un réseau de drainage initialement conçu pour le seul rabattement d'une nappe hivernale, permettait ensuite une recharge suffisante de celle-ci en été, à la suite d'apports d'eau. La déstabilisation ou non de la structure du matériaux de remplissage de la tranchée de drainage devait être vérifiée. Agronomiquement, il fallait contrôler qu'il était possible de conduire la recharge de la nappe et de réguler les remontées capillaires sus-jacentes, pour les adapter à la vitesse et à la profondeur d'enracinement d'une culture de maïs.

C'est en acquérant et en confrontant des données pédologiques, hydrologiques et agronomiques que l'on a tenté de répondre aux objectifs ci-dessus. Les démarches et les résultats de la campagne de mesures de l'été 1993 sont présentés maintenant.

MILIEU, MATERIEL ET METHODES

Situation et caractéristiques de la parcelle expérimentale

Le site d'étude est localisé dans la petite région naturelle Bresse Chalonnaise. Celle-ci, de topographie générale plane, d'altitude 170 à 250 m, est caractérisée par un climat océanique atténué à forte influence continentale : pluviométrie moyenne annuelle de 790 mm, température moyenne annuelle de 10,6°C. Ce climat provoque dans le sol un excès d'eau printanier une année sur trois et un excès d'eau automnal deux années sur cinq. Les besoins en eau du maïs ne sont satisfaits qu'une année sur deux, avec un déficit important une année sur cinq. En juillet, l'ETM du maïs peut dépasser parfois 5 mm/jour.

Géologiquement, la Bresse Chalonnaise appartient au fossé d'effondrement bressan qui a été comblé par des matériaux fluvio-lacustres assez hétérogènes, avec des variations de faciès latérales et verticales importantes, sous des dépôts limoneux quasi continus.

La parcelle expérimentale est située à St Martin en Bresse (Saône et Loire), à 10 km à l'est de Chalon-sur-Saône. En position sub-horizontale, elle occupe cinq hectares, semés en maïs le 8/5/93 (variété DEA). Elle est équipée d'un réseau de drains espacés de 10 m, profonds de 0,8 à 1,2 m, implantés en 1970 à l'aide d'une draineuse-trancheuse (figure 1). Le diamètre extérieur des drains est de 50 mm, ces derniers étant surmontés d'une couche de graviers de quelques centimètres d'épaisseur. Le collecteur central a un diamètre qui croît de 80 mm à 160 mm, d'amont en aval. Un regard d'alimentation permet d'apporter l'eau à l'extrémité amont. Au milieu de la parcelle, le collecteur est équipé d'un clapet qui permet de réguler le débit de l'eau lors des arrosages. A l'extrémité aval du collecteur, dans un autre regard, une vanne permet de bloquer les écoulements en période d'irrigation.

Le sol de la parcelle (tableau 1) est typique des LUVISOLS-REDOXISOLS largement développés régionalement. Il comprend, au sommet, des horizons Ap et Eg limoneux, poreux (activité biologique), de teinte claire, tachetés de rouille, reposant vers 50 cm sur des horizons argilo-limoneux, bariolés gris et ocre, B₁Tg, B₂Tg, BCg. La structure de ces derniers est nettement prismatique au sommet (B₁Tg, B₂Tg) avec pénétration racinaire verticale, entre les parois très peu poreuses, car comprimées, des prismes. La sous-structure est polyédrique. Vers 60-70 cm, apparaît l'horizon B₂Tg qui peut être considéré comme le plancher quasi-imperméable, au sens hydraulique du terme, du fait de sa faible porosité en période humide. En profondeur, (horizon BCg) vers 100-110 cm la structure devient progressivement lamellaire, avec encore une forte diminution de la porosité. Entre 150 et 250 cm, apparaît un aquifère finement sableux, à distribution spatiale lenticulaire, de couleur rosée caractéristique.

Figure 1 - Schéma du réseau de drainage

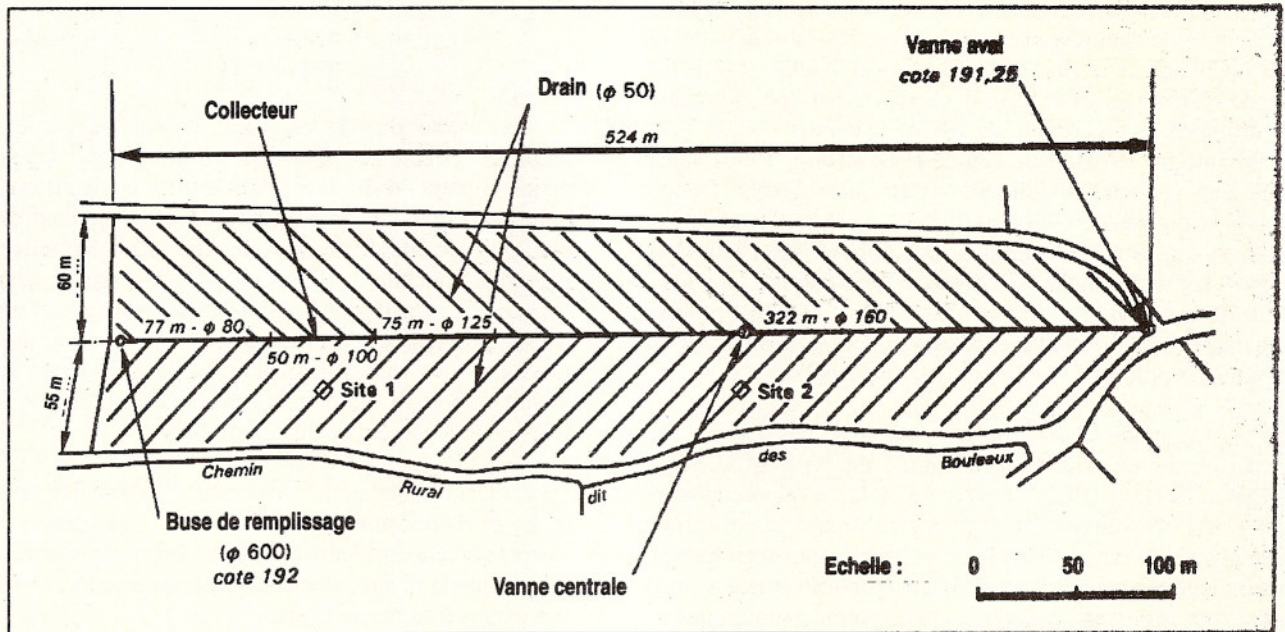


Tableau 1 - Caractéristiques physiques et physico-chimiques du sol de la parcelle étudiée

Profondeur en cm	Horizon	Granulométrie %					MO %	pH eau	N Total 0/00	Complexe Absorbant meg/100g					Fe total %	Mn total %	P Olsen 0/00
		SG	SF	LG	LF	A				CEC	Ca	Mg	K	Na			
0-35	Ap	1,8	19,3	29,6	34,5	14,8	1,63	6,2	0,97	7,1	6,6	0,39	0,51	0,03	1,61	0,35	0,12
35-40	Eg	1,6	16,2	27,6	34,9	19,7	0,86	6,2	0,52	7,4	6,8	0,53	0,45	0,03	1,88	0,47	0,30
50-65	B ₁ Tg	0,8	10,6	22,8	31,2	34,6	0,52	7,2	0,39	12,9	13,5	1,37	0,35	0,05	3,27	0,33	0,01
65-100	B ₂ Tg	0,6	11,2	22,3	31,3	36,6		7,0		16,2	17,5	2,47	0,23	0,12	3,11	0,18	
100-140	BCg	0,5	14,4	19,6	29,7	35,8		7,1		16,7	18,5	2,82	0,18	0,18	3,13	0,23	
140-170	C ₁ g	0,8	22,8	18,5	22,7	35,2		7,1		17,0	20,6	2,87	0,20	0,18	2,82	0,17	
170-200	C ₂ g	1,4	39,6	16,0	16,4	26,6		7,2									

Tableau 2 - Valeurs des densités apparentes sèches mesurées au site 1 dans la tranchée de drainage et dans le massif de sol adjacent, au début et à la fin de la période d'étude. Chaque valeur représente la moyenne de trois mesures (cylindre de 130,09 cm³).

Profondeur en cm	Tranchée de drainage		Sol en place	
	3/6/93	22/9/93	3/6/93	22/9/93
5-10	1,39	-	1,39	-
22-28	1,25	-		
26-31	1,39	-		
35-40	1,50	1,46	1,54	1,58
52-57	1,47	1,46		
57-62	1,47	-	1,51	1,53
62-67	1,54	-		
72-77	1,51	1,47		
80-85	-		1,61	1,65

La densité apparente du sol (tableau 2) passe de 1,3-1,4 dans l'horizon cultivé Ap, à 1,5-1,6 dans les horizons argilluviaux BTg. La réserve utile en eau (R.U.) est de 165 mm pour 100 cm d'épaisseur, selon les valeurs de capacité de rétention et de point de flétrissement mesurées sur presse à plaque en laboratoire sur échantillons remaniés. Des mesures hydrodynamiques, effectuées par la méthode de l'essai de pompage de Guyon (Guyon, 1983) dans le même type de sol en Plaine Dôloise, avaient donné des valeurs de conductivité hydraulique à saturation de 0,09 à 0,14 m/j, et une valeur de porosité de drainage de 0,03 (Bouzigues et Favrot, 1978).

L'eau d'irrigation de la parcelle provient d'un forage distant de 1 200 m, profond de 32 m, au débit exploitable de 55 m³ par heure.

Protocole expérimental

Pour caractériser les transferts d'eau dans le sol, deux sites de mesures ont été installés dans la parcelle, à l'aval (site 1) et à l'amont (site 2) de la vanne centrale. Au site 1, les horizons limoneux sont légèrement plus épais (50 cm contre 40 cm) et les drains sensiblement moins profonds (85cm contre 120cm) qu'au site 2. Chacun des deux sites a été équipé de quatre batteries de tensiomètres à mercure et de piézomètres qui ont été implantées sur le drain, à 1,0 m du drain, à 2,50 m du drain et à l'interdrain (5,0 m). Chaque batterie comprend quatre tensiomètres et trois piézomètres, posés à des profondeurs variant de 30 à 140 cm (figure 2). Ces appareils ont été relevés (manuellement) de trois à six fois par jour, entre le 8 juin et le 30 août 1993. Des piézomètres à enregistrement automatique (capteurs à ultra sons), de 90 cm de profondeur, ont été également installés.

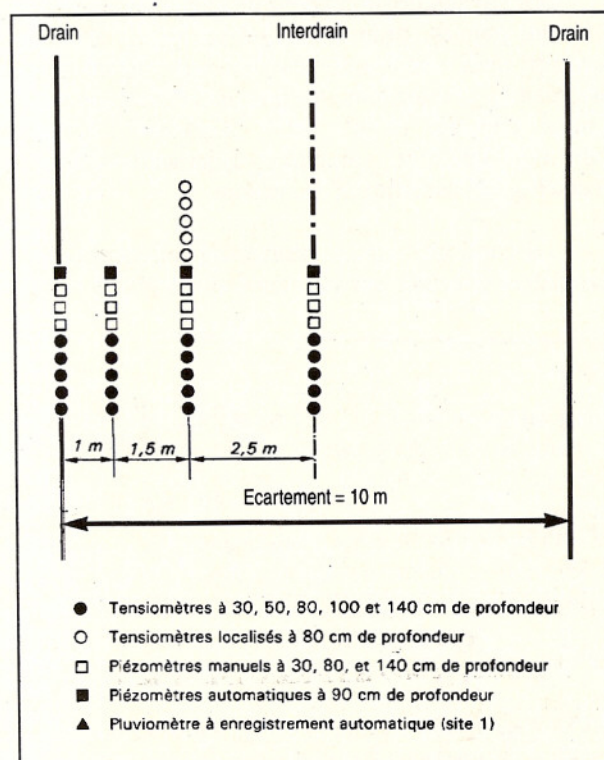
Des profils racinaires ont été observés à trois dates successives : à la floraison mâle du maïs et à deux reprises autour de la floraison femelle. Pour cela, une paroi verticale a été taillée entre deux pieds consécutifs de maïs sur la ligne de semis, et perpendiculairement aux quatre lignes d'un même passage de semoir. L'observation consiste à compter la présence de racines (avec trois options : 0 absence, 1 = 1 racine, 2 = 2 racines ou +) au sein de mailles de 2,2 cm d'une grille appliquée contre la paroi verticale, préalablement rafraîchie au couteau. Les points d'observation sont choisis dans une station au peuplement homogène, de 25 m x 25 m de cotés, autour des sites 1 et 2. Un écart minimum de trois mètres est respecté entre ces points, et également avec les placettes réservées aux mesures des composantes du rendement (nombre de pieds levés/ha, nombre d'épis/ha, nombre de rangs/épi, nombre de grains/épi et poids de mille grains). Sur chaque station, ces placettes, au nombre de quatre, représentent chacune 1/1000^e d'hectares et sont disposées en diagonale sur les lignes du même passage de semoir.

Des suivis tensio-piézométriques et agronomiques comparables ont été réalisés dans une parcelle adjacente,

drainée (écartement : 10 m) et irriguée par aspersion (trois arrosages de 40 mm en août 1993).

Pour estimer l'évolution de la structure et de la porosité du sol dans la tranchée de drainage, des mesures de densité apparente (méthode du cylindre) et des observations morphologiques ont été effectuées sur des profils ouverts début juin et à la mi-septembre 1993.

Figure 2 - Dispositif piézo-tensiométrique des sites 1 et 2.



Les hauteurs de pluie ayant affecté la parcelle étudiée ont été mesurées à l'aide d'un pluviomètre installé au site 1. Durant la période d'observation, il est tombé 149 mm. Un bilan hydrique climatique a été établi pour cette même période (figure 3). A noter que des cycles d'irrigation souterraine avaient déjà été effectués en 1972 puis en 1992 dans la parcelle expérimentale.

Les volumes d'eau apportés à chaque arrosage ont été comptabilisés grâce à un compteur débit métrique placé sur la conduite d'amenée. Au total, compte tenu des précipitations assez abondantes des mois de juin et de juillet, trois cycles d'arrosage par drains enterrés ont été suivis : du 8 au 13 juin (155 m³/ha au total), du 17 au 23 juillet (247 m³/ha), du 26 juillet au 26 août (1042 m³/ha). Le débit maximal d'injection d'eau dans les drains, par suite du diamètre limité du collecteur à l'amont, n'a été que de 8 m³/ha, soit 3,84 mm/jour en pleine phase d'irrigation (figure 3).

RESULTATS

Seront abordés successivement dans ce chapitre les résultats concernant la métrologie utilisée, les suivis hydrologiques, les observations sur les tranchées de drainage et la dynamique de l'enracinement du maïs.

Comparaison entre données piézométriques et tensiométriques

Les valeurs de profondeur de nappe en un point et à un instant donnés, déduites de relevés piézométriques et tensiométriques, ne sont pas toujours rigoureusement concordantes, compte tenu des milieux et des conditions de mesures (Bouma et *al.*, 1980 Zimmer, 1989). Une vérification de cette variabilité éventuelle a donc été effectuée sur la parcelle expérimentale.

La confrontation des relevés de tensiomètres et de piézomètres effectués sur un même site a révélé alors une

bonne concordance d'ensemble pour l'évaluation de la profondeur de la nappe. En particulier, lorsque la remontée de la nappe est provoquée par l'irrigation souterraine, à l'interdrain et sur le drain, le décalage est faible, de l'ordre de quelques centimètres (figure 4) entre données tensiométriques et piézométriques.

Par ailleurs, pour vérifier la variabilité à courte distance des données tensiométriques, une batterie de cinq tensiomètres distants de quelques décimètres a été implantée à 80 cm de profondeur, au sein de l'horizon argilluvial BTg, dans chacun des sites 1 et 2 (figure 2). Comme précédemment, alors que les écarts sont très faibles à la suite d'une irrigation souterraine, des différences temporaires de -10 à -15 mb sont observées entre tensiomètres à la suite d'une pluie.

Par la suite, les profondeurs de nappe indiquées seront déduites des données tensiométriques, plus sensibles aux mouvements instantanés de l'eau dans le sol.

Figure 3 - Précipitations (P), apports d'eau d'irrigation (I) et bilan climatique cumulé (BC) en mm.

$$BC = ETP (\text{évapotranspiration potentielle}) - (P + I).$$

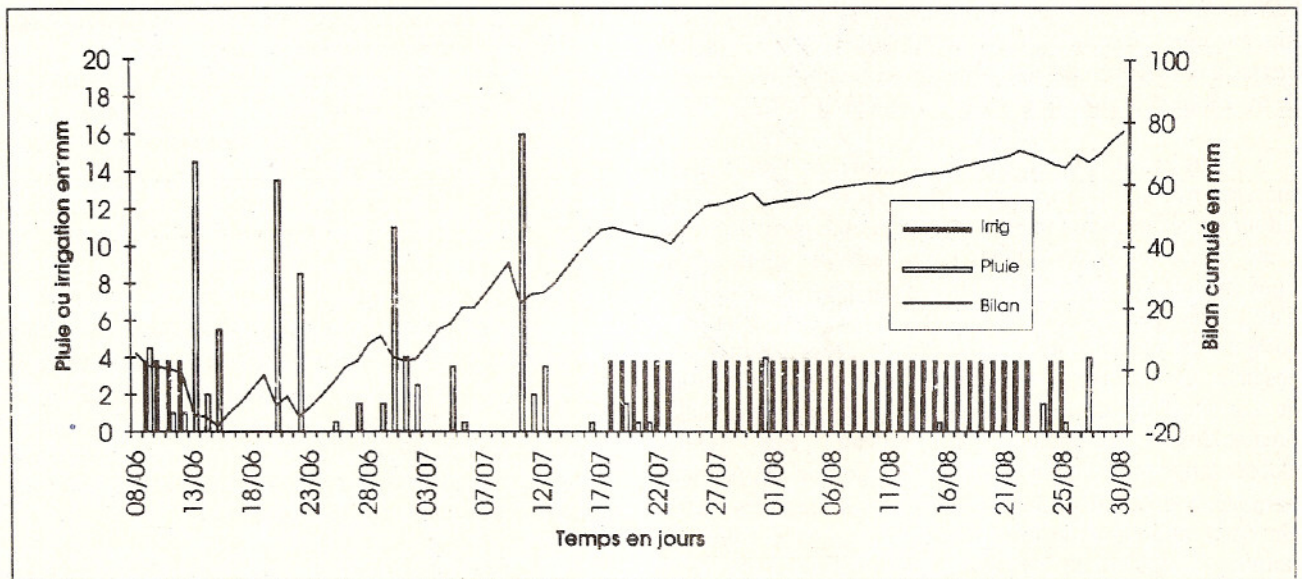


Figure 4 - Evolution du niveau de la nappe mesurée par piézométrie (p) et par tensiométrie (t), selon la séquence drain-interdrain, lors du premier arrosage.



Cinétique de la nappe

Pour simplifier la présentation des résultats, seules les données acquises au site 1, le plus représentatif du contexte pédologique et hydrologique régional, seront exposées (figures 3 à 8).

Au cours de la période étudiée, en fonction du cycle végétatif du maïs et des conditions climatiques, trois phases principales ont été distinguées (figure 3) :

- la première, du 8 au 13 juin, marquée par une faible demande climatique du maïs, est celle du premier cycle d'arrosage par les drains,
- la seconde, du 14 juin au 15 juillet correspond à une succession d'épisodes pluvieux rapprochés,
- la troisième, enfin, coïncide avec une période très sèche au cours de laquelle l'irrigation souterraine a été menée pratiquement en continu du 17 juillet au 26 août.

Les résultats des suivis tensiométriques vont être présentés maintenant, en fonction de ces trois phases.

Premier cycle d'arrosage

Avant la mise en œuvre du premier arrosage, les relevés (figure 4) montrent que la nappe se situait vers 130 cm de profondeur, avec un profil drain-interdrain quasi horizontal.

La mise en eau provoqua alors une nette remontée de cette nappe, avec une cinétique contrastée entre le matériau remanié de la tranchée de drainage et le sol en place : alors qu'au dessus du drain la nappe remonte très rapidement de 130 à 75 cm de profondeur (vitesse de 50 cm/jour), puis plus lentement de 75 à 60 cm (6 cm/jour), à l'interdrain

la nappe ne remonta que de 130 à 105 cm, avec une vitesse initiale de 21 cm/jour et une vitesse finale de 4 cm/jour.

La forme de la nappe rechargée est nettement concave, avec notamment une forte perte de charge (40 cm) constatée dès le premier mètre à partir de la tranchée de drainage (figure 4). Entre 1 m et 5 m (interdrain) la perte de charge n'est plus que de quelques centimètres.

Phase pluvieuse

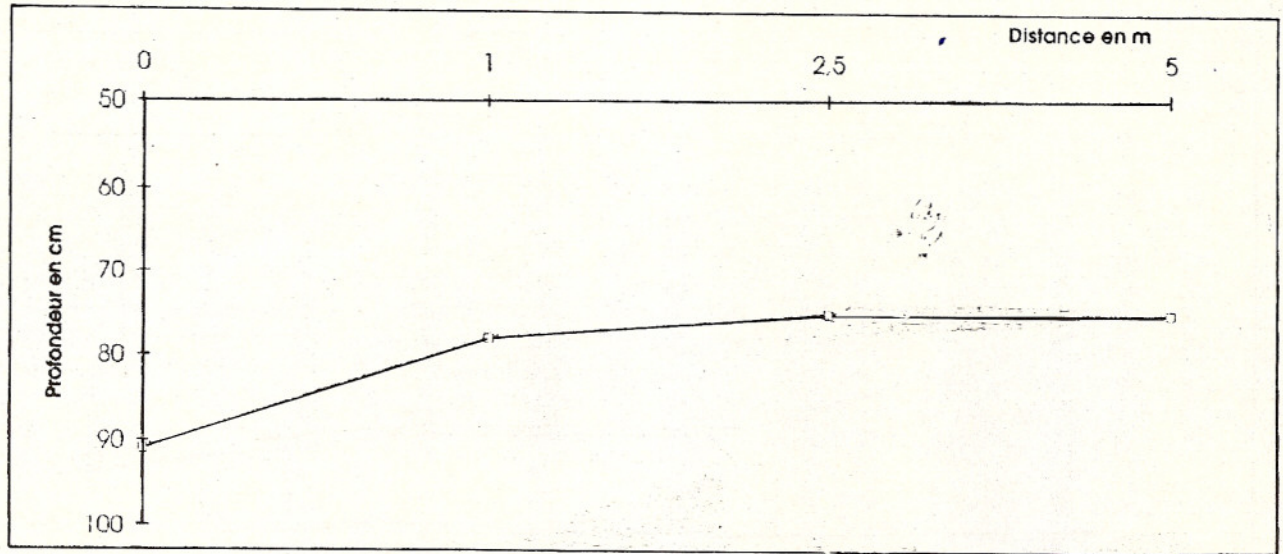
Lors des fortes précipitations de juin et juillet 1993, la nappe a pris une forme convexe totalement inversée par rapport à celle obtenue lors de la phase de remontée acquise à la suite de l'irrigation (figure 5). Durant la première, décennie de juillet, le sommet de la nappe a subi des fluctuations nombreuses et rapides à l'interdrain. Les vitesses de remontées ou de rabattement de la nappe, entre 70 et 105 cm de profondeur, ont été de l'ordre de 20 à 30 cm/jour.

Phase de forte demande climatique

Au cours de l'irrigation souterraine continue, et notamment entre le 27 juillet et le 27 août, la cinétique de la nappe a présenté certaines analogies avec celle observée lors du premier arrosage, la remontée étant en particulier toujours nettement plus importante au dessus du drain qu'à l'interdrain.

Toutefois, durant cette période sèche, l'ampleur de la recharge a été beaucoup plus faible. En effet, à l'interdrain, le niveau de la nappe n'est remonté qu'à 120 cm de profondeur, pour redescendre ensuite progressivement à 140 cm. A la verticale du drain, la saturation du sol n'a été maintenue que jusqu'à 95-100 cm de profondeur.

Figure 5 - Forme de la nappe selon la séquence drain-interdrain après les pluies du 29/06 au 30/07/93 (tensiométrie).



Remontées capillaires

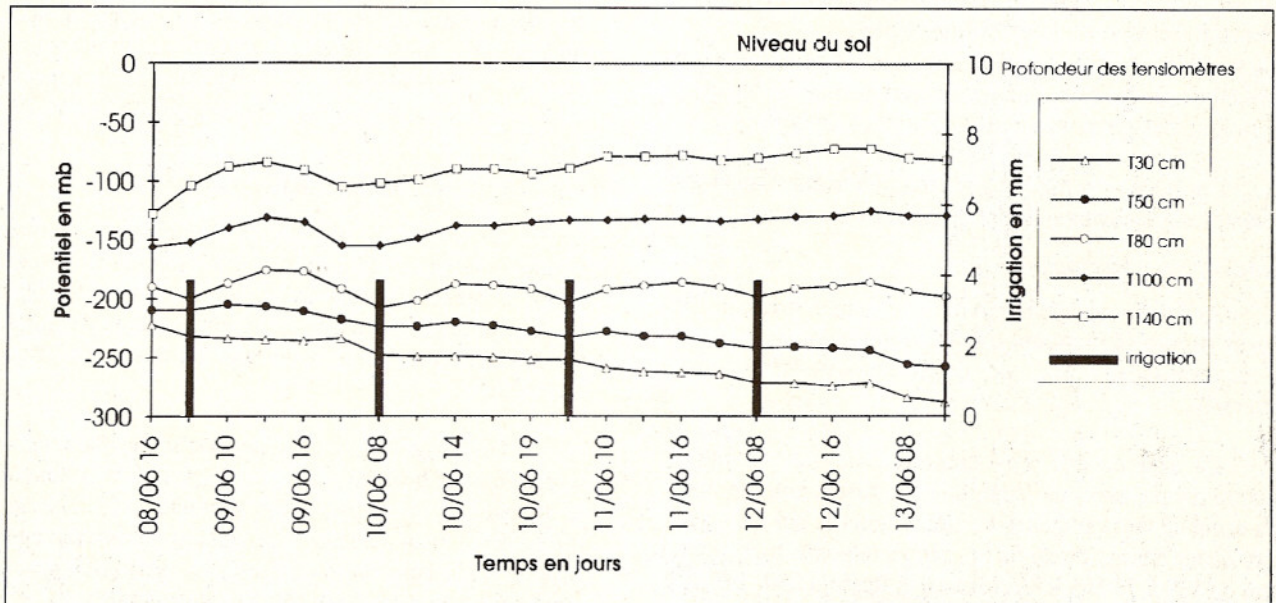
Grâce aux profils tensiométriques, il a été possible de suivre l'évolution des remontées capillaires au cours des deux phases climatiques sèches.

Premier arrosage

Lors de la période du 8 au 13 juin, à l'interdrain (figure 6), seul le tensiomètre situé à 140 cm de profondeur a affiché des pressions positives (chiffre de la pression observé sur le tensiomètre supérieur à la profondeur de ce dernier), traduisant la présence de la nappe dont le sommet

se situait vers 105 cm. Les tensiomètres moins profonds ont révélé des pressions négatives matérialisant un milieu non saturé. Toutefois, alors que le potentiel total des tensiomètres posés à 30 et 50 cm décroît avec le temps, pour les tensiomètres situés à 80 et 100 cm, l'évolution des pressions a été très comparable à celle constatée pour le tensiomètre 140 (courbes parallèles). A ces deux profondeurs, avec des valeurs voisines de -150 et -180 mb, les potentiels mesurés sont restés constants ou ne se sont élevés que très légèrement durant la période d'apport d'eau. Cette évolution concomitante traduit l'existence d'une frange capillaire qui, pour une profondeur de la nappe de 105 cm, a dépassé 25-30 cm de hauteur.

Figure 6 - Evolution du potentiel total à l'interdrain, durant la première irrigation.



Malgré un apport d'eau continu dans le sol à partir du 26 juillet, on a constaté un abaissement progressif du potentiel total des tensiomètres, ordonné selon la profondeur. Ainsi à l'interdrain (figure 7), le tensiomètre posé à 30 cm a décroché le premier lorsque le potentiel s'est abaissé au dessous de -800 mb. Ensuite, ont décroché successivement les tensiomètres installés à 50, 80 et 100 cm. En revanche, le tensiomètre situé à 140 cm a affiché toujours des pressions positives malgré un léger abaissement du potentiel total, synchrone du rabattement de la nappe. L'évolution ordonnée des tensiomètres supérieurs a donc résulté de l'épuisement progressif, de haut en bas du profil, des réserves en eau du sol. Le faible abaissement du potentiel à 140 cm de profondeur a traduit un transfert ascendant de l'eau par diffusion capillaire vers le système racinaire du maïs. Ces mouvements ascensionnels sont confirmés par le gradient vertical négatif de potentiel total constaté durant toute la période entre les tensiomètres situés à 100 et 140 cm de profondeur.

Saturation et stabilité structurale dans la tranchée de drainage

Les relevés tensiométriques effectués dans la tranchée de drainage du site 2 (drain à 120 cm) ont montré que durant les 37 jours d'arrosage, les matériaux de remplissage de la tranchée de drainage (graviers au contact des drains et sol remanié) ont été constamment saturés entre 100 et 120 cm de profondeur. Au site 1, où le drain est moins profond (85 cm), il y a eu saturation permanente pendant une dizaine de jours sur plusieurs cm d'épaisseur au dessus du drain.

Malgré ces durées, qui excèdent largement le seuil de tolérance pris en compte pour le dimensionnement des réseaux de drainage (de l'ordre de 48 h/an), les examens morphologiques visuels, effectués avant et après la période de suivi hydrologique, n'ont pas relevé de colmatage de

pores dans le matériau terreux, ni d'aggravation de la contamination argileuse du remblai graveleux. D'autre part, les valeurs de densité apparente (tableau 2) sont restées les mêmes, avant et après irrigation. Elles correspondent à une porosité totale de 42 à 45 % en dessous de l'horizon labouré. Dans le sol en place adjacent, la porosité totale passe de 42-43 % dans l'horizon BTg à 38-39 % dans l'horizon BCg.

Ce même constat a été fait dans des sols alluviaux hydromorphes de texture comparable (Meunier, 1987 ; Visser, 1992).

A l'intérieur des drains, un dépôt argilo-limoneux de 1,6 cm d'épaisseur au site 1 et de 0,7 cm au site 2 a été observé, sans variation significative d'épaisseur après irrigation. Ce dépôt était absent dans d'autres drains de la parcelle.

Cinétique d'enracinement et composantes du rendement du maïs

Le tableau 3 montre l'évolution dans le temps des profondeurs maximale et moyenne d'enracinement (densité racinaire supérieure à 5 %) du maïs arrosé après un accroissement rapide, cette profondeur augmente peu au delà de la floraison femelle et se situe alors autour de 80 cm au site 1. Par ailleurs, la profondeur d'apparition, sous les pieds de maïs, de zones vides de racines sur 20 cm de largeur - révélatrice de la répartition spatiale de la colonisation racinaire - varie de 70 cm au site 1 à 62 cm au site 2. Dans les deux sites, il y a donc colonisation partielle de l'horizon argilluvial B₂Tg.

Concernant les valeurs des composantes du rendement (tableau 4), il apparaît que la valeur de 3500 grains par m² - qui est considérée comme optimale dans le milieu régional - a été dépassée alors que le poids de mille grains est très en dessous de l'optimum de la variété DEA qui est située à 300 g dans le contexte régional.

Figure 7 - Evolution du potentiel total à l'interdrain, en phase de forte demande climatique, lors de l'irrigation souterraine.

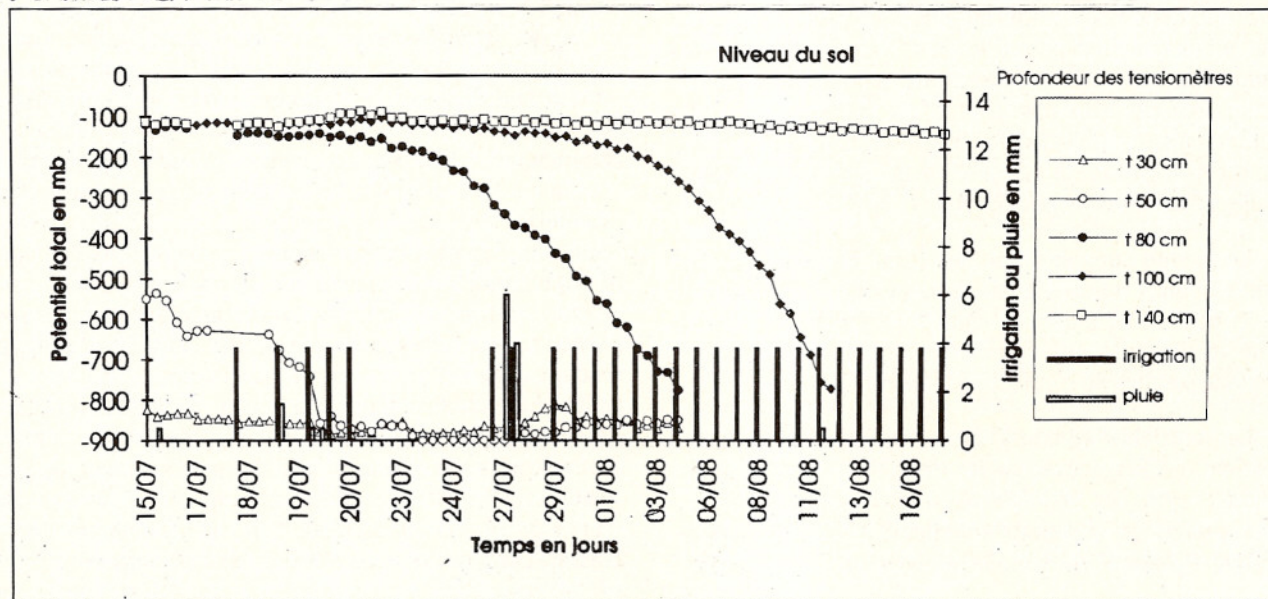


Tableau 3 - Caractéristiques de l'enracinement du maïs au site 1. à trois dates successives.

Date	1 ^{er} juillet 1993			13 juillet 1993			22 juillet 1993		
Stade végétatif	panicule mâle sensible			début floraison			3j post floraison femelle (Flo. Fem. + 35%.base 6°C)		
Taille des plantes	2,10 m			2,50			> 2,70 cm		
Densité racinaire	% cases avec			% cases avec			% cases avec		
Profondeur	0 racine	1 r.	2 r.	0 racine	1 r.	2 r.	0 racine	1 r.	2 r.
de 0 à 31 cm	66	15	19						
de 31 à 45 cm	86	8	6	75	15	10	77	17,5	5,5
de 45 à 55 cm	97,5	2	0,5	92,5	4,5	3	81,5	15	3,5
de 55 à 68 cm				95	4	1	85,5	12	2,5
de 68 à 79 cm				91,5	8	0,5			
Racine la plus profonde	53 cm			70 cm			> 79 cm		
Profondeur d'apparition d'une densité racinaire supérieure à 5 %	48 cm			64 cm			> 79 cm		
Profondeur d'apparition d'une densité racinaire supérieure à 10 %	40 cm			44 cm			66 cm		

Tableau 4 - Composantes du rendement du maïs relevées sur des placettes proches des sites 1 et 2.

	pieds levés 10 ³ ha ⁻¹	épis/ m ²	rangs/ épi	grains/ épi	grains/ rang	grains/ m ²	PMG à 15%	Rendement à 15 %	humidité moyenne %
Site 1	109,0	103,5	13,0	340	26,1	3518	257,3	90,5	35,6
Site 2	110,2	108,5	13,1	353	26,9	3828	236,1	90,4	30,8

PMG à 15 % : poids de mille grains à 15 % d'humidité.

DISCUSSION

Effets des horizons argillivieux sur les transferts hydriques

L'interprétation des données hydrologiques conduit à plusieurs constats.

Le **premier** est que l'apport d'eau dans le sol en période estivale ne se traduit pas par la création d'une nappe perchée mais par la recharge et la remontée de la nappe contenue dans les matériaux sableux apparaissant entre 150 et 250 cm de profondeur. La conductivité hydraulique des horizons BTg et BCg est en effet suffisante pour cela, comme le montre la vitesse de remontée de la nappe entre 140 et 80 cm qui peut atteindre 20 cm/jour. L'horizon B₂Tg ne constitue donc pas un niveau strictement imperméable comme le laisseraient supposer les observations de sa porosité apparente. De telles possibilités d'oscillation d'une nappe au sein des horizons argillivieux avaient déjà été constatées dans des luvisols -REDOXISOLS du Faux Perche et des terrasses de la Garonne, avec des nuances liées aux faciès structuraux de ces horizons (Zimmer *et al.*, 1991).

Le **second constat** a trait aux résultats des piézomètres automatiques (relevés à pas de temps horaire) obtenus durant la période de pluies (14 juin - 15 juillet). Ces derniers ne mettent pas non plus en évidence de formation d'une nappe perchée au sommet de l'horizon B₂Tg.

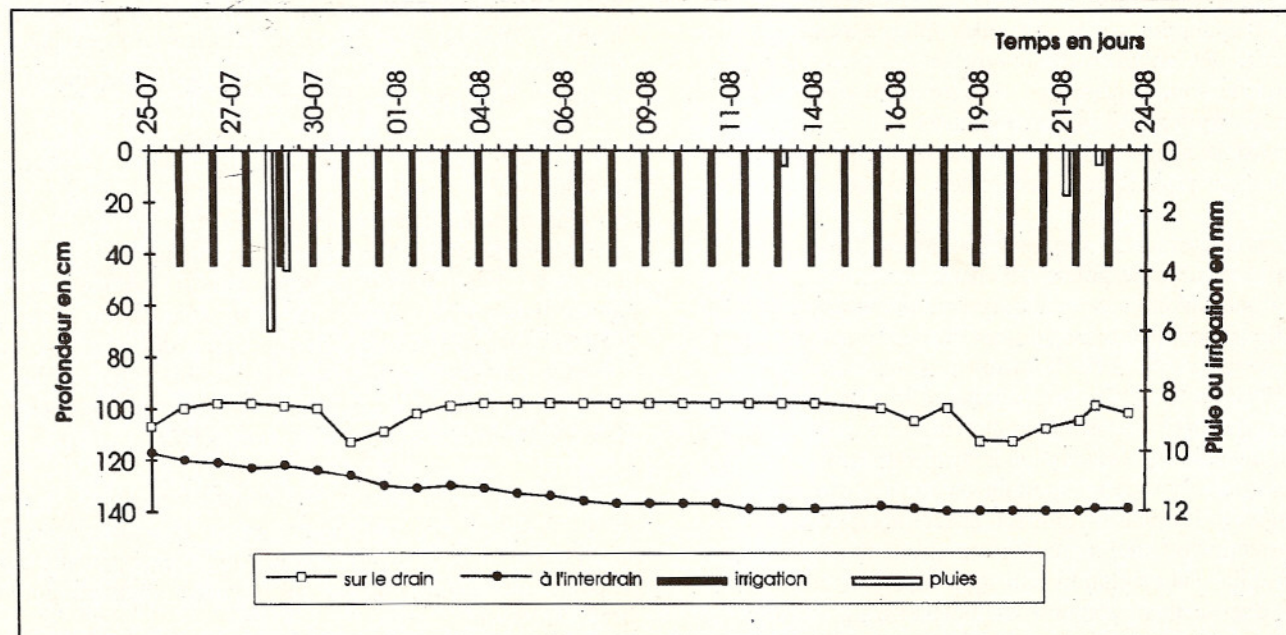
Le **troisième constat**, est, qu'en période humide comme lors des irrigations par les drains, il y a continuité hydraulique entre les couches de surface saturées et les couches profondes occupées initialement par la nappe souterraine. Comme en période d'irrigation, malgré une

charge hydraulique accrue, un équilibre hydrostatique est constaté dans cette nappe le même potentiel tensiométrique étant en effet noté sur les divers tensiomètres. Ceci traduit aussi l'absence d'infiltrations profondes.

Le **quatrième constat** concerne l'existence de transferts hydriques en milieu non saturé. Ces transferts se traduisent soit par la frange capillaire de 25 à 30 cm d'épaisseur constatée lors du premier arrosage, soit par des mouvements diffusifs ascensionnels mis en évidence lors de la période très sèche. Cette ascension capillaire apparaît entre le front racinaire située à 80 cm de profondeur et le sommet de la nappe, lequel s'abaisse progressivement de 120 à 140 cm de profondeur au cours du mois d'août (figure 8).

Le **dernier constat** est que la structure des horizons argillivieux explique la double possibilité de transferts convectifs et diffusifs (Bouzigues et Favrot, 1984). En effet, les premiers sont autorisés par les vides fissuraux et biologiques (lombrics, racines), même très modestes, existant à l'interface des blocs structuraux prismatique. Les seconds sont rendus possibles par la microporosité constatée au sein des prismes, microporosité également d'origine biologique (radicelles) et physique, celle-ci étant liée à l'ajustement fort des polyèdres constituant la sous-structure. La réalité des transferts convectifs peut être déduite notamment des écarts, de l'ordre de 10 à 15 mb, relevés entre tensiomètres de même profondeur (80 cm) lors des pluies, écarts s'expliquant par la localisation de tensiomètres à la fois au centre des unités structurales prismatiques et à leurs interfaces, lesquelles constituent les zones de transferts préférentiels. Le même phénomène a été signalé par Bouma *et al.* (1980) en sols argileux.

Figure 8 - Evolution de la profondeur de la nappe, sur le drain et à l'interdrain, en phase de forte demande climatique.



Pérennité de la tranchée de drainage

L'un des risques importants pouvant découler de l'irrigation souterraine en LUVISOL-redoxisol est la déstabilisation de la structure des matériaux de remplissage de la tranchée de drainage, avec diminution de la porosité, par suite de leur saturation prolongée. Les valeurs relativement élevées des indices d'instabilité structurale (tests Henin) constatées dans ces sols vont dans ce sens (log 10 Is # 1,3-1,5).

Toutefois, malgré les cycles d'arrosage opérés en 1970, 1992 puis 1993, nos observations et mesures de 1993 n'ont pas révélé d'altérations structurales et porales visibles. Des observations périodiques sont néanmoins nécessaires pour confirmer ce premier constat favorable. Trouche (1981) constate toutefois, en laboratoire, que malgré un tassement progressif du matériau de remplissage de la tranchée après des phases périodiques de saturation, il n'y a pas de modification significative du débit du drain par rapport à une tranchée non soumise à une saturation prolongée.

Concernant le colmatage minéral interne des drains, les cycles d'irrigation souterraine ne semblent pas aggraver ce phénomène. En fait, dans la parcelle étudiée, compte tenu de la grande variabilité de l'épaisseur des dépôts constatée d'un drain à l'autre, il semble bien que le colmatage soit attribuable à la technique de pose des drains utilisée en 1970 (guidage par nivelettes), technique conduisant à une certaine irrégularité de la profondeur des drains. La technologie actuelle (guidage laser) limite heureusement les imperfections de pose et les éventuels risques de colmatages en LUVISOL-redoxisol et évite donc les inconvénients liés à ce phénomène (accroissement des

pertes de charge et réduction de la section efficace).

Recharge de la nappe et dynamique racinaire

Techniquement, l'objectif de l'irrigation à partir de drains enterrés est d'adapter la recharge de la nappe à l'abaissement progressif puis à la stabilisation du front racinaire du maïs, compte tenu de l'importance des remontées capillaires. Il s'agit en particulier d'assurer une alimentation hydrique optimale lors de la levée puis de la floraison mâle du maïs.

En 1993, par suite des épisodes pluvieux, cet objectif a été pratiquement atteint. En effet, le système racinaire du maïs, descendu progressivement à 80 cm de profondeur a partiellement colonisé les horizons argillivieux B₁Tg et B₂Tg et a coïncidé à la floraison avec une profondeur de nappe pas trop élevée. De même, lors du premier arrosage, le front racinaire peu profond (moins de 50 cm) a pu bénéficier néanmoins d'une alimentation hydrique suffisante, grâce à la frange capillaire importante (25-30 cm) surmontant la nappe et aux flux ascensionnels sus-jacents, révélés par l'existence d'un gradient et potentiel vertical négatif.

Cependant, l'abaissement progressif du sommet de la nappe à partir de la mi-juillet n'a pas permis une alimentation hydrique optimale. Il montre que malgré des apports d'eau continus, certaines périodes ou années très sèches, il ne sera pas possible de remonter la nappe à une hauteur compatible avec une faible profondeur d'enracinement. Cette impossibilité est ici conjoncturelle car liée au dimensionnement insuffisant de la partie du réseau étudié, lequel limite le débit d'injection d'eau à 38 m³/ha/jour.

Modes d'irrigation et rendement du maïs

Par rapport à la parcelle adjacente arrosée par aspersion, les volumes d'eau mis en jeu pour l'irrigation souterraine sont supérieurs : 1 440 m³/ha contre 1 200 m³/ha. La comparaison des rendements bruts n'est toutefois pas possible à cause d'un écart de semis de 18 jours et surtout d'une phytotoxicité accidentelle de désherbage.

L'analyse des composantes du rendement montre que si le nombre de grains par mètre carré, élevé, indique que l'alimentation en eau du maïs a été bien assurée dans la parcelle subirriguée jusqu'au seuil d'avortement des grains (2000 en base 6°C post floraison femelle) intervenu le 3 août 1993, en revanche, le poids de mille grains est très en dessous de l'optimum de la variété DEA. Ce dernier constat traduit un déficit d'alimentation hydrique du maïs à partir de début août et un écart important du régime d'alimentation en eau entre les phases floraison et remplissage des grains. Alors que le potentiel de rendement se situait à la floraison à 110 q/ha, l'alimentation hydrique incomplète en fin de cycle, due au débit d'apport d'eau insuffisant, a limité le rendement final à 90 q/ha.

Conception des réseaux

A l'image du réseau étudié, le dimensionnement actuel des anciens réseaux de drainage ne garantit pas une alimentation hydrique suffisante du maïs, par irrigation souterraine, lors de périodes très sèches. Pour remédier à cela, deux modes d'action sont à envisager :

- pour les réseaux en place, il conviendra de réaménager les dispositifs existants, soit en installant plusieurs regards d'alimentation en eau le long des collecteurs principaux, soit en reliant les extrémités amont des drains à de gros collecteurs de ceinture.
- pour de nouveaux réseaux, il faudra prévoir dès la conception des regards d'alimentation et un dimensionnement des collecteurs adaptés à la double fonction d'irrigation et de drainage. En l'absence de démonstration contraire, il apparaît prudent de recourir à un remblai poreux (graviers) au dessus des drains.

Concernant le diamètre extérieur de ces derniers, certains auteurs préconisent des valeurs plus élevées que 50 mm, pour réduire les pertes de charge qu'ils attribuent à une superficie linéaire insuffisante des perforations, augmentant la résistance de sortie de l'eau des drains (Bounival *et al*, 1987 Mohamad et Skaggs, 1984). La rapide remontée de l'eau de saturation dans les tranchées de drainage après apport d'eau nous permet de penser qu'en LUVISOL redoxisol le diamètre habituel (50 mm) sera suffisant.

CONCLUSION

Dans les LUVISOLS REDOXISOLS de Bresse, l'irrigation souterraine à l'aide de réseaux de drains posés à

la draineuse trancheuse est possible techniquement. Elle repose sur la recharge d'une nappe souterraine associée à un aquifère sableux et bénéficie de la structure favorable des horizons argillivieux qui autorisent à la fois une ascension rapide de la nappe et des remontées capillaires.

Moyennant des adaptations des réseaux en place ou des nouveaux, ce mode d'arrosage peut s'avérer intéressant au plan régional. Par rapport à l'irrigation par aspersion, il compense des exigences en eau sensiblement plus élevées par de moindres frais d'investissement (le drainage est de toutes façons nécessaire) et de main d'œuvre. En outre, la portance des sols pour les interventions culturales n'est pas affectée par les cycles d'arrosage. Enfin, cette technique limite les risques de pollution des nappes par entraînement des nitrates et pesticides (Kalita *et al*, 1992).

Néanmoins, en vue d'une meilleure conception et d'une conduite optimale de réseaux à la double fonction d'irrigation et de drainage, des travaux expérimentaux sont à poursuivre lors des années qui viennent, dans aux moins trois directions :

- la réalisation d'essais au champ avec des réseaux posés à la draineuse trancheuse garantissant des apports d'eau suffisants pour remonter la nappe à une profondeur adaptée à l'alimentation en eau des racines et - si nécessaire - jusque vers la surface du sol.
- la réalisation d'essais au champ avec des réseaux posés à la draineuse sous-soleuse et sans remblai poreux, technique la plus répandue actuellement.
- et l'adaptation de modèles tels que SIDRA (Lessaffre, 1988 ; Zimmer, 1992), Drainmod (Tang et Skaggs, 1977 Skaggs, 1991) et Swadre (Van Bakel, 1973), facilitant une généralisation de la conception et de la mise en œuvre de cette technique dans d'autres régions françaises.

BIBLIOGRAPHIE

1. A.F.E.S. (1992) : Référentiel pédologique. Ouvrage collectif. INRA éditeur Paris, 222 p.
2. Belcher H.W., Kittleson (1987) : Regional approach to subirrigation planning. ASAE paper n° 87 - XXXX. 1987 International Winter Meeting of the ASAE.
3. Bouma J., Dekker L.W., Haans J.C.F.M. (1980). Measurement of depth to water table in heavy clay soil. Soil Science Vol. 130.5,264-270.
4. Bounival P., Prasher S., Von Hoyningen Huene B. and Broughton R.S. (1987): Measurements of head losses in a subirrigation system. Transactions of the ASAE. v. 30, (1). 183-186.
5. Bouzigues R., Favrot J.C. (1978) : Etude pédologique dans la plaine dôloise (jura). INRA Montpellier n°333, rapport 217 p.
6. Bouzigues R., Favrot J.C. (1984) : Analyse morphologique de la porosité des horizons Bg de deux sols lessivés à pseudogley. Actes du colloque AFES

ETUDE ET AMELIORATION DES TURBINES HYDRAULIQUES UTILISEES POUR L'ENTRAINEMENT DES MOULINS A GRAIN DANS LES ZONES MAROCAINES DE MONTAGNE

B. BOUZRARI¹, S.A. DAHMAN¹ et M. EDDBAB²

SUMMARY

In Moroccan mountain regions, hydraulic energy is taken by multi-blade turbine and transformed into mechanical energy for milling grain (wheat, barley, maize, peas and so forth). These machines, traditionally made of local materials, are fragile and characterized by a weak efficiency (6 à 15 Kg/h) but they are not pollutant and make out a good and multivariated flour's texture. The present work try to study the performances of these machines of milling in the field and in the laboratory and suggest some improvement and propose another kind of turbine able to ameliorate the yield and to be used for small electrification so needed in developing the mountain's region.

Key words: energy, mill, turbine, multi-blade, Banki, hydraulic, pollution, mountain's region, Morocco, cereal.

I- INTRODUCTION

Au Maroc, le problème posé par l'accès à l'énergie dans le monde rural est particulièrement préoccupant dans les zones de montagne du Rif et de l'Atlas. Dans ces milieux enclavés et pauvres, les habitants vivent d'une agriculture traditionnelle pluviale ou irriguée (arbres fruitiers, maraichage, céréales, etc...) associée à un élevage généralement extensif. Ce système de production repose sur l'exploitation de trois types d'énergies: humaine, animale et hydraulique qui est utilisée uniquement pour la mouture des grains. Dans ce dernier cas, l'énergie potentielle des eaux en chute est captée par des turbines traditionnelles à pales qui la transforment en énergie mécanique transmise aux meules par un axe vertical en bois.

Les régions où on rencontre les moulins à turbine hydraulique sont l'axe Marrakech-Taroudant au Sud du pays, la région de Demnat et Azilal au Centre, les provinces de Riche et Midelt au Centre-Est, Boulemane, Imouzzet et Fes au Centre-Nord et la partie du croissant Rifain comprenant les provinces de Taza, Ouezzane, Chefchaouen et Tetouan. Les moulins hydrauliques utilisés dans ces zones sont construits par les artisans à partir de matériaux locaux et en provenance de l'extérieur.

Les moulins hydrauliques actuellement utilisés au Maroc se caractérisent par une capacité d'écrasement assez médiocre influencée par un débit subissant d'importantes fluctuations journalières et saisonnières dues à une gestion assez complexe du tour d'eau d'irrigation et aux sécheresses que connaît le pays. Selon Lukobeka (1982), dans un village de Demnat, on change pales et meules suivant les saisons : meule de 60 cm de diamètre et turbine de 16 pales en période de faible débit pour une capacité d'écrasement de 6 Kg/h de blé et meule de 70 cm de diamètre et turbine de 24 pales le reste du temps.

L'augmentation sans cesse croissante de la demande, la faiblesse du potentiel hydraulique causé par les fortes sécheresses, le faible rendement des moulins, la pénurie en bois fortement ressentie et qui est due à un déboisement assez prononcé, l'inexistence d'infrastructure de base, la confection assez approximative des organes de l'appareil, sa grande fragilité et sa durée de vie assez limitée à cause du pourrissement des éléments de la turbine qui travaillent continuellement dans l'eau sont autant d'éléments qui incitent à améliorer le moulin hydraulique et/ou le substituer par une conception mécanique plus performante et utilisant la même source d'énergie.

¹ Enseignants Chercheurs, Département du Machinisme Agricole, IAV Hassan II, Rabat.

² Ingénieur Agronome, ORMVA Ouarzazate.

II- OBJECTIF DU TRAVAIL

L'objectif du présent travail s'attelle aux points suivants :

- Etudier les performances techniques, les conditions d'utilisation et le coût des moulins traditionnels en vue de proposer des améliorations;
- Dimensionner, construire et essayer une turbine Banki (Cross-Flow) susceptible de s'adapter aux conditions et aux exigences du milieu dans lequel est utilisé le moulin traditionnel.

III- METHODE D'ETUDE

Pour étudier les moulins hydrauliques en milieu réel nous avons réalisé une enquête dans cinq régions différentes: la vallée d'Imlil et Arned à Asni (9 moulins), la vallée de l'Ounein (35 moulins), la plaine de Tahnaout (16 moulins), les cascades d'Ozode (4 moulins), la région d'Ouzzane (3 moulins). Les données collectées sur le terrain ont été complétées par des informations se rapportant au sujet se trouvant dans les rapports du stage de ruralisme de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II et dans quelques rapports, ouvrages et mémoires de fin d'étude qui se sont intéressés au thème (Belaiche, 1981; Haddadi et Jaboun, 1980; Pascon, 1982; Lukobeka, 1982; Bouderbala et al. 1984; Boukaaba, 1984; Crepeau, 1984; Haverson, 1984; Creswell, 1987; Eddbab, 1993). Le travail de terrain s'est intéressé à plusieurs points tels que :

- les dimensions, le poids des organes et les matériaux de fabrication (nature, disponibilité, prix, ...);
- les problèmes de fluctuations annuelles, saisonnières et journalières du débit;
- les capacités d'écrasement et la qualité du produit obtenu;
- les problèmes d'utilisation: entretien, réparation, réglages, ergonomie et coût de production.

Les débits d'eau ont été mesurés suivant les sites soit à l'aide du déversoir de Bazin soit au moyen d'un bac répartiteur à quatre sorties. Le poids, les dimensions et les angles ont été déterminés par les instruments adéquats. La capacité d'écrasement a été estimée à partir de 5 échantillons de grains recueillis chacun à la sortie du trébuchet pendant une durée de 10 secondes et espacés de 10 à 15 minutes.

A la suite du diagnostic effectué au terrain, les mesures des caractéristiques mécaniques de la turbine traditionnelle et du rotor Banki ont été réalisées sur banc d'essai spécialement conçu à cet effet au laboratoire d'énergétique du Département de Machinisme Agricole de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. Ce banc comprend un bassin tampon monté sur pylône de 3.5 mètres de haut, une conduite d'alimentation en eau de forme demi-cylindrique, une vanne de réglage de débit, un débitmètre, une pompe centrifuge, une conduite de refoulement, un

bassin de récupération situé au pied du moulin et un couplemètre à bande muni d'un tachymètre digital.

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques et les pertes de puissance ainsi que leurs niveaux et leurs valeurs, nous avons conduit les essais sans meule supérieure et ce avec et sans roulements sur les paliers inférieur et supérieur. Pour chaque essai, nous avons produit une série de couples de freinage sur l'arbre moteur de la turbine et mesuré la force de freinage et la vitesse de rotation correspondante. Ainsi, l'équation permettant de déterminer les pertes de puissance peut être définie de la manière suivante :

$$P_t = P_e - [P_{pi} + P_{ps} + P_s]$$

Où :

P_t : représente les pertes de puissance au niveau de la turbine;

P_e : la puissance effective ;

P_{pi} et P_{ps} : les pertes de puissance respectivement au niveau des paliers inférieur et supérieur ;

P_s : la puissance de sortie (ou au bout de l'arbre).

IV- DESCRIPTION DU MOULIN

Le moulin se trouve dans un local à cave appelé R'ha. La cave contient la turbine, la conduite d'eau et les mécanismes d'embrayage et de réglage continu du jeu de fonctionnement entre meules. La partie de dessus contient les meules gisante et tournante, les leviers de commande et l'auge de récupération. La turbine repose sur une poutre horizontale en bois par l'intermédiaire d'un système de pivot en acier forgé. Elle est mise en rotation par un jet d'eau sortant d'un convergent monté à l'extrémité d'une conduite à ciel ouvert en pente.

Le couple développé par la turbine est transmis à la meule supérieure par l'intermédiaire d'un arbre fixé à son tronc par un assemblage en tenon-mortaise. Ce dernier assemblage permet, à l'aide d'une clavette conique en bois, d'ajuster la turbine à l'arbre et par suite aux meules (centrage, alignement). La partie supérieure de l'arbre est fendue sur une vingtaine de centimètres pour porter une tige métallique forgée dont la partie inférieure est aplatie et l'autre cylindrique pour pouvoir tourner dans un palier doux en bois de figuier aménagé dans le trou central de la meule gisante. L'extrémité supérieure de cette tige est légèrement aplatie pour loger dans un trou carré d'une pièce métallique à deux pales placées chacune horizontalement dans une cavité taillée dans la face inférieure de la meule supérieure.

Les grains contenus dans une trémie tronconique ou troncpyramidale - généralement en vannerie- descend vers le trou central de la meule supérieure à travers le trébuchet. Pour activer l'écoulement des grains, le trébuchet est mis en vibration par l'intermédiaire d'un sabot en bois qui traîne sur la face supérieure de la meule tournante. Pour régler le débit

des grains en fonction du débit d'eau et donc de la puissance hydraulique disponible, le trébuchet est fixé à la trémie au moyen d'une planche portant des trous placés en quinconce.

Le débrayage de l'appareil se fait en activant un levier fixé à une perche verticale portant une planche permettant d'obturer le diffuseur et perturber par là

l'écoulement de l'eau qui se trouve projeté au dessus de la turbine. Le réglage de l'écartement entre meules peut se faire même lorsque l'appareil est en fonctionnement. Il s'obtient en faisant monter en haut turbine, arbre et meule supérieure à l'aide d'un levier horizontal fixé à une perche verticale dont le bout inférieure est articulé sur l'extrémité d'une planche en bois sur laquelle repose tout le dispositif.

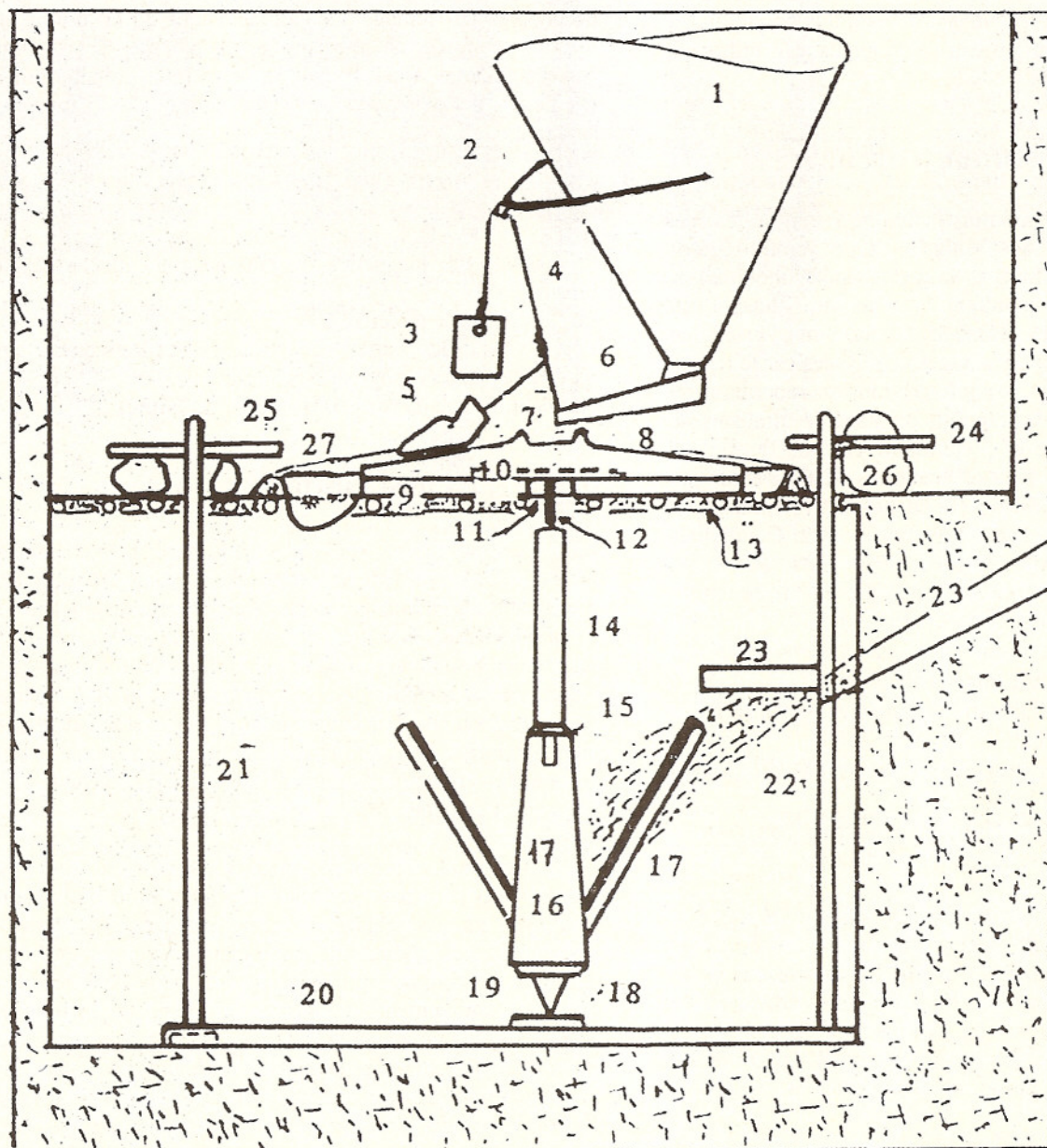


Figure 1: Vue d'ensemble d'un moulin hydraulique traditionnel

1 : trémie (vannerie, bois tôle) ; 2 : arc en bois ; 3 : poids d'alourdissement ; 4 : ficelle (tension et réglage du débit) ; 5 : vibreur (ou bayard ou frayon) ; 6 : trébuchet ; 7 : oeillard ; 8 : meule supérieure (ou meule tournante ou courante) ; 9 : meule inférieure (ou meule gisante, dormante ou fixe) ; 10 : clavette à pales ; 11 : palier supérieur ; 12 : liaison métallique ; 13 : plancher ; 14 : arbre de transmission ; 15 : liaison avec tenon mortaise et clavette conique ; 16 : arbre de turbine ; 17 : pales ; 18 : pointe métallique ; 19 : fer plat d'appui à trous coniques ; 20 : planche ; 21 : perche verticale ; 22 : planche d'embrayage ; 23 : rigole ; 24 : levier de commande de l'embrayage ; 25 : levier de réglage du jeu entre meules ; 26 : pierres jouant le rôle de cale ; 27 : auge de récupération.

V- RESULTAT DE L'ENQUETE ET DISCUSSION

La turbine est formée de deux éléments :

- un arbre de rotation tronconique de diamètres 12 et 14 cm ;
- des pales ancrées dans le tiers inférieur de l'arbre principal sous un angle fixe qui varie d'un modèle à l'autre.

Le diamètre des turbines visitées est compris entre 72 et 94 cm. Le nombre de pales par turbine peut être 24, 26, 28 ou 30 suivant le débit. La face de chaque pale est inclinée d'un certain angle par rapport au plan vertical. Les valeurs des angles observés sont comprises entre 10° et 27° : la moyenne calculée est de 17° (CV = 23,5 %). Les valeurs extrêmes observées de l'angle d'ancrage des pales sur l'arbre principal sont 30° et 56° (Tableau 1). La moyenne calculée est de 48° (CV = 12,5 %).

Il est difficile de retrouver les transformations que le moulin hydraulique a dû subir pour acquérir sa forme actuelle. Cependant, quant à la raison de l'angle d'ancrage des pales, il semble que la réponse réside dans le mode d'assemblage des pales. En effet, la fixation entre pales et arbre principal est assurée par tenon et mortaise disposés de

manière alternée. La raison de cette conception s'explique par les points suivants :

- la section de l'arbre n'est pas affaiblie au niveau de la zone d'ancrage.
- la portée de fixation est importante et la section des tenons soumises aux efforts de cisaillement est grande.
- la distance entre pales est réduite pour obtenir une rotation régulière.

Tableau 1: Valeurs des angles d'ancrage et de calage des moulins visités dans les différentes régions d'étude

	angle d'ancrage	angle de calage β
minimum	30°	10°
maximum	56°	27°
moyenne	48°	17°
cv (%)	12,5%	23,5%

Il existe deux types de pales qui diffèrent par la forme de leur face utile qui est soit en V soit en L. Selon les artisans, les pales en L sont relativement récentes et permettent d'améliorer l'efficacité de transformation de l'énergie hydraulique. La longueur des faces utiles des pales varie entre 20 et 30 cm et la largeur est comprise entre 4 à 6 cm ; la longueur totale est de 40 à 50 cm.

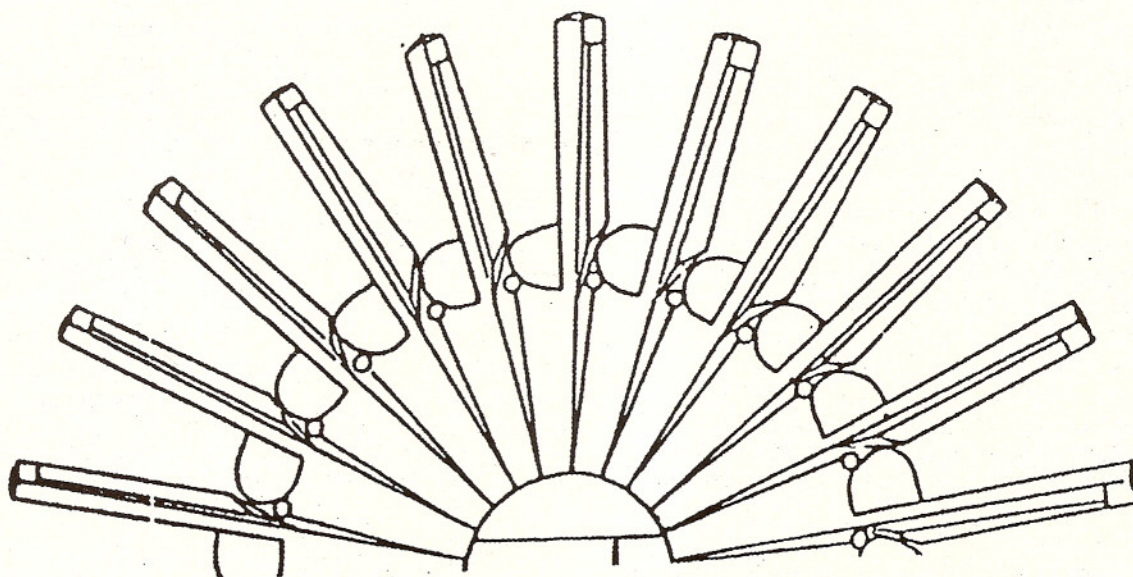


Figure 2 : Demi-vue de dessus d'une turbine hydraulique traditionnelle. (source: Eddbab M. 1993, p.22).

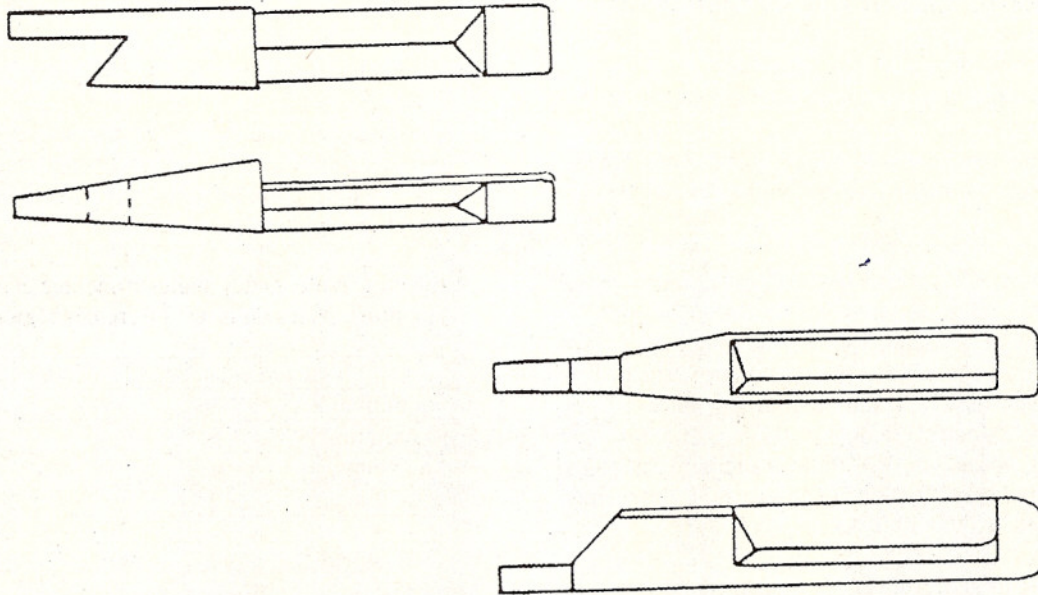


Figure 3 : Vues de face et de dessus des deux types de pales: en V (en haut) et en L (en bas)

Le système de broyage des grains est constitué de deux meules. Des échantillons prélevés sur ces meules et analysés au Laboratoire de Géologie de L'APESA de l'IAV Hassan II montre que la pierre provient de roches magmatiques acides microgranit ou microdiorite à deux minéraux abondants : le quartz et le feldspath potassique avec des petits cristaux de mica.

La meule gigante est fixée au sol de telle sorte que sa face rugueuse soit bien horizontale. La face inférieure de la meule tournante est légèrement concave sur son tiers intérieur pour faciliter la progression des grains introduits. L'angle moyen de pente de cette concavité est de $1^{\circ}6'$. La rugosité moyenne R_a est de $0,82 \pm 0,532$ mm ($c_v = 65\%$). Le diamètre des meules des moulins visités varie de 45 à 100 cm et l'épaisseur de 5 à 10 cm. La surface de frottement est comprise entre 0,16 et 0,79 m².

Le seul travail d'entretien des meules consiste à retailler leur faces à l'aide d'un burin trempé. Lorsque le poids de la meule supérieure descend en dessous de 25 Kg, cette dernière est considérée hors usage et doit être rechangée.

Les conduites d'eau sont soit en béton de section rectangulaire soit construites à partir d'un demi-tronc d'arbre évjé et lissé. La hauteur de chute est déterminée par la pente du terrain au pied duquel on construit le local et par le fait que l'eau doit être récupérée à la sortie de la turbine dans le même canal d'irrigation. L'emplacement du moulin sur le canal d'irrigation ne doit pas perturber son fonctionnement. Les hauteurs de chute sont comprises entre 1,34 et 7 mètres. Les débits mesurés pendant les périodes les plus sèches de l'année varient entre 10 et plus de 20 litres par secondes:

D'après les mesures effectuées sur les moulins, les données des enquêtes auprès des utilisateurs et celles collectées à partir de la bibliographie nationale, 42 % des appareils font des rendements compris entre 10 et 20 Kg/h et 30 % moins de 10 Kg/h. Les moulins qui occupent des sites exceptionnels (grands débits, grandes hauteurs de chutes) permettent de réaliser plus de 30 kg/h.

Au niveau des villages, la faiblesse des capacités d'écrasement et des débits sont compensés par la mise en série d'un certain nombre de moulins le long du canal principal qui conduit l'eau vers les parcelles ou par la mouture de faibles quantités juste suffisantes pour couvrir les besoins du foyer en pain et en soupe correspondant à un durée de 3 à 5 jours. Les trémies sont de forme tronconique ou troncpiramidale et peuvent contenir plus de 30 kg.

Tableau 2 : Classe de capacité d'écrasement de 80 moulins hydrauliques localisés dans différentes régions du Maroc

Classes (kg / h)	< 10	10 - 20	20 - 30	> 30	Total
Effectif	24	34	18	05	80
Pourcentage %	29.6	42.0	22.2	06.2	100

Les moulins hydrauliques offrent l'avantage d'être construits, entretenus et réparés localement par des artisans qui résident sur place. Les matériaux sont bon marché et ont une durée de vie plus ou moins acceptable et les outils de travail sont produits localement. Les pales sont construites à partir du chêne vert, du caroubier ou du pistachier. L'arbre de la turbine est en général en olivier. La conduite d'eau est en peuplier. Il faut entre une et deux semaines et demi pour fabriquer et installer un moulin à eau. On compte selon les données des enquêtes 5 à 6 jours pour les meules, 1 à 2

jours pour la trémie. 3 à 4 jours pour la roue hydraulique. 1/2 jour pour les accessoires. 1 jour pour le canal et 2 à 3 heures pour les pièces forgées.

Le moulin est généralement utilisé par les femmes. L'utilisateur se tient accroupi à côté des meules pour alimenter manuellement l'oeillard et balayer avec une feuille de palmier nain le pourtour de la meule pour ramener la farine vers l'auge. Les organes de commande et de réglage sont bien accessibles mais la posture du corps pendant le travail est fatigante.

L'existence d'une trémie et d'un trébuchet avec leur accessoires permet d'automatiser l'alimentation et de libérer par conséquent la personne qui s'occupe du moulin. Mais cette automatisation n'est que partielle car lorsque la trémie est déchargée, les meules tournent à vide: ce qui accélère leur usure. C'est pour cela que la trémie n'est que rarement installée sur le moulin.

La finesse de la mouture est réglable et le produit obtenu répond bien aux exigences des utilisateurs (pas d'échauffement excessif, pas de pollution du produit ou de la nature, pas de dépendance des sources énergétiques extérieures au milieu).

Les moulins à moteur thermique dont la présence - souvent récente - dans plusieurs sites visités, n'opposent pour le moment aucune concurrence notable aux moulins hydrauliques. Ces deux techniques sont plutôt complémentaires. Le premier permet de mouler de grandes quantités notamment pendant les fêtes traditionnelles et religieuses et le second a l'avantage de réaliser des textures très recherchées par les habitants (semoule de blé pour couscous, semoule d'orge ou de maïs pour soupe matinale, farine pour couscous extra-fin, ...). Cependant, les moulins à moteur thermique ne sont pas tout à fait adaptés aux à cause de la difficulté d'approvisionnement en carburant, en lubrifiants et en pièces de rechange, de la pollution qu'ils entraînent (gaz toxique, huile de vidange, son, ...), de la faible maîtrise de son utilisation et du manque d'ateliers de réparation, etc.

VI- RESULTATS DU TRAVAIL EXPERIMENTAL ET DISCUSSION

VI.1. Caractéristiques mécaniques de la turbine traditionnelle

Le fonctionnement optimal de la turbine pour un débit de 15 litres par seconde et une hauteur de chute de

3.5 m est obtenu à la vitesse nominale de 10 rd/s (95.49 tr/mn). A ce niveau, la puissance est de 180 watts et le rendement de 34.3 %. Le couple de démarrage sur l'arbre de la turbine est de 30 Nm. Le tableau N°3 résume les coefficients de régression du couple, de la puissance et du rendement de la turbine traditionnelle en fonction de la vitesse angulaire.

Tableau 3 : Coefficient de régression du couple (C), de la puissance (P) et du rendement (R) en fonction de la vitesse angulaire.

		c	b	a	r ²
Couple	Nm	29.5667	-0.5010	-0.0680	-0.9943
Puissance	w	-14.7109	42.0954	-2.3177	0.9269
Rendement	%	-2.9780	8.1504	-0.4537	0.9415

La puissance hydraulique (Ph) disponible à la sortie du convergent n'est pas totalement transformée par la turbine (le jet d'eau est très large et sa section au voisinage des pales est plutôt horizontale, les pales n'offrent au jet qu'une partie de leur face utile, l'angle de calage et d'inclinaison sont approximatifs et différents d'une pale à l'autre, ...). Comme l'indique le tableau N°4, la puissance mécanique développée par l'arbre de la turbine se répartie en puissance dissipée sous forme de chaleur dans les paliers supérieur et inférieur (O.O9.Ph) et en puissance de sortie utilisées pour l'écrasement des grains (O.25.Ph).

Tableau 4 : Valeurs des pertes de puissance au niveau des pales (Pt) et des paliers inférieur et supérieur (Ppi et Pps) et Puissance de sortie (ES).

Niveau de perte	Pt	Ppi	Pps	ES
Valeur en %	65.71	3.38	5.71	25.20

Pratiquement les 2/3 de la puissance hydraulique sont perdus au niveau des pales de la turbine. Les frottements dans les paliers inférieur et supérieur dissipent sous forme de chaleur respectivement 17.75 watts (3.38 %) et 30 watts (5.71 %).

VI.2. Caractéristiques de la turbine Banki

Choix et caractéristiques théoriques :

Nous avons opté pour la turbine Banki parce que c'est la seule machines parmi les turbines hydrauliques classiques qui s'adapte aux faibles hauteurs de chute et offre une conception et une réalisation facile et économique.

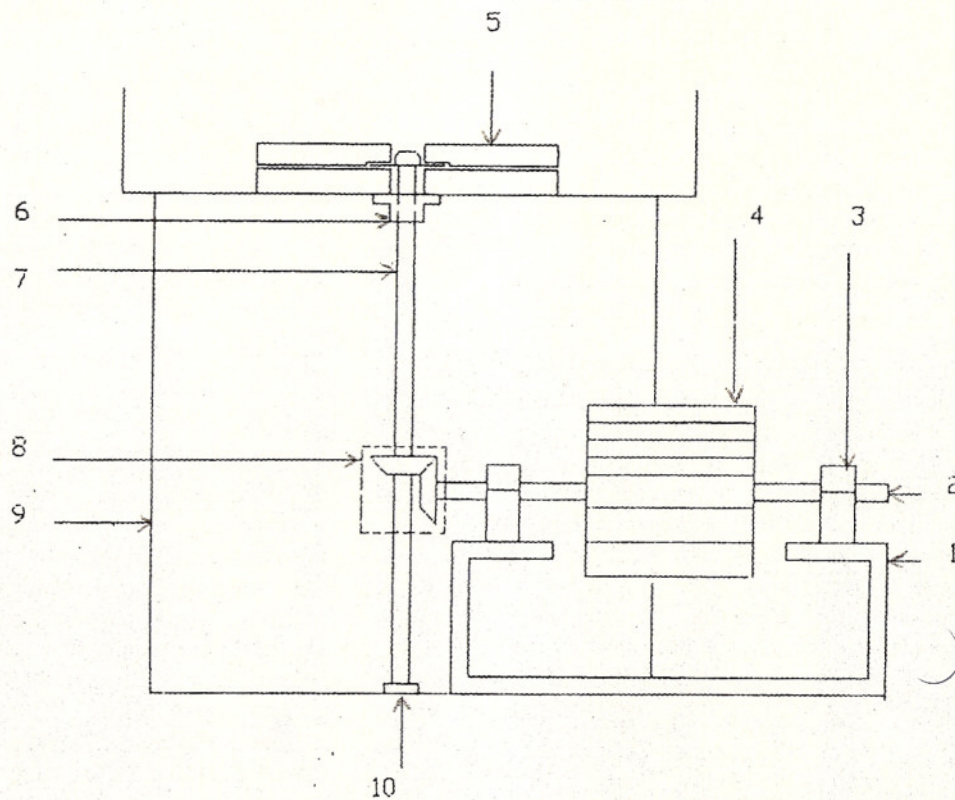


Figure 4 : Représentation schématique en élévation du montage turbine Banki et moulin traditionnel.

1 : Support de la turbine. 2 : Axe de rotation; 3 : Palier ; 4 : Rotor Banki ; 5 : Meules ; 6 : Palier supérieur ; 7 : Arbre vertical de transmission du mouvement ; 8 : Engrenages ; 9 : Support du moulin ; 10 : Palier inférieur.

Les caractéristiques de la turbine Banki dimensionnée pour une hauteur de chute moyenne de 3,5 mètres et un débit moyen de 15 l/s se présentent comme suit :

- diamètre extérieur = 360 mm ;
- diamètre intérieur = 304,6 mm ;
- longueur des aubes = 150 mm ;
- largeur des aubes = 27,7 mm ;
- nombre d'aubes = 20 ;
- angle d'injection = 33° ;
- vitesse nominale = 18,56 rd/s (177,83 tr/mn);
- vitesse d'emballement = 37,1 rd/s (354,3 tr/mn);
- puissance théorique optimale = 334 watts;
- couple théorique maximal = 36 mN.
- vitesse de l'eau à l'entrée de la turbine = 8,1 m/s
- section de l'injecteur = 1,866. 10⁻³ m².

Caractéristiques expérimentales :

Le fonctionnement optimal de la machine est obtenu à la vitesse nominale de 20 rd/s (191 tr/mn). A cette vitesse, la puissance est de 317,4 watts (0,54 cv) et le rendement de 60,4 %. Le couple maximal sur l'arbre de la turbine est de 34 Nm. Le tableau 5 résume les coefficients de régression du couple, de la puissance et du rendement de la turbine traditionnelle en fonction de la vitesse angulaire.

Tableau 5: Coefficient de régression du couple (C) de la puissance (P) et du rendement (R) en fonction de la vitesse angulaire.

		c	b	a	r ²
Couple	Nm	33.7410	-0.8258	-0.0014	0.9961
Puissance	w	-4.7208	35.2859	-0.9161	0.9759
Rendement	%	-0.9152	6.7227	-0.1745	0.9759

Le rendement pratique de la turbine Banki est de 1,76 fois plus grand que celui de la turbine traditionnelle et la puissance 1,82 fois plus importante.

VII- PROPOSITIONS D'AMELIORATION DE LA TURBINE TRADITIONNELLE

- Induire les pales et l'arbre principal de résine et de fibre de verre pour augmenter leur longévité ;
- Placer au palier supérieur un roulement graissé à vie ;
- Mettre une vanne entre les canaux principal et secondaire pour que la turbine ne soit pas toujours sous l'eau ;
- Equiper la machine d'un système d'arrêt automatique qui fonctionne lorsque la trémie est vide ;
- Installer une conduite forcée à convergent pour réduire les pertes de puissance au niveau des pales ;

- Fixer sur le bord de la meule supérieure un balai tendre pour ramener la farine à l'auge et placer les meules à une hauteur du plancher facilitant la descente de la farine dans un sac ;
- Munir la machine d'une tonnelle pour éviter les pertes de farine ;

VIII- COUT D'UTILISATION, FACTURATION ET RENTABILITE

Le coût horaire d'utilisation pour une durée de fonctionnement journalière de 6h/j est de 0.25 DH/h pour le moulin traditionnel, 0.23 DH /h pour le moulin traditionnel avec organes enduits de résine et 0.31 DH /h pour le moulin entraîné par rotor Banki. Si on ramène le coût à la masse de blé écrasé on trouve dans l'ordre respectif précédent : 1.67 DH/ql, 1.45 DH/ql et 1.03 DH/ql. La capacité d'écrasement moyenne du moulin traditionnel est de 15 kg/h et celle du moulin à rotor Banki est pratiquement le double.

Le moteur Diesel présente le coût d'utilisation le plus faible 0.23 DH/ql et permet de moudre relativement de grandes quantités, ce qui est avantageux lors des fêtes. C'est la raison pour laquelle il coexiste, quand c'est possible, avec le moulin hydraulique traditionnel. Cependant, il ne permet pas de donner les semoules recherchées par les utilisateurs et chauffe la farine de manière exagérée en lui faisant perdre sa qualité.

L'accès au moulin traditionnel se fait contre paiement en nature: en général, on laisse le 1/10 du produit moulu. Ce mode de facturation continue toujours d'être pratiqué. Avec les moulins à moteur Diesel, la facturation est en espèce.

IX- RECOMMANDATIONS

Pour une meilleure exploitation de l'énergie hydraulique par les moyens existant ou celui proposé par cette étude, nous faisons les recommandations suivantes :

- Adaptation et essai de différentes sortes de meules ;
- étude des performances du montage d'un rotor Banki avec une génératrice d'électricité ;
- étude expérimentale des caractéristiques mécaniques des pales en "V" et en "L" ainsi que d'autres types de pales susceptibles d'améliorer le rendement des turbines traditionnelle.

REMERCIEMENT

M. Baghdad M. enseignant de géologie à l'IAV Hassan II.
Mme Berday N., enseignante à l'IAV Hassan II.
MM. Benkaddour Adil et Yassir.

BIBLIOGRAPHIE

1. Arfal E. et A. Salli, 1984- Conception d'une microcentrale hydraulique. Projet de fin d'étude inédit. Université Mohammed V, Ecole Mohammédia des Ingénieurs. Rabat, Maroc.
2. Belaiche T., 1981- Contribution à l'étude des technologies traditionnelles au Maroc. Mémoire de fin d'étude inédit. ENTA, IAV Hassan II. Rabat, Maroc.
3. Bouderbala N., J. Chiche, A. Herzenni, P. Pascon, 1984- La question hydraulique. Tome I: petite et moyenne hydraulique au Maroc. Presses du Graphitec. Rabat, Maroc. pp. 283-308.
4. Boukaaba M., 1984- Etude comparative des moulins à grain dans le moyen Atlas, proposition d'amélioration du moulin à eau. Mémoire de 2ème cycle inédit. Département de Machinisme Agricole, IAV Hassan II. Rabat, Maroc.
5. Candoré A., 1992- Des moulins à tout faire. Historia. Nov. France. pp. 102-106.
6. Cresswell R. 1987- De la voûte céleste au terroir, du jardin au foyer. Edition de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociale, pp.507-513.
7. Dehmouch M. et A. Elmarjani, 1980- Minicentrale hydraulique. Projet de fin d'étude inédit. Université Mohammed V, Ecole Mohammédia des Ingénieurs. Rabat, Maroc.
8. Eddbab M., 1993- Réhabilitation des moulins hydrauliques de la grande vallée de l'Ounein. Mémoire de fin d'étude inédit. Département de Machinisme Agricole, IAV Hassan II. Rabat, Maroc.
9. Ermenc J.J., 1979- Petites machines hydrauliques pour les zones rurales des pays en développement: un regard sur le passé. Les énergies renouvelables. Tendances Actuelles n°76, pp. 85-106.
10. Haddadi et Jaboun, 1980 - Comparaison des techniques de broyage artisanales et industrielles des céréales. Mémoire de fin d'étude inédit. Ecole Nationale de Technologies Alimentaires, IAV Hassan II. Rabat, Maroc.
11. Haverson M. 1985 - Des moulins à eau dans la vallée de l'Ounein, University of Cambridge, June, 10 p. ronéo.
12. Laoust E. 1920 - Mots et choses berbères. Paris Challamel pp. 41-49.
13. Lukobeka KB., 1982- Contribution à une mise au point sur les technologies appropriées: cas de la technologie alimentaire. Ecole Nationale de Technologie Alimentaire, IAV Hassan II. Rabat, Maroc. pp. 121-137.
14. Mouncef N. 1992- Electrification rurale en zone montagneuse. Electrification par micro centrale hydraulique. Département de Machinisme Agricole. Mémoire de fin d'étude inédit. Département de Machinisme Agricole, IAV Hassan II. Rabat, Maroc.
15. Pascon P.- 1982- Le Haouz de Marrakech. Editions Marocaines et Internationales de Tanger, Maroc. p. 396.
16. Shepherd DG., (sdnl)- Principles of turbomachinery. The Macamillan Company.

INFLUENCE DE LA SURELEVATION DU BARRAGE DE ZARDEZAS SUR SON ENVASEMENT

BOUALEM REMINI¹

RESUME

En Algérie, de nombreux efforts ont été déployés par les services concernés pour lutter contre la sédimentation dans les retenues des barrages. La surélévation de la digue de l'ouvrage est une des méthodes qui a été utilisée sur quelques barrages. Mais l'étude effectuée sur l'évolution de l'envasement dans le barrage de ZARDEZAS ayant subi une surélévation de la digue, montre que cette technique accélère le dépôt des sédiments.

Mots clés : Envasement - Barrage - Surélévation - ZARDEZAS - Algérie.

ABSTRACT

In Algeria, a numerous efforts are deployed by the concerned services for fight against a sedimentation in dams. The raising of dyke of work is one of the methods who are using on some dams. But the study effected on evolution of sedimentation in ZARDEZAS dam assign submit a raising shows that this technical accelerate the depositing of sediments.

Words key: Evolution of sedimentation - Dam - Raising of dyke - ZARDEZAS - Algeria.

I. PROBLEMATIQUE

Lors de la mise en eau du barrage en 1945, la capacité totale de la retenue était de 27 Mm³. Du fait de l'apport solide important, la retenue s'est réduite à une capacité d'environ 9.10⁶ m³ en 1967, ce qui correspond à un volume de vase d'environ 18.10⁶ m³. Face à ce problème les services d'hydraulique ont procédé à la surélévation de la digue du barrage en 1975. Cette méthode consiste à augmenter la hauteur de la digue d'une taille variable, permettant la constitution d'une réserve complémentaire pour compenser la perte du volume occupé par la vase. La nouvelle situation ainsi créée a influencé l'évolution des dépôts des sédiments dans la retenue. En effet, pour des raisons de sécurité de l'ouvrage, il a fallu en 1976, baisser le niveau de la retenue normale de 2 m.

En 1990, les services d'exploitation ont du baisser encore une fois pour les mêmes raisons de 2 m le niveau d'eau et cela s'est fait au détriment de l'approvisionnement de la population de la ville de Skikda et du périmètre de Saf-Saf de volume régularisé qui était de 20.10⁶ m³ et qui s'est trouvé réduit environ à 10.10⁶ m³.

La vidange de fond, jusqu'à la date du 11 mai 1994 n'ayant pu être ouverte se trouvait sous plus de 18.10⁶ m³ de vase et toute opération de vidange de la retenue était, de ce fait impossible. De même les pertuis de dévasement se sont retrouvés envasés vu la cote de vase qui est très importante.

II. SITUATION ET CARACTERISTIQUES

Le barrage de Zardézas d'une capacité de 35.10⁶ m³ (après la surélévation de la digue), construit de 1929 à 1945, est situé sur l'oued Saf-Saf au nord-est de Constantine et à 30 km au sud de Skikda. Il est du type barrage poids.

III. LE BASSIN VERSANT

III.1. Description sommaire

Le bassin versant du barrage des Zardézas d'une superficie de 345 km², se caractérise par la prédominance du domaine agricole sur le domaine forestier, comme le montre la figure 1 :

¹ Chargé de cours - Institut de Génie Rural - Université de BLIDA, Algérie

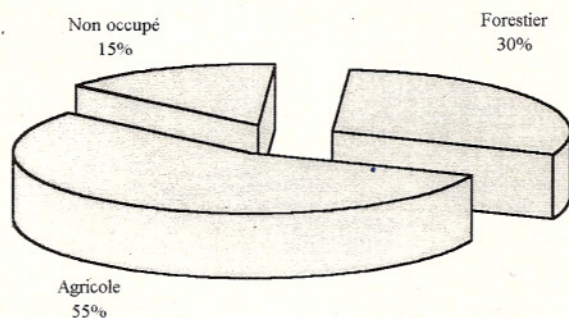


Figure 1: Bassin versant du barrage de ZARDEZAS. Domaines d'occupation

Plusieurs facteurs se combinent pour déterminer l'évolution du milieu naturel dans ce bassin versant avec des conséquences importantes sur l'arrivée des débits liquides et solides dans la retenue du barrage.

III.2. Lithologie

Les roches argileuses tendres facilement érodables occupent une surface de 13682 ha soit 39.4 % de la superficie du bassin versant, 38 % de ces terrains s'étendent dans la vallée de l'oued Bou Adjeb juste au sud du barrage, et 1.4 % de la superficie totale représente une bande droite qui longe l'oued principal (Bou Adjeb).

III.3. Pentés

Dans le bassin versant de Zardézas, plus de 50 % de la superficie (soit 17382 ha) se compose de pentes comprises entre 12.5 % et 45 %. Alors que les terrains dont les pentes supérieures à 45 % représentent 3373 ha, soit 9.8 % de la superficie.

III.3. La pluviométrie

Dans le bassin versant de l'oued Saf-Saf existent six stations pluviométriques, toutes fonctionnant d'une façon continue. Une série d'observations de 12 ans (1975-1987) a été prise. Elle s'avère homogène et ceci pour toutes les stations prises en compte (figure 2).

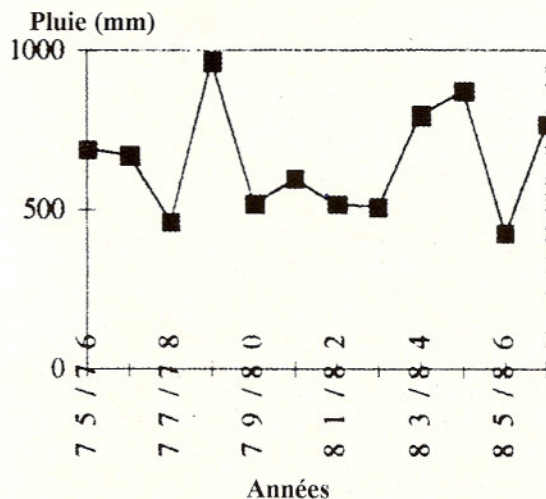


Figure 2 - Pluies annuelles sur le bassin versant de l'oued Saf Saf (1975/1987)

La figure 3 montre clairement que la saison s'étend du début de l'automne à la fin du printemps, mais les précipitations ne sont importantes qu'au milieu de l'automne et au début du printemps. Les pluies orageuses se produisent assez fréquemment en juin et août mais sont en moyenne peu abondantes.

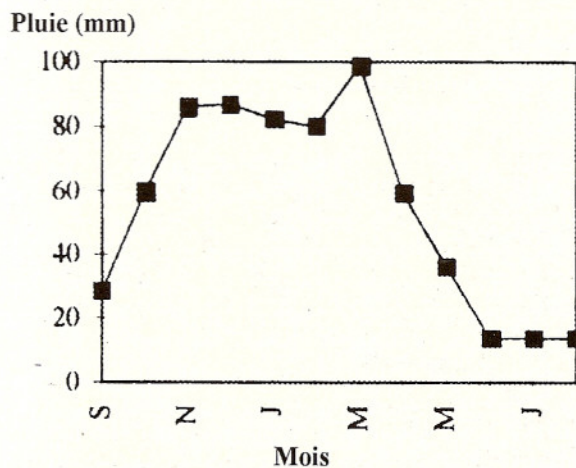


Figure 3 - Pluies mensuelles moyennes sur le bassin versant de l'oued Saf Saf (Période 1975-1987)

IV. EVOLUTION DE L'ENVAISEMENT EN FONCTION DE LA HAUTEUR D'EAU DANS LA RETENUE

Pour répondre à l'hypothèse précédente, nous avons représenté sur la figure 4, l'évolution des dépôts des sédiments dans la retenue du barrage de ZARDEZAS durant la période d'exploitation 1975-1986. (la digue de ce barrage a été surélevée en 1975).

On peut constater que :

- Le graphe est composé d'une fonction polynomiale du 3^{ème} degré correspondant à une évolution des dépôts de la vase dans la retenue initiale (au-dessous de la surélévation) et d'une droite linéaire à cette même évolution dans la réserve créée par la surélévation.
- Le dépôt des sédiments évolue plus rapidement et d'une manière uniforme (le toit de la vase est parallèle au fond de la retenue) dans la réserve créée par la surélévation. Ceci tendrait à confirmer que la surélévation d'une digue influe sur le mécanisme de la sédimentation de la retenue (puisque avant surélévation, la fonction était polynomiale, mais que juste après surélévation l'évolution devient identique à celle du début d'exploitation d'un nouveau barrage) et qu'elle accélère l'envasement dans cette retenue.

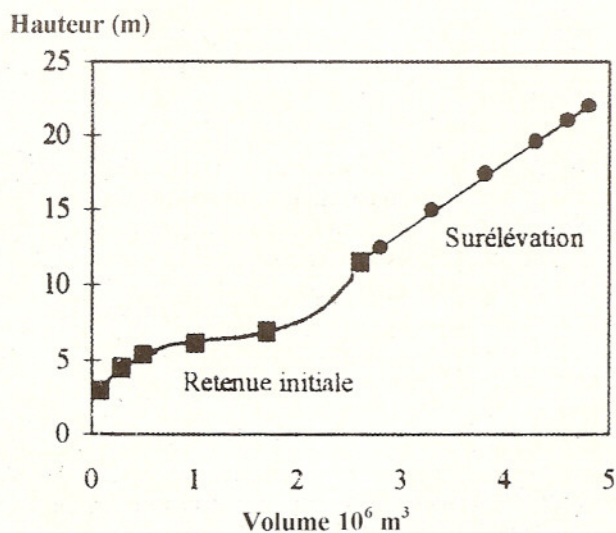


Figure 4 : Evolution de l'envasement en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue du barrage de ZARDEZAS (1975-1986)

V. EVOLUTION DE L'ENVAISEMENT DANS LE TEMPS

Pour compléter cette approche, et confirmer ce qui précède, nous avons représenté sur la figure 5, l'évolution dans le temps de l'envasement dans la retenue de

ZARDEZAS, dont la digue a été surélevée en 1975 à la suite d'un comblement rapide du réservoir.

On peut constater que le graphe est composé de deux éléments de courbe, le premier correspondant à une évolution de la sédimentation dans la retenue avant la surélévation de l'ouvrage, le deuxième à cette même évolution après surélévation, avec une pente supérieure au premier : l'explication qui peut être donnée est que l'envasement augmente plus rapidement après cette surélévation, la vitesse de sédimentation est passée de 0,30 (avant surélévation) à 0,70 10⁶ m³/an après surélévation.

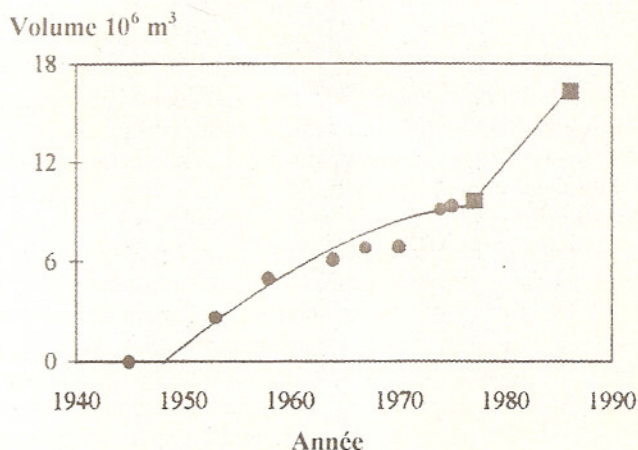


Figure 5 : Evolution dans le temps de l'envasement dans la retenue du barrage ZARDEZAS (1975-1986)

VI. CONCLUSION

Cette rapide étude montre que la retenue du barrage de ZARDEZAS est soumise à un envasement intense. La surélévation de la digue du barrage a influé sur le mécanisme de l'envasement et a accéléré le dépôt des sédiments dans la retenue.

REFERENCES

1. REMINI B. - 1997- Envasement des retenues de barrages en Algérie : importance, mécanismes et moyen de lutte contre par la technique du soutirage. Doctorat d'état, mars, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 342 p.
2. REMINI B. et al- 1995- Envasement du barrage d'IGHIL EMDA (Algérie). Revue La Houille Blanche n° 2/3, pp. 23-28.
3. REMINI B. et al- 1997- La technique du soutirage. Un moyen de lutte contre l'envasement - Revue sciences Techniques et Méthodes, n°3, mars, pp.69-76.

CONSIDERATIONS CONCERNANT LE DEBIT DES BUSES A FENTE NEUVES

B. HUYGHEBAERT¹, C. DEBOUCHE² ET O. MOSTADE¹

RESUME

Les constructeurs de buses de pulvérisation garantissent la qualité de leur production. Pour cela, ils ont établi des contrôles de qualité. Une des vérifications, qu'ils effectuent, est la comparaison du débit des buses neuves avec un débit de référence (débit nominal). Lorsque l'écart entre ces deux valeurs est trop important, la ou les buses concernées sont rejetées et éliminées. Une enquête menée auprès des constructeurs a permis de déterminer les tolérances et limites qu'ils se sont imposées dans le cadre de la vérification de la qualité de leur production.

Les débits de 1565 buses neuves de 3 constructeurs ont été mesurés sur un appareil développé pour cette étude. Différents tests statistiques ont permis d'apprécier la qualité des 3 productions ainsi que leurs caractéristiques.

Les critères de qualité annoncés par les constructeurs ne sont pas toujours vérifiés. En moyenne 20 % des buses étudiées sortent des limites de tolérance que se sont imposées les fabricants. Le débit moyen peut être assimilé au débit nominal des buses. En pratique, la distribution de probabilité du débit des buses neuves est normale. Bien que supérieure à la dispersion théorique, la dispersion observée du débit des buses neuves est réduite. Les productions de buses semblent homogènes. Ces conclusions doivent être nuancées en fonction des différents constructeurs. En effet, la qualité de la production diffère d'un constructeur à l'autre.

Mots clés : Buse, débit, buse à fente, qualité

INTRODUCTION

La buse à fente est composée d'une pièce percée au centre d'un orifice circulaire débouchant à l'extérieur dans une fente aux parois obliques. La perforation étant incomplète, l'orifice terminal prend une forme plus ou moins elliptique générée par l'intersection d'un prisme triangulaire avec un cône ou une calotte sphérique (Caussin R., 1993).

La qualité de sa répartition transversale et la précision de son débit la rendent particulièrement adaptée aux principaux traitements en cultures basses. De ce fait, la buse à fente à jet plat est un des types de buse les plus utilisés en grandes cultures.

La répartition individuelle d'une buse à fente se présente en forme de cloche assimilée à une courbe de Gauss. Cette forme de répartition individuelle permet d'obtenir une répartition sous rampe régulière pour autant que les buses soient fixées de telle sorte qu'il y ait une superposition importante des volumes épanchés par les jets voisins.

Les constructeurs vérifient la qualité de la répartition transversale de leur production de buses. La méthode de mesure suivie est la norme ISO 5682 ou une méthode apparentée. Le paramètre qui permet d'évaluer la qualité de la répartition est le Coefficient de Variation (CV) des volumes de liquides épanchés sous rampe. Pour que les buses neuves soient acceptées, la valeur du CV mesuré doit

¹ Ministère des Classes moyennes et de l'Agriculture, Centre de Recherches agronomiques (CRA), Département de Génie rural, 5030 Gembloux, Belgique.

² Faculté universitaire des Sciences agronomiques, 5030 Gembloux, Belgique.

être inférieure à 7 %. Certains constructeurs acceptent une valeur de rejet plus sévère (5 %) ou complètent cette mesure par des vérifications supplémentaires (évaluation des accidents de répartition sous rampe, mesure d'angle du jet). Seulement une partie de la production de buses est vérifiée de cette manière. Les buses testées sont choisies lors d'un échantillonnage aléatoire et sont sensées être représentatives des quantités produites pendant une certaine durée (exemple : 2 heures ou 1 jour).

Le débit est le second paramètre utilisé par les constructeurs pour vérifier la qualité de leur production. Une enquête, menée auprès de 3 constructeurs, a permis d'évaluer leur contrôle de fabrication basé sur le débit des buses. Le tableau 1 donne les résultats de l'enquête, à savoir les tolérances utilisées lors des contrôles de fabrication par les trois constructeurs de buses.

La valeur x est le débit de référence, aussi appelée le débit nominal et q est le débit réel de la buse testée. Le débit nominal est le débit d'une buse neuve idéale. Il est fourni dans le catalogue du constructeur. Cette valeur est également utilisée pour établir les tableaux de réglage du volume/hectare.

Le constructeur A emploie deux fluides de contrôle différents. Les débits d'une partie de sa production sont contrôlés en utilisant de l'eau. Par contre, la totalité de sa production est vérifiée en utilisant de l'air. Une relation, établie préalablement, permet de corréler les résultats obtenus avec les deux fluides.

Les constructeurs B et C ne vérifient la qualité que d'une partie de leur production. Celle-ci est obtenue par un échantillonnage dans la production d'une certaine période de temps.

Comme le montre le tableau 1, les tolérances de rejets des buses neuves diffèrent d'un constructeur à l'autre.

Selon que toute la production est vérifiée ou seulement un échantillon, une buse ou la production représentée par l'échantillon est rejetée lorsque la mesure de débit s'écarte des valeurs admises.

Le débit des buses est un facteur important qui permet, en pratique, de déterminer rapidement leur qualité. A l'état neuf le débit des buses est un paramètre utilisé par les constructeurs pour vérifier la qualité de leur production. A l'état usagé, le débit des buses permet d'évaluer leur usure et de les remplacer le cas échéant.

Ces deux considérations démontrent l'importance d'une bonne connaissance du débit des buses neuves ou plus particulièrement du débit de référence, à savoir du débit nominal.

L'objectif de cette étude est de vérifier la précision et la stabilité de cette référence. De plus, la mesure du débit d'un grand nombre de buses neuves doit permettre d'établir la distribution statistique de la variable «débit des buses neuves». Une fois la distribution établie, des informations précises pourront être fournies sur la conformité des tolérances de fabrication des constructeurs.

MATERIEL ET METHODE

Les débits de 1565 buses neuves ont été mesurés. Ces buses sont distribuées dans 48 lots de marques, calibres, angles et matériaux de construction différents. Le nombre de buses par lot varie de 10 à 100 individus.

Les débits ont été mesurés à 2 bars ou 3 bars, selon les spécifications du constructeur. Le liquide utilisé est de l'eau claire à la température ambiante. Le tableau 2 donne les caractéristiques des différents lots de buses neuves étudiées.

Tableau 1. Critères de qualité (débit) utilisés par les 3 constructeurs de buses étudiées (A-B-C)

Constructeur	Liquide de contrôle	Echantillonnage	Tolérances sur le débit des buses
A	air	Toute la production	$x - 5 \% \leq q \leq x + 5 \%$
	eau	Partie de la production	
B	eau	Partie de la production	$x - 3 \% \leq q \leq x + 3 \%$
C	eau	Partie de la production	$x - 5 \% \leq q \leq x + 5 \%$

Tableau 2. Caractéristiques des lots de buses neuves étudiées

Constructeur	A	B	C	Total
Nombre de lots	19	10	19	48
Nombre de buses	988	138	439	1565
Angle des buses (importance relative)*	80° (10,1 %) 110° (89,9 %)	110° (100 %)	110° (100 %)	-
Nombre de calibres*	5	6	4	-
Matériaux de fabrication (importance relative)*	céramique (100 %)	céramique (60 %) plastique (40 %)	céramique (27,1 %) plastique (27,3 %) acier (45,6 %)	

*L'angle, le calibre et le matériau de fabrication sont homogènes dans un même lot. Ces caractéristiques peuvent uniquement différer d'un lot de buses à l'autre.

L'équipement de mesure du débit des buses permet d'acquérir un nombre important de mesures en un temps raisonnable. Le principe de mesure est similaire à celui établi par Reichard D.L. (1991), lors de son étude sur l'usure des buses. Par contre, la vitesse d'exécution de la mesure a été fortement améliorée. La figure 1 montre le banc de mesure du débit des buses.

Le banc de mesure est composé d'une cuve contenant 90 L d'eau propre, d'une pompe centrifuge à étages qui assure un débit stable, d'une vanne de régulation capable de maintenir la pression constante, d'un manomètre de type Bourdon (classe 0,5 et échelle de 0 à 6 bars), d'un débitmètre électromagnétique, d'un carrousel qui permet de disposer les buses et d'un dispositif qui permet d'assurer l'étanchéité entre le circuit d'alimentation et la buse. L'eau de mesure évolue en circuit fermé. Le signal fourni par le débitmètre est envoyé automatiquement à l'ordinateur. Ce système de mesure permet de mesurer le débit de 60 buses en 15 minutes.

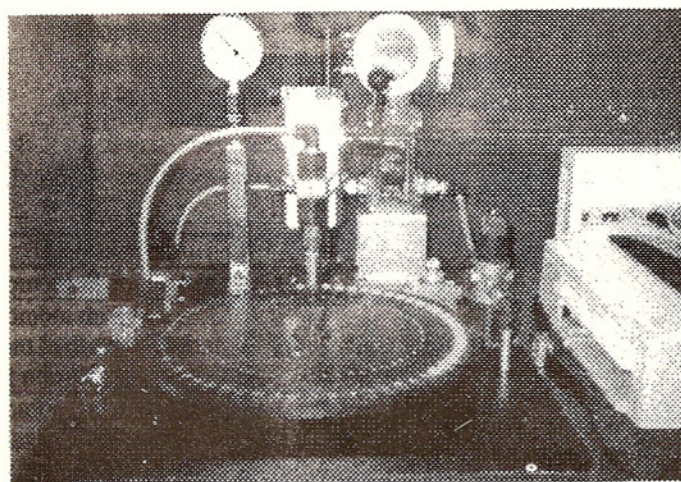


Figure 1 - Dispositif de mesure du débit des buses

ANALYSES ET COMMENTAIRES

Statistiques et test de conformité

Dans un premier temps, les statistiques de conformité ont porté sur les lots de buses. Un lot de buses est considéré comme non conforme, lorsqu'une buse du lot sort des tolérances de fabrication admises par le constructeur (tableau 1). Le tableau 3 donne les résultats de cette statistique.

Tableau 3. Statistique de conformité des lots de buses

Constructeur	A	B	C	Total	Moyenne
Nombre de lots	19	10	19	48	-
Nombre de lots conformes	7	1	14	22	-
Nombre relatif de lots conformes (%)	36,8	10	73,7	-	45,8

Le tableau 3 montre qu'une partie importante des lots de buses neuves n'est pas conforme en termes de contrôle de qualité tel que nous l'avons défini ci-dessus. Ce constat est surtout marqué pour le constructeur B. Il faut noter que ce constructeur a les tolérances de qualité les plus sévères.

En termes pratiques, lorsqu'un utilisateur achète un nouveau lot de buses, il doit s'attendre, en moyenne une fois sur deux, à recevoir un lot contenant au moins une buse sortant des tolérances de qualité du constructeur (tableau 1). Cette remarque est à nuancer en fonction du constructeur.

Cette statistique ne donne pas beaucoup d'informations au niveau du nombre de buses non conformes. C'est pourquoi, les statistiques de conformité ont porté directement sur les buses. Une buse n'est pas conforme lorsque son débit sort des tolérances de fabrication admises par le constructeur. Le tableau 4 donne les résultats de cette statistique.

Tableau 4. Statistique de conformité des buses

Constructeur	A	B	C	Total	Moy.
Nombre de buses	988	138	439	1565	-
Nombre relatif de buses dont le débit < à la limite de tolérance inférieure (%)	0,6	20,3	0,7	-	2,4
Nombre relatif de buses dont le débit > à la limite de tolérance inférieure (%)	18,0	10,9	10,7	-	15,3
Nombre relatif de buses non conformes (%)	18,6	31,2	11,4	-	17,7

Les résultats du tableau 4 sont certainement plus positifs que ceux obtenus précédemment (tableau 3). En moyenne et indépendamment du constructeur, 82,3 % des nouvelles buses satisfont aux critères de qualité de production. Cependant, il faut remarquer que les mauvais résultats obtenus précédemment par le constructeur B sont confirmés.

Les deux statistiques de conformité réalisées précédemment indiquent que lorsqu'un lot n'est pas conforme, seulement une partie des buses constitutives du lot sort des tolérances de fabrication. Il serait intéressant de connaître l'influence de ces «mauvaises buses» sur le débit moyen. Aussi, les débits moyens des lots ont subi un test de conformité au débit de référence (Dagnelie, 1986). Ce débit de référence est le débit nominal fourni par le constructeur et chaque lot de buses est considéré représentatif d'une population de buses.

Le tableau 5 donne les résultats du test de conformité des débits moyens au débit nominal dont l'hypothèse nulle peut s'écrire de la façon suivante

$$H_0 : \text{débit moyen du lot} = \text{débit nominal}$$

Tableau 5. Résultats du test de conformité du débit moyen au débit nominal

Constructeur	A	B	C	Total	Moy.
Nombre de lots	19	10	19	48	-
Nombre relatif de débits moyens statistiquement conformes (%)	15,8	40,0	21,1	-	22,9
Plus petit écart entre le débit moyen et le débit nominal (%)	-1,70	-3,61	-2,55	-	-
Plus grand écart entre le débit moyen et le débit nominal (%)	7,25	2,33	6,66	-	-
Ecart moyen entre le débit moyen et le débit nominal (%)	1,72	-1,09	0,16	-	0,52

A première vue, les résultats du test de conformité sont sévères. Seulement 20 % des débits moyens sont statistiquement conformes. Cependant, le débit moyen dévie, en moyenne, très peu du débit nominal.

Cette analyse montre que les buses dont le débit s'écarte des tolérances de fabrication ont en moyenne peu d'influence sur la population de buses. Ce constat est surtout marquant pour le constructeur B qui présentait de mauvais résultats au niveau des statistiques de lots et de buses. Les débits moyens des lots du constructeur B répondent pratiquement à ses tolérances de fabrication, à savoir $\pm 3\%$ par rapport au débit nominal.

Etude de la distribution du débit des buses neuves

La connaissance de la distribution de probabilité de la variable «débit des buses neuves s» permettra de prédire avec une relative précision le comportement de la production des buses. Vraisemblablement, la variable «débit de buses neuves» devrait suivre une distribution de type gaussien.

Afin de vérifier la normalité de la distribution du débit des buses neuves, les coefficients de symétrie et d'aplatissement de Fisher ont été calculés pour chaque lot de buses neuves. Rappelons que pour une distribution normale, la valeur théorique pour chacun de ces deux coefficients est nulle (Dagnelie, 1986). Les coefficients de symétrie (g_1) et d'aplatissement (g_2) de Fisher sont calculés de la façon suivante :

$$g_1 = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad g_2 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3$$

- où m_2 est le moment centré d'ordre 2.
- m_3 est le moment centré d'ordre 3.
- m_4 est le moment centré d'ordre 4.

Un moment d'ordre k par rapport à la moyenne est dit centré. Il est défini de la façon suivante

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^k$$

- où k est l'ordre du moment,
- x_i est la ième valeur observée,
- \bar{x} est la moyenne des valeurs observées,
- n est le nombre de valeurs observées.

Le tableau 6 présente les valeurs observées des coefficients de symétrie et d'aplatissement de tous les lots de buses neuves.

Tableau 6. Coefficients de symétrie et d'aplatissement de Fisher des lots de buses neuves

Constructeur	A	B	C	Moy.
Coefficient minimal de symétrie de Fisher	-1.77	-1.37	-1.48	-
Coefficient maximal de symétrie de Fisher	1.45	1.93	1.22	-
Coefficient moyen de symétrie de Fisher	-0.23	0.05	0.08	-0.04
Coefficient minimal d'aplatissement de Fisher	-1.70	-0.97	-1.58	-
Coefficient maximal d'aplatissement de Fisher	7.95	4.79	2.86	-
Coefficient moyen d'aplatissement de Fisher	0.40	0.42	-0.38	0.06

Le tableau 6 montre que les valeurs moyennes des coefficients calculés pour l'ensemble des lots sont compatibles avec l'hypothèse de normalité. En effet, les coefficients moyens sont très proches de la valeur nulle.

Afin de conforter ces conclusions, un test de normalité a été pratiqué. Ce test est basé sur la comparaison entre les valeurs observées et théoriques des coefficients de symétrie et d'aplatissement de Fisher. Chaque lot est considéré comme étant un échantillonnage dans une population dont on teste le caractère normal. Ce test demande que l'effectif des échantillons soit suffisamment élevé. Aussi, seuls les lots d'un effectif supérieur à 20 ont été retenus. Le tableau 7 présente les résultats du test de normalité, dont l'hypothèse nulle est :

$$H_0 : \gamma_1 = 0 \text{ et } \gamma_2 = 0$$

Où : γ_1 est le coefficient de symétrie de Fisher défini pour la population.

γ_2 est le coefficient d'aplatissement de Fisher défini pour la population.

Tableau 7. Résultats du test de normalité du débit des buses neuves pour les lots d'effectif supérieur à 20

Constructeur	A	B	C	Total	Moy.
Nombre de lots testés	16	4	11	31	-
Nombre de lots dont la distribution est normale	10	2	8	20	-
Nombre relatif de lots dont la distribution est normale (%)	62,5	50,0	72,7	-	64,5

Le tableau 7 montre que statistiquement l'hypothèse de normalité du débit n'est pas acceptable pour tous les lots de buses. De trente à cinquante pour-cent des lots testés présentent une distribution significativement différente de la distribution normale.

Cette conclusion est gênante car elle ne corrobore pas l'impression de normalité que le tableau 6 avait suscitée. Une analyse plus approfondie a mis en évidence que la normalité est vérifiée pour les lots dont l'effectif est plus important. Ce sont également les tests les plus puissants.

De ce fait, nous admettons que «le débit des buses neuves» est, en pratique, une variable aléatoire qui suit une distribution normale, bien que statistiquement cela ne soit pas systématiquement vérifié.

Etude de la dispersion des débits dans les lots

L'étude de la dispersion des débits des buses autour du débit moyen est précieuse. Elle donne des indications utiles quant à l'homogénéité de la production. On peut supposer qu'un lot de buses dont les débits sont homogènes, effectuera une pulvérisation plus homogène.

Le paramètre statistique utilisé pour représenter la dispersion du débit des buses est le coefficient de variation des débits individuels (CV_q en %). Il s'obtient en appliquant la formule suivante :

$$CV_q = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

Où : s est l'écart type des débits observés.
 \bar{x} est la moyenne des débits observés.

Le tableau 8 présente les valeurs minimum, maximum, et moyenne des coefficients de variation des débits, calculées pour les différents lots de buses.

Tableau 8. Coefficients de variation des débits (CV_q) minimum, maximum et moyens pour les différents lots de buses

Constructeur	A	B	C	Moyenne
CV_q minimum (%)	0,79	0,63	0,84	-
CV_q maximum (%)	4,23	3,12	2,77	-
CV_q moyen (%)	1,97	1,87	1,34	1,70

Comme le montre le tableau 8, les coefficients de variation des débits sont en moyenne réduits et du même ordre de grandeur pour les trois constructeurs. Il faut cependant noter que des lots de buses neuves peuvent présenter des valeurs élevées de CV_q (4,23 % comme valeur maximale observée).

Il serait intéressant d'examiner ces valeurs de dispersion des débits en fonction des critères de qualité des constructeurs (voir tableau 1). Un tel examen suppose que la distribution de probabilité de la variable «débit des buses» soit connue. Ce problème a été étudié au point 2. Nous adopterons l'hypothèse de normalité de cette distribution.

La distribution normale étant asymptotique, il faut choisir la masse de probabilité qui sera associée aux débits compris dans les limites annoncées. Soit 99 % des débits effectivement compris entre ces limites. Cela autorise 1 % d'erreur dans le processus de contrôle de ces buses.

Compte tenu des propriétés de la distribution normale, on peut calculer la valeur du coefficient de variation qui est compatible avec les limites annoncées par le raisonnement suivant : 99 % des valeurs d'une variable de distribution normale sont contenues dans un intervalle centré sur la moyenne et dont la longueur totale vaut 5,16 fois l'écart-type. Si l'intervalle de variation des débits annoncé par le constructeur a une longueur de 10 % du débit nominal, on peut écrire :

$$5,16 \sigma_q = 0,1 Q_{\text{nom}} \quad \text{ou} \quad \sigma_q = 0,0193 Q_{\text{nom}}$$

où σ_q est l'écart-type théorique des débits des buses
 Q_{nom} est le débit nominal annoncé par le constructeur.

En fonction de la définition du coefficient de variation et en supposant que la moyenne de la distribution des débits est égale au débit nominal, on a :

$$CV_q = \sigma_q / Q_{\text{nom}} = 0,0193 \text{ ou } 1,93 \%$$

Où CV_q est le coefficient de variation théorique des débits des buses

Dans le cas où le constructeur annoncerait un intervalle de variation des débits de longueur égale à 6 % du débit nominal, la valeur théorique du CV_q est de 1,16 %.

La comparaison de ces valeurs théoriques avec celles observées a permis de dresser le tableau 9. Celui-ci rapporte le nombre de lots pour lesquels les coefficients de variation observés sont inférieurs aux coefficients de variation théoriques.

Le tableau 9 indique que l'homogénéité de la production des constructeurs A et B ne respecte pas celle qu'ils avaient annoncée. Cette constatation se marque, à nouveau, très fort pour le constructeur B. Si ce dernier était testé sur les mêmes bases que les deux autres, le nombre relatif de CV_q observés inférieurs aux CV_q théoriques serait de 60 %.

Tableau 9. Nombre de lots dont les CV_q observés sont inférieurs aux CV_q théoriques

Constructeur	A	B	C	Total	Moy
Nombre de lots	19	10	19	48	-
Nombre de CV_q observés inférieurs aux CV_q théoriques	11	2	18	31	-
Nombre relatif de CV_q observés inférieurs aux CV_q théoriques (%)	57,9	20,0	94,7	-	64,6

Il est à noter que les lots de buses des constructeurs B et C ne sont pas tous constitués du même matériau (tableau 2). Une analyse qualitative de l'influence de cette caractéristique a mis en évidence que, pour les constructeurs B et C, les lots dont le CV_q observé est supérieur au CV_q théorique sont généralement constitués de buses en céramique. Il semblerait donc que le matériau de construction des buses ait une influence sur la dispersion de leur débit. Le plastique et l'acier sont des matériaux plus homogènes que la céramique. Cette caractéristique pourrait se traduire dans le même sens au niveau de l'homogénéité des débits des buses.

CONCLUSIONS

Dans le cadre d'un contrôle de la production, les constructeurs vérifient le débit des buses neuves. Ils admettent une certaine tolérance de fabrication. Cette tolérance s'exprime en pour-cent d'un débit de référence. Cette référence, aussi appelée débit nominal, est le débit d'une buse neuve parfaite.

Il s'avère que l'ensemble de la production ne répond pas aux critères de qualité annoncés par les constructeurs. Cela se marque surtout pour le constructeur B qui s'est imposé les critères de qualité les plus sévères.

Le test de conformité du débit moyen est négatif. Théoriquement, le débit moyen des buses ne peut être assimilé au débit nominal donné par le constructeur. Pourtant en pratique, cette assimilation est courante. Cela peut se justifier, vu que l'écart relatif moyen entre ces deux valeurs est inférieur à 1 %. Cependant, il faut noter que ponctuellement des écarts importants peuvent être observés.

L'hypothèse selon laquelle la variable aléatoire «débit de buses neuves» a une distribution de probabilité normale est approximativement vérifiée. En moyenne, les coefficients de symétrie et d'aplatissement de Fisher sont proches des valeurs théoriques d'une distribution normale. Pourtant, le test de normalité n'a pas confirmé cette conclusion pour tous les lots. Toutefois il faut le relativiser, étant donné que le test de normalité est positif pour les lots à grands effectifs.

La dispersion observée des débits est pratiquement très basse. Ce qui traduirait une homogénéité de la production. Par contre les coefficients de variation des débits observés sont souvent plus élevés que les coefficients de variation théoriques calculés sur base des tolérances de fabrication des constructeurs. Cela se marque surtout pour les constructeurs A et B.

Il s'avère également que généralement les lots de buses construites en céramique ont des débits moins homogènes que ceux composés de buses en plastique ou en acier.

Ces conclusions doivent être nuancées pour les différents constructeurs. A ce titre, il faut noter les bonnes performances du constructeur C. Ce constructeur s'est imposé des critères de qualité moyennement sévères et il s'y tient généralement.

Outre ces résultats, cette étude a permis la mise au point d'un banc de mesure de débit de buses. Il permet de mesurer, avec une grande précision et en peu de temps, un nombre important de buses.

REFERENCES

1. Caussin R., 1993, Techniques d'application des produits phytopharmaceutiques, I.R.S.I.A., pp 84-85.
2. Dagnelie P., 1986, Théorie et méthodes statistiques, Les presses agronomiques de Gembloux, volume 1, 378 p., 1986.
3. Dagnelie P., 1986, Théorie et méthodes statistiques, Les presses agronomiques de Gembloux, volume 2, 463 p., 1986.
4. Reichard D.L., Ozkan H.E., Fox RD., 1991, Nozzle wear test procedure, Transactions of ASAE, Vol. 34(6), pp 2309-2316, 1991.

ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF A PILOT CONSTRUCTED WETLANDS FOR WASTEWATER TREATMENT/REUSE IN RURAL AREAS

M. VOSSOUGH¹ and E. PAZIRA²

ABSTRACT

Artificial or constructs wetlands have emerged as a viable option for helping to solve a wide range of environmental and water quality problems. Wetland systems are particularly attractive alternative where they can become an integral part of the overall landscape plan.

Interest in wetland systems can be attributed to their role in filtering particulate material thereby reducing suspended solids (SS), removing biochemical oxygen demand (BOD) and removing and storing heavy metals.

This paper presents a preliminary assessment of heavy metals removal performance by a pilot scale wetland based on the design of a constructed wetlands treating industrial wastewater. The potential to reuse water discharged from these artificial wetlands was also recognised. To investigate heavy metals removal performance, pilot scale gravel - substrate subsurface- flow wetlands in a continuous mode were built to assess the removal of Cu, and Zn from industrial wastewater. The treatment performance of constructed wetland, were investigated over an 18-month at a different range of loading rates.

The results show that subsurface flow system leads to satisfactory efficiency wastewater during this period, with an 89% reduction in biochemical oxygen demand (BOD), 81.7% Cu, 90.4% Zn and 90% reduction in total suspended solids (TSS). These results indicate the ability of the system to act as an efficient sink for heavy metals and effluent can be used as irrigation water.

INTRODUCTION

The increasing capital and operation costs associated with conventional wastewater treatment plants is of great concern to wastewater authorities throughout the world.

In recent years, there has been increased interest in alternative and innovative technologies particularly in developed countries, with the aim of developing low-cost, low maintenance, and environmentally friendly methods of treating wastewater (Finlayson et al., 1987; Costello, 1989; Maddox and Kingsley, 1989).

The new developing "Constructed wetland technology (CW) offers a low cost, low maintenance solution to domestic and industrial wastewater treatment especially suitable for developing countries (Mancini et al. 1994; wang et al. 1994)

Considering the uncontrolled expansion of big metropolitan cities of Iran (e. g. Tehran, Isfahan) in mind, we think that the CW technology may offer a solution if the final effluent reused for the following applications:

- Irrigation playing fields and recreational areas:
- Irrigation pastures and fodder crops:
- Irrigation sugar cane.
- Irrigation selected treelots, and for the creation of artificial lakes and wetlands in resort areas.

There is considerable scope for reuse of effluent in community agricultural practices provided the world Health Organisation Recommended Guidelines for waste water Reuse in Agricultural (WHO, 1989) are followed. They provide a sound and safe basis for establishing national health standard and regulations for wastewater reuse

The potential to reuse water discharged from these

¹ Sharif University of Technology, BBRC, P. O. Box:1 1365-6891.Tehran.IRAN

² Irania Agricultural Engineering Research institute (IAERI), Po.Box 31585-845-Karaj-IRAN.

artificial wetlands has been recognised by many investigators.

Greenway and Simpson (1996) noted that in arid regions effluent from artificially constructed wetlands can be used for a variety of purposes including irrigation crops, playing field, golf courses, park and gardens. The benefits of reusing wastewater in this way include the conservation of natural water resources, the alleviation of surface and ground water pollution and the provision of nutrients contained within the wastewater for plant growth.

One of the main problems with the use of wastewater for irrigation is the presence of pathogens and parasites, some of which can persist in the environment for long periods. Previous studies investigating the treatment of municipal wastewater using artificially constructed wetlands have shown that pathogens and parasites may be efficiently removed or inactivated (Gersberg et al., 1989; Rivera et al. 1995).

The main goal of the present study was to monitor the efficiency of the system for the treatment and reuse of high-strength waste from the bakers yeast industry.

I. REACTION KINETICS AND HYDROLOGY

Artificial wetlands are biological reactors with continuous growth of biomass. The basis for description is a comparison of the real reactor to either or both of the ideal flow patterns: plug-flow reactors (PFR) and continuous stirred tank reactors (CSTR). The conversion in the steady flow PFR for a first - order, irreversible reaction is given by:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp[-k.t] \quad (1)$$

where:

C_e : BOD concentration in outlet (mg/l)

C_o : BOD concentration in inlet (mg/l)

k : First - order rate Constant (L/day)

t : nominal retention time (day)

Several published sources (Reed et al., 1988; USEPA, 1993) propose a rate constant of 1.104 l/d for use in formula (1) for the design of subsurface constructed wetlands. If the standard deviation recorded during the investigational period is subtracted from calculated rate constant (above) a conservative of 1.4 l/d results, implying a 20% smaller wetland to achieve equivalent BOD removal.

Darcy's law has been applied to the hydraulic design of subsurface flow wetlands (USEPA, 1993) when the dimensions of, media specifications and depth of the pilot scale wetland are entered into the equation defined by Darcy's Law:

$$Q = k_s AS$$

Where:

Q = flow per unit time

K_s = hydraulic conductivity of a unit area of the perpendicular to the flow direction.

A = total cross sectional area, perpendicular to flow.

S = hydraulic gradient of the water surface in the flow system.

The calculated theoretical flow through the media without surface flow is approximately 32 m³/day, adopting an hydraulic conductivity of 10,000 m³/m² day (USEPA 1993).

II. MATERIALS AND METHODS

Two laboratory scale wetlands were constructed as subsurface flow systems in a continuous mode. Two flow experimentation tanks measuring 1.5 m long × 0.4 m wide × 0.3 m deep was used; one tank was employed for dosing experiments and the other acted as a control.

The central sections of the tanks, which consisted of washed gravel of diameter 3-7 mm and the porosity of 0.35 to a depth of 0.25 m, contained 12 plants of species phragmites, which were placed at approximately equal intervals in the media. The Volume of liquid in the system was about 80 liters.

A schematic diagram of SF wetland is presented in Figure 1. The system was fed diluted raw sewage from the effluent of baker's yeast factory. The average influent wastewater quality fed to the wetland for this period is presented in Table 1.

Table 1: Average concentration of Influent wastewater

Parameter	BOD ₅	COD	Suspended solids	Total Njtrogen	Total phosphor
(mg/lit) Concentration	256	460	132	43	3.6

Samples were collected daily from two points within the systems: 1 influent, 2 final effluent. Analysis of the samples were carried out according to standard methods (A.P.H.A., 1985).

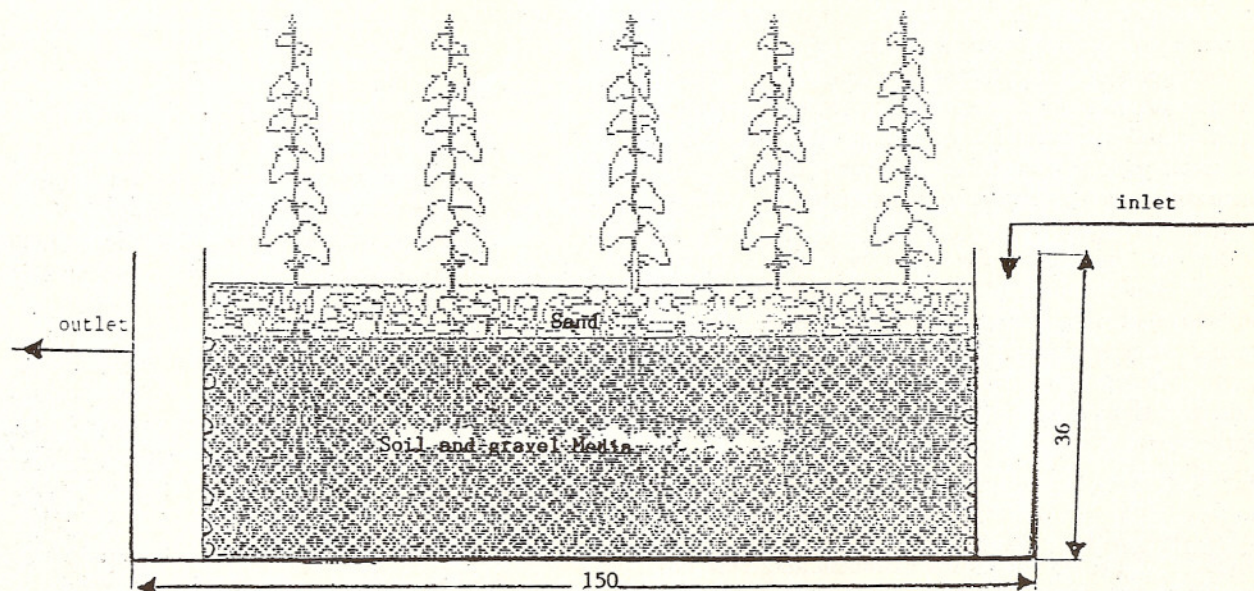


Figure 1: Schematic diagram of subsurface flow wetland.

III. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the analysis of BOD₅, COD, SS, TP, TN and pH are given in Table 2 for wetland system and in Table 3 for blank system.

Table 2: Average Concentration of input and output for wetland system

Parameter	BOD mg/l	COD mg/l	SS mg/l	TN mg/l	TP mg/l	pH
input	270	440	148	44.6	4.4	8.1
output	23.2	92.6	19	13.3	1.1	8.0
% removed	91	80	87	70	75	--

The mean removal efficiencies of BOD, COD and SS over the period of sampling for wetland system were 91 %, 80 % and 87 % respectively, but from Table 3 it can be seen that the removal rate of BOD₅, COD and TP were extremely below, they were, 30 % for BOD and COD and only 4 % for TP. From these results it can be concluded that only 30 % of total removal is due to physical adsorption by gravel bed.

The pH of the wastewater ranged from 7.6 to 8.1 and did not change noticeably through the system.

Table 3: Average Concentration of input and output for Blank system

Parameter	BOD mg/l	COD mg/l	SS mg/l	TN mg/l	TP mg/l	pH
input	276	496	148.2	45.2	4.3	8.1
output	193	346	38	32.6	4.1	8.0
% removed	30	30.2	74	27	4	--

Figure 2 shows BOD₅ concentration in the influent and effluent of the wetland during six months. At the starting of operation the removal efficiency was not considerable, but after 120 days in spite of high BOD concentration in influent, a considerable removal was obtained.

Nitrogen removal was near 72 % according to Figure 3; and was coupled with a slight increase in nitrate / nitrite concentrations, indicating that either sufficient denitrification occurred to remove the nitrate formed during nitrification or that volatilisation was the major nitrogen removal mechanism.

Suspended solids removal was important to the assessment of the CW operations because the agricultural discharge permit requires effluent TSS to be less than 50 mg/l. Figure 4 shows TSS concentration in

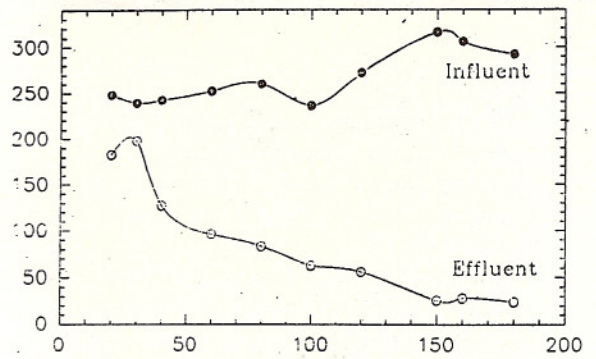


Figure 2: Influent and effluent concentration of BOD in the CW.

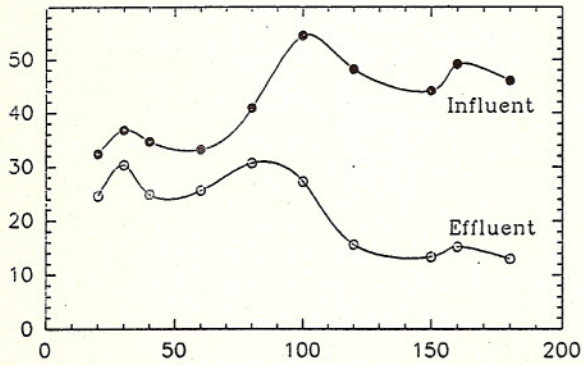


Figure 3: Influent and effluent concentration as of TN in the CW.

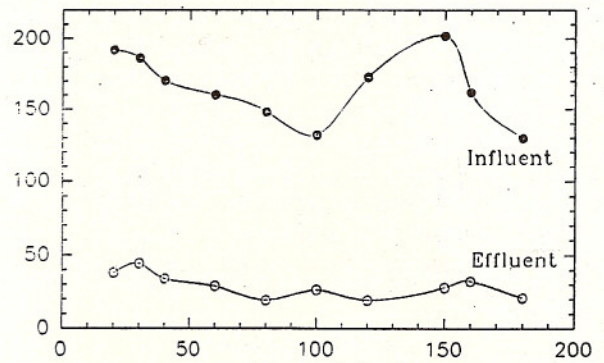


Figure 4: Influent and effluent concentration of TSS in the CW

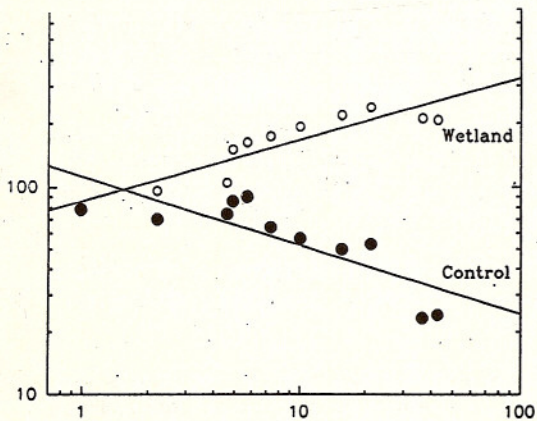


Figure 5: BOD₅ removal vs organic loading for CW and control system

the wetland, it can be seen that concentration in the effluent is fairly constant and below 30 mg/l. In addition, the vegetated system removed slightly more suspended solids than the control system. (90% for CW, 65% for control system).

From the averaged results for each period the BOD₅ removal in mg/l for each treatment condition can be plotted on a log-log basis against inlet BOD₅ loading in g/m³.d (Figure 5). The graph of figure 5 approximates to a straight line with the equation ($Y = 95.9 + 48.6 \ln x$) for CW system and ($Y = 158.4 - 30.37 \ln x$) for control system, where $Y = \text{BOD}_5$ removed and $x = \text{inlet BOD}_5$ loading.

Analyses of metals (Cu and Zn) in the influent and effluent show that maximum concentration of Cu and Zn at the inflow were 2.1 and 3.6 mg/l and the out flow 0.19 and 0.28 mg/l. The average efficiency of Zn and Cu reduction were about 90 %.

Wastewater Reuse

Reuse of wastewater to irrigate crops is not a recent practice in Iran. Indirect irrigation reuse has been applied for many years. Effluent from the wetland system is at least comparable to many of this wastewater in terms of BOD and SS and probably superior in terms of potentially toxic compounds such as heavy metals. The effluent from the CW can use for the irrigation of crops with reclaimed wastewater in regions where major source of income is farming or, irrigation of parks and green areas in coastal tourist settlements.

CONCLUSION

Wastewater from baker's yeast factory was successfully treated in a constructed wetland system employing subsurface flow. During the 18 months of operation, mean removal rates were: BOD₅: 89%, COD: 80%, SS: 87% and total Nitrogen 70%. Removal rate of total phosphorus and NO₃-Nitrogen were variable but generally high. The artificially constructed wetland played an essential role in improving effluent quality, but effluent from the wetland was not of sufficiently high quality for irrigating especial crops, it was being successfully used for the irrigation of ornamental plants and of land for recreational purposes.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge assistance from Sharif University of Technology (BBRC), and Iranian Agricultural Engineering Research Institute (IAERI). For their substantial financial and practical assistance in carrying out this research.

REFERENCES

1. APHA, AWWA and WPCF (1985). Standard Methods for the Examination of water and wastewater. American public Health Association, 16th edd. Washington.
2. Castello, C. J. (1989) Wetlands treatment of dairy animal wastes in Irish Drumlin landscapes. In: Constructed wetlands for wastewater Treatment. D.A. Hammer(ed). Lewis, Michigan.
3. Finlayson, C. M., Chick, A. J., Von Oertzen, L. and Mitchell, D.S. (1987). Treatment of piggery effluent by an aquatic plant filter. *Biol. wastes* 19, 179-196.
4. Gersberg, R.M., Gearheart, R.A. and Ives, M. (1989). pathogen removal in constructed wetlands. In: Constructed wetlands for wastewater Treatment. D.A. hammer(ed). Lewis, Michigan.
5. Greenway, M. and Simpson, J.S.(1996). Artificial wetlands for wastewater treatment, water reuse and wildlife in Queensland, Australia. *Wat. Sci. Tech.* 33(10-11),221-229.
6. Maddox, J.J. and Kingsley, j.B. (1989). Waste treatment for confined swing with an integrated artificial wetland and aquaculture system. In: Constructed wetlands for wastewater Treatment. D.A. Hammer(ed). Lewis, Michigan.
7. Mancini, i.M., Boari, G. and Trulli, E.(1994). Integrated biological treatment for high strength agro-industries wastewater. Pre-print of the 4th Int. Conf. wetland systems for wat. poll. Cont. 6-10 NOV. 1994, China. 589-598.
8. Reed, S.C., Middlebrook, E.J., and Crites, R.W. (1989). Natural system for Waste Management and Treatment Mc Graw-Hill, New York.
9. Rivera, F., Warren, A., Ramirez, E., Decamp, O., and Snachez, J.T. (1995). Removal of pathogens from wastewater by the root zone method. *Wat. Sci.Tech.*32(3),211-218.
10. U.S.EPA, (1993). Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: A Technology Assessment. EPA 832-R-93-008.
11. Wang, J., Cai, X., and Zhang, Y. (1994). Analysis of the configuration and the treatment of constructed wetland wastewater treatment system for different wastewater in south china. Pre-print of the 4th int. Conf. Wetlands systems for Wat. poll. Cont.,6-10 Nov. 1994, China. 114-120.
12. WHO (1989). Health Guidelines for the use of wastewater in Agricultural and Aquaculture. Technical Report series No. 778, World Health organisation, Geneva.