

Culture sous serres au Maroc

Aspect agro-économique : cas de la banane et de la tomate

Par

EL QORTOBI AA. et EZZAMITI A.

Ingénieurs Agronomes ORMVA Gharb

Cette publication résume les résultats de deux études (1) et (2) relatives à la comparaison des sorties et entrées en devises engendrées par la pratique de deux cultures sous serre, à savoir le bananier et la tomate.

Ces deux cas de figures représentent deux types de cultures qui engendrent des sorties de devises. Or, leur pratique visait, soit l'économie de celles-ci (bananier), soit leurs entrées (tomate).

D'ou l'intérêt de la comparaison des sorties et entrées ou économie de devises engendrées par la pratique des deux cultures sous serres.

Cette comparaison a été possible grâce à :

- la réalisation d'une analyse micro-économique afin d'étudier l'intérêt financier que revêtent les cultures sous-serres étudiées pour les exploitants.

- la réalisation d'une analyse macro-économique, basée sur le calcul de l'indice du recouvrement défini comme suit :

$$I_r = \frac{\text{Valeur des exportations (prix FOB)}}{\text{Valeur des importations (prix CAF)} \times 100}$$

A - CULTURE DU BANANIER

1 - Histoire et problématique

La culture du bananier a été pratiquée au Maroc bien avant 1900. Dans certaines villes impériales, elle a été cultivée dans les jardins (3).

En 1946, elle a été pratiquée en plein champs à Doumelt et Ighzrine dans la région du Souss. Ce n'est qu'en 1981 que la culture du bananier sous serre a commencé à Biougra (Souss Massa). La réussite de ce type de culture a stimulé son extension en dehors du Souss, le long du littoral atlantique jusqu'au Nord du pays (Sous Massa, Essaouira, El Jadida, Casablanca, Rabat-Salé, Gharb, Loukkos etc...) (4).

A la mi-1988, la superficie du bananier a atteint 896 ha (5) (tableau n°1), soit un rythme moyen annuel de plantation d'environ 130 à 140 ha.

Tableau n° 1 : Répartition de la bananerie nationale

Zone	Culture plein champ (ha)	Culture sous serre (ha)	Total (ha)
Sous-Massa	90	476	566
El Jadida	-	116	116
Rabat-Salé	-	130	130
ORMVA Gharb	-	81	81
Casablanca	-	33	33
Ben Slimane	-	36	36
Khémisset	-	9	9
Essaouira	-	14	14
Loukkos	-	1	1
Total	90	896	986

Toutefois, ce développement spectaculaire de la bananerie sous serre au Maroc n'est que le résultat des mesures prises par l'Etat, relatives aux produits

d'importations et visant à redresser la balance commerciale du pays.

En effet, la banane a été classée à partir de 1978,

sur la liste C des produits prohibés à l'importation.

N'est-il pas, alors, paradoxal de chercher à redresser la balance commerciale du pays, en évitant une hémorragie de devises engendrée par l'importation d'un produit, jugé de luxe, alors qu'on permet de le produire localement, et par conséquent, d'entraîner une sortie de devises pour l'importation des équipements et facteurs nécessaires à sa production.

D'où la question fondamentale suivante qui résume cette problématique : combien coûte à la nation les sorties en devises engendrées :

- soit par l'importation de l'équipement et des facteurs nécessaires à produire localement la banane ?
- soit par l'importation directe de la banane fraîche ?

2 - Méthode de travail

a - Agrotechnie de la culture

Les opérations suivantes ont été étudiées :

- aménagement du sol
- construction des serres
- plantation
- entretien de la culture
- récolte et production.

Une étude bibliographique a été réalisée.

b - Analyse économique

Les flux de produits et de monnaies liées au secteur du bananier sous serre sont schématisés dans la figure 1. Deux volets essentiels ressortent de ce schéma.

• Analyse micro-économique

Il s'agit de calculer les éléments suivants :

- marge brute à l'hectare (M.B.)
- valeur ajoutée à l'hectare (V.A)
- autres indices (V.A/tonne, VA/charges d'installation des serres,...etc).
- taux d'intensification des investissements (investissements en DH/ha).

• - Analyse macro-économique

Comme le montre la figure 1, les sorties de devises sont possibles suivant plusieurs voies. Dans notre cas, on ne s'est intéressé qu'aux sorties engendrées par l'importation de la charpente métallique, le matériel d'irrigation, le plastic, les intrants importés et l'emprunt de la CNCA remboursé en devises pour les organismes étrangers.

Voir schéma (Fig 1)

Mais, en raison du manque d'information, notamment la répartition des Sources de financement de la CNCA et les prix économiques, nous avons dressé certaines hypothèses qui nous ont aidé à estimer les sorties en devises prises en compte. Ces hypothèses sont :

- Le coût des produits à l'importation est équivalent au coût payé par l'exploitant, majoré par les subventions lorsqu'elles ont été défalquées et multipliées par un coefficient tenant compte de la marge bénéficiaire et des taxes respectivement perçues par les agents économiques intermédiaires et l'Etat.

H1 : le coût total payé en devises est équivalent à la moitié du coût total financier.

H2 : le coût total payé en devises est équivalent aux 75 % du coût total financier.

H3 : le coût total payé en devises est équivalent à 100 % du coût total financier.

- Les emprunts réalisés par la C.N.C.A. pour financier ses clients sont généralement étrangers et constituent une source de financement importante. D'autre part, la culture du bananier sous-serre demande des investissements importants à l'hectare et, donc, des emprunts volumineux réalisés par l'agriculteur.

Pour tenir compte de ces sorties, même si la superficie actuelle du bananier est limitée, nous avons supposé que 50 % de l'annuité remboursée par l'agriculteur, sera destinée à rembourser les créanciers étrangers de la CNCA en devises. Elles constituent une hémorragie de devises et méritent d'être considérées dans le calcul.

- Les agents économiques intermédiaires entraînent des sorties de devises, sous forme de dividendes ou d'annuités sur des prêts, évaluées à 15% des frais totaux des matériaux importés pour l'installation d'un hectare du bananier.

En plus de ces hypothèses, nous avons recueilli les informations suivantes :

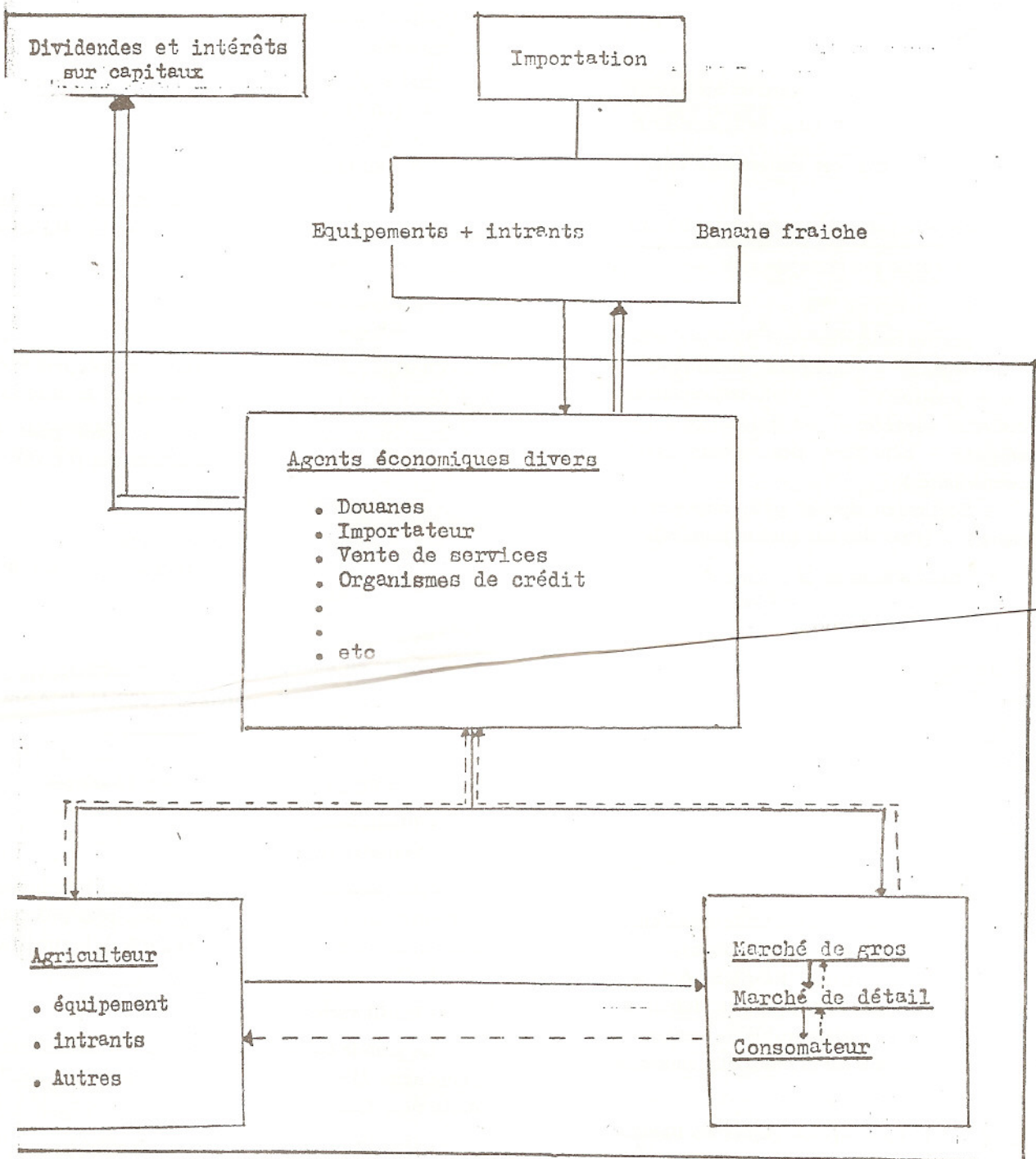
- Les cours mondiaux de la banane fraîche (1984-87)

- Le taux de change des différentes devises en monnaie nationale (DH)

- La nature des matériaux et produits importés et utilisés pour produire la banane localement.

Ces hypothèses et les informations recueillies nous ont aidé à comparer les sorties de devises nécessaires

FIG 1 : SCHEMA DES FLUX COMMERCIAUX
(culture de bananes)



Légende :

- flux des produits (banane, équipements, etc...)
- ⇒ Sorties de devises possibles
- > flux de monnaie nationale.

à la production d'un kilogramme de bananes au niveau national avec celles pouvant se produire en cas de son importation. Cette comparaison a été faite en utilisant l'indice suivant, habituellement utilisé, pour caractériser le recouvrement des devises, lors de l'étude de la balance commerciale d'un pays.

$$\text{Indice de recouvrement (\%)} = \frac{\text{Valeurs des exportations (Prix FOB)}}{\text{Valeurs des importations (Prix CAF)}}$$

Dans notre cas, cet indice a été adapté comme suit :

$$\text{I.R.} = \frac{\text{Sortie en devises pour produire localement un kg de bananes (Prix CAF)}}{\text{Sorties en devises pour importer un kg de bananes (Prix CAF)}} \times 100$$

Avec :

+ Sorties en devises pour produire localement un Kg de bananes = (Charpente métallique + Engrais N.K + produits phytosanitaires + Prêt CNCA + Matériel d'irrigation et de pompage + bénéfices des agents économiques intermédiaires).

+ Sorties en devises pour importer un Kg de bananes = (Prix des bananes importées).

3 - Agrotechnie de la culture du bananier

a - Exigences des cultures

• Botanique

Le bananier (*Musa Spp*) appartient à la famille des musacées de la classe des monocotylédones (4), (6).

On cite 200 variétés, environ qui sont actuellement connues dans le monde (4).

Le groupe cavendish comprend les variétés cultivées au Maroc et qui sont (4) :

- Petite naine (petite taille et moins sensible au froid);
- Grande naine (de taille située entre celle de la petite naine et du poyo);
- Poyo (dite "ROBUSTA" de grande vigueur. Elle tolère le déficit ou l'excès d'eau, mais sensible au vent);
- Williams (de grande taille, moins sensible au froid).

• Exigences écologiques du bananier

La période végétative est de 300 à 365 jours. Les températures optimales de croissance oscillent de 25 à 30° C.

Il craint le gel, des températures inférieures à 8° C pendant des périodes prolongées entraînent des dégâts importants. Il exige de fortes humidités relatives

de l'air et craint des vitesses de vent supérieures à 4 m/secondes. Le sol doit être profond, bien drainé à PH allant de 5 à 7. Il est sensible à la salinité et préfère des sols à ECe mmho/cm. Les exigences en éléments fertilisants rapportées dans certaines références bibliographiques oscillent de :

- 200 à 400 U d'azote
- 45 à 60 U de P205
- 240 à 480 U de K2O
- 60 à 80 U de MgO

Le bananier est très sensible au déficit d'eau. Ses besoins en eau varient de 12.000 à 22.000 m³/Ha selon le type de climat (4), (6), (7).

b - Pratique agricole

• Types de serres

Globalement, les serres métalliques occupent 62% des superficies et celles en bois occupent le reste (5).

Les quantités de matériaux utilisées pour la construction des serres sont généralement (8), (9) :

- Serres métalliques (/Ha)

- Armature = 22 à 30 tonnes
- Film en plastique thermique = 2,5 à 3 tonnes (200 à 240 U)
- Fil de fer galvanisé = 3 tonnes

- Serre en bois (/ha)

- Poteaux d'eucalyptus : 630 U de 4,5m à 5,5m de longueur
- Film plastique : 3 à 3,5T (220 - 24 U)
- Fil de fer galvanisé : 9 à 10 tonnes

• Plantations

- Matériel végétal

Généralement, les souches et les rejets sont utilisés. Les vitroplants sont plus homogènes, plus précoces à la floraison, mais moins utilisés (24% de la superficie totale) (5),

- Profil variétal

La grande naine occupe 62% des superficies et la petite naine 21%. La variété Williams n'occupe que 7% de la superficie totale (5).

- Densités pratiquées

Elles varient beaucoup avec une fourchette allant de 1600 à 3500 plants/ha voir même 4000 dans certains cas (5).

- Date de plantation

Agronomiquement, il est souhaitable de planter en

Mars-Avril. Cependant les agriculteurs les évitent afin de ne pas faire coïncider la récolte avec les mois d'été où il est difficile d'écouler la production.

- Mode de plantation

Les plantations en linges simples, jumelées ou les 2 à la fois sont pratiquées (5), (8), (9).

- Aménagement du sol

La séquence la plus fréquente est :

- Labour
- 2 cover-crop
- Ouverture des trous.

- Fertilisation

A la plantation les apports sont (8), (9) :

- 10 à 25 kg de Fumier/trou
- 100 g de supertriple/trou
- 100 g de sulfate de potasse/trou.

Les apports réalisés après sont très variables et les fourchettes suivantes ont été rapportées (5), (8), (9).

- Azote = 200 à 800 kg/ha/cycle
- Potasse = 200 à 2000 kg/ha/cycle
- Phosphore = 0 à 150 kg/ha/cycle
- Mgo (Parfois) = 150 kg/ha/cycle.

- Irrigation

57% des exploitations utilisent le circojet associé à la brumisation. Les doses pratiquées varient de 12 à 16000 m³/ha (5).

- Autres travaux d'entretien (4), (5), (8), (9)

- Binage sarclage lutte contre les mauvaises herbes
- Desherbage chimique
- Traitement anti-parasite et antifongique
- Tuteurage
- Ebourgeonnement
- Epistillage
- Gainage du régime
- Oeillonnage.

- Récolte (4)

Elle a lieu 11 à 14 mois après la plantation. Le poids moyen des régimes varie de 20 à 35 kg avec un maximum de 60 à 70 kg.

- Maturation et conservation (4)

La maturation est réalisée à des températures allant de 15 à 20 °C avec une humidité relative de 90 à 95%. Artificiellement, la maturation est obtenue par traitement dans des murisseries par l'acétylène.

La conservation se fait à 13 - 15° C jusqu'à 20° C.

4 - Analyse économique

a - Coût de production d'un hectare de banane.

voir tableau n° 2

Le coût total pour la production d'un hectare de bananier s'élève donc à :

- S. métallique : 158.862 DH, augmentés de 15% de marge bénéficiaire revenant à la société qui installe la serre, ce coût devient 182.691 DH/ha.
- Serre en bois : 143.832 DH/ha.

Ces coûts ont été calculés pour la conduite la plus pratiquée sur la culture du bananier sous serre. L'équipement d'irrigation considéré est l'irrigation localisée, associée à la brumisation. Les durées d'amortissement considérées sont :

- armature métallique : 10 ans
- film plastique : 3 ans
- fil de fer (serre métallique) : 10 ans
- fil de fer (serre en bois) : 8 ans
- poteaux en bois (serre en bois) : 8 ans
- socles en béton (s. en bois) : 8 ans
- matériel d'irrigation : 5 ans
- puits : 10 ans
- matériel de pompage : 8 ans
- rénovation de la plantation : 4 ans.

b - Calcul des indices économiques à l'échelle de l'exploitation

Partant d'un prix payé à la production équivalent à 6,5 DH/kg et d'un rendement de 40 tonnes/ha/an (moyenne nationale actuelle), il a été possible de calculer les indices suivantes :

Les résultats du tableau 3 permettent d'avancer :

- La culture du bananier est très rentable : 77.309 à 116.168 DH de marge nette à l'hectare.

- Le taux de rentabilité (ratio $\frac{\text{marge nette}}{\text{charge totales}} \times 100$) est respectivement de 42,3% et 80,8% pour la serre métallique et celle en bois.

- La valorisation des facteurs extérieurs consommés par l'exploitation est assurée.

La valeur ajoutée est de l'ordre de 124 087 DH et 162.166 DH respectivement pour la serre métallique et celle en bois. Elle représente 9 à 11 fois celle permise par les agrumes. Elle compense totalement les charges d'installation (ratio $\frac{\text{V.A.ajoutée}}{\text{charge d'installation}}$ est de 1,0 et 1,72 respectivement pour la serre métallique et celle en bois).

Tableau 2 : Charge de production d'un hectare de bananier sous-serre

	Coût total/ha		Coût ha/han	
	S. métallique	S. bois	S. métallique	S. bois
I- Installation				
Construction abris	286.000	159.510	42.830	34.795
Equipement irrigation	60.000	60.000	12.000	12.000
- Puit et matériel de pompage	70.000	70.000	8.250	8.250
- Plantation	70.763	70.763	17.700	17.700
Total partiel (1)	486.763	360.273	80.780	72.745
F. Gestion : (2) = (1) x 3%	14.603	10.808	2.425	2.182
F. financiers pour 7 an (3) (12%)	181.892	134.625	25.985	19.233
Total installation : (4) = (2) + (3)	-	-	109.190	94.160
I - Entretien				
- Fertilisation	-	-	10.132	10.132
- Irrigation	-	-	11.520	11.520
- T. phytosanitaires	-	-	3.000	3.000
- Main d'œuvre	-	-	16.630	16.630
- Location terrain	-	-	3.000	3.000
Total partiel (5)	-	-	44.282	44.282
- Frais financiers (9%)	-	-	3.990	3.990
- Divers	-	-	1.400	1.400
Total entretien (6)	-	-	49.672	49.672
Total général : (4) + (6) = (7)	-	-	158.862	143.832

Tableau 3 : Indices économiques à l'échelle de l'exploitation

Indices	Serre métallique	Serre en bois
Produit brut/ha	260.000 DH	260.000 DH
Marge brut/ha	119.629 DH	145.883 DH
Marge nette/ha	77.309 DH	116.168 DH
Marge nette/tonne	1.932,7 DH	2.904 DH
Valeur ajoutée/ha	124.087 DH	162.166 DH
Valeur ajoutée/tonne	3.103,0 DH	4.054 DH
Valeur ajoutée/charges installation	1,0 DH	1,72 DH
Investissements/ha	478.400 DH	289.510 DH
Rémunération travail/ha		
(MN/Nbre de journées de travail)	52 DH	78,2 DH
Prix de revient/kg	4,57 DH	3,6 DH

- La journée de travail est bien rémunérée par la culture du bananier. Elle permet d'acquérir 52 à 78,2 DH des bénéfiques nets, respectivement pour la serre métallique et celle en bois.

de 4,57 DH/kg et 3,6 DH/kg, respectivement pour la serre métallique et celle en bois.

c - Balance économique

- Sortie de devises

- Le prix de revient de la culture du bananier est

Tableau n° 4 : **Part du coût payé en devises pour la production d'un kg de bananes**

Désignation	Serre métallique			Serre en bois		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3
Matériel d'irrigation et de pompage + subvention (1)	11.131	16.697	22.262	11.131	16.697	22.262
Autres (charpente, fil de fer, plastic. Engrais (N,K), produits phytosanitaires (2)	25.150	46.099	61.466	21.930	32.896	43.861
Prêt CNCA (50% annuités) (3)	30.733	37.725	50.300	19.175	28.763	38.350
Total (DH) : (4) = (1) + (2) + (3)	67.014	100.521	134.028	52.236	78.355	104.473
Agents économiques intermédiaires (5) = (4) x 15%	10.052	15.078	20.104	7.835	1.175	15.671
Total (6) = (4) + (5)	77.066	115.599	154.132	60.072	90.108	120.144
(6) / 40.000 kg (DH/Kg)	1,93	2,89	3,85	1,5	2,35	3,00

- Cours mondiaux

La valeur des importations en DH/kg a été pour la période 1981/84 comme suit :

Tableau n° 5 : **Valeur d'un kg de banane fraîche importée (prix CAF en DH)**

1981	1982	1983	1984
2,49	2,79	2,89	3,79

Source : MARA/DPAE

A partir de 1984, les importations ont été annulées.

Au niveau international, le tableau n° 7 donne

l'évolution des prix mensuels à l'importation dans certains pays pour la période 1984/87 (source MARA/DPV/DH).

En prenant l'Italie et l'Allemagne comme pays de référence (en raison de leur proximité du Maroc, et du fait qu'ils ne produisent pas de bananes, comme le cas de la France en outre-mer), il est possible de comparer les prix de la banane fraîche en cas de son importation, et la part en devises du prix de revient de la banane produite localement, en utilisant l'indice suivant :

$$I.R = \frac{\text{Part payé en devises pour produire localement un kg de bananes}}{\text{Prix CAF d'un kg de bananes importées}}$$

- Calcul de l'indice de recouvrement

Le tableau suivant donne les valeurs de l'indice selon le pays choisi et les hypothèses retenues.

Tableau n° 6 : **Calcul de l'indice de recouvrement par hypothèse et par type de serre (année 1987)**

	S E R R E					
	Serre métallique			Serre en bois		
	H1	H2	H3	H1	H2	H3
Pays de référence						
Italie	17,1	25,75	34,2	13,35	20,0	26,7
Allemagne	33,61	50,42	67,22	26,2	39,3	52,4

Tableau n° 7 - Bananes : Prix mensuels à l'importation dans certains pays, 1984 - 1987

	FRANCE 1/				REP. FED. D'ALLEMAGNE 2/				JAPON 3/			
	1984	1985	1986	1987	1984	1985	1986	1987	1984	1985	1986	1987
 Francs français/kg DH/tonne Yen/kg			
Janvier	4.26	4.50	4.76	4.70	1161	1287	1185	775	67.5	87.9	73.2	55.7
Février	4.55	4.89	5.08	4.84	1402	1494	1323	1197	72.0	89.1	80.0	60.8
Mars	5.04	5.75	5.60	5.62	1436	1877	1447	1410	76.8	95.0	84.6	71.7
Avril	5.05	5.79	5.49	5.42	1448	2011	1685	1282	87.9	122.4	96.4	81.4
Mai	4.91	5.49	5.21	5.33	1344	1803	1523	1288	100.5	130.6	99.0	77.4
Juin	4.79	4.94	5.30	5.55	1440	1509	1540	1521	90.8	133.4	113.3	73.2
Juillet	4.64	4.61	4.71	5.54	1205	1168	879	1323	81.2	116.0	107.3	65.8
Août	4.51	4.61	4.82	5.52	1226	1100	1066	1264	84.4	106.8	81.0	64.0
Septembre	4.53	4.76	5.02	5.45	1205	1223	1054	1129	105.6	118.4	75.6	71.5
Octobre	4.67	4.92	5.02	5.39	1243	822	1002	1029	91.3	106.7	63.4	68.1
Novembre	4.68	4.71	4.87	4.97	1327	937	855	909	80.6	79.0	59.6	58.2
Décembre	4.67	4.66	4.82	4.22	1210	848	947	811	94.6	72.6	60.3	51.2
ANNEE	4.69	4.97	5.06	5.21	1304	1340	1209	1162	86.3	104.8	82.8	66.6

	ETATS-UNIS 4/				ITALIE 5/							
	1984	1985	1986	1987	1984		1985		1986		1987	
					I	II	I	II	I	II	I	II
 Dollars E.-U./caisse de 40 lb Lires/kg							
Janvier	6.20	6.83	5.97	6.97	1000	1600	1550	1850	1350	1750	1550	1700
Février	7.56	8.03	7.01	7.77	1400	1750	1700	1900	1600	1850	1550	1700
Mars	7.51	8.23	9.07	7.69	1300	1750	1900	2050	1600	1850	1730	1850
Avril	7.52	8.79	10.48	5.97	1300	1800	1900	2050	1600	1850	1730	1850
Mai	7.73	8.30	7.03	7.79	1500	1800	1900	2050	1600	1850	1600	1750
Juin	8.33	6.90	6.26	6.47	1500	1750	1850	2000	1600	1850	1550	1700
Juillet	6.65	5.82	6.00	7.46	1500	1700	1400	1750	1290	1610	1550	1700
Août	6.16	7.65	5.82	5.52	1300	1650	1500	1600	1320	1590	1550	1700
Septembre	6.88	6.56	7.69	5.97	1400	1650	1570	1670	1400	1680	1650	1750
Octobre	5.60	5.05	6.80	4.49	1500	1700	1650	1750	1500	1750	1650	1800
Novembre	4.88	4.99	5.33	6.94	1650	1830	1720	1850	1580	1800	1600	1800
Décembre	5.43	5.17	5.65	6.48	1600	1900	1600	1750	1530	1760	1600	1800
ANNEE	6.70	6.86	6.93	6.63	1413	1740	1687	1854	1498	1766	1607	1758

Source : Etats-Unis : Données officielles. Royaume-Uni : commerce privé. Japon : bulletin mensuel de statistiques bananières. Allemagne-France : Marché européens des fruits et légumes, revue d'information économique. Italie : Données officielles. 1/ Martinique, franco wagon, ports français. 2/ Amérique centrale, franco wagon de l'importateur au grossiste, Hambourg. 3/ Philippines, valeur c.a.f. non compris le coût des cartons. 4/ Verte, première catégorie, emballage tropical, caisse de 40 lb ; en provenance d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud, franco wagon, de l'importateur au grossiste, New York. 5/ Franco wagon, ports italiens ; I - Somalie, II - Autres provenances.

Le taux de change nous a été communiqué par la Banque du Maroc, siège Kénitra. Les valeurs des ventes suivantes ont été considérées (mois de Décembre 1987).

- Italie : 6,6811 DH pour 100 livres
- Allemagne : 4,9278 DH pour 1 D.M.

Les résultats du tableau n° 6 relèvent donc, que la production des bananes, au niveau local, permet d'économiser des devises. En effet, L'indice calculé selon les 2 références n'a jamais excédé 70% et reste, donc, largement inférieur à 100%.

B) CULTURE DE LA TOMATE

1) Historique et problématique

La culture de la tomate occupe une place importante dans le secteur des primeurs au Maroc (10), (11) cultivée en plein champs depuis fort longtemps, elle n'a été pratiquée sous serre qu'à partir de 1972.

Deux grandes phases se distinguent alors :

- 1972 à 1978 : situation stagnante avec des superficies très faibles. Il s'agissait des essais de culture sous-serres,
- 1979 à 1987 : Augmentation des superficies au fil des années pour atteindre 1895 ha en 1986/1987.

Depuis la campagne 1972/83, les exportations n'ont fait que décliner pour atteindre le plus bas tonnage en 1978/1979 (10)- Afin de résoudre cette situation, dûe à une vive concurrence sur les marchés extérieurs, et à l'inadaptation de notre calendrier de production à la demande des marchés européens (période d'exportation limitée entre Novembre et Avril par les accords Maroc-C.E.E. de 1976), le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire a lancé, en collaboration avec l'O.C.E, le projet primeurs financé par la BIRD en 1979

Durant la campagne 1987/88 (12), la superficie occupée par la tomate a atteint :

- plein champ : 3 820 ha
- sous serre : 1 445 ha

Ces superficies représentent respectivement :

- 28% de la superficie des primeurs en plein champ
- 87% de la superficie totale des primeurs sous serre.

La zone de culture de la tomate sous serre s'étend le long du littoral atlantique de la région de Rabat-Kénitra à safi et Agadir-Taroudant avec une concentration de la superficie au niveau de Souss-Massa et El jadida-Doukkala (64% de la superficie totale).

La tomate, comme les autres primeurs, constitue pour l'Etat une source de rééquilibrage de la balance commerciale et d'entrée des devises.

Cependant, la culture sous serre, sur laquelle est fondé l'espoir du dit rééquilibrage, exige l'importation d'un équipement coûteux qui engendre une hémorragie de devises.

Il s'avère, donc, judicieux de comparer les entrées en devises, engendrées par l'exportation de la tomate, aux sorties en devises engendrées par l'acquisition des moyens et facteurs de production et/ou le financement des installations et la conduite de la culture.

2 - Méthode de travail

La méthode de travail suivie pour réaliser cette comparaison est la même que celle exposée dans le cas du bananier. Toutefois, l'indice de recouvrement est calculé dans ce cas, sans modification de sa définition.

$$I.R = \frac{\text{Valeur exportations (Prix FOB)}}{\text{Valeur importations (Prix CAF)}}$$

3 - Agrotechnie de la culture

a - Exigence de la culture

• Botanique

La tomate (*lycopersicon esculentum*, Mill, *solanum lycopersicum*) appartient à la famille des solanacées. C'est une espèce annuelle buissonnante dicotylédone à fruits rouges (13), (14). Les variétés de tomate se classent en :

- Variétés à croissance déterminée : palissées et ébourgeonnées en cultures sous-serre.
- Variété à croissance indéterminée : présentent une tige principale poussant avec régularité et formant un bouquet à fleurs toutes les trois feuilles généralement.

• Exigences écologiques (7), (13), (14).

La période végétative s'étend de 90 à 140 jours, (la période en pépinière non comprise : 25 à 35 jours).

Les températures requises pour la croissance sont 15 à 28 °C.

Les températures optimales s'étendent de 18 à 25 °C. La température nocturne optimale est de 10 à 20 °C.

Elle est sensible au gel, à une humidité relative élevée et à de forts vents.

La tomate préfère les limons légers, bien drainés, sans engorgement, à PH allant de 5 à 7.

Modérément sensible à la salinité, la tomate subit des pertes de rendements dès que Ece 2,5 mmhos/cm.

A 12,5 mmhos/cm, la perte est 100 %. C'est au stade germination et au début de développement des plants que la tomate est très sensible au sel.

Les besoins en eau tournent autour de 400 à 600 mm. La tomate est considérée d'une sensibilité moyennement forte au manque d'eau.

La tomate exige :

- 100 à 150 unités d'azote
- 65 à 110 unités de P205
- 160 à 240 unités de K20.

b - Conduite de la culture

• Types de serres

Les serres utilisées dans le cas de la tomate se caractérisent par :

- une hauteur de 3m environ
- l'utilisation de 0,7 à 1,1 tonnes de fil de fer
- l'utilisation de 3 à 4,5 tonnes de plastique.

Les serres en bois sont très utilisées au niveau de sous-Massa.

• Plantation (13), (14), (15), (16).

Les semis en plateaux sont réalisés à partir de Septembre jusqu'à Décembre. Le repiquage est pratiqué 25 à 55 jours après la levée ou même jusqu'au stade apparition du premier bouquet de fleurs.

La plantation est effectuée sur des rangs distants de 0,8 m et à 0,4 m sur le rang. Ces distances sont variables selon la largeur des chappelles de la serre et de l'utilisation ou non des lignes jumelées. Cette pratique est prépondérante au Gharb.

• Aménagement du sol

La séquence suivante est fréquemment pratiquée :

- Labour moyen
- 2 à 3 passages de Cover-crop
- Rarement un labour profond (défoncement)

• Fertilisation

D'après les fiches économiques consultées, les apports suivants sont effectués (15), (16) :

- Fumier : 60 à 90 T/Ha
- Azote : 303 à 373 U/Ha
- P205 : 322 à 414 U/Ha
- K20 : 336 à 480 U/Ha

• Irrigation

10 à 12.000 m³/ha sont apportés durant le cycle de la culture.

Différents systèmes d'irrigation sont pratiqués : localisée et gravitaire.

• Autres travaux d'entretien

Les travaux suivants sont réalisés :

- Binage et buttage
- Traitement phytosanitaire
- Palissage (maintien des plants en position verticale)
- Ebourgeonnement
- Brises vents

g - Récolte (14)

Elle a lieu, en général, 60 jours après la floraison complète. Elle est échelonnée et on distingue parfois trois périodes de floraison correspondant à trois récoltes. Les tomates doivent être récoltées avant leur maturité.

Cependant, il n'est pas convenable de les cueillir trop vertes.

4 - Analyse économique :

a - Coût de production d'un hectare de tomate sous-abri

Le coût total par an et par hectare de la production de la tomate sous serre s'élève à 152.810 DH (campagne 1985-86).

Le tableau 9 donne le détail des charges de production (15).

b - Calcul des indices économiques (à l'échelle de l'exploitation)

Partant des prix payés au producteur (exportation et marché local) et d'un rendement de 70 tonnes dont 55 tonnes exportées et 15 tonnes vendues localement, il a été possible de calculer les indices suivants :

Tableau n° 8 : Indices économiques (à l'échelle de l'exploitation)

Indice	Serre métallique
Produits Brut/Ha	215.000
M. Brut/Ha	144.440
M. nette/Ha	62.190
M. nette/Tonne	888
Valeur ajoutée/ha	109.250
Valeur ajoutée/T	1.561
V.A./charges installation	1,38
Investissements DH/ha	360.540
Rémunération Travail DH/ha	48,2
Prix de revient DH/kg	2,18

FICHE ECONOMIQUE

Tableau n° 9 : Coût de production d'un hectare de tomate sous abris serres

Compagne 1985-86 (DH/DPV/MARA)

Opérations et autres désignations	Coût total (en DH)
- Travaux mécanisés du sol	315
Ils ne sont affectés que l'année d'installation des abris serres en principe, ceux-ci sont déplacés tous les deux ans :	
• Labour profond	300
• Labour moyen	150
• Cover cropage : deux passages à 90 DH	180
Total	630 tous les deux ans
- Fumure de fond	8.870
Fumier : 20 voyages (60T) à 400 DH	8.000
Sulfate d'ammoniage 2 qx à 60 DH	120
Super triple 7 qx à 80 DH	560
Sulfate de potasse 2 qx à 95 DH	190
- Fumure d'entretien	1.160
Ammonitrate 5 qx à 95 DH	475
Sulfate de potasse 5 qx à 95 DH	475
Urée 2 qx à 105 DH	210
- Elevage des plans	10.635
Semences : 100 g à 19 DH/G	
Tourbe : 270 sacs à 28 DH	7.560
Sachets de plastique	875
Plateaux de semis : 20 plateaux à 30 DH/2 ans	300
- Brise vents et palissage	4.020
Roseaux pour brise vents : 2 charges à 1.250 amortis sur 2 ans	1.250
Fil de fer : 700 kg à 4,15 DH amortis sur 2 ans	1.450
Ficelle pour palissage : 60 kg à 22 DH	1.320
- Traitement phytosanitaire	7.465
Désinfection du sol : 560 kg Nemosol à 6,30 DH/kg tous les 2 ans	1.765
Fongicides : par ex. Dithane N-45 : 20 tr x 2l x 45 DH	4.000
Organil 75 PM : 5 tr x 6 kg x 25 DH	750
Insecticides : par ex. Perfection : 5 tr x 2l x 45 DH	450
Acaricides : par ex, Dicofol 50 x 5 tr x 2l x 50 DH	500
- Irrigation : 12.000 m³, puit 60 m	4.875
Gasoil : 1.340 l à 3,45 DH/l	4.625
Huile 28 l à 8,80 DH/l	250
- Main d'œuvre	29.060
Traitement sous sol	10 JT
Préparation du sol (billonnage)	50 JT
Epannage de la fumure de fond	50 JT
- Préparation des plants	60 JT
Plantation	40 JT
Montage de 6 serres (1 fois tous les 2 ans)	90 JT = 180/2
Palissage et taille	100 JT

Tableau n°9 (suite)

Placement des brises-vents	30 JT	
Traitements phytosanitaires	50 JT	
Irrigation	40 JT	
Récolte	460 JT	
Travaux d'entretien y compris vibreur et aération	250 JT	
Sous total :	1.230 JT à 22 DH	27.060
Caporal = 1000 DH x 12 mois		2.000
Entretien et réparation du matériel		2.060
Total : A		68.460
- Location du terrain, amortissement du matériel, transport		
Location du terrain		3.000
Amortissement des abris serres		
• Armature sur 7 ans		21.500
• Plastique sur 2 ans		25.000
• Fil de fer sur 2 ans		1.000
Transport de la récolte (70 t à raison de 0,75 la caisse de 25/kg)		2.100
Amortissement du matériel d'irrigation (5 ans)		
+ matériel de pompage (8 an) + puits (10 ans)		14.750
Amortissement vibreur, matériel de traitement et autres (10)		2.000
Intérêt et frais financiers		15.000
Sous-total : B		84.350
Total Général		152.810 DH

SOCIETE D'ETUDES ET TRAVAUX

SOCIETE ANONYME AU CAPITAL DE 550.000 DH

ENTREPRISE GENERALE DE TRAVAUX PUBLICS
BETON ARME - GENIE CIVIL

290, bd. Mohammed V - RABAT

Tél. : 336-40

Ces résultats montrent que :

- La culture de la tomate sous serre, dont une partie importante de la production est exportée, procure une marge bénéficiaire de l'ordre de 62.190 DH, soit 0,89 DH/Kg produit,

- Le ratio marge nette/charges réelles x 100 est évalué à 41 % ce qui traduit une rentabilisation importante des investissements consentis.

Cependant, il est à noter que le prix de vente n'est intéressant que pour la production exportée,

- La culture de la tomate, sous abris valorise bien les facteurs extérieurs consommés par l'exploitation. La valeur ajoutée est de l'ordre de 109.250 DH.

- La culture de la tomate sous serre rémunère bien

le travail. Une journée de travail permet d'avoir une marge nette à l'héctare, l'ordre de 48,2 DH.

Voir Tableau 9

Recettes

Rendement moyen brut : 70 tonnes

Rendement export : 55 tonnes à 3,5 DH/kg 192 500

Ecart de triage : 15 tonnes à 1,5 DH/kg 22 500

Recettes 215 000 DH/ha

N.B. : des corrections ont été apportés au coût de la journée de travail et à l'amortissement du matériel d'irrigation, du matériel de pompage et du puit, ainsi que la location du terrain.

c - Balance économique

- Sortie des devises

Tableau n° 10 : part du coût de production payée en devises pour produire un kg de tomate exportée.

Désignation	H1	H2	H3
Matériel d'irrigation et pompage + subvention(20%)	4.577	6.866	9.154
Autres (armature fil de fer, plastic, engrais NK produits phytosanitaire, tourbe, etc..)	33.223	49.834	66.445
Prêt CNCA (annuités)	26.742	40.113	53.484
Total (1)	64.542	96.813	129.083
Agents économiques intermédiaires (2) = (1) x 15%	9.681	14.522	19.362
Total en DH (3) = (1) + (2)	74.223	111.335	148.445
Total en DH/kg (3)/55.000 kg	1,35	2,02	2,70

(Subvention = matériel d'irrigation)

H1 = 0,5 x coût total

H2 = 0,75 x coût total

H3 = 1 x coût total.

L'indice de recouvrement a été évalué pour les trois hypothèses comme suit :

Tableau N° 11 : Calcul de l'indice de recouvrement

Hypothèses	H1	H2	H3
Indice	259 %	173 %	130 %

Ceci montre que la balance économique pour la tomate sous serre destinée à l'exportation est très excédentaire. Dans la pire des situations (H3) elle est excédentaire de 30%.

C) DISCUSSION

a - Balance des devises

Les résultats de la méthode utilisée pour évaluer le recouvrement des devises ont permis de constater que :

- en produisant la banane localement, on économise une part importante de la monnaie sortante en devises dans le cas de son importation. Dans la pire des situations (hypothèse 3, Allemagne), il s'agit d'une économie de 33 de la valeur d'importation de bananes. Une différence significative entre la serre métallique et celle en bois est à noter. Dans ce dernier cas, l'économie de devises atteint 48% (h3 ; Allemagne).

- La culture de la tomate sous serre, destinée à l'exportation, permet de réaliser un excédent en devises très important. Il est de l'ordre de 30 à 150 selon les hypothèses avancées.

b - Effets agrotechniques

La maîtrise de la culture sous-serre permet d'encourager l'introduction ou le développement d'autres cultures rentables et participerait, sans doute, à l'auto-provisionnement du pays en certains produits agricoles. On assiste, actuellement, à la pratique de l'ananas sous serre dans certaines zones (sous Massa, Douiyet) et à l'extension du maraichage sous serre vers d'autres zones (cas de Menasra dans le Gharb).

c - Effets socio-économiques

La pratique de ces cultures permet :

- de créer de l'emploi : 720 à 790 jt/an/ha pour le bananier et 1 290 jt/an/ha pour la culture de la tomate. Cette offre d'emploi est encore plus importante en considérant les activités liées à ces productions, aussi bien à l'amont qu'à l'aval :

- de stimuler des activités économiques. A l'amont, les usines de plastic, les sociétés de vente des intrants etc ... A l'aval, les acheteurs de gros, les transporteurs, les murisseries, les détaillants et même les vendeurs ambulants pour le bananier. Pour la tomate, le secteur des transports routiers et maritimes, l'emballage, les ports etc ... ;

- de faire des recettes à l'Etat et une économie ou une entrée de devises selon le cas. A l'échelle nationale, l'augmentation des chiffres d'affaires des sociétés situées à l'amont ou à l'aval de la production, permet à l'Etat de récupérer des impôts (TVA). ceci permet, sans doute, d'équilibrer les pertes subies par la caisse de l'Etat en détaxant les produits importés et utilisés dans ce secteur ;

- de procurer aux producteurs des recettes importantes et donc, d'améliorer de façon substantielle leurs revenus

- de bien valoriser les facteurs terre, eau et travail ;

- d'assurer la disponibilité du produit sur le marché local, dans le cas du bananier.

D) CONCLUSION

- Les cultures du bananier et de la tomate représentent deux cas distincts de cultures pratiquées sous-serre.

L'étude réalisée a consisté en la comparaison des sorties et entrées en devises engendrées par la pratique de ces deux cultures sous abris. La méthode utilisée peut être considérée comme une approche permettant de simuler les différents flux de monnaies liées à la production de ces cultures. En effet, les hypothèses dressées ne permettent que d'approcher le

problème et non de calculer avec exactitude l'indice de recouvrement utilisé. Ceci est dû, au manque de certaines informations (structure des sources financières de la C.N.C.A, marges bénéficiaires réalisées par les sociétés à capital étranger, les prix économiques).

Toutefois, l'approche suivie a permis de constater que la culture du bananier et celle de la tomate sous-abris sont :

- très bénéficiaires pour les exploitants. Les marges brutes réalisées à l'hectare sont pour le bananier de 119 629 DH (serre métallique) à 145 883 DH (serre en bois) et pour la tomate de 147 500 DH (serre métallique).

- d'un grand intérêt social. L'emploi crée est de :

* 720 à 791 jt/an/ha pour la culture du bananier,

* 1 290 jt/an/ha pour la culture de la tomate.

Elles permettent aussi d'économiser les devises (bananier : jusqu'à 30% de la valeur des importations de la banane fraîche) ou des entrées de devises (tomate : jusqu'à 130% de la valeur des importations des équipements et intrants nécessaires à sa production).

Cependant, ce genre de culture pose beaucoup de problème aussi bien à l'Etat qu'aux producteurs :

- Cas du bananier

+ Absorption d'une masse importante des crédits et des investissements au dépens d'autres productions agricoles jugées prioritaires (production céréalière, oléagineux, viande et lait).

+ Subit des dégâts importants dans certaines zones (Gharb par exemple) à cause des vents forts. Ceci diminue les recettes à l'hectare obtenues par les agriculteurs.

+ L'écoulement de la production pose des problèmes à certaines périodes de l'année, notamment durant l'été. Ce qui se répercute sur le prix de vente.

+ Le prix de revient n'est pas concurrentiel et ne permet pas de prévoir des exportations du produit.

- Tomate

+ La concurrence d'autres pays européens, notamment l'Espagne et le Portugal pose des problèmes d'écoulement de la production sur le marché européen. Néanmoins, le marché européen de l'Est semble être une solution pour ce problème.

+ Elle absorbe une marge de crédits et des investissements colossaux au dépens d'autres cultures prioritaires.

+ Elle est très sensible aux maladies. Le risque de pertes de production est élevé.

ABREVIATIONS

- M.A.R.A.	:	Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire
- D.P.V.	:	Direction de la Production Végétale
- D.H.	:	Division d'Horticulture.
- D.P.A.E.	:	Direction de la Planification et des Affaires Economiques.
- C.N.C.A.	:	Caisse Nationale de Crédit Agricole
- O.C.E	:	Office de Commercialisation et des Exportations.
- B.I.R.D.	:	Banque Internationale de Reconstruction et du Développement.
- ORMVA Souss Massa	:	Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Souss Massa.
- ORMVA GHARB	:	Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 - EL QORTOBI A.A. et EZZAMITI A. : Culture sous serre au Maroc. Cas du bananier - Mars 1989.
- 2 - EL QORTOBI A.A. et EZZAMITI A. : Cultures sous serre au Maroc. Cas de la tomate - Août 1989.
- 3 - Vie Agricole (La) : La culture des bananiers sous serre n° hors série. Janvier 1988, p. 11.
- 4 - Ecole d'Horticulture de Meknès : La culture du bananier, stage - Novembre 1989.
- 5 - APROBA et Co : La situation actuelle et les perspectives d'avenir de la culture de la banane sous serre au Maroc. Aît Melloul - Agadir 22, 23 et 24 Février 1989.
- 6 - CERIGHELLI R. : Cultures tropicales I, plantes vivrières Nouvelle encyclopédie agricole p. 485 - 614.
- 7 - DOORENBOS et KASSAM : Réponse des rendements à l'eau - Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n° 33, 1980 - p. 90 - 94.
- 8 - MARA/DPV/DH : Le Bananier, fiche technique.
- 9 - ORMVA Souss Massa : Fiche technique de la culture du bananier sous serre - Mai 1986.
- 10 - M.A.R.A : Note synthétique du projet intégré de développement des primeurs. Octobre 1979 - MRA/DMVA/DPA/S. Horticulture.
- 11 - M.A.R.A : Dépliant spécial primeurs 1986.
- 12 - M.A.R.A. : Bilan des primeurs - campagne 1987/88 - MARA/DPV/DH.
- 13 - LAUMONIER R. : Cultures légumières et maraichères. Encyclopédie agricole - Tome 1, 1978 - p. 112 - 131.
- 14 - LAUMONIER R. : Cultures légumières et maraichères. Encyclopédie agricole Tome 2, 1979 - p. 92 - 120.
- 15 - M.A.R.A. : Coût de production d'un hectare de tomate sous abris serres. Campagne 1985/86 (MARA/DPV/DH).
- 16 - ORMVA Sous Massa : Projet d'Amélioration de la Grande Irrigation. Etude des Assolements. Rapport de la première phase (Annexe). ORMVA Sous Massa 1987.
- 17 - M.A.R.A. : Bilan des primeurs - camp. 1986/87 Oct. 1987 - MARA/DPV/DH.
- 18 - DANIANE M. : Note sur le bananier - ORMVAG/S.E., Octobre 1985.

Optimisation dans un réseau d'irrigation

Une solution intégrée

Par

R. BEN AYED A. MILI Y. LABYE

I - INTRODUCTION

Un réseau d'irrigation peut être défini comme étant un système matériel permettant l'acheminement de l'eau depuis certains points de puisage (barrage, lac ...) jusqu'aux points d'utilisation (prises).

Un réseau est dit ramifié si les segments qui le constituent forment un arbre, chaque tronçon d'un tel réseau (arrête de l'arbre) est caractérisé par sa longueur L , son débit Q et sa perte de charge H . Le débit d'un tronçon T est égal à la somme des débits qu'il dessert.

L'optimisation du tracé d'un réseau s'insère dans le cadre de la minimisation du coût d'investissement, d'exploitation et de maintenance du réseau.

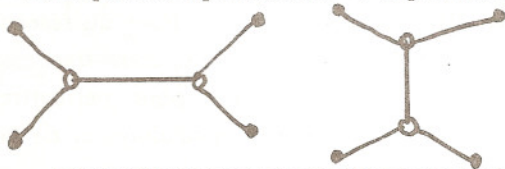
Rappelons que le tracé d'un réseau ramifié comportant N points fixes (réservoir + prises) consiste à joindre ces points ; aussi obtenir le tracé le plus court conduit à rajouter $N-2$ points intérieurs dont la position est à optimiser. La solution est alors connue si l'on se fixe le mode de jonction des $2(N-1)$ points ; ceci revient à décider, a priori, si le segment $M_i M_j$, reliant deux points quelconques M_i & M_j appartenant à l'ensemble des points à joindre, fait ou non partie du tracé.

• Exemple 1 : 3 points fixes + 1 point intérieur.



La position du point intérieur est connue : elle est telle que les trois angles entre les tronçons voisins sont égaux à 120° .

• Exemple 2 : 4 points fixes + 2 points intérieurs.



Deux solutions sont possibles : Donc deux modes de jonction I et II.

Pour un mode de jonction fixé, la distribution des débits est fixée et on obtient alors la solution rigoureuse donnant simultanément le tracé (position des points

intérieurs) optimal et sur chaque tronçon le (ou les deux) diamètre (s) optimal (aux). Ces optimums sont relatifs au mode fixé ; pour obtenir l'optimum absolu, il faudrait considérer tous les modes de jonction possibles. Hormis le cas où N est très petit, le nombre de modes de jonction est tel que l'application du procédé de calcul ci-dessus est pratiquement irréalisable.

La seconde possibilité consisterait à appliquer la théorie des flots dans les graphes, puisque la fonction prix d'un tronçon est connue. Toutefois le fait que ce prix s'exprime en fonction de L , Q et H conduirait à des calculs inextricables.

On peut donc optimiser simultanément le tracé et les diamètres ; d'où la nécessité de déterminer, dans une première étape, un tracé sub-optimum puis, pour ce tracé, déterminer les diamètres. C'est la méthode traditionnellement utilisée bien qu'elle ne soit pas rigoureusement valable du fait que le prix n'est pas fonction de la longueur uniquement.

Cette méthode est détaillée dans le procédé itératif suivant :

- 1 - Déterminer l'arbre couvrant minimal dont les sommets sont soit une prise soit le réservoir (algorithme de KRUSKAL, algorithme de SOLLIN).
- 2 - Placer, ensuite, compte tenu des notions de proximité, les points intérieurs.
- 3 - Choisir un mode de jonction, optimiser en conséquence, la longueur du tracé ; d'où les coordonnées des extrémités des tronçons et leur longueur L_i .

Ces trois opérations s'effectuent par application de la méthode GIRETTE [1] et par la méthode du gradient.

- 4 - Optimiser, à partir de ce tracé, les diamètres des conduites en utilisant la méthode discontinue de LABYE [2] d'où une première valeur des P_i et du prix total P .

Ce premier passage donne une première allure du réseau ainsi qu'une estimation du coût unitaire $p_i = P_i/L_i$, qui déterminent l'attitude à adopter lors de la deuxième itération. Lors de la deuxième itération L_i est pondérée par p_i , puis on retrouve soit en 1 pour reprendre l'algorithme choisi soit en 3 pour rechercher les nouvelles coordonnées des points intérieurs : le mode de jonction étant conservé.

Cette méthodologie appelle les remarques suivantes :

- la convergence du procédé n'est pas établie.
- le tracé final choisi ne peut être directement transposé sur terrain puisqu'il n'exclut pas la possibilité de passage à travers champs quelque soit le diamètre alors que cette possibilité ne peut être envisagée que pour des tronçons à grand débit.

En vue de pallier ces deux inconvénients, nous avons proposé une méthode spécifique, que nous présentons ci-dessous

II - METHODE PROPOSEE

Dans cet article, nous proposons une méthode de détermination de tracé optimal, qui présente les caractéristiques suivantes : elle tient compte de la réalité du terrain, notamment des réseaux d'accès ruraux (routes, chemins,...); le tracé et les sections de chaque tronçon sont étudiés conjointement, en vue d'une solution plus optimale; la fonction de coût utilisée tient compte, non seulement de la longueur, mais aussi des débits (c'est à dire de la section du tronçon).

Pour tenir compte de la géographie du terrain, on définit des contraintes sur le tracé du graphe de telle sorte que les canalisations ne passent qu'en bordure des champs. Pour intégrer les étapes de tracé du réseau et de détermination des sections de chaque tronçon, on utilise une fonction coût qui fait intervenir la longueur et la section de chaque tronçon (aussi notre problème est formalisé comme un problème de programmation linéaire en variables mixtes).

L'expérience acquise sur les réseaux ramifiés, montre que l'on obtient une solution approchée S voisine de l'optimum en substituant à la fonction $P = P(L,Q,H)$ une fonction $P = P(L,Q) = A' + A'' Q^\beta$ ou A' , A'' , β seront explicités plus loin; ce que simplifie considérablement les calculs. $T(s)$ étant le tracé ainsi obtenu il est loisible d'essayer un ensemble E de tracés (T_1, T_2, \dots, T_n^*) tous voisins de $T(s)$ en utilisant pour chacun de ces tracés l'explicitation exacte $P = P(L,Q,H)$. Cette possibilité est pratiquement très

efficace, du fait que pour T_n fixé, l'optimisation des diamètres ne demande qu'une ou deux secondes de calcul, pour un grand réseau, à l'aide d'un micro ordinateur de puissance de calcul réduite.

Toutefois la simplification résultant de l'adoption de l'explicitation $P = P(L,Q)$ ci-dessus ne supprime pas la difficulté d'utilisation de la théorie des flots dans les graphes puisque $P(L,Q)$ ne peut être directement exprimé à partir d'un tronçon T pris isolément (son débit Q étant la somme des débits des tronçons qu'il dessert). En revanche l'approche adoptée et exposée ci-après revient en fait à une utilisation de la théorie des graphes.

1 - Données du problèmes

L'ensemble M maillé, représenté par la figure 1, est extrait du réseau d'accès. Il est formé par les latéraux L_1, L_2, \dots, L_n et par les chemins, joignant entre elles, les lignes L_i et L_{i+1} . Cet ensemble constitue le «réseau aval», tandis que l'ensemble des tronçons reliant le réservoir à la ligne L_n constitue le réseau «amont», R' .

Le problème consiste à déterminer conjointement le sous ensemble de R portant des canalisations et le réseau R' , étant entendu que les prises sont situées sur les latéraux L_i .

Deux tronçons de liaison successifs, portant des canalisations, joignant L_i et L_{i+1} forment une maille élémentaire $ABCD$ (figure 2) dont CD est appelé base. Pour obtenir un réseau ramifié extrait de M , il faut et il suffit de faire une et une seule coupure sur la base de chacune des mailles extraite de la figure 1 et constituée de canalisations.

En effet, une telle coupure est nécessaire sinon on formerait une maille avec AC, CD, BD et les lignes AR, BR joignant A et B au réservoir (figure 3); elle est unique car une seconde coupure donnerait lieu à un tronçon non alimenté (figure 4).

2 - Mise en équations

2.1 - Réseau aval R

L'ensemble des chemins latéraux et transversaux susceptibles d'être empruntés par le tracé du réseau ainsi que les positions des prises d'eau étant fixé, ces données peuvent y être greffées pour permettre d'aboutir à la formulation des contraintes et de la fonction objectif à minimiser.

Une ligne L_m (figure 5) est définie par ses extrémités A_m^o et B_m^o ainsi que les tronçons qui la relie à L_{m-1} et L_{m+1} . Pour identifier ces tronçons de

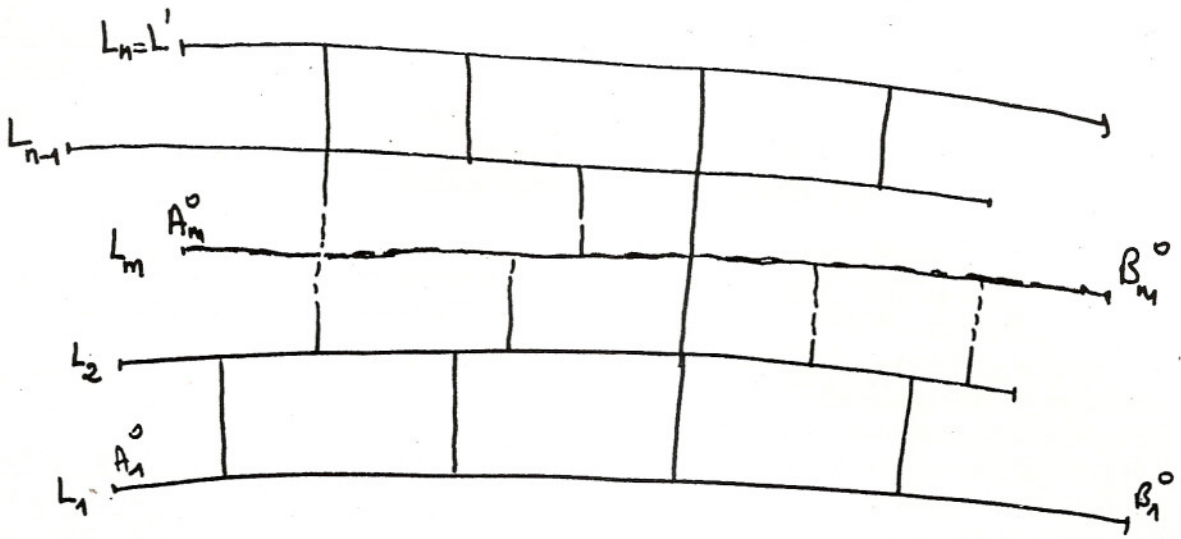


Figure 1

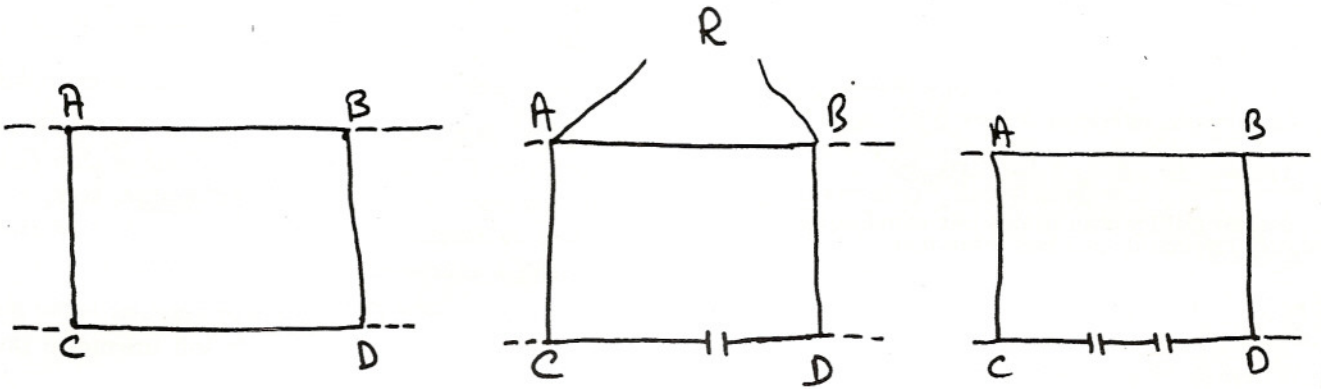
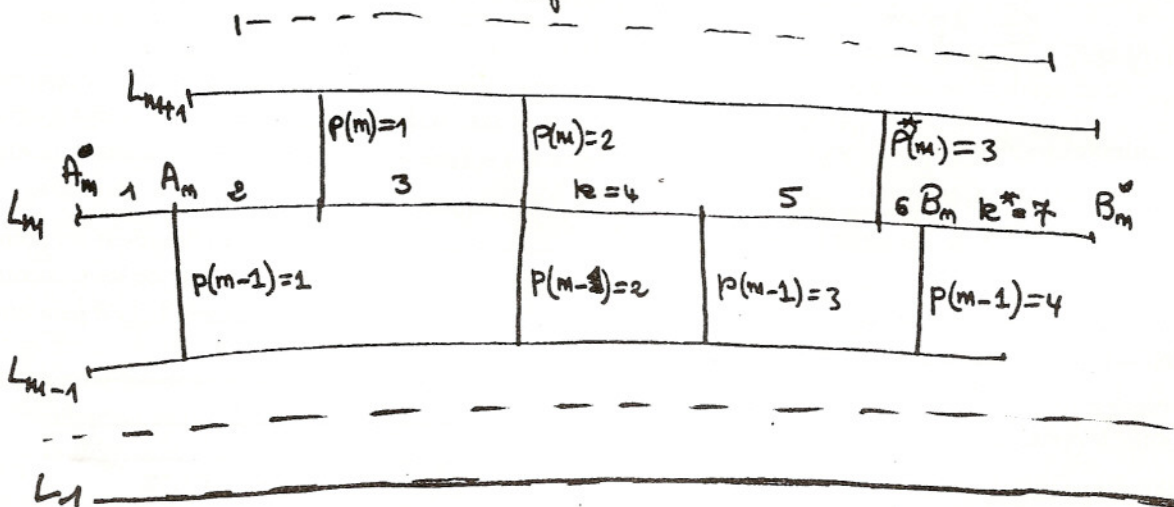


Figure 2

Figure 3

Figure 4

Figure 5



liaison, il faut les ordonner et attribuer à chacun un numéro égal à son rang lorsque la ligne L_m est parcourue dans le sens $A^{\circ}_m \longrightarrow B^{\circ}_m$. Le numéro d'un tronçon sera appelé $p(m)$ s'il appartient à la classe des tronçons reliant L_m à L_{m+1} et $p(m-1)$; $p^*(m)$ est le plus grand des $p(m)$.

De plus, la ligne L_m est divisée en segments successifs :

$$(1,m), (2,m), \dots, (k,m), \dots, (k^*,m).$$

Chacun des points $p(m)$ et $p(m-1)$ est l'extrémité d'un segment (k,m) , une variable booléenne X_p lui est associée : X_p est égale à 1 ou à zéro selon que le tronçon de liaison de L_m à L_{m+1} ayant $p(m)$ pour extrémité, porte ou non une canalisation du réseau R. De même une variable booléenne Y_k est associée à chaque segment (k,m) : Y_k est égale à 1 ou zéro selon que le segment K de L_m contient ou non une coupure.

• Equations de ramification

Les équations suivantes expriment que le réseau R est ramifié (la notation k appartient à $p'p''$ désigne les tronçons intérieurs à l'arc $p'p''$) :

$$(1) \quad \begin{aligned} p &= p^* \\ p &= \sum_{p=1}^{p^*} X_p \geq 1 \end{aligned}$$

traduit qu'il y a au moins une canalisation joignant L_m à L_{m+1}

Pour chacun des couples (p', p'') tels que $p' < p''$, l'équation (2) traduit la coupure obligatoire sur la base de chacune des mailles possibles :

$$(2) \quad (X_{p'} + X_{p''} - 2) < \sum_{p \in p'p''} Y_k \leq \sum_{p=p'+1}^{p=p''} X_p + (3 - X_{p'} - X_{p''})$$

Enfin l'équation complémentaire (2') exprime l'absence de coupure sur les tronçons A_0A et BB_0 de la ligne L_m :

$$(2') \quad \sum_{k=1}^{k=k^*} Y_k = \sum_{p=1}^{p=p^*} X_p - 1$$

• Relation exprimant les débits :

L'introduction des données hydrauliques impose les relations exposées ci-après.

a - Sur les lignes latérales :

Les segments $k(m)$ sont orientés et le sens positif choisi est celui de A°_m vers B°_m . Un segment k est caractérisé par sa longueur l_k , son débit à gauche Q_g^k et son débit à droite Q_d^k .

q étant le débit d'une prise et e l'écartement des prises,

on peut assimiler le service fourni aux prises à un service de densité $q' = q/e$. Q_g^k et Q_d^k (figure 6) sont des quantités algébriques de même signe, les débits sur les segments k seront exprimés, dans tous les cas, par la relation suivante :

$$(3.1) \quad Q_g^k = Q_d^k + I_{kq'}$$

si dans le cas où le segment k comporte une coupure, on choisit de la placer à droite, on aura :

$$Q_d^k = 0 \quad \text{et} \quad Q_g^k = I_{kq'}$$



Il suffit alors de rajouter à l'équation (3.1), la relation suivante :

$$(3.2) \quad -K(1-Y_k) Q_d^k K(1-Y_k)$$

(K est une constante assez grande = Nq par exemple).

En effet si $Y_k = 0$ (absence de coupure), l'équation (3.2) n'est pas contraignante et c'est (3.1) qui exprime les débits sur k . Par contre, si $Y_k = 1$ (cas de la coupure) (3.2) force le débit à droite à zéro, le débit à gauche est alors donné par (3.1).

Il convient de noter que pour exprimer le fait que le sens de circulation du fluide soit orienté, il faut rajouter les équations :

$$(3.3) \quad Q_g^k \leq 0 \quad Q_d^k \geq 0$$

b - Sur les tronçons de liaison

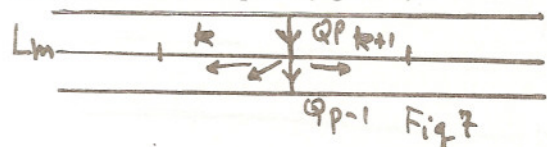
Etant donné que sur les tronçons de liaison le fluide circule dans le sens amont-aval, les débits sur ces tronçons sont des quantités positives ou nulles. Une équation par tronçon est donc à écrire :

$$(4) \quad 0 \leq Q_p \leq K X_p$$

Elle n'est pas contraignante si le tronçon est construit ($X_p = 1$); alors qu'elle force le débit à zéro ($Q_p = 0$) si le tronçon n'est pas construit ($X_p = 0$).

c) Equilibre aux nœuds

Dans le cas le plus général, un nœud est un point d'intersection d'une ligne latérale L_m et de ses tronçons de liaison avec la ligne L_{m+1} et la ligne L_{m-1} , il peut être muni ou non d'une prise (figure 7).



D'où la relation traduisant toute configuration possible autour d'un nœud :

$$(5) \quad Q_p - Q_{p-1} - Q^{k+1}_g + Q^k_d - q = 0$$

(est remplacé par 1 s'il existe une prise au nœud et par 0 dans le cas contraire)

• Expression du prix des éléments de R

La série des diamètres commerciaux étant discrète, on utilisera la fonction coût approchée adoptée par GOUYON [3] qui est de la forme :

$$f(D) = (A' + A''D^b)$$

A', A'' 0, b 1 sont des constantes ne dépendant que de la série : D [D_{is}, D_{ss}].

A' et A'' sont déterminés par ajustement sur le bordereau de prix des diamètres commerciaux de la serie considérée, au moyen de la méthode des moindres carrés.

Il est possible de ramener cette fonction à celle du débit, en effet :

$$\text{La vitesse } v = \frac{4Q}{\pi D^2} \Rightarrow D = \left(\frac{4Q}{\pi v} \right)^{1/2} Q^{1/2}$$

$$\Rightarrow D^b = \left[\frac{4}{\pi v} \right]^{b/2} Q^{b/2}$$

soit en posant :

$$\frac{b}{2} = \beta \quad \text{et} \quad A''' = \left[\frac{4}{\pi v} \right]^{b/2} A''$$

$$f(Q) = A' + A''' Q^\beta$$

soit pour un tronçon de longueur L_T et de débit Q_T :

$$P_T = (A' + A'''Q^\beta) L_T$$

Une analyse des résultats d'optimisation portant sur de nombreux réseaux d'irrigation, montre que les vitesses dans les grosses canalisations sont notablement inférieures à celles rencontrées pour les petites canalisations; ceci est d'ailleurs renforcé lorsqu'on tient compte du fait que les ingénieurs imposent des vitesses réduites sur les grosses canalisations afin de se prémunir contre les coups de béliers. Par suite on peut valablement considérer, qu'on obtiendra une solution proche de la solution optimale en imposant une vitesse V = 1,6 m/s pour les canalisations d'un diamètre de 80 mm à 350 mm.

Nous prendrons V = 1,6 m/s pour le réseau aval et V = 1,1 m/s pour le réseau amont; on notera qu'un premier passage en machine permet une meilleure évaluation de la valeur V à attribuer à chaque tronçon que l'on introduirait lors d'un second passage.

a - Expression du prix pour les segments latéraux

a₁) Q^k_g et Q^k_d non négatifs

Le débit Q_x en un point situé à la distance x de l'extrémité droite du segment k est Q_x = Q^k_d + q'x ; le prix est donné par la relation :

$$P_k = A'P_k + A''' \int_0^{P_k} Q_x^\beta dx$$

$$= A'P_k + A''' \int_0^{P_k} (Q_d^k + q'x)^\beta dx$$

$$= A'P_k + \frac{A'''}{(\beta+1)q'} \left[(Q_d^k + q'x)^{\beta+1} \right]_0^{P_k}$$

$$= A'P_k + \frac{A'''}{(\beta+1)q'} \left[(Q_d^k + q'P_k)^{\beta+1} - (Q_d^k)^{\beta+1} \right]$$

$$P_k = A'P_k + \frac{A'''}{(\beta+1)q'} \left[(Q_g^k)^{\beta+1} - (Q_d^k)^{\beta+1} \right]$$

a₂) Q^k_g et Q^k_d non positifs

Un calcul similaire montre que l'on obtient la formule ci-dessous

$$P_k = A'P_k + \frac{A'''}{(\beta+1)q'} \left| |Q_g^k|^{\beta+1} - |Q_d^k|^{\beta+1} \right|$$

valable dans tous les cas

b) Expression du prix pour les tronçons de liaison

pour un tronçon T de longueur l_T et de débit Q_T, nous avons :

$$P_T = (A'l_T + A'''l_T Q_T^\beta) X_T$$

Nous écrivons dans le modèle la relation

$$(7) \quad P_T = A'l_T X_T + A'''l_T Q_T^\beta$$

En effet la relation (4) 0 Q_TK_{X_T} établie plus haut donne une expression correcte de P_T si le tronçon est construit (X_T = 1); il en va de même s'il n'est pas construit (X_T = 0).

• Réseau amont : R'

a - Relation de ramification

Sur la ligne L_n = L', on fixe N points A₁,..., A_p,...,A_n. Aucune condition d'interdiction ou d'obligation n'existe sur ces points pour qu'ils soient extrémités de tronçons de liaison de L_{n-1} à L_n. Etant choisis par l'hydraulicien, il constituent une donnée du problème.

Nous devons prévoir le cas où un tronçon de R' partirait de chacun des N points de L'. Nous sommes alors en présence de la jonction de (N + 1) points (le réservoir et les N points de L') ce qui conduit à prendre (N + 1)-2 points intérieurs, soit au total 2N points.

Il est commode d'adopter les numérotages suivants:

Les numéros 1 à N seront réservés aux points de la ligne L'.

Les numéros N + 1 à 2N-1 seront attribués aux points intérieurs. le numéro 2N est attribué au réservoir. Soient A_i et A_j ($j > i$), deux des 2N points ci-dessus. Le couple d'indice (i,j) désignera le tronçon $A_i A_j$.

X_{ij}^* étant une variable booléenne égale à 1 ou zéro selon que le tronçon $A_i A_j$ est, ou non, effectivement construit. La relation ci-dessous exprime que chaque point A_p , situé sur la ligne L', constitue l'extrémité d'au plus un tronçon de R'.

$$(1) \quad \sum_{j \geq N+1} X_{pj}^* = \hat{x}_p \quad \hat{x}_p = 0 \text{ ou } 1$$

Si $\hat{x}_p = 0$, aucun tronçon ayant p pour extrémité n'est construit.

Si $\hat{x}_p = 1$, un et un seul tronçon ayant p pour extrémité est construit.

La relation (2) exprime qu'il existe au moins un tronçon de R' alimentant le réseau aval R.

$$(2) \quad \sum_{p=1}^N \sum_{j \geq p} \hat{x}_p \geq 1$$

Il en résulte que le nombre de points effectivement à joindre au réservoir est égal à N' avec :

$$N' = \sum_{p=1}^N \hat{x}_p$$

Le nombre total de points effectivement à joindre est donc $2N'$ et non $2N$; il y aura $2N'-1$ tronçons effectivement construits.

Ceci est exprimé par la relation :

$$(3) \quad \sum_{i, j > i} X_{ij}^* = 2 \left(\sum_{p=1}^N \hat{x}_p \right) - 1$$

Un point intérieur est soit retenu, soit non retenu. S'il est retenu il est extrémité d'au moins deux tronçons effectivement construits ; d'où la relation suivante pour tout point A_i , intérieur ($N+1 \leq i \leq 2N-1$).

$$(4) \quad \downarrow V_i \leq \sum_j X_{ij}^* + \sum_k X_{ki}^* \leq K V_i$$

Dans laquelle K est une constante positive assez grande, il suffit de prendre $K=2N$; V_i est une variable booléenne prenant la valeur 1 si le point intérieur est retenu et 0 s'il ne l'est pas.

Nous devons écrire que du réservoir par au moins un tronçon ; d'où

$$(5) \quad \sum_{k=2N} X_{k2N}^* \geq 1$$

Par ailleurs, il y a lieu de rajouter les équations de ramification faisant intervenir X_p et Y_k sur la ligne L'.

b - Relations exprimant les débits

La relation suivante exprime que le débit sur le tronçon $A_i A_j$ est nul si ce tronçon n'est pas construit .

$$(6) \quad 0 \leq Q_{ij}^* \leq K X_{ij}^* \quad j > n$$

Un point intérieur A_i , étant un nœud du réseau R', la relation ci-dessous traduit l'équilibre des débits en ce nœud :

$$(7) \quad \sum_{ij} Q_{ij}^* - \sum_{ki} Q_{ki}^* = 0$$

c - Relation exprimant les prix

Le prix P d'un tronçon $A_i A_j$ de R' de débit Q_{ij}^* et de longueur l_{ij} est donné par la relation :

$$p = (A^* + A'' \quad p_0 (Q_{ij}^*)^\beta) l_{ij}$$

(P_0 coeff. de foisonnement)

(X_i, Y_i) et (X_j, Y_j) étant les coordonnées des 2 extrémités du tronçon $A_i A_j$, sa longueur est donnée par la relation :

$$l_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}$$

d - Traitement des points intérieurs non retenus

Les relations suivantes forcent le prix d'un tronçon non construit à zéro et regettent un point intérieur non retenu au dehors du périmètre :

$$(8) \quad 0 \leq P_{ij} \leq K' X_{ij}^* \quad (K' \text{ constante assez grande})$$

$$(9) \quad K^0 (1 - \sum X_{ij}^*) \leq X_i \leq K^0 (1 + \sum X_{ij}^*)$$

$$(9') \quad K^0 (1 - \sum X_{ij}^*) \leq Y_i \leq K^0 (1 + \sum X_{ij}^*)$$

K^0 est une constante positive supérieure à la plus grande coordonnée des points fixes du réseau.

III - MISE EN OEUVRE

Dans la section 2 nous avons exposé toutes les contraintes du problème ainsi que la fonction objectif. Nous avons envisagé la résolution de ce problème au moyen d'un progiciel de programmation linéaire en variables mixtes.

La mise en œuvre de ce progiciel soulève un certain nombre de difficultés : La longueur d'un tronçon s'exprime par la norme cartésienne, une expression non linéaire des coordonnées des extrémités ; certaines composantes de la fonction objectif sont exprimées en termes de valeurs absolues ; la composante « coût du réseau amont » de la fonction objectif est exprimée comme un produit de variables.

Nous traitons ces trois problèmes tour à tour, ci-dessous, dans les sections 3.1 à 3.3. Dans la section 4 nous donnons des indications sur l'exécution de notre programme.

1 - Expression de la longueur L_{ij}

$A_i(X_i, Y_i)$ et $A_j(X_j, Y_j)$ sont les extrémités du tronçon A_iA_j .

Posons $X = X_i - X_j$
 $Y = Y_i - Y_j$

et nous avons alors $L = \sqrt{X^2 + Y^2}$

dans un système d'axes rectangulaires OX, OY, OL , l'équation ci-dessus représente la partie supérieure d'un cône qui est une surface convexe. Le fait que P est une fonction séparément croissante de L entraîne que pour X, Y fixés, le programme d'optimisation choisira automatiquement une valeur de L telle que le point de coordonnées (X, Y, L) se trouvera situé sur le cône ; ce qu'on peut traduire par les relations :

$$|X| = \sum_{s=0}^{s^*} l_s \cos\left(\frac{s}{s^*} \frac{\pi}{2}\right)$$

$$|Y| = \sum_{s=0}^{s^*} l_s \sin\left(\frac{s}{s^*} \frac{\pi}{2}\right)$$

$$L = \sum_{s=0}^{s^*} l_s$$

Dans ces relations, les l_s sont des variables positives, cette explicitation donne une expression suffisamment précise de L (erreur de l'ordre de 1/100) avec un nombre réduit de variables L_s ($s^* = 6$).

2 - Linéarisation des termes exprimés par leur valeur absolue

Soit W la variable en question, on peut poser

$$W = W_1 - W_2 \text{ avec } W_1 \geq 0 \text{ et } W_2 \geq 0$$

d'où $W_1 = W + W_2$ et $W_2 = W_1 - W$

$$W_1 + W_2 = W + 2W_2 \quad (1)$$

$$W_1 + W_2 = 2W_1 - W \quad (2)$$

Deux cas sont alors possibles selon le signe de W :

a) $W > 0$; $W_1 + W_2$ est minimum pour $W_2 = 0$
ce qui donne :

$$\min(W_1 + W_2) = W = |W| \text{ (par la relation 1)}$$

b) $W < 0$; $W_1 + W_2$ est minimum pour $W_1 = 0$
ce qui donne :

$$\min(W_1 + W_2) = -W = |W| \text{ (par la relation 2)}$$

On voit donc que dans tous les cas on a bien $\min(W_1 + W_2) = |W|$

3 - Linéarisation de P_{ij} par rapport à $Q^{B_{ij}}$

$$P_{ij} = A' L_{ij} + A''' (Q^{B_{ij}})^{\beta} L_{ij}$$

On linéarise P_{ij} par rapport à $(Q^{B_{ij}})^{\beta}$ et à l'ensemble des autres variables en utilisant les relations suivantes :

$$(10) \quad L_{ij} = l_0 \sum_{r=0}^{r^*} 2^{r-1} X_{r,ij}$$

$$X_{r,ij} = 0 \text{ ou } 1$$

$$r = 0$$

$$(11) \quad 0 \leq Q^{B_{ij}} - Q_{r,ij} \leq K'' X_{r,ij}$$

$$(12) \quad 0 \leq Q_{r,ij} \leq K'' X_{r,ij}$$

$$(13) \quad P = A' l_0 \sum_{r=0}^{r^*} 2^{r-1} X_{r,ij} + A''' l_0 \sum_{r=0}^{r^*} 2^{r-2} Q_{r,ij}$$

pour $X_{r,ij} = 1$ on a $Q_{r,ij} = Q^{B_{ij}}$
 $X_{r,ij} = 0$ on a $Q_{r,ij} = 0$

On a donc dans les deux cas : $Q_{r,ij} = Q^{B_{ij}} X_{r,ij}$
d'où $\sum_{r=0}^{r^*} 2^{r-1} Q^{B_{ij}} = \sum_{r=0}^{r^*} 2^{r-1} X_{r,ij} Q^{B_{ij}} = Q^{B_{ij}} \sum_{r=0}^{r^*} 2^{r-1} X_{r,ij} = L_{ij} Q^{B_{ij}}$

Il est à noter que β étant proche de 1 ($\beta \approx 0,75$), nous avons substitué $|Q|$ à $|Q|^{\beta}$ lors d'un premier passage et $|Q|^{\beta-1}|Q|$ à $|Q|$ lors du second passage, Q_0 étant le résultat (de l'optimisation) fourni par le premier passage.

4 - Programmation

Nous avons utilisé un progiciel de programmation linéaire mixte d'une bibliothèque numérique standard. Afin de faciliter l'utilisation de ce progiciel par les hydrauliciens, nous avons développé un programme en amont, dans le but de préparer les données au programme linéaire.

Le programme détermine, à partir des données de base, la configuration du périmètre (lignes latérales,

chemins de liaison....), il écrit alors les équations du modèle appliquées à ce périmètre. Le chainage de ce programme avec le progiciel de programmation linéaire est totalement transparent à l'utilisateur.

L'agrégat de ces deux programmes est défini de la façon suivante :

• Entrées :

- coordonnées des points situés à l'intersection des lignes latérales et transversales ainsi que ceux des points de la ligne L_n pour joindre la partie aval du réseau au réservoir.

- codes des points de chaque ligne L_m (prises d'eau, extrémité d'un tronçon de liaison avec la ligne L_{m-1} et/ou L_{m+1} extrémité de la ligne).

• Sorties :

Elles englobent toutes les informations relatives à la solution trouvée :

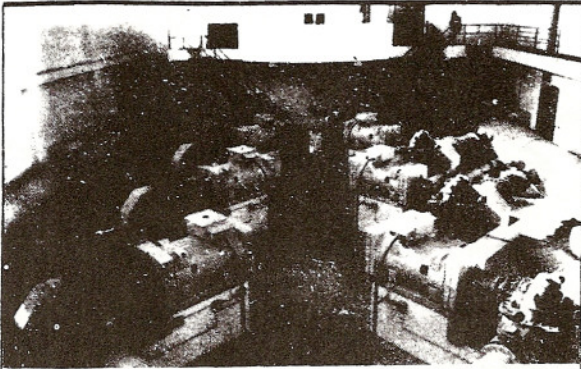
- tronçons de liaison effectivement construits, leur longueurs, les débits qu'ils portent.
- caractéristiques des tronçons k des lignes latérales existence ou non de coupure, longueur et débits.
- points de L' retenus pour la jonction, coordonnées des points intérieurs retenus.
- caractéristiques des tronçons de R' : extrémités, longueurs et débits.
- Prix de tous les tronçons constituant le réseau.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une solution intégrée au problème d'optimisation dans un réseau d'irrigation. Notre solution est intégrée dans le sens qu'elle optimise conjointement le tracé du réseau ainsi que la détermination des sections de chaque tronçon.

La méthode proposée permet d'aboutir à un tracé T du réseau qu'il y a tout lieu de considérer comme voisin du tracé optimum. Un tracé définitif est obtenu en procédant à l'optimisation d'un ensemble de tracés tous voisins de T . Pour chacun des tracés essayés, on procède à l'optimisation complète en utilisant la fonction exacte $P(L, Q, H)$. Il est clair que la méthode utilisée donne des résultats dont les limites sont celles que l'on rencontre lors de l'utilisation de programme linéaires en variables mixtes.

La mise en œuvre de cette solution au moyen d'un progiciel de programmation linéaire a donné des résultats satisfaisants malgré les simplifications d'ordre théorique et pratique qui nous étaient imposés par la nature du problème.



TECHNIQUE RATEAU

STATIONS DE POMPAGE CLES EN MAINS

irrigation - eau potable - eaux usées

Bd. du Fouarat - Casablanca - tél : 24.27.46
24.52.67
rélex : 25.772 M

irrigation par aspersion

Quels que soient l'importance et les impératifs de votre exploitation, la Smirri se charge de l'installation complète de votre réseau, de l'étude du projet à la mise en service



SOCIETE MAROCAINE
POUR L'IRRIGATION

SMIRRI 20 bis, Charii Chellah
Rabat

Organisation actuelle de la distribution de l'eau d'irrigation dans les périmètres irrigués du Maroc*

Par
Mr. Ghazzali k.
ORMVA du Gharb

I - INTRODUCTION

Le comité technique "Gestion des Périmètres Irrigués" de l'ANAFID, composé de tous les chefs des services de gestion des réseaux d'irrigation et de drainage des neuf (9) ORMVA et de divers chercheurs et spécialistes, et présidé par Mr. Othmane LAHLOU, directeur de L'ORMVA du GHARB, a élaboré un important travail sur le processus de distribution.

Ce travail, qui traite de tous les aspects (techniques, sociaux, organisationnels.....) de la distribution de l'eau d'irrigation dans les périmètres irrigués du Maroc, sera édité sous forme d'ouvrage devant servir de document de base à toute étude se rapportant à ce sujet.

La présente communication traite uniquement le volet : organisation actuelle de la distribution dans les périmètres irrigués.

La distribution de l'eau d'irrigation est généralement définie comme étant la combinaison d'un ensemble de processus, techniques climatiques et sociaux permettant l'acheminement de l'eau depuis la source jusqu'à la plante.

A l'exception des périmètres traditionnels, où l'équilibre de force est en faveur des contraintes sociales et traditionnelles, on remarque que, dans tous les périmètres modernes, la distribution obéit pratiquement aux mêmes lois (à quelques nuances près). C'est ainsi qu'il a été constaté que tous les services de gestion des ORMVA ont mis en place pratiquement la même organisation de la distribution, définissant clairement les différentes étapes du processus d'une part, et les différents niveaux de prises de décision d'autre part.

A cet effet, l'analyse détaillée du processus de distribution dans les différents périmètres modernes a montré l'existence d'une véritable similitude dans toutes les composantes du transit depuis le barrage jusqu'en tête de la parcelle.

II - PROGRAMMATION DE LA CAMPAGNE D'IRRIGATION

1 - Différentes étapes de la programmation :

(voir schéma)

Programmer les irrigations, c'est faire des prévisions dans deux cas :

- le volume d'eau disponible dans le réservoir est suffisant ;
- le volume d'eau est insuffisant. Pour ce faire, l'ensemble des périmètres irrigués suivent pratiquement le même schéma synoptique décrit ci-dessus, avec des réajustements en fonction des cas spécifiques des années climatiques.

2 - Plan de culture

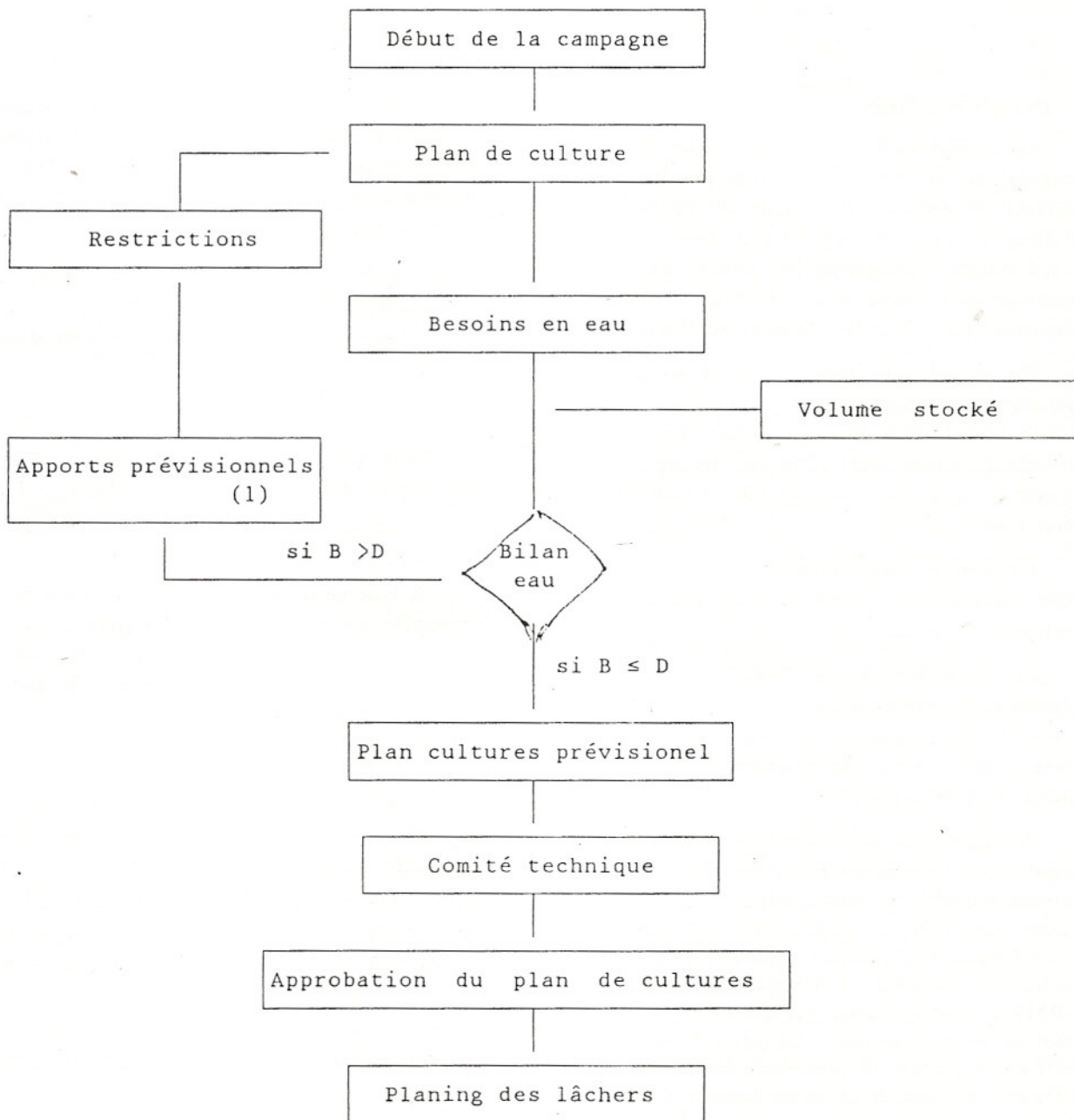
Les services de la production agricole et de l'élevage établissent annuellement, et en début de campagne, un projet de plan de culture (1) soumis pour étude aux services de gestion. Ces derniers, en fonction des réserves en eau disponibles et des simulations des prévisions d'apports possibles, procèdent à son modification du plan se font généralement au profit, ou au détriment des cultures de printemps et d'été selon que les apports réels sont supérieurs ou inférieurs aux prévisions.

* Cette communication constitue un résumé de la 1ère partie de l'étude entreprise par le Comité "Gestion et Exploitation des Périmètres Irrigués" de l'ANAFID en 1988-1989. Cette étude se rapporte à la distribution de l'eau d'irrigation et à l'exploitation-maintenance des réseaux d'irrigation dans les Grands Périmètres d'Irrigation au Maroc ; cette étude fera l'objet d'une publication spéciale de l'ANAFID au cours de l'année 1990.

(1) - Le plan de cultures tient compte de l'assolement pratiqué, du rythme de mise en valeur, et des orientations du pays en matière de politique agricole. (plans sucrier, laitier, oléagineux, ...).

II - PROGRAMMATION DE LA CAMPAGNE D'IRRIGATION

1° Différentes étapes de la programmation :



(1) différents scénarios sont alors projetés en fonction des hypothèses faites sur les apports d'eau.

Les réserves du barrage Oued EL MAKHAZINE étant supérieures aux besoins du périmètre, l'office du LOUKKOS pratique, sans modification le plan de cultures prévu par la mise en valeur.

3 - Besoins en eau

Les besoins en eau des cultures ainsi programmées, sont calculés à partir des critères de base pris en considération dans le dimensionnement du réseau, lors de l'établissement des projets d'équipement des périmètres modernes, en apportant un certain nombre de modifications et d'adaptations en fonction de l'expérience vécue par chaque office.

4 - Comités techniques

Après l'établissement et l'ajustement des différents scénarios de plan de culture, les O.R.M.V.A proposent ce plan, selon le cas, aux comités techniques provinciaux ou aux comités régionaux de l'eau (2). Ces comités tiennent une réunion à la demande de l'Office pour discuter et approuver les programmes de culture à réaliser, les volumes d'eau à utiliser et approuver les fournitures à partir des barrages.

En fonction de l'importance des apports prévisionnels, le programme de culture est alors révisé. Dans ce cas, une réunion extraordinaire du comité technique est convoquée par l'ORMVA dont la date varie pour les différents périmètres du Maroc : au Tadla et au Souss Massa, la 2ème réunion se tient au mois de Mars ; au Haouz, en Décembre, Avril et Juin, au Gharb et au Loukkos, en moyenne tous les trois mois.

III - PROCESSUS DE DISTRIBUTION EN IRRIGATION GRAVITAIRE

1 - Déclaration et recensement des cultures (enquête foncière)

La connaissance des différentes cultures mises en place est le point de part de l'établissement du tour d'eau. A cet effet, une enquête foncière est établie par les aiguadiers et les agents des CMV, en collaboration avec les autorités locales. Le but est d'identifier l'agriculteur client, l'état foncier de l'exploitation, sa superficie et sa localisation dans la sole et le bloc.

2 - Etablissement du tour d'eau

La distribution de l'eau d'irrigation dans les secteurs gravitaires se fait suivant les règles du tour

d'eau à la demande. C'est ainsi que la main d'eau (3) circule à l'intérieur d'un ou plusieurs blocs d'irrigation (Maximum 3) selon 2 principes différents, à savoir :

- de l'amont vers l'aval selon un itinéraire bien déterminé à l'avance, prenant en considération les cultures à irriguer et sans tenir compte de la priorité chronologique de la demande d'irrigation ;
- selon une priorité chronologique attribuée aux agriculteurs premiers inscrits. Ce genre de procédure (très souple) est observée dans les périmètres ou la mise en valeur n'a pas encore atteint le régime de croisière.

3 - Demande de l'eau d'irrigation

Les aiguadiers se réunissent avec les agriculteurs au point désigné du rendez-vous qui peut être, selon les périmètres, la station de pompage, le souk, le C.M.V, ou encore un endroit appelé point d'attache. Cette rencontre a pour objet de recueillir les demandes d'eau d'irrigation à l'hectare cultivé. A cet effet, dans l'ensemble des périmètres irrigués, les aiguadiers ajustent les demandes des agriculteurs sur la base de 8 à 10 h/ha ; le périmètre des Doukkala se base sur un tableau indiquant le maximum d'heures d'irrigation à l'hectare cultivé pour une culture donnée et pour un mois donné.

Sur la base de ces demandes, les agents de distribution établissent des fiches de répartition des débits par tertiaire, et éventuellement par primaire, ainsi que le nombre de groupes à mettre en marche dans le cas d'un secteur desservi par une station de pompage.

4 - Planning d'irrigation

L'ensemble des renseignements précédemment évoqués, aboutissent à l'établissement du planning d'irrigation prévisionnel devant indiquer clairement la circulation spatiale de la main d'eau au niveau du ou des blocs concernés, la liste par ordre chronologique des agriculteurs desservis, ainsi que le temps de séjour.

Avant le démarrage de l'irrigation, et afin d'éviter l'absence des irrigants, des imprimés appelés avis d'irrigation, signés conjointement par l'aiguadier et l'agriculteur, sont alors distribués au plus tard 24 heures à l'avance, et ce, pour informer ce dernier de la date et de l'heure à laquelle il doit recevoir la main d'eau.

(2) - Participent à ces comités, tous les représentants d'organismes ayant une relation directe ou indirecte avec l'agriculture (M.A.R.A., Provinces, O.N.E., O.N.E.P, A.H., D.P.E., D.P.A., Sucreries, Associations de producteurs ...).

(3) - On considère une main d'eau comme le débit qu'un irrigant peut manipuler aisément dans les secteurs gravitaires, et notamment les réseaux modernes, est de 30 l/s.

Au cours du déroulement de la distribution, et à chaque tour d'eau, un bon de livraison d'eau, portant toutes les indications nécessaires à la facturation de l'eau telles que : l'heure d'ouverture et de fermeture, la culture, le numéro de la sole et du bloc, le code client, et l'émargement de l'agriculteurs, est transmis à ce dernier. L'ensemble de ces bons constitue le document essentiel à la facturation en fin de campagne.

Les aiguadiers sont chargés de suivre le déroulement du tour d'eau sous le contrôle des agents de la section de la distribution et d'une cellule d'inspection, (cas de l'Office du Tadla), et sous le contrôle du Directeur du CMV (cas des autres périmètres) seul le périmètre du Gharb pratique un contrôle géré par la subdivision et le bureau exploitation.

Le cas du Périmètre du Haouz mérite d'être signalé : la S.E.R (subdivision d'entretien des réseaux) suit la répartition au niveau du primaire et les C.M.V celle au niveau des secondaires et des tertiaires, selon le calendrier indiqué par le tour d'eau.

5 - L'irrigation par submersion (cas particulier du gravitaire)

L'irrigation par submersion, pratiquée sur la culture du riz dans le périmètre du Gharb, s'étend actuellement sur une superficie de 13.500 ha. Le potentiel de la région est de l'ordre 22.000 ha.

a - Mesure préparatoire pour le lancement de la campagne d'irrigation :

la culture de riz est soumise à autorisation délivrée par l'ORMVG sur la base d'un dossier fourni par l'agriculteur et comprenant un plan de situation de l'exploitation portant la superficie demandée.

Le réseau d'irrigation des secteurs rizicoles est entièrement en terre compactée (sauf quelques tronçons amont des canaux primaires).

Chaque canal tertiaire dessert 1, 2, ou 3 blocs d'irrigation composés de plusieurs clos d'une superficie moyenne de 2,5 ha.

b - Organisation de la distribution

La conception du réseau rizicole prévoit un débit d'équipement en tête du secteur de telle sorte que, tous les canaux tertiaires soient alimentés en même temps par une main d'eau de 45 l/s par bloc (même si ce dernier a une superficie inférieure à 20 ha) ; donc pas de rotation de la main d'eau entre blocs d'une part, et une alimentation en eau continue et sans interruption des canaux tertiaires d'autre part, et ce depuis le

démarrage de l'irrigation (mi Avril) jusqu'à la récolte (mi septembre) soit 5 mois d'irrigation.

En ce qui concerne la distribution entre clos à l'intérieur du bloc, celle-ci se fait par les agriculteurs eux mêmes sur la base d'un tirage au sort, ou d'un accord à l'amiable ; les agents de distribution de l'office n'interviennent qu'en cas de conflit entre agriculteurs.

Cette procédure a été favorisée par le fait que la facturation se fait sur la base d'un forfait à l'ha de 17.400 m³.

IV - PROCESSUS DE DISTRIBUTION EN IRRIGATION PAR ASPERSION

1 - Organisation de la distribution

En général, l'irrigation se fait à la demande au niveau de la prise. Elle continue à se faire à la demande à l'intérieur du bloc, sauf dans les canevases hydrauliques ou les usagers de prise commune utilisent en commun le matériel mobile d'irrigation. Dans ce cas, ceux-ci s'organisent entre eux pour la rotation de ce matériel. Cette procédure engendre automatiquement des litiges entre usagers ; ce qui se traduit généralement par la perturbation de la distribution.

Cependant, l'irrigation à la demande se trouve parfois perturbée par le recours des usagers aux enlèvement des organes régulateurs de la borne (limitateurs de débit, régulateurs de pression, compteurs) pour compenser les pertes de pression dans le matériel mobile d'irrigation, ou tout simplement pour disposer de plus de débit (2 à 3 fois le débit autorisé). Ceci se traduit par des appels de débits supérieurs aux capacités des stations de pompage, d'où la non possibilité de satisfaire la demande de façon simultanée.

Devant ces faits, les ORMVA ont été amenés à rechercher des solutions pratiques devant permettre une répartition correcte des débits. Ces solutions consistent principalement en l'organisation de Tours D'EAU entre les antennes d'une même unité hydraulique.

Cette solution ne peut être que provisoire, car si elle permet de répartir de façon équitable les doses d'irrigation sous des pressions convenables, elle présente un certain nombre d'inconvénients dont on peut citer quelques exemples :

- l'affectation d'agents supplémentaires pour les fermetures et ouvertures des chambres de vannes et remplissage du réseau,
- les éclatements de conduites,
- le fonctionnement continu des stations de pompage,

- les réclamations des agriculteurs concernant les volumes facturés,
- le gaspillage de l'eau d'irrigation et de l'énergie électrique,
- le surdosage en eau de certaines cultures au détriment d'autres.

2 - Préparation des états pour la facturation :

En général, on peut distinguer deux types de procédure selon les périmètres :

- La première consiste à comptabiliser les heures de fonctionnement des asperseurs (cas du Gharb) ou à relever les compteurs au niveau des bornes (cas des périmètres modernes du Massa ou le système de comptage marche encore),
- La seconde consiste au recensement des cultures et à la répartition des volumes distribués en fonction des exigences de chaque culture (cas du Loukkos et de Doukkala).

V - LA DISTRIBUTION DE L'EAU D'IRRIGATION DANS LES PERIMETRES TRADITIONNELS

1 - Principe d'organisation

Deux niveaux d'organisation sont mis en évidence quant à la distribution des eaux dans les quatre périmètres traditionnels :

a - Au niveau de l'oued

La répartition se distinguait, avant l'aménagement, par une réglementation commune à tous les périmètres, consistant en la priorité absolue de l'amont sur l'aval.

Avec l'avènement des aménagements hydro-agricoles, ce principe a été abandonné dans la Tassaout réaménagée et dans le N'fis.

Dans le cas du Drâa, l'ordre d'organisation traditionnelle est inversé pour la distribution des eaux régularisées en commençant par l'aval et en alimentant progressivement les prises de l'amont en fonction des débits disponibles.

Dans le cas de Tafilalet, des lâchers de barrage sont destinés exclusivement pour l'aval.

b - Au niveau de la Séguia

A ce stade de répartition, et dans la partie de ces périmètres où les droits d'eau sont conservés, on distingue trois catégories de gestion des eaux :

- **le système melk** : dans ce système une part d'eau est appropriée par un individu indépendant de sa propriété foncière. La distribution de l'eau entre les propriétés s'opère dans le cadre d'un tour d'eau dont la durée varie selon les séguia ;

- **le système collectif** : le statut de l'eau est collectif. L'eau fait partie intégrante et indissociable de la terre. Dans ce cas, l'irrigation se fait selon une rotation de l'eau entre les différents espaces irrigués dans l'ordre de leur succession topographique ;

- **le système mixte** : celui-ci consiste en une juxtaposition dans une même séguia des deux systèmes précédents.

2 - Processus de distribution

a - Calcul du tour d'eau

Le calcul du tour d'eau n'intervient qu'au niveau de la Tassaout amont réalimentée, ou l'aiguadier de l'Office prend en charge la distribution jusqu'au niveau du secondaire.

b - Programmation des lâchers

La programmation des lâchers est réalisée conformément aux procédures suivantes :

• **Cas de N'fis et du Tafilalet** : une part de la dotation en eau est fixée conformément à l'étude de régularisation concernant la gestion de la retenue du barrage Hassan Ed-Dakhil dans le cas de Tafilalet, et conformément au décret de 1939 dans le cas du N'fis.

Les éléments pris en compte dans l'élaboration du programme dans le Drâa sont : l'occupation du sol, mise en évidence par des enquêtes agricoles, les besoins en eau des cultures, la durée d'écoulement de l'eau dans le lit de l'oued. Cette programmation de la répartition des volumes des lâchers se fait par paire de palmeraies en fonction des éléments possibles.

• **Cas de la Tassaout réalimentée** : dans ce cas, la programmation du lâcher se fait sur la base des droits d'eau au niveau de chaque séguia.

c - déroulement des irrigations

Un trait commun à tous les périmètres traditionnels en matière de déroulement des irrigations, est la participation effective des usagers à la distribution.

Cette participation intervient au niveau du tertiaire dans le cas de la Tassaout amont réalimentée, ou une première répartition au niveau du réseau principal et du secondaire est assurée par l'Office.

Au niveau du N'fis et de la Tassaout amont réalimentée, la répartition par l'Office s'arrête au niveau des prises traditionnelles en fonction des droits qui reviennent à chacune d'elle conformément à la réglementation en vigueur.

La mission des aigüadiers de l'Office, dans le cas du Drâa et du Tafilalet, s'arrête au niveau des canaux primaires alimentant les séguías traditionnelles dont l'organisation interne de distribution est assurée par la Jemâa convertie récemment en associations d'irrigants.

VI - CONCLUSION

De manière générale, la distribution de l'eau d'irrigation au Maroc se caractérise par une organisation et des principes de fonctionnement similaires sur l'ensemble des grands périmètres irrigués modernes. L'étude et l'analyse des règles et processus régissant l'organisation et le fonctionnement de la distribution dans les neuf (9) ORMVA du Maroc fait ressortir l'identité des règles appliquées : canevas définissant les différents niveaux de prise de décisions, relations usagers-agents chargés de la distribution. Quelques nuances peuvent être relevées d'un périmètre à l'autre, nuances dictées par l'environnement et les conditions locales spécifiques à chaque périmètre.

Nous pouvons distinguer deux étapes bien distinctes dans le processus de distribution de l'eau d'irrigation.

La première étape concernant le transport de l'eau depuis l'ouvrage de stockage ou de mobilisation jusqu'en tête du canal tertiaire pour le gravitaire et la submersion, ou à la borne pour l'aspersion. Le transit de l'eau au cours de cette étape peut durer quelques heures, ou quelques jours, et intéresse plusieurs ouvrages et tronçons de réseaux (ouvrages de prise sur les réservoirs ou les oueds, stations de pompage, réservoirs, canaux primaires et secondaires, matériels et ouvrages de régulation...).

La qualité de la fourniture de l'eau au cours de cette première étape dépend :

- du bon fonctionnement des différents ouvrages, canaux et conduites,
- d'une bonne efficacité de l'eau pendant cette opération transport.

L'étude des différents cas des grands périmètres irrigués Marocains nous permet de conclure que l'expérience acquise par les cadres des services de gestion des ORMVA a permis une bonne maîtrise de la technique de transport et de distribution de l'eau d'irrigation au niveau de cette étape, et la résolution d'un certain nombre de problèmes techniques se rapportant à diverses réparations, ou mode de réglages, ou type de rénovation.

La seconde étape intéresse la distribution

proprement dite de l'eau à la parcelle. Elle présente la source majeure des difficultés (d'autant plus complexes que le nombre d'agriculteurs desservis par une même main d'eau est important) du gestionnaire de l'eau ; sa dépendance étroite des problèmes sociaux et fonciers, spécifiques à chaque périmètre, voire à chaque secteur hydraulique dans un même périmètre, fait d'elle le point sensible de la distribution.

Le canal tertiaire ou la borne constituent une espèce d'interface entre l'ORMVA représenté par les agents de distribution, chargés d'assurer une fourniture de l'eau organisée et équitable, et les usagers qui, guidés par leur individualisme parfois excessif, n'écoutent que leurs intérêts, même s'ils vont à l'encontre d'une conduite rationnelle de l'eau (destruction de certains ouvrages ou matériel du réseau), ou à l'encontre de droits d'autres usagers (usagers à l'aval privés totalement ou en partie d'eau).

Ce problème, très contraignant, ne pourra être dépassé qu'avec la responsabilisation des usagers, par le moyen de groupement sous forme d'associations d'irrigants, devant assurer, à long terme, une sorte d'autogestion des équipements collectifs mis à leur disposition.

Traitement des eaux usées domestiques dans un chenal algal à haut rendement et leur réutilisation pour l'irrigation du chou

H. BERDAI, N. JELLAL*

B. EL HAMOURI**

RESUME

Ce travail constitue le premier d'une série d'expérimentations qui sera réalisé conjointement par la D.E.R. (service des Expérimentations d'Hydraulique Agricole) et de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (laboratoire de Biochimie) dans le cadre de la convention signée par ces deux organismes le 27 - 2 - 1989.

Dans cet essai, des eaux usées domestiques de Rabat sont épurées dans un chenal algal à haut rendement (CAHR) et réutilisées pour l'irrigation d'une culture de chou.

Les résultats préliminaires obtenus constituent les premières tentatives :

- 1 - de mise au point du pilote de traitement et l'optimisation de ses performances ;
- 2 - de méthodologies d'analyses bactériologiques et physico-chimiques appliquées à l'eau, au sol et au végétal ;
- 3 - d'évaluation des effets de l'irrigation par les eaux usées sur le sol et le végétal.

Les résultats ont montré que l'épuration par le CAHR permet d'obtenir une eau de qualité physico-chimique satisfaisante. De même, cette épuration a conduit à un abattement de 90 % et 95 % respectivement pour les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux.

En ce qui concerne la réutilisation pour l'irrigation, les analyses montrent que les EUB, les EUD et les EUE possèdent une valeur fertilisante intéressante. Les teneurs moyennes des EUB, EUD et EUE en azote minéral sont de 80, 60 et 26 mg/l respectivement.

Les meilleurs rendements ont été obtenus dans le cas de l'irrigation avec des EUB : 42,5 T/ha contre 39,2, 34,6 et 23,8 T/ha respectivement pour l'EUE, l'EUD et le témoin.

Pour ce qui est de la qualité sanitaire des choux produits, l'utilisation des EUE contrairement aux EUB et EUD ne semble pas entraîner un risque supplémentaire pour le consommateur comparativement aux choux irrigués avec l'eau témoin si l'on considère les seules-tests de contamination fécale.

Enfin, l'irrigation par les EUB, les EUD ou les EUE n'a entraîné aucun changement notable sur les propriétés physico-chimiques des sols.

AVANT-PROPOS

L'essai présenté dans cette note, s'inscrit dans le cadre d'une convention signée le 27 Février 1987 entre la Direction de l'Equipement Rural et l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.

L'objet de cet essai est l'Épuration des Eaux Usées et leur Réutilisation en Agriculture.

Les travaux de recherche sont réalisés par une équipe pluridisciplinaire regroupant les domaines de spécialisation suivants : physiologie végétale, bactériologie, parasitologie, agronomie, physicochimie des sols et génie rural.

* Service des Expérimentations d'Hydraulique Agricole - Direction de l'Equipement Rural.

** Laboratoire de Biochimie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.

INTRODUCTION.

Les eaux usées domestiques et industrielles déversées sans prétraitement dans les cours d'eau ou infiltrées dans la nappe posent des problèmes sérieux pour l'homme et les écosystèmes.

De plus dans les zones arides et semi-arides, où l'eau est rare, l'intensification de l'agriculture nécessite l'économie, la protection et la valorisation des ressources en eau. De ce fait, la réutilisation des eaux usées traitées à des fins agricoles s'avère essentielle et même prioritaire. Il ne s'agit donc pas seulement de respecter les équilibres naturels et de résoudre le problème de pollution en restituant au milieu des eaux parfaitement épurées mais également de bénéficier d'une appréciable ressource en eau disponible en permanence pour l'irrigation.

Vu ces avantages certains, la réutilisation des eaux usées principalement en agriculture est une pratique qui devient de plus en plus fréquente de par le monde, et notamment dans les pays à climat semi-aride ou aride. Cette pratique existe actuellement dans 20 pays du monde (1985, rapport PNUD et Banque Mondiale).

Au Maroc, la réutilisation des eaux usées en agriculture reste limitée aux villes ou les terrains agricoles en aval des lieux de déversement des effluents sont disponibles et où il est possible de mettre en place de simples dérivations gravitaires pour acheminer les effluents vers les parcelles agricoles.

Le tableau suivant donne pour certaines villes continentales une estimation des volumes d'eaux usées réutilisées en agriculture : (rapport dernière session du Conseil Supérieur de l'Eau, mai 1988).

Ville	Nb. d'hab. en milliers	Vol. eaux usées en M ³	Super. irriguée en ha
Marrakech	473	15	3000
Meknès	352	14	1500
Fès	530	21	800
Fquih B. Salah	55	1	100
Béni-Mellal	110	2,6	300
Khouribga	145	4	360

Ces réutilisations sont cependant faites avec des eaux usées brutes ce qui présente deux inconvénients majeurs :

- des risques sanitaires pour les populations localisées dans ces périmètres et en contact permanent avec ces eaux ou consommant les produits agricoles sans contrôle sanitaire.
- des risques de contamination de la nappe phréatique en raison d'une mauvaise gestion des irrigations.

Pour ce qui est des autres villes continentales et côtières à l'exception de Nador qui dispose d'une station d'épuration, des eaux usées sont soit déversées à l'état brut dans le réseau hydrographique ou dans la mer soit épandues dans la nature et perdues par évaporation et infiltration dans le sol. Ces eaux constituant une ressource en eau non négligeable sont perdues et engendrent des pollutions dans le milieu récepteur.

La réutilisation des eaux usées à des fins agricoles après amélioration appropriée de leur qualité devient donc une nécessité nationale. Cependant, cette réutilisation soulève différents problèmes d'ordre

agronomique et sanitaire qui exigent des recherches préalables.

C'est dans le but d'apporter quelques éléments de réponse à ces préoccupations qu'une expérimentation a été conduite conjointement par :

- Le Service des Expérimentations d'Hydraulique Agricole.
- l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.

Cet essai vise les objectifs suivants :

- Etude du traitement des eaux usées urbaines dans un chenal algal à haut rendement visant une diminution de la pollution organique, bactériologique et parasitologique.
- Etude comparative des effets séparés sur le sol et la plante de l'irrigation avec :
 - . des eaux usées brutes.
 - . des eaux usées décantées pendant 24 H.
 - . des eaux usées traitées.
 - . et des eaux non usées.
- Evaluation de la valeur fertilisante et de la charge polluante des eaux usées brutes, décantées et traitées et leurs limites d'utilisation.

Le système de traitement des eaux usées retenu dans cet essai est le Chenal Algal à Haut Rendement. Il est basé sur la combinaison d'un chenal d'oxydation avec un réacteur algal. Cette combinaison permet d'atteindre un objectif double : Le traitement secondaire des eaux usées et la production d'une importante biomasse algal. (1,2,3).

La biomasse algale peut avoir plusieurs utilisations comme l'alimentation du bétail ou du poisson ; l'extraction de vitamines, colorants naturels ou comme fumure organique pour le sol.

Plusieurs stations de traitement des eaux usées basées sur ce principe ont été construites de par le monde (USA, Palestine, Inde, Thaïlande, Portugal, etc ...).

Ce travail constitue la première tentative d'introduction de ce système au Maroc.

MATERIEL ET METHODES

1 - Présentation de la zone d'étude.

Notre étude a été réalisée sur un sol fersiallitique lessivé de la région côtière à Rabat. Ce sol sableux en surface (rmel), argileux en profondeur est dominant dans la zone des dunes et d'interdunes alignées, sur une vingtaine de kilomètres parallèlement entre elles et à la côte atlantique suivant l'axe SW - NE.

Cette zone comprend trois principales formations :

- formation de Témara et des Séhoulis à l'Est.
- formation de Ben Slimane - Bouznika.
- formation de Mohammédia à l'Ouest.

• Climat

Le climat de Rabat est de type subhumide à hiver frais.

La température moyenne annuelle est de l'ordre de 17°5 à 17°C et atteint rarement 18°C. L'influence océanique se traduit par des températures minimales mensuelles de 10°C à 12°C en hiver et de 20° à 24° en été.

Les hauteurs de pluies moyennes annuelles sont supérieures à 580 mm.

L'évaporation moyenne annuelle mesurée à l'évaporomètre Piche est de 1352 mm à Rabat.

L'intensité du rayonnement solaire en hiver est en moyenne de 550 uE/m²/s.

• Occupation des sols :

A côté de la végétation naturelle constituée par des

forêts de chêne liège, la zone côtière est essentiellement dominée par la céréaliculture, les maraîchages, les vignes, les légumineuses, les cultures fourragères et arboricoles.

2 - Le Site expérimental :

La parcelle ou nous avons installé l'essai se trouve à l'I.A.V Hassan II à proximité du bassin de traitement des E.U à haut rendement. Le sol a été laissé en jachère depuis plusieurs années.

Il s'agit d'un sol fersiallitique lessivé à encroûtement calcaire formé sur grès dunaire. Sa texture est sableuse sur une profondeur de 80 cm environ (horizon A1 et A2). Au-delà de cette profondeur, il y a un horizon argileux (Bt) rubéfié et possédant une structure bien développée. Le sol est décarbonaté sur tout le profil. Un horizon d'accumulation du calcaire (K) surmonte en profondeur le grès altéré (horizon C).

Ce sol est donc très profond, mais sableux sur une profondeur moyenne de 80 cm, d'où un potentiel hydrique du sol très faible et un bon drainage.

Dans ce sol sableux, le taux de matière organique est très faible (0,80 % à 0 - 20 cm et 0,4 % à 20 - 40 cm). Compte tenu des conditions climatiques et d'une bonne aération, elle subit une minéralisation intense assez caractéristique des sols à sesquioxides de fer.

Le pH du sol est légèrement acide (entre 5 et 7). La capacité d'échange cationique est faible sur une profondeur de 80 cm (2 méq/100 g) et atteint 15 Méq/100 g dans l'horizon argileux.

Ce sol est également pauvre en azote (0,044°/°° à 0 - 20 cm) en phosphore assimilable (0,03°/°°) et en potassium échangeable (0,08°/°°).

3 - Le système d'épuration

• Le chenal algal.

Un chenal pilote en piste de course de 8,0 x 1,5 m soit 12 m² de surface et 0,40 m de profondeur et d'une capacité de 4,8 m³ a été utilisé. Son imperméabilisation a été obtenue à l'aide d'une couche de ciment-armé.

L'agitation du bassin, en permanence, est réalisée grâce à une roue à palettes cylindrique de 1,41 m de diamètre et 61 cm de profondeur ; entraînée par moteur électrique de 0,5 kW. La vitesse de circulation de l'eau dans le bassin est de 0,15 m/seconde.

• Les eaux usées

Les eaux usées domestiques utilisées ont été prélevées de la conduite principale qui se déverse dans le

Bou-Reg-Reg au niveau du quartier de Takaddoum. Cette conduite collecte les eaux de quartiers d'habitations sans unités industrielles importantes :

L'eau est prélevée à l'aide d'un groupe motopompe puis transportée jusqu'à l'I.A.V. Hassan II en citerne.

Avant d'être admise dans le chenal algal, l'eau subit une décantation de 24 h dans un bassin de 1,5 x 1,5 x 1m.

• Conduite du pilote.

Le chenal a été conduit en discontinu à cause de l'éloignement des points d'approvisionnement et de traitement.

Chaque 24 h un volume d'eau épurée est prélevé du chenal et un volume d'eau usée décantée équivalent est ajouté selon le temps de séjour retenu. L'évaporation est compensée à l'aide d'eau potable avant les prélèvements.

Les conditions de fonctionnement du pilote pendant la période de cet essai sont : 140 Kg DBO₅/haj ; temps de séjour 6 jours et une moyenne de température de + 15°C.

4 - Dispositif expérimental :

L'essai est réalisé suivant un dispositif en blocs aléatoires complets comportant 4 traitements et 3 répétitions.

Les 4 traitements de l'essai sont :

EUB : Irrigation avec une eau usée brute.

EUE : Irrigation avec une eau usée épurée.

EUD : Irrigation avec une eau usée décantée pendant une durée de 24 h.

T : Irrigation avec une eau témoin.

Les parcelles expérimentales ont une superficie de 30 m² chacune, espacées les unes des autres par une distance de 2 m.

- Spéculation :

Dans cet essai, l'irrigation par les 4 types d'eau sus-citées s'effectue sur une culture maraîchère d'hiver : le chou. Cultivés en pépinière, les plants de choux ont été repiqués en plein champ, le 3/12/87, sur billons avec un espacement de 40 cm entre les plants et de 50 cm entre les billons.

La fertilisation organique et minérale a été apportée selon le calendrier suivant :

Type de fumure d'apport	Quantité	Date
- Fumure de ferme	50 T/ha	19 - 10 - 87
- Sulfate d'ammoniaque 21%	70 U	09 - 12 - 87
- Superphosphate triple 45%	116 U	19 - 10 - 87
- Sulfate de potassium 48%	60 U	19 - 10 - 87
- Sulfate de potassium 48%	80 U	09 - 12 - 87

L'ordre de grandeur de l'équilibre minéral est le suivant :

	N	P	K
Unités totales exprimées en kg/ha	150	116	140
Equilibre minéral	1,3	1	1,2

- Irrigation :

Les choux sont irrigués gravitairement avec une fréquence d'une fois par semaine et une dose de 27 mm. En cas de pluie, les irrigations sont arrêtées jusqu'à ressuyage et dessèchement partiel du sol.

- Travaux de sol :

Outre le labour du sol effectué avant mise en place de la culture, des binages sont réalisés régulièrement pour ameublir la surface du sol, maintenir ses réserves de fraîcheur et lutter contre les mauvaises herbes.

5 - Analyses physico-chimiques de l'eau.

Les caractéristiques physico-chimiques ont été déterminées sur l'eau témoin (ET), les eaux usées brutes (EUB) ; les eaux usées décantées (EUD) et les eaux usées épurées (EUE). Ces dernières sont préalablement centrifugées à 3000 RPM pendant 10 min, pour éliminer les algues avant les analyses.

DBO₅ et DCO : La DBO₅ a été déterminée à l'aide d'un appareil manométrique AQUALYTIC BSB-Gerät Modèle 214 maintenu dans une enceinte thermostatée à + 20°C. (6). La DCO a été déterminée selon la méthode décrite dans Standard methods for examination of water and wastewater (7).

Matières en suspension déterminées selon la méthode décrite par Rodier (8).

Éléments minéraux : la détermination des concentrations de l'eau en N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻ et P-PO₄³⁻ (orthophosphates) a été effectuée selon les méthodes décrites par RODIER (8).

• Les cations :

Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ et K⁺ sont dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique.

• **Les anions :**

Cl⁻ et HCO₃⁻ sont déterminés par titrimétrie et SO₄⁼ est dosé par turbidimétrie.

. **Intensité lumineuse** : l'intensité du rayonnement solaire a été mesurée à l'aide d'un quantummètre Li-Cor type Li - 185 B.

. **pH** : le pH a été mesuré à l'aide d'un pH mètre Metrom Hershian type E 603.

. **Conductivité électrique à 25°.**

6 - Analyses bactériologique des Eaux

Les différents germes bactériens ont été énumérés avant et après traitement selon les méthodes suivantes :

- Les germes tests de contamination fécale (coliformes fécaux, streptocoques fécaux) ont été recherchés et dénombrés en milieu liquide selon le MPN (Most Probable Number) (7) ;
- Les coliformes totaux ont été dénombrés sur milieu solide au désoxycholate de sodium par lecture directe (9) ;
- Le dénombrement des germes totaux (FMAT) a été réalisé suivant la méthode classique de dilution et incorporation dans un milieu gélosé solide (gélose nutritive) coulé en boîte de Pétri (10) ;
- Les bactéries Pathogènes : les Salmonelles, les Staphylocoques et les Pseudomonas ont été recherchés sur milieu solides sélectifs. Ainsi, la recherche et le dénombrement des Staphylocoques ont été réalisés sur milieu de CHAPMAN (11) et la numération des Pseudomonas sur milieu "Pseudomonas selectif agar" (Merck 10988) (9). Pour les Salmonelles, nous avons utilisé la méthode simple de préenrichissement sur bouillon nutritif, enrichissement sur "selinite enrichment broth" puis isolement sur "salmonella Shiguella Agar" (9).

7 - Analyses physico-chimiques du sol et du végétal

a - Sol :

Des analyses physico-chimiques sont effectuées sur le sol avant et après traitement.

Les analyses réalisées sont principalement : humidité, pH, Conductivité électrique à 25°, matière organique, Azote total (Kjeldahl), Azote minéral (distillation), bases échangeables et Capacité d'échange Cationique.

b - Végétal :

A la récolte et pour chacun des traitements, des prélèvements de la partie aérienne des choux sont faits en vue de quantifier les exportations en N, P et K. Après minéralisation acide du végétal (attaqué par H₂SO₄ concentré + acide salicylique et H₂O₂), les éléments N, P et K ont été analysés.

L'Azote total a été déterminé par la méthode kjeldahl, le phosphore par colorimétrie au vanadomolybdate et le K a été dosé par spectrophotométrie d'absorption atomique.

8 - Analyses bactériologiques du végétal :

50 g de feuilles de chou ont été découpées en tranches longitudinales puis broyées dans 100 g d'eau distillée stérile. Le broyat est décanté et le surnageant est utilisé pour l'ensemencement.

RESULTATS ET DISCUSSION

1 - Qualité physico-chimique des eaux

Le tableau 1 regroupe les résultats des analyses physicochimiques effectuées sur les différents types d'eau utilisés dans cet essai.

Les résultats montrent que le système permet d'obtenir un abattement global de la DB05 d'environ 70 %, dont 40 % le sont par la simple décantation de 24 heures.

Considérant le temps de séjour, relativement court, et les températures basses, ayant régné pendant l'essai, on peut estimer que le résultat est satisfaisant. Toutefois, les écarts enregistrés dans le rapport DB05N - P par rapport aux valeurs recommandées peuvent expliquer qu'on n'atteigne pas 80 à 90 % d'abattement de la DB05. En effet, les rapports 100 - 22 - 2,5 et 100 - 28 - 3,2 sont enregistrés respectivement avant et après la décantation de 24 heures. Rappelons que les valeurs recommandées pour un bon fonctionnement d'un système d'épuration sont de 100 - 5 - 1 (1).

L'accentuation des écarts dans le rapport DB05 - N - P au cours de la décantation dans le sens d'un excès d'azote par rapport à la DB05 pourrait être due à un début de processus anaérobique conduisant à une élimination préférentielle de la DB05 par rapport à l'azote (7).

Signalons par ailleurs, qu'une forte concentration en azote ammoniacal conduit à une inhibition de l'activité photosynthétique des algues (8) ce qui pourrait s'ajouter au déséquilibre DBO₅-N-P qui, lui handicape la flore bactérienne.

Tableau 1 : **Caractéristiques physico-chimiques des eaux en mg/l. (Moyennes sur les trois irrigations)**

Caractéristiques	T	E.U.B	E.U.D	E.U.E
pH (+)	7,0	7,73	7,63	8,5
C.E (*)	0,65	1,74	1,31	1,16
M.E.S	0	268	169	243
D.C.O	24	674,7	404	178
DBO ₅	10	363,3	210	123,3
P-PO ₄ ³⁻	(-)	8,8	6,9	5,4
N-NH ₄ ⁺	0,6	79,9	58,9	25,5
N-NO ₂ ⁻	(-)	(-)		0,2
N-NO ₃ ⁻	(-)	(-)	(-)	(-)
HCO ₃ ⁻	144,4	716,7	469,7	260,3
Cl ⁻	104	200,3	183,2	174,9
Ca ⁺⁺	39,3	66	53,3	39,3
Mg ⁺⁺	15,4	20,7	20,1	15,2
K ⁺	7,5	56,2	56,6	66,9
Na ⁺	59,8	124,2	128,8	111,9
S.A.R (**)	2,0	3,4	3,8	3,9

(+) sans unité , (-) non détectés.

(*) C.E : Conductivité électrique à 25° en ds/cm.

(**) S.A.R : Indice d'absorption du sodium.

Voir tableau 2

L'examen des valeurs données dans le tableau 1 et leur comparaison avec les directives de la F.A.O relatives à l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux d'irrigation (Tableau 2) (9), permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'eau ordinaire (eau potable) ne présente aucun critère physico-chimique préjudiciable à sa qualité et peut donc être considérée comme utilisable pour l'irrigation de toutes les cultures.
- en revanche, les autres types d'eau, aussi bien celle ayant subi un traitement secondaire (eau épurée) que les eaux usées décantées et brutes, présentent des niveaux de salinité compris entre 0,79 et 2,22 mmhos/cm ce qui les classe dans la catégorie des eaux dont l'utilisation devrait être effectuée moyennant certaines restrictions, telles l'exclusion de cultures sensibles au sel.

Les risques d'imperméabilisation des sols qu'entraînerait l'irrigation par de telles eaux sont quasiment faibles à nuls, d'autant plus que les sols sont sablonneux et bien drainants. Les risques de

toxicité spécifique des ions Sodium et Chlorures sont faibles à modéré. Les pH de ces eaux sont situés dans la gamme normale (6,5 à 8,4).

Concernant les éléments fertilisants, les eaux EUB, EUD et EUE se distinguent de l'eau potable (T) par leur teneur relativement élevée en N, P et K. (Fig. 1).

La teneur moyenne la plus élevée en azote minéral se trouve dans les eaux usées brutes (79,7 mg/l). Il y a réduction de 26% de cet azote lors de la décantation et de 67,7% après traitement.

Dans les trois types d'eau EUB, EUD et EUE, l'azote est présent essentiellement sous forme de sels ammoniacaux. Ceci pourrait être expliqué par le fait qu'à cette période de l'année (Fév., Mars, Avril) la température de l'eau est encore trop faible pour permettre la nitrification de l'azote ammoniacal. En effet, les bactéries nitrifiantes présentent des exigences écologiques très strictes. Elles sont aérobies et neutrophiles, leur température optimale est d'environ +30°C (15).

La prédominance de l'azote ammoniacal pendant la saison hivernale et des nitrates pendant la saison estivale a déjà été observée dans le cas des eaux usées traitées par boues activées (16).

Pour ce qui est du potassium, les teneurs des eaux EUB, EUD et EUE en cet élément sont à peu près les mêmes et sont de 56, 56,7 et 62,3 mg/l respectivement. Cette teneur ne dépasse pas 7,5 mg/l dans l'eau ordinaire (temoin).

Quant au phosphore soluble inorganique directement assimilable par les plantes, les teneurs sont faibles dans les trois types d'eau (8,82 mg/l dans l'EUB, 6,6 mg/l dans l'EUD et 5,37 mg/l dans l'EUE).

L'ordre de grandeur de l'équilibre minéral N/P/K dans les différentes eaux est le suivant :

1 - 0,11 - 0,70 pour EUB
 et
 1 - 0,11 - 0,96 pour EUD
 1 - 0,20 - 2,42 pour EUE

Cet équilibre minéral pour les 3 types d'eau montre que le phosphore serait apporté en faible quantité par rapport à l'azote et au potassium (16).

2 - Qualité bactériologique des eaux

Voir tableau 3

L'analyse des résultats du tableau 3 montre que

Tableau n°2 : Directives pour l'interprétation de la qualité d'une eau d'irrigation

Nature des problèmes	Unité	Restriction pour l'irrigation		
		Aucune	Légère à modérée	Forte
Salinité (influe sur l'eau disponible pour la plante)				
CE ou	ds/m	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
TDS	mg/l	< 450	450-2000	> 2000
Infiltration (influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau ds le sol : utiliser à la fois CE & SAR)				
SAR = 0 - 3 et CE =		> 0,7	0,7 - 02	< 0,2
= 3 - 6 =		> 1,2	1,2 - 0,3	< 0,3
= 6 - 12 =		> 1,9	1,9 - 0,5	< 0,5
= 12 - 20 =		> 2,9	2,9 - 1,3	< 1,3
= 20 - 40 =		> 5,0	5,0 - 2,9	< 2,9
Toxicité de certaine ions (affecte les cultures sensibles)				
Sodium (Na)				
Irrigation de surface	SAR	< 3	3 - 9	> 9
Irrigation par aspersion	me/l	< 3	> 3	
Chlore (Cl)				
Irrigation de surface	me/l	< 4	4 - 10	> 10
Irrigation par aspersion	me/l	< 3	> 3	
Bore (B)				
Effets divers (affecte les cultures sensibles)	mg/l	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
Azote (NO₃ - N)				
Bicarbonate (HCO ₃)	mg/l	< 5 -	30	> 30
(seulement pour l'aspersion sur frondaison)	me/l	< 1,5	1,5 - 8,5	> 8,5
pH		Zone normale 6,5 - 8,4		

Tableau 3 : Analyse Bactériologique de l'eau.

Germe/100 ml	(Eau Usée Brute)	(Eau Usée traitée Epurée)	Taux de Réduction
C.fécaux	1,1 10 ⁷	11 10 ⁵	90
S.fécaux	2,3 10 ⁷	11 10 ⁵	95.
C.Totaux	51 10 ⁶	8,7 10 ⁶	83
F.M.A.T*	32 10 ⁷	2,8 10 ⁷	88
Staphylocoques	5,2 10 ⁵	0,5 10 ⁵	90
Pseudomonas	12,8 10 ⁷	4 10 ⁷	69
C.S.R.**	23 10 ³	7 10 ³	69

* Flore mésophile aérobique totale.

** Clostridium sulfite réducteurs.

la réduction des germe-tests de la contamination fécale reste faible.

On obtient un taux d'élimination de 90 et 95 % respectivement pour les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux, ce qui conduit à un effluent contenant 11.10^5 Coliformes fécaux/100 ml ; environ 20 fois la norme recommandée pour les pays tropicaux pour une irrigation limitée aux seules cultures industrielles ou des cultures destinées à être cuites avant consommation. (6).

Il est cependant intéressant de signaler que le taux d'élimination des germes-tests de contamination fécale reste supérieur à celui des autres germes notamment les anaérobies sulfite-réducteurs.

3 - Effet sur la culture

a - Rendement du chou

Tableau 4 : Effet des traitements sur le rendement du chou (en T/ha)

Traitement	T	E.U.D	E.U.E	E.U.B
Rendement en T/ha	23,8	34,6	39,2	42,5
Effet Traitement	Significatif			

Les résultats présentés dans le tableau 4 montrent une augmentation significative des rendements dans le cas de l'irrigation avec des eaux usées brutes (78,6%), épurées (64,8 %) et décantées (45,5 %) par rapport à celle avec des eaux témoin. Le classement des traitements dans le sens EUB > EUE > EUD > T pourrait s'expliquer par :

- les apports par les eaux usées brutes, épurées et décantées en éléments fertilisants N, P, et K en quantité non négligeables (tableau 5).
- l'existence d'une autre source d'azote sous forme de substances organiques dans les eaux usées brutes et de biomasse bactérienne et algale dans les eaux usées épurées.

Tableau 5 : Les apports totaux, exprimés en unité fertilisante (kg/ha), en N, P et K par les eaux d'irrigation

Traitement	N	P	K
EUB	64,61	7,13	54,6
EUD	47,69	5,55	55,1
EUE	20,8	4,34	60,4

b - Exportations du chou.

Tableau 6 : Exportations en matière verte du chou exprimées en T/ha

Traitement	T	E.U.D	E.U.E	E.U.B
Exploitations MV. T/ha	32,4	47,2	53,4	57,9
Effet Traitement	Significatif			

Les résultats présentés dans le tableau 6 montrent comme pour le rendement une augmentation significative des exportations en matière verte en faveur des traitements EUB, EUE et EUD.

Il n'y a donc pas eu, dans aucun cas, de développement végétatif exagéré au détriment du fruit. Au contraire, toute augmentation de la masse des feuilles responsables de la photosynthèse se traduit par une augmentation du rendement de la culture ce qui est le signe d'une nutrition minérale bien équilibrée.

Tableau 7 : Exportations en éléments majeurs N, P et K des choux en kg/ha

Traitement	N	P	K
EUB	89	21	208
EUE	88	18	176
EUD	75	11	143
T	45	9	88

- Effet du traitement : Significatif.

Les résultats présentés dans le tableau 7 montrent une augmentation significative des exportations en N, P et K concernant les traitements EUB, EUE et EUD par rapport à T.

Par ailleurs, ces éléments ont été utilisés par la plante dans des proportions similaires pour l'ensemble des traitements.

Le tableau 8, donnant les exportations en N, P et K exprimées en % MS, vient confirmer l'existence de cet équilibre dans la nutrition minérale de la plante.

Tableau 8 : **Exportations en éléments majeurs N, P et K des choux en % MS.**

Traitement	N	P	K
EUB	1,85	0,44	4,2
EUE	1,94	0,40	3,88
EUD	1,86	0,30	3,6
T	1,67	0,35	3,25

- Effet du traitement : Non significatif.

c - Qualité bactériologique du chou

Le tableau 9 regroupe les résultats des analyses bactériologiques effectuées sur le chou.

Il ressort des résultats que la contamination par les germes fécaux, exprimée en germes/g de poids frais, varie selon le type d'eau utilisée pour l'irrigation.

Si on considère les seuls germes-tests de contamination fécale, on peut noter que l'utilisation de l'eau EUE, contrairement aux eaux EUB et EUD, ne semble pas devoir entraîner un risque supplémentaire pour le consommateur comparativement aux choux irrigués avec l'eau témoin.

Cependant, ces résultats sont à prendre avec beaucoup de précautions étant donnée la difficulté de mise au point de méthodes reconnues et acceptées par tous pour l'analyse bactériologique des fruits.

La méthode que nous avons utilisée et qui consiste à broyer les feuilles dans de l'eau distillée stérile conduit certainement à une suspension de tous les germes dans le broyat ce qui facilite leur mise en évidence, mais en revanche, le broyage peut conduire à une libération d'acides organiques (ou d'autres substances) ayant un effet sur la survie des germes.

Tableau 9 : **Analyse Bactériologique du Végétal Chou Vert en germes/g de poids frais.**

	T	E.U.B	E.U.D	E.U.E
Coliformes fécaux	< 3	6	6	< 3
Coliformes totaux	20	900	690	-
Stréptocoques fécaux	< 3	6	4,3	< 3
F.M.A.T	1020	48.10 ⁴	5,2.10 ⁴	8,8.10 ⁴
Clostridium* S.R	-	-	-	-
Salmonelles*	-	-	-	-

* Non détectés.

4 - Effet sur le sol

L'irrigation par les eaux usées brutes, décantées ou épurées n'a entraîné aucune modification notable de la composition chimique des sols.

En effet, la teneur en M.O est restée inférieure à 1 % et à 0,5 %, après traitement, respectivement dans les couches 0 à 20 cm et 20 à 40 cm. De même, la salinité du sol qui était à l'origine très faible (C.E. sur extrait 1/5 0,10 mmhos/cm sur la quasi-totalité des échantillons) n'a subi aucun changement après irrigation. Ceci est d'autant plus prévisible que :

- Les eaux usées brutes, décantées et traitées ne sont pas très salées (C.E. ne dépassent pas une moyenne de 1,74 mmhos/cm pour les plus minéralisées d'entre elles).
- Le nombre des irrigations avec ces eaux a été limité à trois ; en raison d'une pluviosité suffisamment abondante et bien répartie durant le cycle cultural du chou.
- Les sols sont de texture, sablonneuse et donc perméables et bien drainés, empêchant toute accumulation de sels.

CONCLUSIONS :

Les résultats préliminaires présentés, dans cette publication constituent les premières tentatives :

- 1 - De mise au point du pilote de traitement et de l'optimisation de ses performances.
- 2 - De méthodologies d'analyse bactériologiques et physico-chimiques appliquées à l'eau, au sol et au végétal dans nos conditions de travail.
- 3 - D'évaluation des effets de l'irrigation par les eaux usées sur le sol et le végétal.

Nous nous attacherons, dans la poursuite de ce travail à aborder d'autres aspects parallèlement aux mises au points précitées comme l'accumulation de métaux lourds dans le sol et le végétal, le suivi des parasites du tube digestif (helminthes et protozoaires notamment) dans l'eau, le sol et le végétal. Et enfin collaborer avec des épidémiologistes pour déterminer les risques supplémentaires que peuvent courir les agriculteurs et les consommateurs ; suite à l'utilisation des eaux usées en irrigation.

Observations sur la qualité des eaux de l'Oued Boufekrane

Par

Sovannarath LEK*, Sithan LEK*

El-Madani BELKHADIR** & Abdelaziz ABDALLAOUI

RESUME

Le profil hydrobiologique de l'Oued Boufékrane a été dressé dans son cours supérieur, de la source à l'entrée de Sidi-Kacem, par des analyses physico-chimiques et faunistiques.

Les résultats obtenus mettent en évidence une perturbation importante causée par les effluents domestiques et industriels de l'agglomération de Meknès. Les analyses physico-chimiques et la détermination des indices biotiques, de Shannon et d'équitabilité montrent une dégradation très importante. Le profil morphodynamique de l'Oued en aval de la ville n'est pas propice à une auto-épuration efficace.

Observations on water quality of Oued Boufekrane

SUMMARY

The hydrobiologic profile of Oued Boufékrane was investigated from the source to the city of Sidi-Kacem. Biological, physical and chemical characteristics of samples were considered.

The results showed evidence of pollution with important perturbations produced by waste water rejected by the urban and industrial area of Meknès. Chemical and physical characteristics and the biotic index of Shannon and the Equitability parameters showed an important degradation of water quality. Furthermore, the morphodynamic profile of the stream beyond Meknès, after meeting the waste water is not suitable for an efficient selfpurification.

INTRODUCTION

En 1937, quand l'autorité occupante a voulu détourner l'eau de l'oued Boufékrane desservant la ville, pour l'irrigation des terrains agricoles des colons, la population, privée d'eau de boisson, protesta. Des manifestations violentes eurent lieu et furent réprimées par les armes à feu. Il y eut des victimes avant que les autorités ne reviennent sur leur décision. La bataille de Boufékrane ou bataille d'eau douce est ainsi entrée dans l'Histoire du Maroc.

Ce rappel historique montre que par le passé, les riverains se battaient pour pouvoir disposer des eaux de l'Oued Boufékrane. Aujourd'hui, on est tenté de dire que les gens se réunissent pour polluer ses eaux. En effet, avec l'urbanisation et l'industrialisation croissantes, l'oued reçoit directement de plus en plus d'effluents domestiques industriels, sans le moindre traitement.

L'oued Boufékrane est donc touché par la pollution. Cependant, une bonne partie de la population

* Laboratoire de Sciences Naturelles, B.P. 418, Avenue Coubertin, 44600 SAINT-NAZAIRE.

** Faculté des Sciences de Meknès, B.P. 4010, Beni M'Hamed - Meknès - MAROC.

de Meknès continue à boire de ses eaux, ici, le vocable "Ima hlou ou eau douce" désigne encore et strictement les eaux de Boufékrane.

Dans le but de souvegarder ce cours d'eau, nous menons à la faculté des Sciences de Meknès un programme de recherche sur l'étude des pollutions et nuisances. Le présent travail représente la première publication effectuée dans ce cadre.

I - LE MILIEU D'ETUDE

L'oued Boufekrane est un cours d'eau permanent de la plaine du Saïss. Il s'écoule à travers le bassin lacustre du plateau de Meknès, une des régions les plus agricoles du Maroc. Le substratum est constitué de calcaire sableux datant du Pliocène. La couverture (terre agricole) est d'âge tertiaire et quaternaire.

L'oued Boufekrane prend sa source à l'ouest d'El Hajeb (fig. 1), dans le causse Moyen-Atlasique, à 750 m d'altitude. Il porte d'abord le nom d'Aïn Maâruf, ensuite celui de Boufekrane à 10 km de la source, et enfin celui de R'Doom après sa confluence avec l'oued Ouislane. Il s'écoule en direction S-NW avec une pente moyenne de 2 à 3% pour se jeter dans la merja El Jouab, au nord de sidi Slimane, sans rejoindre l'oued Sebou.

Dès son orogine, l'oued traverse la plaine agricole du plateau de Meknès et ensuite la commune de Boufekrane, à 15 km de la source. Ensuite à 35 km en aval, l'oued passe dans la vallée séparant la ville ancienne et la ville nouvelle de l'agglomération de Meknès. Enfin, après un parcours sinueux de 50 km environ à travers la plaine agricole du nord de Meknès, l'oued passe dans Sidi-Kacem, ville pétrolière.

II - SITUATION DES STATIONS

Nous avons retenu au total 12 stations, dont 11 se situent sur les oueds Boufékrane et R'Doom et une sur l'oued Ouislane (X), juste avant son point de confluence avec le premier.

La station 1 est située à 750 m d'altitude, à la source d'Aïn Maâruf, au pied du plateau d'El Hajeb. La végétation aquatique est peu abondante, constituée surtout par des graminées et des mousses fontinalis. Les bordures sont peuplées par quelques figuiers (*Ficuss cariaca*). C'est une source de type rhéocrène dont l'eau sort entre de gros blocs de pierre. Le fond est constitué par de petits graviers et du sable.

La station 2 est située à 725 m d'altitude, à 7 km de la source, au niveau du pont de Sidi-Bouزيد. L'oued dont le lit est plutôt très étroit (2 à 3 m), traverse les

vastes champs de blé. Il est bordé tout le long par une double ligne de peupliers blancs (*Populus alba*).

La station 3 est située à 710 m d'altitude, à 14 km de la source, à l'entrée de la commune de Boufékrane. Elle présente à peu près les mêmes caractéristiques que la précédente station, avec un lit plus large (5m).

La station 4 se trouve en aval de Boufékrane, soit à 500 m environ de la précédente. Le rivage est bien bordé par des peupliers. On note une abondance particulière de la végétation aquatique, constituée essentiellement de graminées.

La station 5 est située à 560 m d'altitude, au niveau de la pépinière municipale, juste avant la traversée de la ville de Meknès. La végétation ripicole est abondante, composée essentiellement de peupliers (*Populus alba*), de canne de Provence (*Arundo donax*), de mûriers grimpants, ...

La station 6 est localisée dans la ville de Meknès, au niveau du pont situé derrière l'hôtel transatlantique, à côté d'une fabrique de tuiles. Elle est distante de la précédente d'environ 3 km. Le lit est étroit (2m) et la végétation est constituée essentiellement de cannes de Provence (*Arundo donax*).

La station 7 est située à la sorte de la ville de Meknès soit à 4 km du point précédent. La pente est accentuée, entraînant une accélération de la vitesse du courant.

La station 8 est située juste avant la confluence avec l'oued Ouislane. Le lit est large est bien bordé par des cannes de Provence (*Arundo donax*) qui représentent les seuls végétaux ripicoles.

La station X est située au niveau du premier pont de la route principale P6 à la sortie de Meknès en direction de Sidi-Kacem. Cette station a été choisie pour rendre compte de la qualité de l'oued Ouislane avant son confluent avec l'oued Boufékrane. La végétation est constituée de saule pleureur (*Salix babylonica*) et les cannes de Provence (*Arundo donax*) et la largeur du lit ne dépasse pas 5 m.

La station 9 est située sur l'oued R'Doom, à 50 m après la confluence entre les oueds Boufékrane et Ouislane. Le lit est large (10 m) et la végétation de rivage est abondante (*Arundo donax*).

La station 10 est située à 200 m d'ltitude à 22 km du point précédent. Le lit, assez large (5 à 10 m), est très sinueux et le courant est presque nul. Le rivage est bien bordé de végétation constituée essentiellement d'acacia hérissé (*Acacia horrida*) et de quelques saules pleureurs (*Salix babylonica*).

La station 11 est localisée au niveau d'une gorge à 5 km en amont de Sidi-Kacem. Le lit est large et colonisé par une riche végétation, surtout des lauriers roses (*Nerium oleander*). Le substrat est dominé par des galets et de gros blocs de pierre.

III - DONNEES CLIMATOLOGIQUES

Le tableau I donne les valeurs des températures (minimales, maximales et moyennes) et de la pluviométrie mensuelles établies sur 25 ans (1924-49) à El Hajeb et Meknès. Nous remercions le service météorologique de Meknès qui a bien voulu nous communiquer les données climatiques de 1986, année correspondant à notre période d'étude.

A El Hajeb (800 m d'altitude), les précipitations sont plus importantes et les moyennes de température sont plus basses qu'à Meknès, ville située à 500 m d'altitude.

En 1986, lors de notre étude, la pluviométrie était légèrement inférieure à la moyenne établie sur 25 ans ; il en est de même pour les températures maximales et minimales qui furent nettement plus clémentes que les valeurs moyennes.

Les valeurs Q du quotient pluviométrique d'Emberger sont calculées à partir de la relation :

$$Q = \frac{100 P}{(M + m)/2 (M - m)} \text{ mm/}^\circ\text{K}$$

dont :

P = total des précipitations annuelles,

M = moyenne des températures maximales mensuelles,

m = moyenne des températures minimales mensuelles.

Les résultats obtenus : Meknès Q (25 ans) = 65,90 mm/°k, Q (1986) = 56,06 mm/°k et El Hajeb Q (25 ans) = 71,76 mm/°k montrent que le cours d'eau étudié se situe dans un étage bioclimatique semi-aride, à la limite inférieure du sub-humide, avec un hiver tempéré et pluvieux correspondant à la période des hautes eaux et un été sec correspondant à l'étiage (EMBERGER, 1955).

IV - MATERIEL ET METHODES

Les données morphodynamiques sont obtenues en utilisant un décimètre, un bouchon de liège et un chronomètre. Nous laissons couler le bouchon à la surface de l'eau sur une distance déterminée (20 à 50 m) en prenant soin qu'il ne soit pas freiné par les aspérités (branches, blocs de pierre) présentes dans le lit. Le

temps obtenu nous permet d'estimer la vitesse au niveau de la surface de la rivière.

Certains paramètres physico-chimiques sont évalués sur le terrain au moment des prélèvements. C'est le cas de la température, du pH, de la conductivité et de l'oxygène dissous. Les analyses des autres paramètres chimiques seront faites immédiatement dès notre retour au laboratoire. Nous avons suivi les techniques analytiques décrites par RODIER (1980), GREENBERG et al. (1985) et les publications de l'ONEP, ABOUZAID et al. (1984).

L'échantillonnage du peuplement benthique est réalisé grâce au filet «surber» (maille : 300µ) permettant une prospection de 0,33 m² de substrat. En raison de l'étroitesse du lit de l'oued, le faciès lentisque est pratiquement inexistant. Les échantillonnages effectués correspondent ainsi au faciès lotique selon la définition du calcul de l'indice biotique de TUFFERY et VERNEAUX, (1968). Les trois échantillons biologiques de chaque station sont conservés dans du formol à 10 % pour être déterminés et dénombrés au laboratoire à la loupe binoculaire. La détermination des différentes unités systématiques a été faite suivant les données bibliographiques de TACHET et al. (1980), BERTRAND (1951) pour les insectes. Concernant les mollusques, nous avons surtout utilisé les publications de BROWN (1980) et MOUTHON (1982).

V - CARACTERISTIQUES MORPHODYNAMIQUES

Les résultats obtenus au cours du mois de septembre (tableau II) montrent que la vitesse du courant est d'abord faible au niveau de la source (20 cm/s), puis modérée ou moyenne jusqu'à la sortie de Meknès. Ensuite, au niveau du plateau pré-rifain (entre Meknès et Sidi-Kacem), avec la faible pente (moins de 1 %), le courant devient légèrement faible.

En ce qui concerne le débit, il est d'abord très faible au niveau de la station 1. Au niveau des stations 2 et 3 le débit atteint jusqu'à dix le débit enregistré à la source. Cette forte augmentation est due à l'apport de nombreuses autres sources qui se situent après la station 1. Les fluctuations des valeurs des stations se trouvent en aval sont dues à l'alimentation des canaux d'irrigations ou à l'apport des sources ou d'effluents polluants.

A son entrée dans Meknès, l'oued doit alimenter un grand canal qui longe le rempart de la partie sud de la ville et passe dans une grande partie de l'ancienne ville. Le débit est ainsi diminué de moitié environ (station 6). Cette perte de débit est très vite compensée

par de très nombreuses sources (LEK (b) et al., en préparation) se trouvant dans la vallée séparant la ville ancienne de la ville nouvelle. On doit considérer également l'apport des collecteurs qui sont très nombreux et qui débouvent directement dans le cours d'eau.

Après la station 7, l'apport des oueds Bou Issehak et Ouislane contribue à une légère montée du débit qui reste à peu près stable jusqu'à l'entrée de Sidi-Kacem.

VI - CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

• 1 - Température : La source Aïn Maârouf, comme la plupart des sources de la plaine du saïss, est une source sténotherme chaude qui émerge à $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Le profil de la température le long du cours d'eau dépend de la saison qui conduit soit à une diminution en hiver (décembre à mars), soit à une augmentation en été (mai à septembre). Les fluctuations observées fig. 2a), sont dues à l'apport de nombreuses sources chaudes ou encore à des rejets des agglomérations.

• 2 - pH : subit des fluctuations autour de la neutralité avec des valeurs comprises entre 6,5 et 8,5 unité de pH. Ce phénomène peut être expliqué par une activité photosynthétique en aval de la source et par des apports de sources ou d'affluents polluants des deux agglomérations. Notons que dans cet intervalle de variation du pH (6,5 à 8,5), nous sommes dans une zone optimale de la production de la plupart des espèces animales et végétales (NISBET et VERNEAUX, 1970 et ARRIGNON, 1976.

• 3 - Conductivité : dans toutes les stations étudiées, les valeurs de la conductivité varient de 600 à 1400 us/cm (fig. 2c). Cette minéralisation élevée est surtout due à la nature du terrain calcaire de la plaine de Saïss.

• 4 - Turbidité : L'évolution de la turbidité, mesurée à l'aide d'un turbidimètre HACH 2100A, montre une nette variation le long du cours d'eau. Limpide à la source, l'eau devient très vite turbide à cause du limon des terrains agricoles du bassin versant. Deux pics en rapport avec les rejets des agglomérations de Boufékrane et de Meknès, sont observés sur les courbes de la figure 2d.

• 5 - Matières en suspension : Elles évoluent de la même manière que la turbidité. Ces teneurs élevées de matières en suspension 0,5 à 2g/l (fig. 2e) font classer l'oued Boufékrane dans la catégorie des cours d'eau pollué à très pollué. Les valeurs élevées observées en février sont dues à des pluies abondantes (tableau I) qui entraînent une très forte érosion du bassin versant. La figure 2f montre une forte dominance des matières minérales.

• 6 - Résidus secs et calcinés : La figure 3a montre l'évolution croissante des teneurs en résidus secs le long de l'oued Boufékrane. Les valeurs élevées de résidus secs observées durant les mois de décembre et mars sont liées à la saison des pluies, qui entraîne un lessivage et une importante érosion du bassin versant, fig. 3b).

• 7 - Alcalinité totale TAC : D'une manière analogue aux mesures de la conductivité et du pH, les valeurs des TAC évoluent également d'amont en aval (fig. 3c).

• 8 - Dureté de l'eau : La figure 3d montre une augmentation progressive d'amont en aval des valeurs de la dureté totale. En effet, dès sa sortie, l'eau traverse le bassin sédimentaire composé essentiellement de calcaires dolomitiques du Jurassique ou du Trias moyen. Les variations saisonnières de l'évolution des teneurs en calcium (fig. 3e) sont proportionnelles à celle de la dureté. Outre le calcium, nous remarquons également une présence notable des ions de magnésium (fig. 3f). En conclusion, l'oued Boufékrane possède une eau très dure.

• 9 - Chlorures : Dosés par la méthode de Mohr, la fig 4a met en évidence des valeurs très élevées de la teneur en chlorures, ce qui classe l'Oued Boufékrane dans les groupes 5 et 6 de l'échelle établie par NISBET et VERNEAUX, (1970). Concernant les sulfates, la situation ne reste normale qu'au niveau de la source. Les autres stations présentent une eau polluée ou séléniteuse voire, en aval de Meknès, très séléniteuse ou fortement polluée. La variation brutale au niveau de la station 6, au mois de mai (fig 4b), ne peut être expliquée que par des apports d'effluents de l'agglomération de Meknès.

• 10 - Composés azotés : raison de sa traversée dans une zone agricole, l'oued Boufékrane possède une teneur très élevée en substances azotées. Les figures 4c et 4d montrent une nette augmentation des concentrations au niveau de l'agglomération de Meknès, témoignant ainsi de l'importance de la pollution organique liée aux rejets domestiques et des usines alimentaires de cette ville.

• 11 - Oxygène dissous : amont de Meknès, la situation est excellente. Nous nous trouvons dans la zone catharobe ou oligosaprobe d'eau pure et consommable (fig. 5a). Bien qu'on note une légère baisse de la concentration en oxygène au niveau de la commune de Boufékrane, la situation reste encore acceptable. Par contre à l'entrée de la ville de Meknès, avec l'arrivée successive des effluents polluants, la chute des valeurs est radicale, atteignant 4 mg/l en mars 86. Sur les cinq prélèvements, on note que la tendance au retour à la « situation normale » commence à se faire sentir dès la station

suiivante (7) située à quelques kilomètres seulement en aval. Cet accroissement rapide peut être lié à la forte pente de l'oued à cet endroit, entraînant une meilleure aération de l'eau par agitation, d'ou un important pouvoir d'auto-épuratation. Les valeurs de la concentration en oxygène restent cependant inférieures à celles observées en amont de Meknès. Passé, la station 7, on note une légère baisse de la teneur, en oxygène dissous, qui se stabilise ensuite jusqu'à l'entrée de Sidi-Kacem, sur une distance de 50 km environ. Ce phénomène peut être expliqué par une très faible pente de la zone (inférieur à 1 %), entraînant une stagnation de l'eau et un ralentissement de l'auto-épuratation.

Les apports des effluents (oueds Toulal et Ouislane) qui drainent les rejets des parties périphériques de la ville contribuent à cette baisse de la teneur en oxygène dissous (on trouve 5,8 mg/l d'oxygène dissous à la station X en janvier). A 3 km de la ville de Sidi-Kacem, au niveau des gorges ou l'oued redevient de nouveau agité, on constate une nette amélioration de la teneur en oxygène dissous.

• 12 - DBO5, DCO, Oxydabilité : Ces paramètres indicateurs du degré de pollution, surtout organique, ont une évolution inverse à celle de l'oxygène dissous (fig. 5b, c et d). Leur situation n'est normale qu'au niveau de la source. Ensuite, une légère augmentation des valeurs est observée avant l'entrée dans l'agglomération de Meknès. Ceci pourrait être dû aux polluants déversés par les populations riveraines, notamment les produits d'origine agricole. C'est avec l'arrivée des égouts de Meknès que ces trois paramètres atteignent des valeurs maximales, confirmant ainsi la situation dramatique de l'oued. Bien qu'une légère amélioration des valeurs ait été observée en aval de Meknès, suite au phénomène d'auto-épuratation, la situation normale est loin d'être rétablie. Comme pour l'oxygène dissous, les dues à la diminution de la vitesse du courant ayant pour conséquence une influence marquée des apports de polluants et de leur décantation.

En résumé, l'étude des divers paramètres physico-chimiques montre que l'oued Boufékrane est un cours d'eau pollué. La pollution avait une origine agricole lorsque l'oued traverse le plateau de Meknès, mais la qualité de l'eau y reste acceptable. Les rejets de Meknès, ville de 400 000 habitants, sont responsables d'une importante pollution. L'auto-épuratation est bien amorcée dès la sortie de la ville ou la pente est très importante. Mais, malheureusement, dans la plaine agricole au Nord de Meknès ou la vitesse du courant est presque nulle à cause de la faible pente, l'auto-

épuratation est inhibée. A l'entrée de Sidi-Kacem, la qualité de l'eau s'est améliorée, mais reste cependant douteuse.

VII - ETUDES BIOLOGIQUES

Afin d'évaluer la qualité biologique de l'eau, nous avons entrepris l'étude de la faune benthique qualitativement et quantitativement. Les résultats obtenus nous permettent de calculer la diversité au moyen de l'indice de Shannon (DAGET, 1976), donné par la relation suivante :

$$I_{sh} = 3,22 \left[\log Q - \frac{\sum q_i \log q_i}{Q} \right]$$

avec :

Q : nombre total d'individus

q_i : nombre d'individus par unité systématique ou par espèce.

Nous déterminons également l'équitabilité qui évalue la diversité réelle de l'échantillon par rapport à la diversité théorique maximale égale à log₂ N, ou N représente le nombre total d'espèces ou de groupes faunistiques inventoriés.

Enfin, nous avons également fait appel à la méthode dite des indices biotiques de TUFFERY et VERNAUX (1968) pour une estimation globale de la qualité biologique au niveau de chaque station.

Les prélèvements ont été effectués en 1986 en deux saisons différentes, soit en janvier (période hivernale) et juin (période estivale). Nous avons noté, dans la liste faunistique (tableau III), une absence totale des plécop- tères qui peut être expliquée par la situation altitudinale, les caractéristiques morphodynamiques et la physico- chimie du cours d'eau étudié. La température, par exemple, est en effet trop élevée pour la faune plécopté- rologique. D'une manière générale, ce groupe d'insectes est peu représenté dans le Moyen-Atlas, par rapport au Haut-Atlas (DAKKI, 1979 ; PIHAN et al., 1983).

1 - Fréquences des principaux groupes faunistiques

Le tableau IV présente en pourcentages, les fréquences des principaux groupes faunistiques. Ce tableau, ainsi que le précédent, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Les Ephéméroptères sont très bien représentés. L'Ecdyonurus a été récolté au niveau des stations 2, 3 et 11. Les Baetis et Coenis sont les plus abondants de cet ordre, surtout les premiers qui sont omniprésents dans toutes les stations étudiées.

Les Hydropsyches, trichoptères les mieux représentés, sont surtout abondants dans les stations situées en amont de Meknès.

Les coléoptères, représentés uniquement par des Elmidae, ont été récoltés uniquement dans la partie amont de la ville de Meknès.

Nous avons récolté également quelques Odonates, surtout *Agrion splendens*. Un exemplaire de la famille des gomphidae a été récolté en juin à la station 2.

Les Gammars, les plus abondants des Crustacés, sont représentés par l'espèce *Gammarus acalceolatus* (PINKSTER, 1971 ; KARAMAN et PINKSTER, 1977). *Gammarus gauthieri* n'a pas été trouvé dans nos prélèvements. Nous avons trouvé en outre *Atyaephyra* dans les trois premières stations et *Asellus* au niveau de Meknès et en aval.

Les Diptères sont représentés par plusieurs familles. Ils sont surtout abondants dans la fin du parcours ou l'eau devient calme (station 10). La vallée de l'oued Boufékranne semble être colonisée uniquement par une seule espèce de simuliidae, *Simulium pseudequinum* (LEK (a) et al., en préparation).

La faune malacologique, omniprésente dans toutes les stations étudiées, est représentée par plusieurs espèces : *Melanopsis premorsa*, *Melanopsis* sp., *Physia acuta*, *Theodoxus*, *fluviatilis*, *Pisidium* sp., ...

Les Oligochètes sont toujours présents. Ils sont surtout représentés par des lumbricidae et lumbriculidae dans les stations amonts. En aval des effluents polluants, ce sont surtout les tubificidae qui sont les plus abondants et qui peuvent atteindre plus de 90 % des effectifs totaux.

2 - Qualité des eaux

Les estimations de la qualité des eaux de l'oued Boufékranne s'effectuent par le calcul des indices biotiques, de Shannon et d'équitabilité (fig. 6).

Au niveau de la source (station 1), l'indice biotique est constant durant nos deux prélèvements (= 7). L'indice de Shannon donne une valeur satisfaisante (= 3 bits). Il est légèrement inférieur durant la période estivale. L'équitabilité est forte et ne subit pas de variations saisonnières importantes, ce qui caractérise une certaine stabilité du milieu.

A la station 2 (7km de la source) et 3 (avant l'entrée de l'oued dans la commune de Boufékranne), on constate un accroissement des valeurs d'indices

biotiques (Ib = 9) et de shannon (supérieur à 3 bits), qui peut s'expliquer par un enrichissement du milieu par des fertilisants agricoles provenant du bassin versant. Les indices de shannon et d'équitabilité montrent une variation saisonnière avec une baisse évidente de valeur en été, sans doute en rapport avec le faible débit de la saison et avec l'éclosion de la plupart des espèces d'insectes.

Une légère baisse des valeurs de l'indice biotique au niveau de la station 4 serait due aux rejets de la commune de Boufékranne. Cependant les valeurs de l'indice de diversité et d'équitabilité ne montrent pas de variation importante. En effet, de la station 3 à la station 4, le nombre d'unités systématiques est presque identique, mais *Ecdyonurus*, espèce d'éphéméroptère très sensible aux polluants, étant disparu, fait baisser la valeur d'indice biotique, témoignant ainsi d'une certaine présence de polluants.

De la station 4 à la 5, la qualité de l'oued reste plus ou moins stationnaire, d'après les valeurs des indices biotiques. L'indice de shannon et l'équitabilité subissent par contre une légère baisse, en raison d'une diminution des débits consécutive à l'irrigation, entraînant une légère modification de structure de la faune. Nous n'avons pas constaté de déversements importants de rejets sur ce parcours.

Au point 6, situé au niveau de la ville de Meknès, on constate une chute importante de tous les indices (fig. 6) qui dénote une très forte pollution. L'agglomération de Meknès, avec ses 400 000 habitants, déverse en effet directement ses rejets dans l'oued à l'aide des collecteurs qui sont dispersés le long de la vallée séparant la ville ancienne de la ville nouvelle.

Les prélèvements au niveau de la station 7, à 4km seulement de la ville, montrent déjà une amélioration de tous les indices, indiquant un important pouvoir d'auto-épuration. Trois raisons peuvent expliquer cette « amélioration » rapide : la première est liée à l'apport de très nombreuses sources au niveau de la ville (LEK (b) et al., en préparation) qui contribuent à une dilution importante des rejets polluants ; la deuxième raison est la dispersion des collecteurs empêchant une très forte concentration des polluants ; et enfin, la forte pente du parcours, déjà évoquée pour la mise en évidence de la remontée des concentrations en oxygène dissous, constitue la troisième raison.

Sur la suite du parcours, néanmoins, une nouvelle chute des valeurs des indices étudiés est enregistrée. Si la chute précédente est facilement explicable, l'origine

de celle-ci est beaucoup moins évidente. Notons que l'oued reçoit sur ce parcours deux effluents, les oueds Toulal et Ouislane qui, malheureusement, drainent également des rejets des parties Ouest et Est de la ville. Pour illustrer ce phénomène, nous avons effectué un prélèvement de faune dans l'oued Ouislane, le plus important de ces deux effluents, juste avant sa confluence avec l'oued Boufékrane (station X). La comparaison des stations 8 et X (avant la point de confluence) avec la station 9, située juste après, montre les mêmes valeurs d'indice biotique. Les indices de shannon et d'équitabilité subissent de légères variations, mais la différence n'est pas notable. La seule hypothèse possible qui peut expliquer cette deuxième chute des valeurs des indices semble être la diminution de la vitesse du courant suite à une très faible pente du terrain. Les éléments polluants de la ville de Meknès pourraient ainsi avoir le temps de se manifester à nouveau, en maintenant les valeurs indicielles à leur point le plus faible. Les fluctuations des valeurs d'équitabilité indiquent en effet une situation plus ou moins déséquilibrée de ce secteur.

Notre dernier point de prélèvement (11) est situé au niveau d'une gorge à quelques kilomètres seulement de la ville de Sidi-Kacem. Les indices calculés montrent une nette amélioration de la qualité des eaux. Les courbes d'indice, biotique et de shannon se redressent, et d'équitabilité dépasse de nouveau la soixantaine de pour-cent.

CONCLUSIONS

Les recherches entreprises représentent une première contribution à l'étude de la qualité des eaux de l'oued Boufékrane, cours d'eau qui draine la plaine de Saïs, et dont l'importance agricole est évidente.

Les analyses physico-chimiques et faunistiques effectuées sur 11 stations, de la source jusqu'à 95 km en aval, ont montré que l'oued Boufékrane est un cours d'eau pollué sur une grande portion de son parcours. Les principales causes de cette dégradation sont les rejets domestiques et industriels de l'agglomération de Meknès. Peuplée par plus de 400 000 habitants, cette ville rejette directement ses égouts dans le cours d'eau. A cela, il faut ajouter des déchets d'origine industrielle comme ceux de la cimenterie, de la tannerie, des huileries, des usines de traitement de surface, des conserveries, ... qui arrivent dans l'oued sans aucun processus de traitement préalable.

Les caractéristiques morphodynamiques de l'oued Boufékrane en aval de Meknès (faible pente) rendent l'auto-épuration longue et difficile. C'est ce qui explique les très faibles valeurs indicielles observées et la très basse concentration en oxygène dissous. Les analyses de plusieurs composants chimiques montrent une surcharge en matières organiques sur un très long parcours. En conclusion, les polluants de la ville de Meknès restent toujours présents dans l'oued. La formation mousseuse au niveau de la gorge à l'entrée de Sidi-Kacem indique par exemple que les détergents n'ont pas été dégradés sur un parcours de plus de 50 km. En résumé, si on compare avec d'autres cours d'eau de même catégorie (MOREAU et al. (1972), l'oued Boufékrane est une rivière bien polluée.

Dans le but de sauvegarder ce petit cours d'eau, nous proposons que les rejets de la ville de Meknès, domestiques ou industriels, soient préalablement épurés avant leur arrivée dans le cours d'eau. Le Maroc étant un pays agricole dont la pluviométrie est plutôt déficitaire, il faut bien garder à l'esprit que toute pollution de ses eaux de surface, aussi minime soit-elle aura de graves conséquences, et représentera donc un véritable crime pour la région considérée.

Tableau I : Données climatologiques de Meknès et El Hajeb de 1924 à 1949 et de Meknès en 1986 (Source : Centre Météorologique de Meknès) (Température en °C ; Pluie en mm)

	MOIS	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL	MOY.
MEKNES 1924- 1949	T.min.	4,4	5,2	7,1	8,6	10,8	13,8	16,4	17,0	15,1	12,2	8,4	5,4	124,4	10,4
	T.moy.	9,7	10,8	13,0	15,1	17,8	21,7	25,2	25,6	22,6	18,9	14,0	10,6	205,0	17,1
	T.max.	15,0	16,4	18,9	21,6	24,8	28,7	34,0	34,2	30,2	25,6	19,6	15,9	284,9	23,7
	Pluie	67,0	70,0	68,0	62,0	40,0	10,0	3,0	1,0	11,0	64,0	88,0	90,0	574,0	47,8
EL HAJEB 1924- 1949	T.min.	2,0	2,8	4,6	6,3	8,8	12,4	15,8	16,5	13,6	10,3	6,1	3,1	102,3	8,5
	T.moy.	7,3	8,4	10,4	12,5	15,7	19,9	24,2	24,9	21,1	16,7	11,6	8,2	180,9	15,1
	T.max.	12,6	14,0	16,2	18,8	22,6	27,5	32,7	33,4	28,6	23,1	17,1	13,3	259,9	21,7
	Pluie	69,0	75,0	81,0	84,0	53,0	20,0	3,0	5,0	19,0	65,0	96,0	85,0	655,0	54,6
MEKNES 1986	T.min.	5,4	7,1	6,7	7,0	13,0	14,2	18,0	17,9	16,8	12,8	8,3	4,6	131,6	11,0
	T.moy.	9,9	11,4	11,8	11,9	20,2	20,5	26,5	25,2	23,6	18,9	14,0	10,3	204,1	17,0
	T.max.	14,4	15,7	17,0	16,8	27,3	26,8	34,9	32,6	30,4	24,9	19,7	16,0	276,5	23,0
	Pluie	125,7	129,7	61,3	75,0	0,3	8,4	0,7	0,6	4,7	13,0	49,3	27,7	496,4	41,4

Tableau II : Situation des stations étudiées et caractères morphodynamiques

Stations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Distance/source (km)	0	7	14	17	35	38	42	47	48	70	95
Altitude (m)	750	725	710	700	560	505	380	270	260	200	80
Largeur lit (m)	1,9	4,11	5,05	3,9	2,15	2,15	3,3	4,5	4,8	6,5	4,5
Profondeur (m)	0,22	0,21	0,19	0,32	0,30	0,50	0,28	0,31	0,32	0,95	0,20
Vitesse m/s	0,2	0,67	0,75	0,37	0,52	0,55	0,53	0,4	0,45	0,09	0,58
Débit l/s	85	578	720	456	335	591	490	558	691	556	522

Tableau III. Liste faunistique des stations étudiées

STATIONS	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		
	Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	1 ^{er} Jan.	1 ^{er} Juin	
PHLEBOTOMES																									
<i>Ecyonurus</i> sp.				7	4	40	6			1															
<i>Baetis</i> sp.	20	13	52	85	30	18	65	275	30	37	125	25	25	20		26	5	33	10	25	75	80	13	10	
<i>Centroptilum</i> sp.	3	2							15																
<i>Ephoron</i> sp.			5				5															45			
<i>Coenis</i>			150	50	13	6		1					15	7											
<i>Oligoneuriella</i> sp.										5															
TRICHOPTERES																									
<i>Psychonia</i>			4																						
<i>Hydropsyche</i> sp.			40	105	5	7	60	37	23	15					1	2			4	3	3	13			
<i>Trinodes</i> sp.					4																				
<i>Ecnesus</i> sp.			2																						
GLECOPTERES																									
<i>Elais</i>	10	5	4	2	6	4	16	10																	
<i>Lianus</i> sp.	2																								
<i>Esolus</i>			2		11		6																		
<i>Riolus</i>		1	6		1																				
<i>Norsodia</i>			4	1	2		1		5																
<i>Gerinidae</i>			3		1		4																		
DOONATES																									
<i>Agrion splendens</i>			1		2	4			2					1	1										
<i>Gourpidae</i>																									
RUSTACES																									
<i>Gammarus acalceolatus</i>	150	120	200	230	130	220			230	120															
<i>Asellus</i> sp.								1	4	1															
<i>Atrypa</i> sp.	20	15	2	1	2	1			7																
IPTERES																									
<i>Istaenidae</i>	2		1																						
<i>Sinulidae</i>	5		7	2	3																				
<i>Chironomidae</i>	10	4	10	15	18	30	5	3	4		15	10		1	1	3	1	15	80	15	32	8	15		
<i>Psychodidae</i>											2	1													
<i>Athericidae</i>					5		12	2		1					5										
<i>Stratioidae</i>	1								2																
<i>Ceratopogonidae</i>			3																						
MOLLUSQUES																									
<i>Melanopsis pinnosa</i>	50	75	50	60	90	250	40	10	40	20			45	45					4	4	5	7	1		
<i>Melanopsis</i> sp.	8	5	15	18	32	21	25	5																	
<i>Ancylus fluviatilis</i>		2	1	2			2		1	2				10											
<i>Physia acuta</i>								20	1		20	20													
<i>Theodorus fluviatilis</i>	30	130			2	10			1	2			5	4											
<i>Valvata ovoluta</i>	3		2				1	1	1	2															
<i>Pisidium</i> sp.	2	1	4			1			2				1	2											
<i>Ballanus unicolor</i>									2																
OLIGOCHETES																									
<i>Lumbricidae</i>		5	3	10	16	2	11	6	19	13	6	7	10	5	1	3	10	5	2	1				4	
<i>Lumbricidae</i>	10	5	10	19	44	1	14	10	7	10			5	15											
<i>Tubificidae</i>					2		10	100	1		250	350	40	65	60	450	110	70	1500	500	40	10	120	20	
ACHETES																									
<i>Erebodella stagnalis</i>		2						4			4														
<i>Helobdella</i> sp.	5							2		1															
<i>Hirudo medicinalis</i>								6		1				1										1	
<i>Haemaphysalis</i>								3																	
TRICLADES																									
<i>Follyella nigra</i>	10	11	1																						
<i>Dugesia gonoccephala</i>			14	10	1	1		16	7				10	2											
<i>Dendrocoelum lactum</i>											5	18													
<i>Gerris</i>	2	1	1	1																					
<i>Hydrotetra</i>	3	4																							
HYDRACARIENS			7	5	2		1																		
COLLEMBOLLES					1																				
HEMIPODES								1																	
Nombre de Taxons	20	18	30	19	25	16	18	13	22	13	8	9	11	12	6	6	7	6	6	10	9	8	10	1	

Tableau IV : Fréquence des principaux groupes faunistique (en %)

STATIONS	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		X	
	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin
EPHEMEROPTERES	7	4	35	22	26	5	25	55	24	19	29	6	25	15	3	5	4	28	1	4	57	55	7	4
TRICHOPTERES	0	0	8	17	2	1	22	7	5	6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	2	7	1
COLEOPTERES	3	1	3	0	4	1	10	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ODONATES	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CRUSSTACES	49	34	33	37	26	38	0	1	53	51	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
DIPTERES	5	1	3	3	5	5	6	1	2	0	4	3	1	3	1	0	2	2	5	20	20	31	6	10
MOLLUSQUES	27	53	12	13	24	48	24	7	4	11	5	5	32	34	11	0	4	5	0	1	3	5	9	5
OLIGOCHETES	3	2	2	5	12	1	13	23	6	10	60	82	35	47	85	94	88	65	94	75	19	7	71	81
ACHETES	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
TRICLADES	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
DIVERS	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau V : Valeurs calculées d'Indice biotique, d'Indice de Schannon

STATIONS	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		X	
	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin	Jan	Juin
Nombres d' U S	20	18	30	19	25	16	18	19	22	13	8	9	11	12	6	6	7	6	6	10	9	8	10	10
Somme	346	401	611	621	513	582	279	500	445	236	424	436	311	181	72	482	137	116	1601	670	214	147	190	257
Indice biotique	7	7	9	9	9	9	7	7	7	6	5	5	6	6	5	5	5	5	5	5	6	5	5	5
Indice de Shanon	2,98	2,59	3,16	2,84	3,34	2,11	3,27	2,28	2,49	2,42	1,57	1,21	2,71	2,68	0,91	0,42	1,16	1,49	0,43	1,31	2,44	1,95	1,75	1,36
Equitabilité	0,69	0,62	0,64	0,67	0,72	0,53	0,78	0,53	0,56	0,65	0,52	0,38	0,78	0,74	0,35	0,16	0,41	0,57	0,16	0,39	0,77	0,65	0,52	0,41

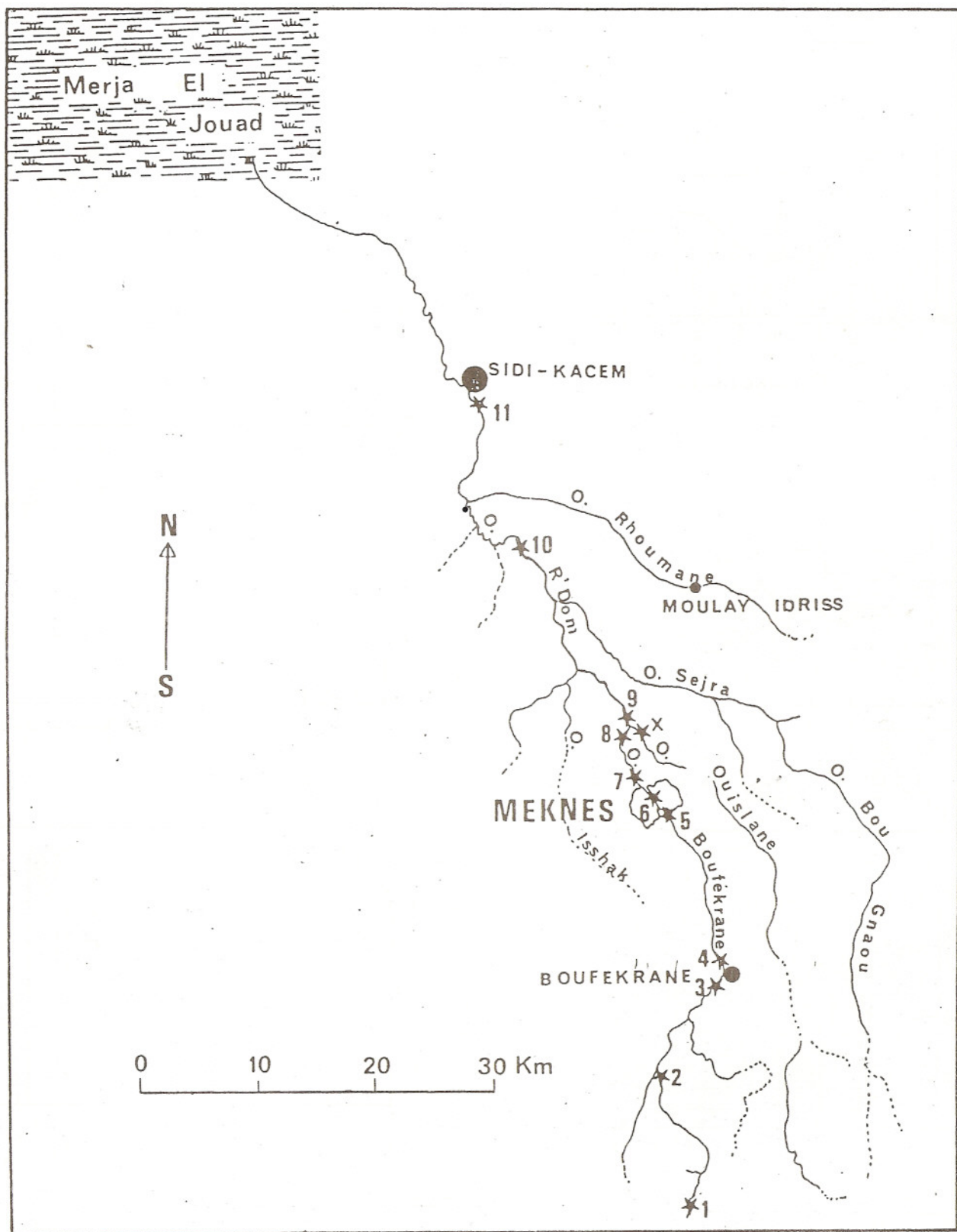


Fig. 1- Réseau hydrographique du cours d'eau étudié. Situation des stations (1' à 11 et X).

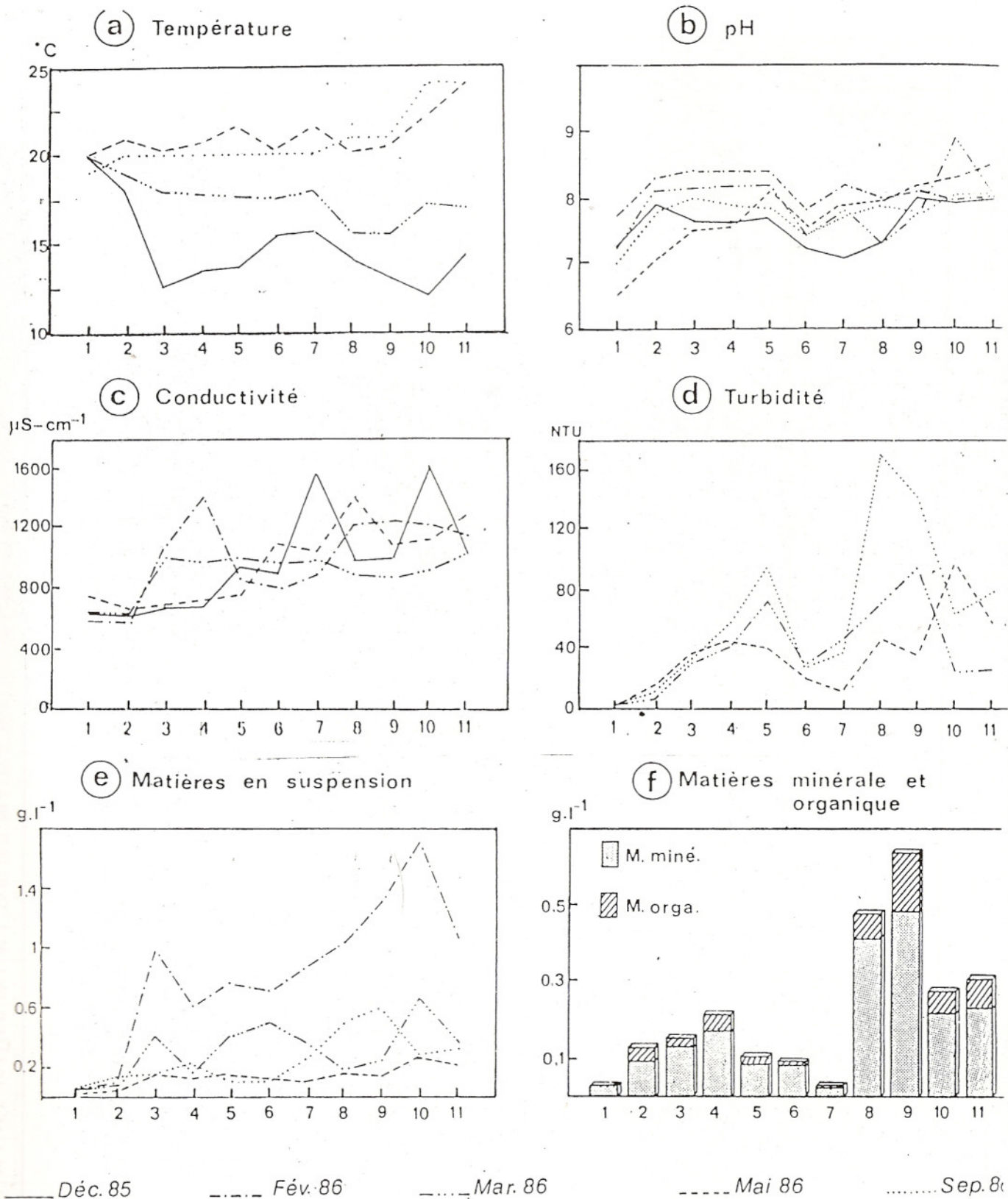
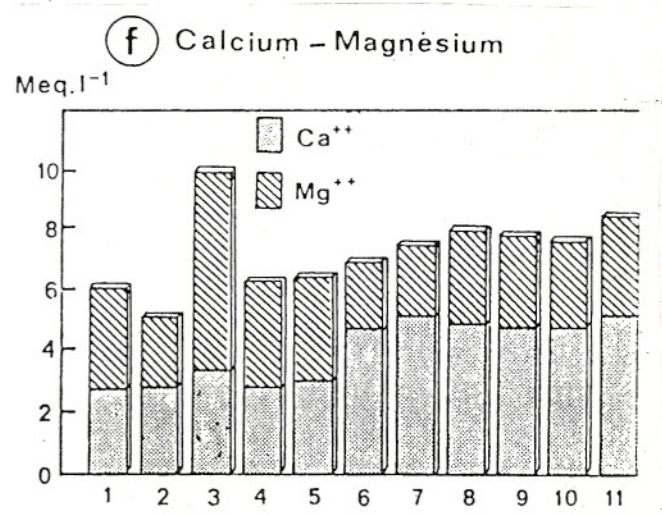
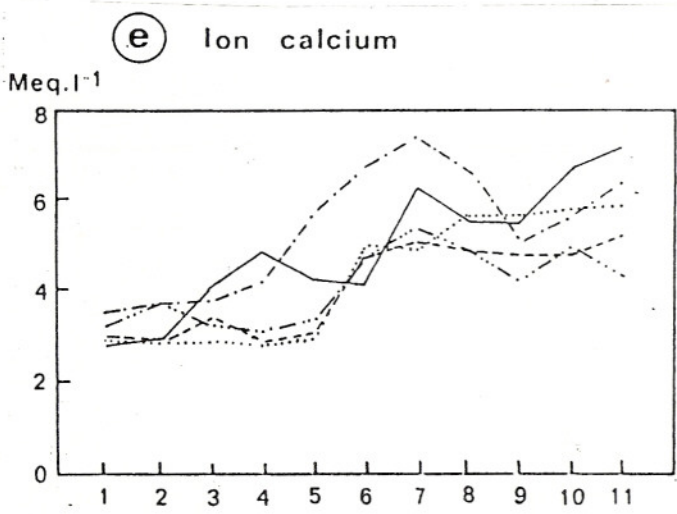
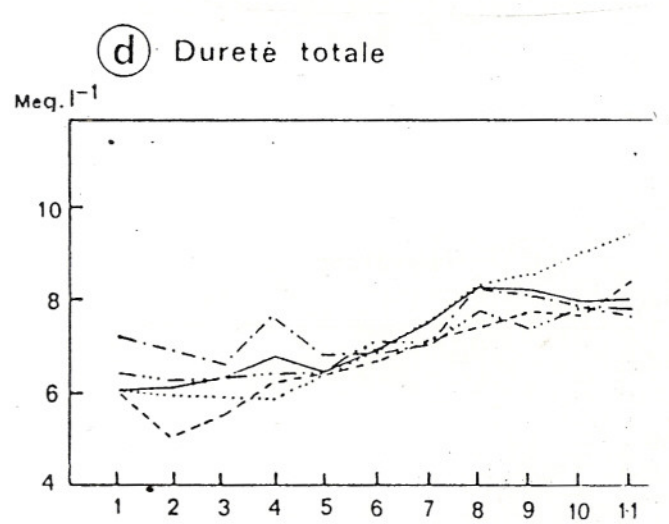
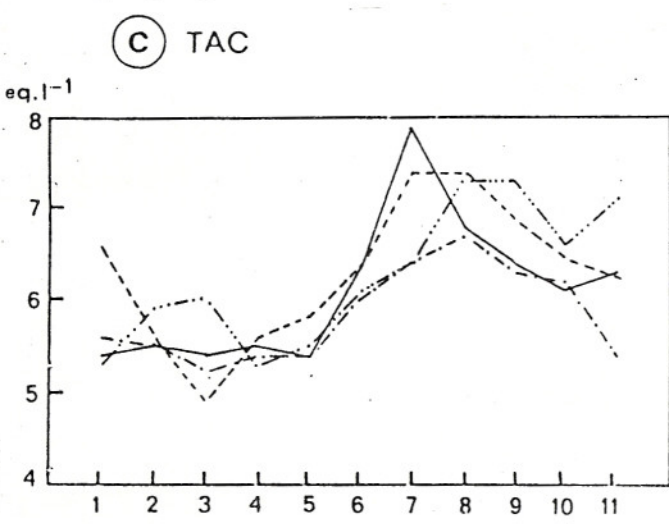
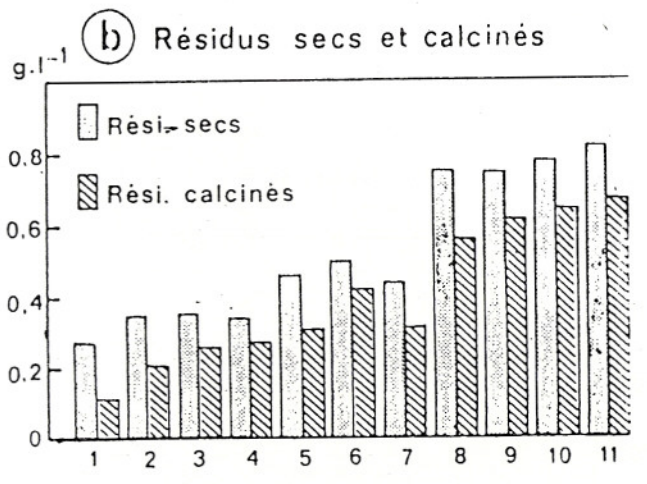
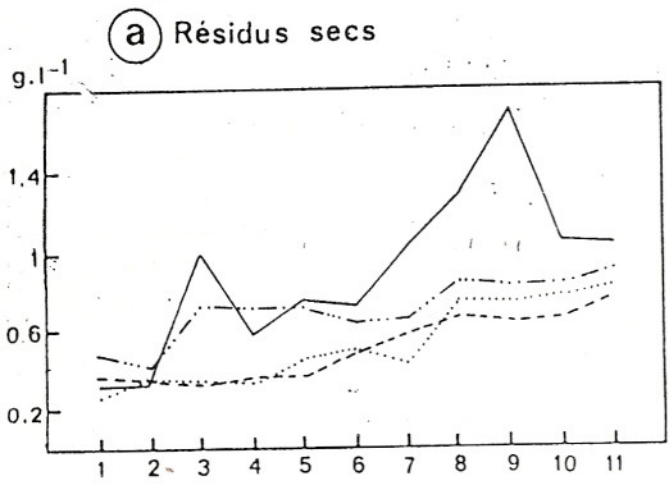
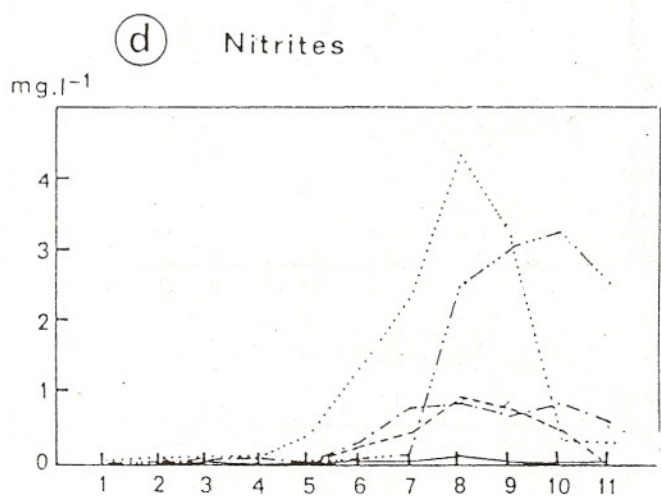
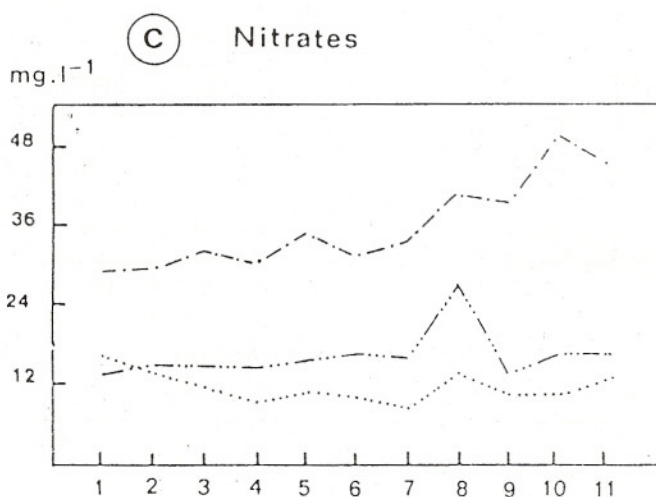
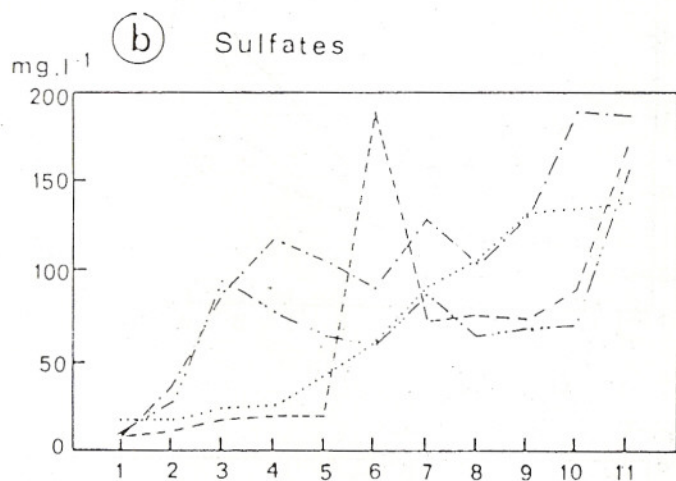
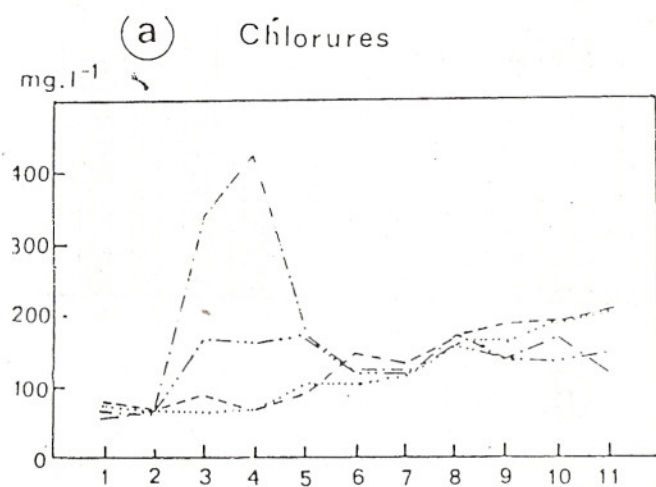


Fig. 2- Evolution amont-aval des valeurs de certains composés physico-chimiques. Les abscisses représentent les stations étudiées.



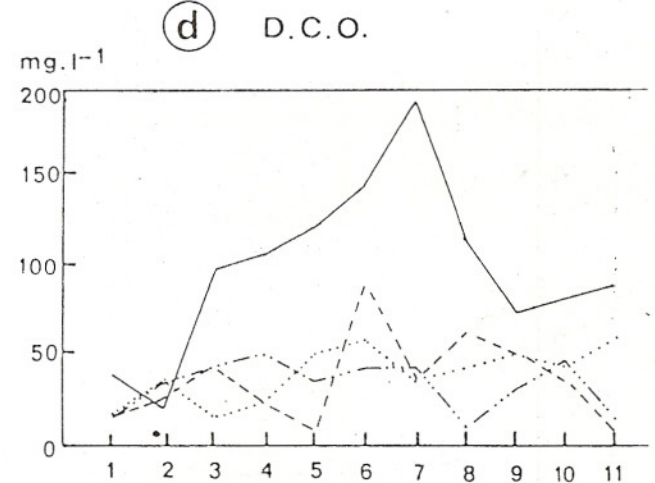
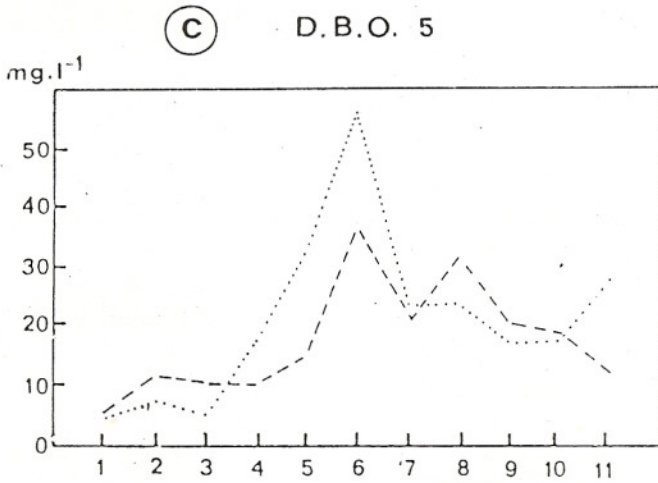
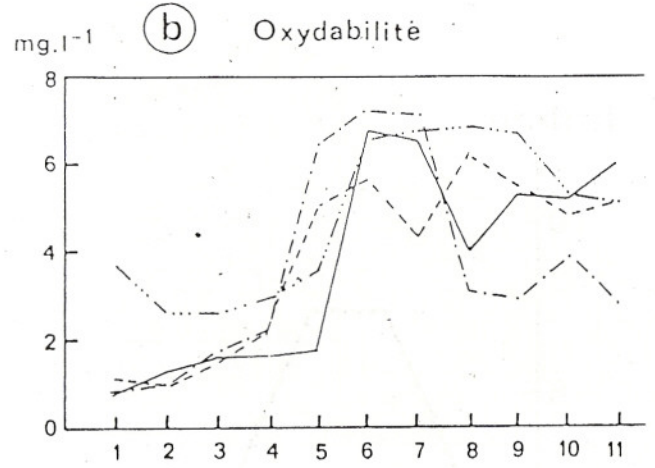
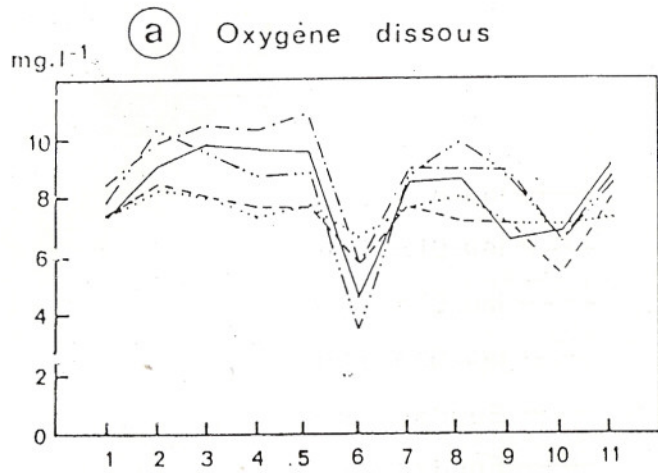
— Déc. - - - - - Fév. - · - · - · Mar. - - - - - Mai ······ Sep.

Fig. 2 - Evolution des paramètres physico-chimiques de l'eau



— Dec. - - - Fèv. - · - · - Mar. - - - Mai ····· Sep.

Fig. 4- Evolution amont-aval des teneurs de certains facteurs chimiques étudiés. Les abscisses représentent les stations prospectées.



— Déc. - - - Fév. - · - · - Mar. - - - Mai ····· Sep.

Fig. 5- Evolution amont-aval des teneurs de certains facteurs chimiques étudiés. Les abscisses représentent les stations prospectées.

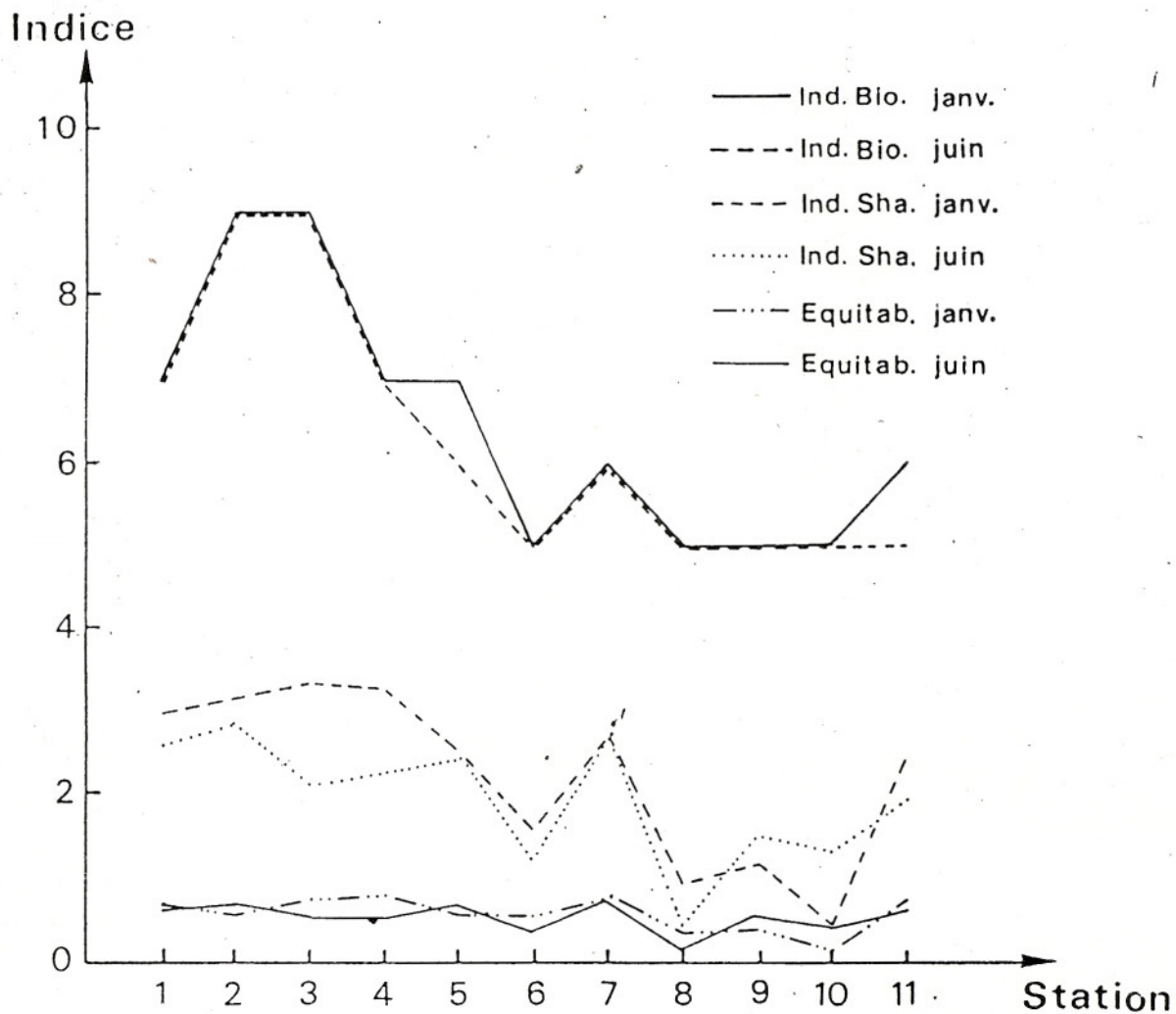


Fig. 6- Profil longitudinal des valeurs des indices biotique, de diversité et d'équitabilité. Les abscisses représentent les stations prospectées.

Station météorologique assistée par ordinateur

Application : Logiciel de calcul de l'évapotranspiration potentielle

Résumé du mémoire de fin d'étude présenté par Mr ACHIQ bdellah
en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome (Option Génie-Rural)
Université catholique de Louvain - (Septembre 1989)

I - INTRODUCTION

Le développement de la société moderne suscite une connaissance de plus en plus des phénomènes de la nature, une application adéquate des lois scientifiques et une pénétration plus accrue de la technique dans le quotidien. A l'heure actuelle, il nous semble que l'informatique et l'électronique sont les éléments essentiels susceptibles de répondre à cet objectif. En effet, ces deux outils offrent beaucoup de moyens permettant de faciliter la tâche et de contribuer à résoudre une bonne part des problèmes.

Les recherches scientifiques et leurs conséquences techniques s'interpénètrent en une vaste exigence de la mesure de la conservation des résultats acquis et de leur interprétation.

Ce processus de développement de la mesure tendant à répondre aux besoins des hommes et concourant à l'amélioration de leur vie a connu une nouvelle ère avec les nombreuses possibilités que lui offrent l'électronique et l'informatique.

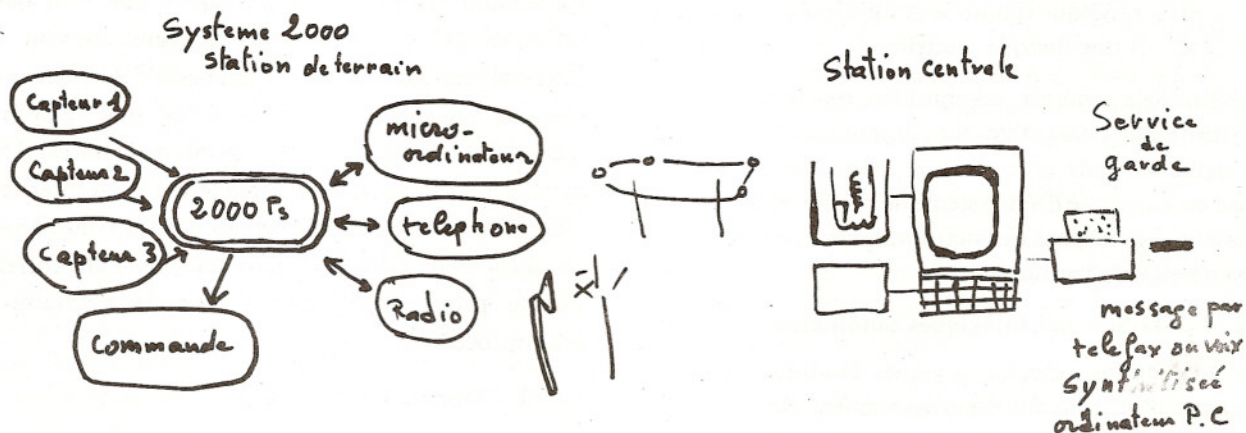
En agrométéorologie, par exemple, le recours à l'électronique et à l'informatique ne vient que de commencer, et les années futures promettent d'être d'un grand progrès pour cette science.

En effet, l'acquisition des mesures par microprocesseur, dont les nombreux avantages en font un outil puissant pour l'agronome, l'élaboration de logiciels bien adaptés à leur problématique - qu'il s'agisse de modèles prédictifs à partir de données expérimentales ou d'utiliser un modèle afin d'en extraire la conception d'un système opérationnel - ont fait l'objet de plusieurs applications dans le domaine de l'agrométéorologie.

II - L'ACQUISITION DES DONNEES

1 - Introduction

Il y'a quelques années, l'observateur a été l'élément essentiel de l'acquisition de mesures. Aujourd'hui, tout a changé et l'homme qui jadis notait la valeur d'une précipitation, d'un débit ou d'une température peut aisément être remplacé par un capteur et un système autonome d'acquisition de mesures, basé sur un microprocesseur.



Ceci offre l'avantage d'éliminer un travail répétitif et ingrat, et ainsi d'éviter beaucoup de sources d'erreurs. Plusieurs technologies possèdent leurs capteurs et un système d'acquisition répondant à leurs besoins.

Nous nous limiterons à une approche plus spécifique à l'agronomie et aux avantages que celle-ci offre et pourra encore offrir d'une application plus poussée de cette nouvelle technique.

2 - Technique de mesure

La mesure d'une caractéristique physique s'obtient de différentes manières, suivant le signal et sa facilité d'exploitation. Il est souvent nécessaire de substituer une mesure physique à une autre. Par exemple, dans le cas de mesure de la température, le phénomène thermique sera remplacé par un phénomène électrique (variation de la résistivité d'un conducteur ou phénomène thermo-générateur de couple).

3 - Les capteurs

Le capteur est le seul élément en contact avec la mesurande, c'est donc lui qui va traduire une grandeur physique en une grandeur généralement électrique.

Il existe deux types de capteur :

- **Les capteurs passifs** : la variation de la mesurande entraîne une modification de l'impédance du capteur. La saisie de cette modification se fera par l'intermédiaire de la mesure de tension ou de courant et demande donc le plus souvent une source d'énergie.
- **Les capteurs actifs** : l'action de la mesurande sur le capteur produit, par l'intermédiaire d'un effet physique (photoélectrique, piézoélectrique, etc ...) une énergie électrique.

En règle générale, on considère que le capteur est constitué par l'ensemble des composants fournissant un signal à l'unité d'acquisition. Ainsi, un capteur de débit est constitué d'un système de poulie et de flotteur agissant sur un potentiomètre, qui est le convertisseur mesure-signal électrique.

4 - Stations météorologiques automatisées

Les stations météorologiques automatisées sont équipées d'instruments d'enregistrement électroniques permettant une acquisition de données fréquentes et précises, avec un minimum de travail, les consommations en énergie sont faibles, assurant de longues périodes entre les services.

Pour ces stations, les capteurs usuellement branchés sur un système d'acquisition sont des capteurs de température, débit, vitesse du vent, direction du vent, hauteur d'eau. Le signal produit doit être mesuré et mémorisé ; c'est le rôle de l'unité d'acquisition. Notons que ce signal peut être de type analogique ou digital. Un signal digital impulsionnel peut être stocké tel quel, puisque c'est à chaque fois un signal unique, qui est envoyé vers l'unité d'acquisition le relais "reed" placé sur l'auget basculeur d'un pluviomètre, et produire à chaque basculement un signal unique qui incrémentera un compteur du microprocesseur. Le signal analogique (tension, courant) doit être discrétisé de manière à en stocker une valeur échantillonnée.

5 - L'unité d'acquisition de mesure

L'unité d'acquisition de mesures est basée autour d'un microprocesseur, ce dernier est une machine permettant d'ordonner le processus de calcul. Dans la plupart des cas, un microprocesseur unique est chargé de la gestion de l'ensemble des capteurs, il élabore les messages, assure le stockage sur le site et éventuellement les affichages pour la visualisation des données sur place. Une horloge interne permet de rythmer l'ensemble des opérations de mise en veilleuse de la station, de cycle de mesures et de dialogue.

6 - Stockage des données

Dans le cas où l'unité d'acquisition n'est pas raccordée directement à une mémoire de mesure, elle doit pouvoir enregistrer la période de mesure comprise entre deux passages de l'opérateur, pour ce faire, le système bénéficie d'une mémoire de volume déterminé. Cependant les processus physiques que l'on désire observer (T°, humidité, etc...) sont souvent des phénomènes continus, il est impossible de stocker des mesures en continu, cela ne ferait que remplir la mémoire d'une suite trop rapprochée de mesures. Il faut donc gérer les capteurs de manière à ne scruter leurs états qu'à des moments ponctuels. Cette gestion dépend du phénomène à observer, ainsi que possibilités offertes par le programme contenu dans la mémoire du microprocesseur.

7 - Transfert des données

Une fois les mesures enregistrés dans la mémoire de l'unité d'acquisition, celle-ci doivent être transférés dans une mémoire de masse, permettant la création d'une banque de données.

8 - Potentialités et applications

Potentiellement, l'agronomie offre de vastes domaines d'application pour ce genre d'équipements. Que ce soit en temps réel ou différé, un système d'acquisition de données conçu autour d'un microprocesseur présente actuellement suffisamment de fiabilité pour être placé dans des conditions de terrain difficiles.

L'acquisition en temps réel permet également une gestion précise des systèmes productifs. Cela s'étend de la gestion du niveau d'eau barrage, par application de modèles hydrologiques, avec mesure en temps réel des précipitations, à la distribution des quantités exactes d'eau d'irrigation.

L'acquisition en différé entre autre, la création de banque de données, facilement utilisables. A ce niveau, il faut noter l'utilité de cette banque de données pour toute étude scientifique visant à comprendre les phénomènes qui contribuent au développement de notre agriculture ou, au contraire portent préjudice à celle-ci.

III - APPLICATION : LOGICIEL DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (E.T.P).

Dans cette partie, nous abordons une des applications actuelles de ces systèmes d'acquisition à microprocesseur. L'application en question concerne l'acquisition des paramètres météorologiques : température, humidité relative, vitesse du vent, radiation globale, ..., via une station météorologique automatique et l'exploitation de ces mesures pour le calcul de l'ETP par différents modèles comme nous le verrons plus loin.

1 - Concepts de l'évapotranspiration potentielle.

L'évapotranspiration est le procédé par lequel l'eau est transférée de la plante et du sol à l'atmosphère. Elle englobe l'évaporation de l'eau des surfaces du sol et de la plante, aussi bien que la transpiration de l'eau à travers le tissu végétal.

Le concept de "l'évapotranspiration potentielle" est une tentative de caractérisation de l'environnement micrométéorologique d'un champ en termes de puissance évaporative ou demande (c'est à dire en terme d'un régime d'évaporation maximale pouvant être extrait par l'atmosphère à partir d'un champ ayant des propriétés de surfaces données).

Penman (1956) l'a définie d'une manière plus spécifique comme étant "la quantité d'eau transférée

par unité de temps par une végétation courte et verdoyante, recouvrant complètement le sol, de hauteur uniforme et qui ne manque jamais d'eau".

Les taux d'évapotranspiration sont directement liés aux conditions climatiques, édaphiques et de la plante.

Les radiations solaires, la température, le vent et l'humidité sont des facteurs climatiques premiers.

La couverture du sol, la physiologie et le métabolisme sont certainement des facteurs végétaux qui affectent également les taux d'évapotranspiration.

2 - Modèles basés sur l'équation du bilan énergétique.

Cette partie sera consacrée à la présentation sommaire des différents modèles de calcul de l'E.T.P, servant de base pour l'élaboration du logiciel, pour plus de renseignement sur le développement théorique de certains modèles j'invite le lecteur à consulter les ouvrages mentionnés en bibliographie ou bien le présent mémoire dont une grande partie est réservée au développement mathématique de la formule de Penman.

a - Equation de Penman modifiée par Doorenbos et Pruitt

L'équation de Penman, comme modifiée par Doorenbos et Pruitt (1977) dans le bulletin FAO 24 est la suivante :

$$ET_o = C [W \times R_n + (1 - W) \times f(u) \times (e_a - e_d)]$$

terme radiatif terme aérodynamique

où :

W : est un facteur de température qui tient compte des effets radiatifs sur ET_o à différentes altitudes

R_n : est la radiation solaire nette (mm/jour)

$f(u)$: est la fonction du vent (mm/jour)

$e_a - e_d$: est la différence entre la pression de vapeur à saturation à la température moyenne de l'air et pression de vapeur de l'air (e_d) en mb.

C : est le facteur d'ajustement pour l'effet jour/nuit.

b - Modèle radiatif de Hargreaves.

Hargreaves (1975) a développé une méthode empirique simple, utilisant seulement la température et la radiation pour estimer l'ETP, la formule radiatif de Hargreaves est la suivante :

$$ETP = 0,0075 \times R_s \times T_f$$

où :

R_s : est la radiation solaire incidente ou global en mm/j.

T_f : est la température moyenne en degré F.

c - Modèle de Turc

Turc (1961) a proposé une équation simplifiée pour l'évaluation de l'ETP, basée sur l'observation de la température de l'air et du rayonnement global pour une humidité relative plus grande que 50%.

$$ETP = K \frac{T}{T + 48} (Rs + 50)$$

où :

T : Température de l'air

Rs : Rayonnement solaire global (cal/cm².j)

K : 0,013 × n

n : nombre de jours

Si l'humidité relative de l'atmosphère durant la période est inférieure à 50 %, on multiplie alors l'ETP calculée ci-dessus par le facteur correctif suivant :

$$\left(1 + \frac{(50 - Hr)}{70}\right)$$

où :

Hr = L'humidité relative moyenne de l'air pendant la période considérée (en %)

d - Modèle de Jenson et Haise

Le modèle de Jenson et Haise (1963) s'exprime uniquement en fonction du rayonnement solaire à la surface et de la température moyenne de l'air :

$$ETP = Rs (0,025 T + 0,08)$$

où :

Rs : radiation solaire globale (mm/jour).

T : Température moyenne de l'air (en °c)

e - Modèle de température de Hargreave

Hargreave et Samani (1985) ont présenté un modèle estimant ETP qui demande seulement les données de températures maximales et minimales. L'équation est dérivée de l'équation radiative de Hargreaves et intègre empiriquement la radiation solaire extraterrestre, ainsi que la différence des températures maximales et minimales. L'équation est la suivante :

$$ETP = 0,0023 Ra \sqrt{T_{max} - T_{min}} [(T_{max} + T_{min})/2 + 17,8]$$

où :

Ra : radiation extraterrestre (mm) qui est une fonction de la latitude et de la période de l'année

Tmax : température maximale journalière (°c)

Tmin : température minimale journalière (°c)

3 - Logiciel de calcul de l'ETP

Ce logiciel a été conçu pour permettre de calculer la valeur de l'évapotranspiration potentielle journalière

pour un site donné. Plusieurs modèles de calcul sont offerts par le logiciel. Le choix d'un modèle donné se fait moyennant un dialogue entre l'opérateur et le logiciel qui, après un choix donné, va chercher les paramètres météorologiques nécessaires stockés soit sur disquette soit sur le disque dur du micro-ordinateur. Le calcul peut aussi se faire automatiquement si l'unité d'acquisition est branchée directement sur l'unité centrale (micro-ordinateur) via le standard Rs 232. Ce logiciel a été conçu pour la latitude de Louvain-la-Neuve en Belgique, mais il pourra facilement être adapté à d'autres sites moyennant de légères modifications. Ce logiciel permet, entre autre, de procéder à l'étude comparative des différents modèles décrits précédemment.

•- Organigramme de calcul

voir organigramme

4 - Comparaison des modèles à celui de Penman

a - Comparaison journalière

L'avantage de l'acquisition des mesures par microprocesseur nous permet de procéder à des comparaisons journalières détaillées. Dans notre cas, les mesures ont été prises toutes les 30 minutes, ce qui est équivalent à 48 mesures pour une journée.

Dans cette partie, nous allons aborder seulement les modèles de Turc et de Jensen et Haise, car les deux modèles de Hargreaves ne peuvent être traités sans des modifications préalables, qui consistent à prendre la température pour la période de mesure choisie, chose que nous ne voulons pas faire, car on va modifier le fondement du modèle dans une comparaison censée être rigoureuse.

• Modèle de Turc : voir fig. 1

Il est extrêmement important de rappeler que le modèle de Turc a été conçu au début pour des évaluations hebdomadaires de l'ETP. Dans ce travail, nous avons tenté de tester sa validité pour des évaluations journalières voire même momentanées (toutes les 30 minutes, par exemple). Le résultat que nous avons obtenu est très satisfaisant (voir figure suivante).

On constate que ce modèle colle très bien au modèle de référence, avec une légère sous-estimation qui ne cesse d'augmenter jusqu'à la fin de la journée. Remarquons qu'au début d'une journée, le modèle de Turc suit parfaitement celui de Penman sans déphasage ni différence, mais vers la fin une nette différence est enregistrée. Nous avons cherché l'origine de cette dif-

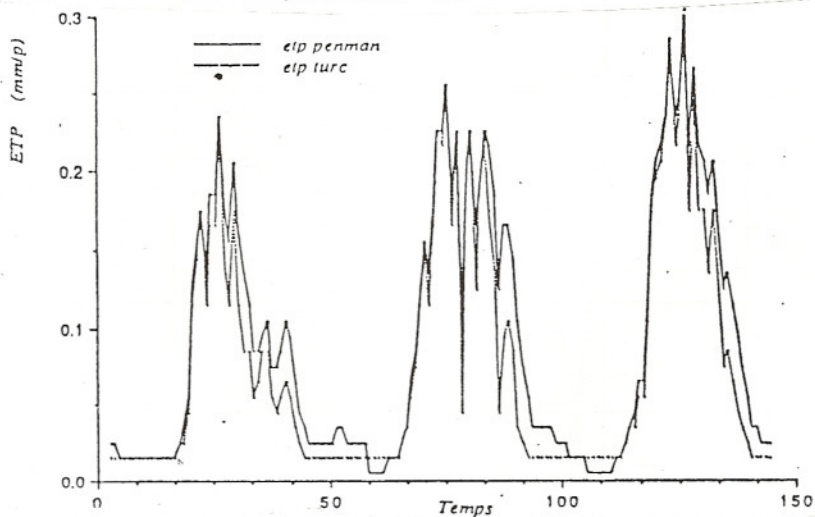
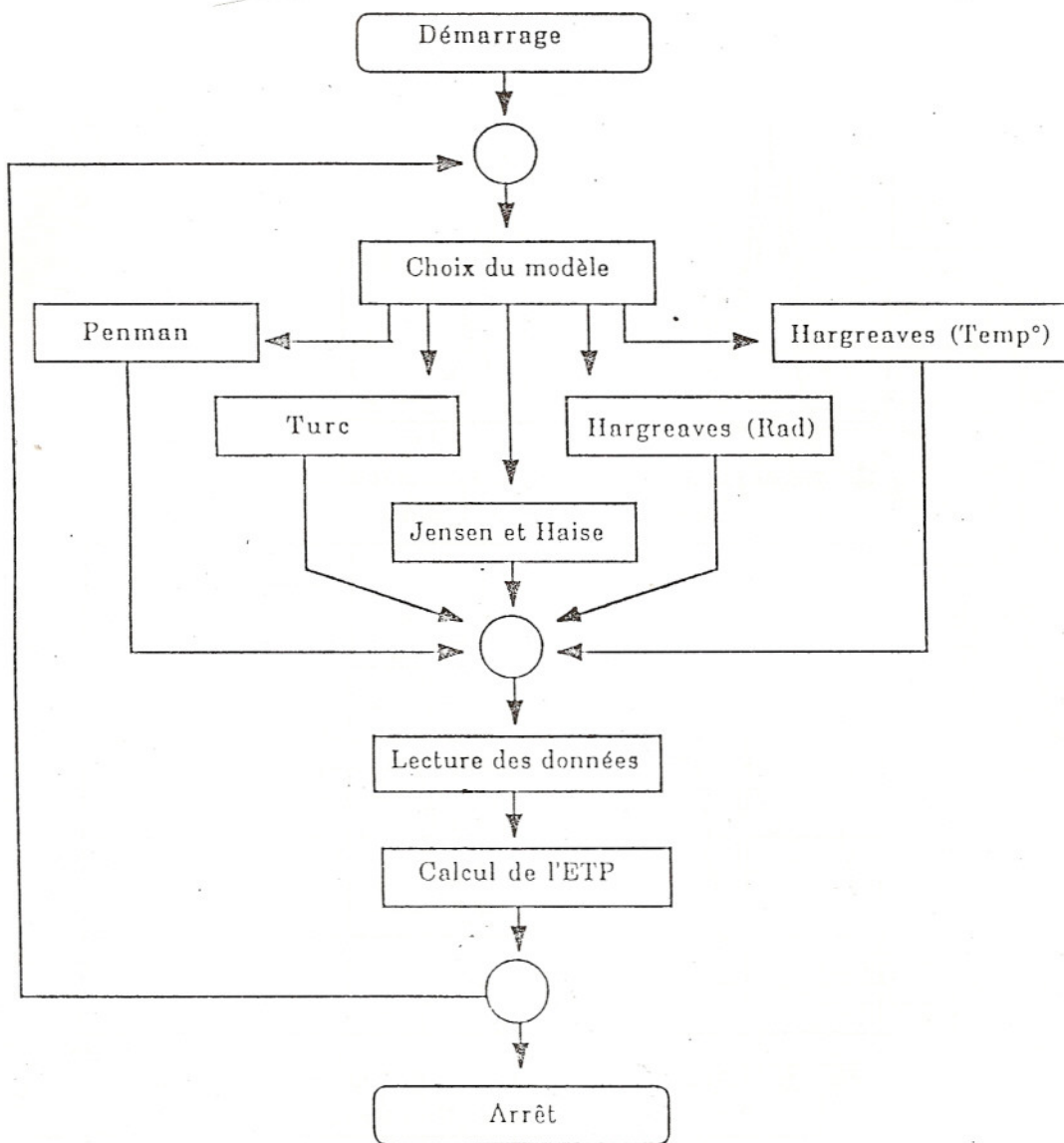


Fig. 1. Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Turc (pas de temps: 30 minutes)

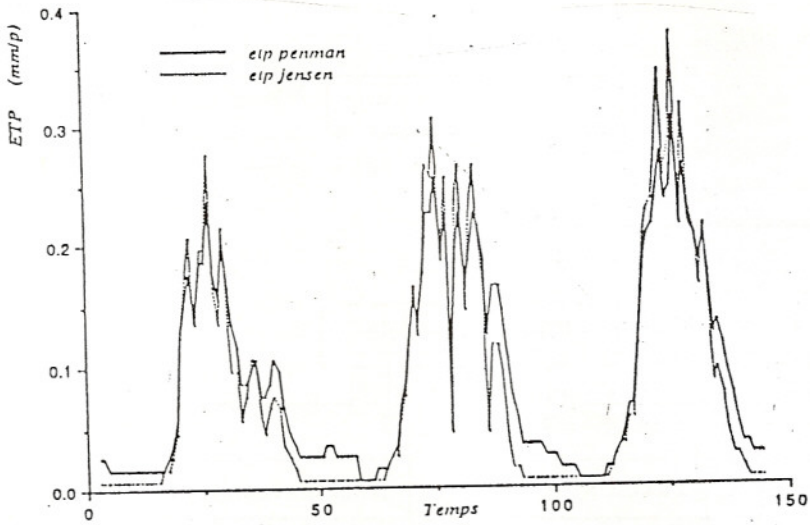


Fig. 2 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Jensen et Haise (pas de temps: 30 minutes)

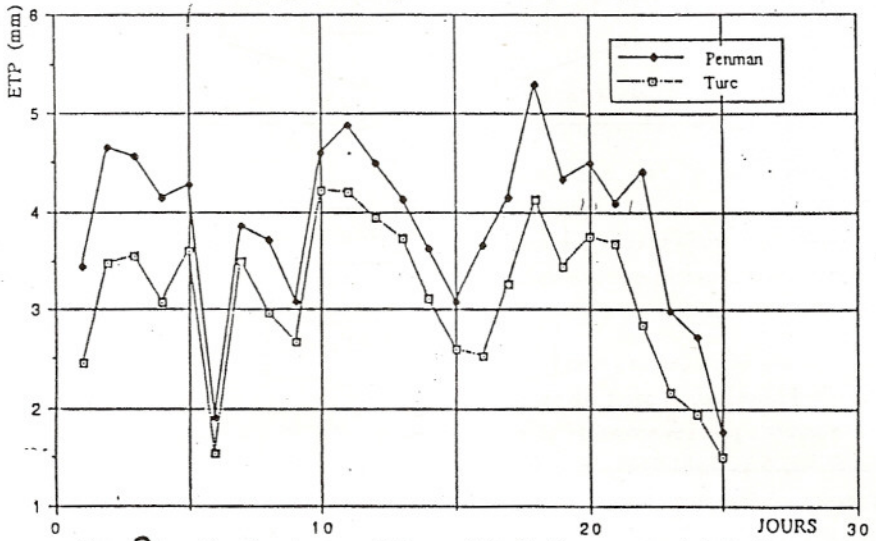


Fig. 3 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Turc (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88)

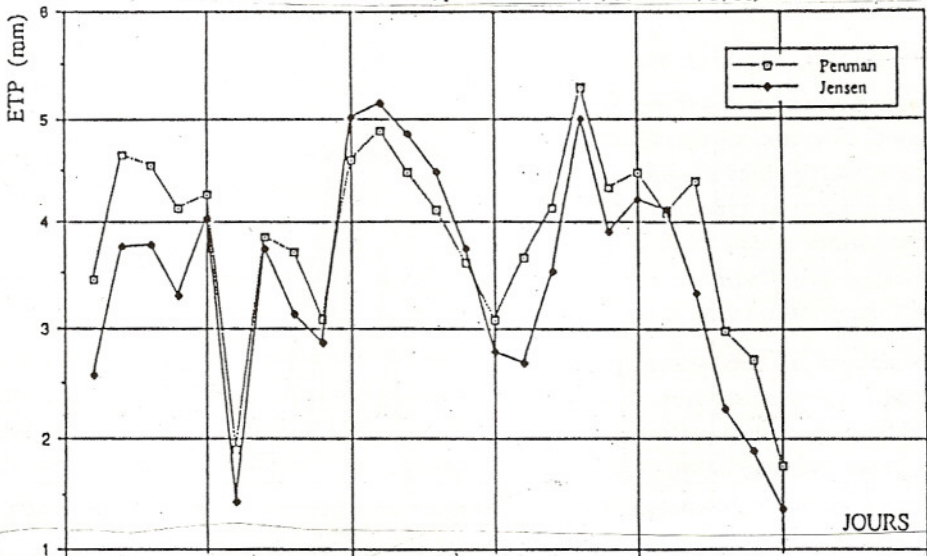


Fig. 4 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Jensen et Haise (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88).

c) Modèle radiatif de Hargreaves:

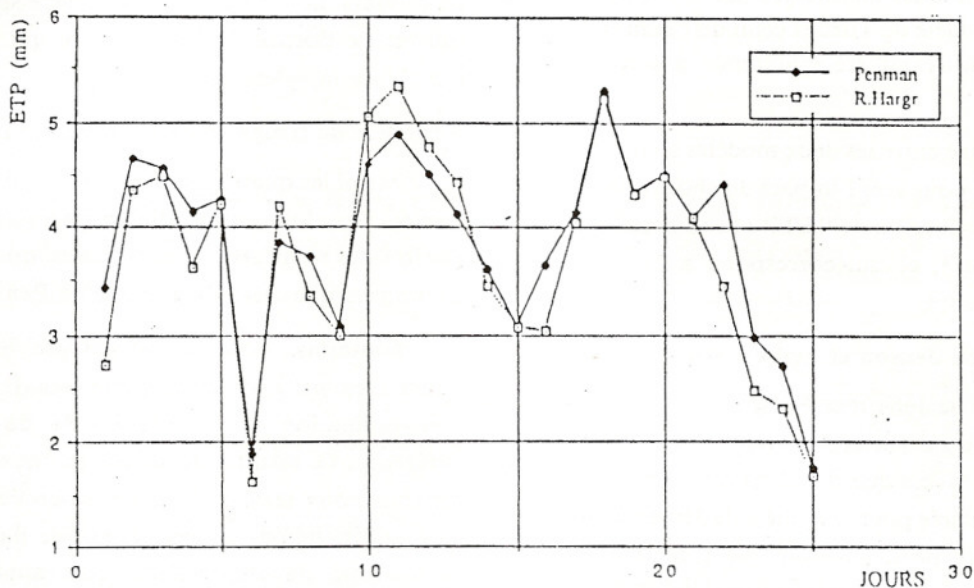


Fig. 5 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui radiatif de Hargreaves (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88)

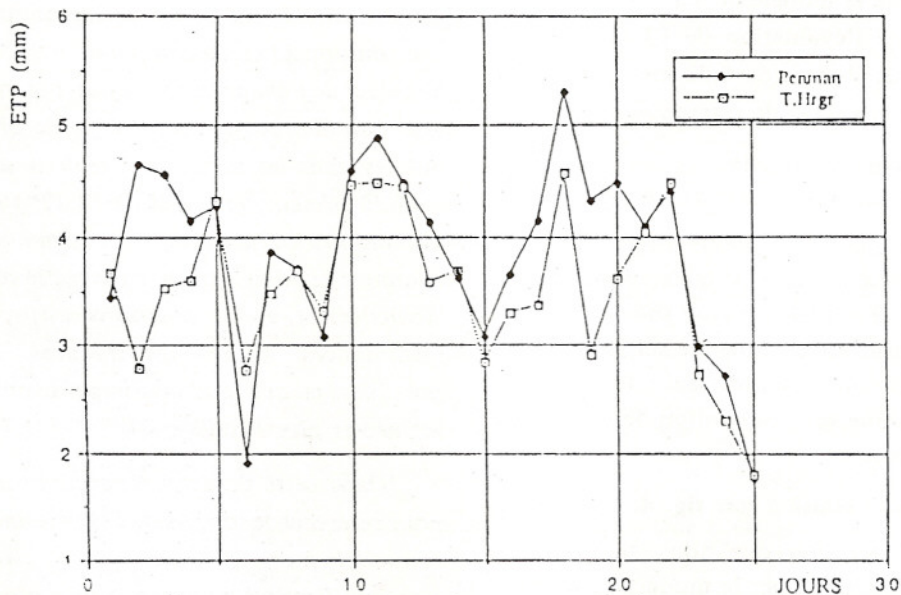


Fig. 6 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de température de Hargreaves (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88).

férence, seule une chute de la radiation solaire globale a été maintenue. Rappelons que le modèle de Turc tient compte de la température et de la radiation solaire globale. Ceci a été mis en évidence sur le graphique de la deuxième journée.

En effet, à la moitié de celle-ci, une chute de la radiation globale s'est manifestée par une différence nette entre le modèle de Turc et celui de Penman, bien que la température ait été maintenue à son niveau normal.

La différence entre les deux modèles a été intégrée sur une journée pour voir l'impact du choix du modèle de Turc sur l'évaluation de l'ETP : la sous-estimation est de 0,73 mm/j, ce qui correspond à 21 % de la valeur de référence.

• **Modèle de Jensen et Haise : voir fig. 2**

Le modèle de Jensen et Haise tient compte de la radiation solaire globale et de la température. D'après le graphique il s'avère que ce qui est dit pour le modèle de Turc reste valable pour le modèle de Jensen et Haise, à une différence près, à savoir que : des radiations hautes induisent une surestimation de l'ETP par rapport toujours au modèle de Penman, alors que des radiations basses donnent lieu à une sous-estimation de l'ETP. Les deux variations ont été intégrées sur une journée. Il ressort que le modèle de Jensen et Haise, lui aussi, sous-estime l'évaluation de l'ETP. Cette sous-estimation est de l'ordre de 0,52 mm/j, ce qui représente 16 % de la valeur de référence.

b - Comparaison mensuelle

• **Modèle de Turc : voir fig. 3**

La conclusion que nous avons tirée pour la comparaison journalière reste valable pour celle mensuelle. En effet, le modèle de Turc sous-estime la valeur de l'ETP. La différence intégrée sur la période de 25 jours donne comme résultat final : 18,38 mm, ce qui correspond à une sous-estimation de 19 % de la valeur de référence.

• **Modèle de Jensen et Haise : voir fig. 4**

Ici aussi, la conclusion que nous avons tirée auparavant reste valable. Donc, le modèle surestime l'ETP pour des radiations élevées et le sous-estime dans le cas contraire. La variation, dans les deux sens, intégrée sur la période des 25 jours, donne lieu à une légère sous-estimation de l'ordre de 9,27 mm, ce qui représente 9 % de la valeur de référence.

• **Modèle radiatif de Hargreaves : voir fig. 5**

Le modèle radiatif de Hargreaves suit la même allure que le modèle précédent (Jensen et Haise). Donc, la valeur de l'ETP est sous-estimée pour une radiation basse. Par contre, elle est surestimée pour le cas inverse. La variation, dans les deux sens, intégrée sur la période de 25 jours, donne lieu à une très légère sous-estimation qui est de l'ordre de 3,43 mm, ce qui correspond à 3,5 % de la valeur de référence.

• **Modèle de température de Hargreaves : voir fig. 6**

Parmi les quatre modèles, seul ce dernier s'écarte parfois trop loin du modèle de référence, avec même parfois des résultats contradictoires, qui vont dans un autre sens que celui du modèle de Penman.

Toutefois, nous avons intégré les différences constatées sur la période des 25 jours. Il en résulte une sous-estimation qui est de 8,7 % de la valeur de référence. Ce résultat ne justifie pas que ce modèle est valable pour le site de Louvain-la-Neuve. Il serait prudent de ne pas classer ce modèle parmi les autres et surtout de déconseiller son application pour Louvain-la-Neuve, voire même pour la Belgique caractérisée par un climat humide et tempéré.

V - CONCLUSION

Le travail, objet de ce mémoire constitue une contribution à l'étude comparative de certains modèles de calcul de l'évapotranspiration potentielle. D'autres sujets similaires ont fait l'objet de plusieurs articles publiés dans les différentes régions du globe, mais, jusqu'à présent, le calcul de l'ETP s'est limité à des estimations journalières, voire même hebdomadaires, comme c'était souvent le cas avec le modèle de Turc. Actuellement, avec le microprocesseur, des estimations instantanées, toutes les minutes, sont devenues possibles, ce qui rend la comparaison beaucoup plus affinée et plus détaillée.

Dans cette étude comparative, nous avons pris pour référence le modèle de Penman modifié. En effet, ce modèle a une base physique et, par conséquent, a une signification intrinsèque plus grande.

Deux types de comparaison ont été établis : une comparaison à l'échelle du jour et l'autre à l'échelle du mois. Les conclusions des deux comparaisons se rejoignent. En effet, les différents modèles, décrits

auparavant, sous-estiment sévèrement l'ETP. Le classement des modèles, du point de vue sous-estimation par rapport au modèle de Penman, pris comme référence, est le suivant :

- 1 - Modèle radiatif de Hargreaves avec 3,5 %
- 2 - Modèle de Jensen et Haise avec 9 %
- 3 - Modèle de Turc avec 19 %

Il est important de signaler que cette classification est uniquement valable pour Louvain-la-Neuve, car les modèles qui donnent de bons résultats dans les zones côtières n'ont pas nécessairement bien fonctionné dans les zones continentales semi-arides.

BIBLIOGRAPHIE

- BERGER A (1981) "cours de météorologie et physique de l'atmosphère" Institut d'Astronomie et de Géophysique, UCL
- BRUNEAU J. LOUIS(1984), "Etude comparative entre valeurs calculées et mesurées de l'évapotranspiration" - Mémoire, UCL
- DANIEL HILLEL (1984), "L'eau et le sol, principes et processus physiques" Editions Cabay, Louvain-la-Neuve.
- DECLERCQ M. "Cours d'électronique", UCL
- DUBOIS R. (1980), "Comprendre les microprocesseurs et leurs circuits associés" - Editions du PSL, Langy/marne, 126 p.
- E. PERSOONS, "Complément au cours d'hydrologie agricole - calcul des besoins en eau des plantes", - Unité de Génie Rural, UCL, 52 p.
- EDITIONS BORTLAND, "Le livre du turbo-Pascal" Version 4
- GEZA STRAMMER (1987), "Microprocesseurs et agrométéorologie" - Mémoire UCL, 134 p.
- GILMORE G.M. (1982), "Introduction aux microprocesseurs" - Editions Mc Graw Hill, Paris, 340 p.
- LAUBET VINCENT (1988), "Cartographie des facteurs de l'environnement : L'insolation" - Mémoire UCL, 95 p.
- LEROY SALAZAR GEORGE H.HARGREAVES, R. KERN STUTLER, "Manuel d'administration de l'irrigation" the International Irrigation Center, Utah State University
- MATHER JOHN R. and RUSSEL A. AMBRE ZIAK
"A search for understanding potential evapotranspiration"
The Geographic Review, Vol 76, octobre 86
- PENMAN H.L. (1949), "The dependence of transpiration on weather and soil conditions" - Edin Sci, 74-89
- PENMAN H.L., "Vegetation and Hydrology" - Collesion Technical Communication, Commonwealth - Bureau of soils
- PENMAN H.L. (1948) "Natural evaporation from water, bare soil and grass" - Proc. Roy Landon A 193
- PERSOONS E., ROUMIEUX S.(1987), - "Systèmes d'acquisition de mesures de terrain à microprocesseur longue autonomie"
- Unité de Génie rural, UCL
- PIETMONT MAURICE, "Mesure numériques, principes pratiques, réalisations" - Editions Radio
- RODANY ZAKS ET PIERRE LE BEUX, - "Les microprocesseurs (techniques et applications)" - Editions Sybex-Euro
- ROUMIEUX S. (1986), "Mesure et calcul de flux d'évapotranspiration par microprocesseur in situ" - Mémoire 193p.
- SCHAYES G. "Cours d'agrométéorologie", UCL
- SCHAYES J., GOLOT (1976), - "Evapotranspiration réelle-mesure aérologiques" - Institut d'Astronomie et de Géophysique,
5 p.
- TILMAN E., "Evapotranspiration potentielle-calcul selon la méthode de Penman" - Unité de Génie Rural, UCL, 6p.

Pratiques culturales et lessivage d'azote

Par

BERRAHA Mohamed

Ingénieur G.R. ORMVAD - El Jadida

Depuis plusieurs années, la pollution des nappes phréatiques par les nitrates préoccupe de nombreux responsables européens et stimule des recherches visant à la prévenir efficacement. En 1989, plusieurs communes en France ont été privées temporairement d'eau potable suite à la contamination de leurs sources par des produits chimiques. Au Maroc, même si actuellement ce problème ne se pose pas avec autant d'acuité, la contamination chronique de nos nappes finira un jour par nous poser les mêmes problèmes si d'ici-là des mesures préventives ne sont pas prises en temps opportun.

L'Etude ci-après, réalisée en France à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts-Paris, dans le cadre d'un thème pratique d'environnement, montre comment certaines pratiques culturales peuvent rapprocher les intérêts du dépollueur et ceux des agriculteurs.

LA POLLUTION DES NAPPES PAR LES NITRATES

L'intensification de l'agriculture, l'encouragement à l'utilisation des engrais et la pratique irrationnelle de la fertilisation azotée - la seule qui nous intéresse dans ce sujet - sont à l'origine d'une pollution progressive des nappes phréatiques par les résidus azotés. Cependant, l'agriculture n'est pas la seule à mettre en cause, les eaux usées et industrielles, même si celles-ci agissent de manières ponctuelles, peuvent induire des pollutions beaucoup plus dangereuses.

1 - Constat de qualité :

Normalement, une eau souterraine qui n'est exposée à aucun facteur polluant ne contient que quelques mg de NO_3 , par litre (pollution naturelle due à l'azote atmosphérique drainé par les pluies). Mais cette teneur est plus élevée dans les aquifères dont le bassin d'alimentation est occupé par une agriculture intensive, par l'urbanisation ou par des équipements industriels et routiers.

Bien que l'on parle toujours de nitrates, ce sont en fait les nitrites (NO_2) qui en résultent qui sont les plus à craindre. Le passage des nitrates aux nitrites se

fait, le plus souvent, au niveau du tube digestif (par réduction microbienne) lorsque le pH est basique. Ce sont les nourrissons et les adultes ayant une hyperacidité stomacale qui sont les plus sensibles. Ainsi, l'ingestion d'une eau contenant plus de 40 à 50 mg/l de nitrates entraîne la réduction de ces derniers en nitrites au niveau de l'estomac et du duodénum avant qu'il ne soient passés dans la circulation sanguine pour être éliminés par voie rénale. L'apparition dans l'organisme de substances oxydantes comme les nitrites entraîne la transformation partielle de l'hémoglobine en méthémoglobine incapable de fixer l'oxygène par liaison réversible.



La cyanose devient perceptible dès que le taux de méthémoglobine dans le sang dépasse 10% (chez un sujet normal, le rapport méthémoglobine/hémoglobine est de 0,8% chez l'adulte, 1,5% chez le nouveau-né) ; au-delà de 20% commencent à apparaître des signes cliniques (polypnée, asthénie...).

De plus, on a récemment découvert l'effet cancérigène des nitrosamines, substances résultant de la transformation des nitrites et d'amines secondaires après incubation avec le suc gastrique.

Quels sont les effets sur la faune et la flore ?

Alors que les nitrates sont stimulants pour les algues et les plantes aquatiques, d'ailleurs la prolifération de celles-ci est indicateur de pollution, les nitrites sont toxiques pour les poissons comme pour l'homme. Une forte teneur en nitrates dans les cours d'eau entraîne une surabondance relative de certaines espèces végétales et une modification du comportement chez les espèces animales : migration, diminution de la reproduction, apparition de certaines maladies, etc.

En 1978, le Conseil d'Environnement de la Commission des Communautés Européennes a établi des réglementations concernant les concentrations des

différents dérivés azotés dans l'eau de boisson :

	Niveau guide	Concentrat. max admise
Nitrates (mg/l)	25,0	50,0
Nitrites (mg/l)	-	0,1

2 - Responsabilité de l'agriculture :

Lorsqu'on parle de pollution des nappes par les nitrates, il vient tout de suite à l'esprit le "rôle majeur" de l'agriculture, et notamment des engrais. Or le problème n'est pas aussi simple qu'on l'imagine : d'autres facteurs participent à des pollutions ponctuelles dont les effets sont catastrophiques là où ils agissent (points d'eau, rivières, lacs, etc.) :

- Les eaux usées urbaines : l'azote est dans ce cas sous forme d'urée et d'acide urique essentiellement. Elles contribuent tout particulièrement à la pollution des eaux de surface.
- Les eaux résiduaires industrielles : la quantité et la qualité des produits azotés rejetés par ces eaux varient d'une industrie à l'autre. Les rejets les plus importants viennent essentiellement des industries d'engrais, de produits chimiques et de l'agro-alimentaire. Mais en fait, ce type d'eau est surtout dangereux à cause de la pollution par les métaux lourds et les produits soufrés qu'il véhicule.

L'agriculture n'est donc pas la seule responsable de la pollution des nappes par les nitrates, mais son impact reste potentiellement très important. Quant à la pollution due aux cultures, si elle n'est pas à l'origine de la plupart des problèmes locaux très vivants, elle n'en reste pas moins quantitativement la plus forte.

3 - Actions menées vis-à-vis de la pollution d'origine agricole :

En France, la réglementation en vue de protéger les captages servant à l'alimentation humaine existe déjà. En effet, l'article L.20 du code de la santé prévoit l'instauration de trois périmètres de protection autour de ces captages :

- Un premier périmètre de protection immédiate (100 m²) qui est systématiquement clôturé.
- Un deuxième périmètre de protection dont la surface varie en fonction de la géologie et dans lequel l'utilisation de fertilisants ou de traitements chimiques est interdite.
- Un troisième périmètre de protection éloigné où certaines activités humaines sont très réglementées.

PRATIQUES CULTURALES ET LESSIVAGE D'AZOTE

1 - Rappel des principales caractéristiques du cycle de l'azote :

Les principales origines de l'azote-nitrate dans le sol se résument ainsi :

- engrais nitriques,
- apports atmosphériques,
- minéralisation de la matière organique.

Cette matière organique peut-être sous différentes formes : l'humus, les résidus de cultures, les micro-organismes, etc. L'humus contient la plus grande partie de l'azote du sol et, contrairement à la matière organique libre, est très stable. Les résidus végétaux, eux, se décomposent plus ou moins rapidement selon les cas : il faut distinguer les résidus à C/N (rapport Carbone sur Azote du sol) faible qui libèrent plus d'azote que n'en consomment les microorganismes qui les décomposent, des résidus à C/N fort (supérieur à 20-25, cas des pailles) dont la décomposition nécessite une fixation de l'azote minéral du milieu.

Les principaux facteurs de la minéralisation du sol sont ceux agissant sur les microorganismes responsables de l'ammonification et la nitratisation (aération, température) et ceux ayant un effet sur la stabilité de la matière organique (texture du sol, teneur en calcaire...). Ainsi, par exemple, la période estivale est une période d'intense minéralisation, contrairement à la période hivernale où elle est pratiquement inexistante.

A l'inverse, les principales "voies de sortie" de l'azote-nitrate sont :

- la réorganisation, phénomène inverse de la minéralisation,
- le ruissellement dans les eaux superficielles.
- le lessivage dans les eaux souterraines.

C'est ce dernier point qui nous intéresse particulièrement. Ce phénomène est dû au fait que l'azote, sous forme de nitrate, migre très facilement dans le sol grâce à certains mécanismes (convection, diffusion, entraînement direct, etc.). On considère que l'azote est potentiellement lessivable à partir du moment où il sort de la zone de développement racinaire. Cela dépend en particulier de la profondeur du sol, de sa structure et de la nature de la culture. Il va de soi que les pratiques culturales ayant un effet sur la quantité d'azote lessivée sont d'une part celles qui agissent sur la quantité de nitrates disponible et d'autres part celles qui agissent sur la quantité d'eau drainée. Il est utile pour la suite de bien noter ces deux aspects.

Influence des techniques culturales :

Une technique culturale donnée agit sur la quantité d'azote potentiellement lessivable par :

- sa consommation en azote,
- ses restitutions,
- La réorganisation d'azote qu'elle induit, probablement par des exsudats de son système racinaire,
- L'effet mécanique que le développement des racines a sur le sol.

La répartition de ces phénomènes dans l'année, notamment par rapport aux périodes de drainage ou de minéralisation intensive, est importante. On distingue principalement deux sortes de grande culture : celle d'hiver et celle de printemps. Le cas des cultures dérobées sera traité à part.

a - Les cultures d'hiver et de printemps :

Les cultures dites d'hiver, semées à l'automne, assurent un couvert végétal hivernal capable d'une part de consommer une partie des nitrates potentiellement lessivables (présents dans le sol après la minéralisation estivale) et d'autre part d'induire la réorganisation d'une autre partie de ces nitrates. Par exemple, un blé d'hiver semé suffisamment tôt consomme 30 à 35 kg d'azote entre le semis et le stade A.

Contrairement au groupe précédent, les cultures de printemps sont encore en pleine croissance en été au moment de la minéralisation estivale ; elles consomment donc une partie de l'azote libéré et diminuent ainsi la quantité d'azote potentiellement lessivable au cours de l'hiver suivant.

b - Les cultures dérobées :

On appelle culture dérobée une culture à cycle de végétation très court, pouvant être insérée dans la rotation avant ou après la culture, il s'agit essentiellement des engrais verts, c'est à dire des cultures implantées le plus vite possible après la récolte et enfouies avant implantation de la culture suivante. On les utilise en général après une céréale à paille et avant une tête d'assolement de printemps ; on en trouve aussi quelques fois entre deux céréales à paille.

L'engrais vert a deux rôles principaux :

- augmentation de la teneur en matière organique du sol et donc amélioration de sa stabilité au printemps. Cet effet se fait sentir à moyen terme, plus rapidement mais de façon moins durable que le fumier. Ce rôle est particulièrement important

dans les sols à faible stabilité structurale dans lesquels les accidents de végétation sont fréquents,

- utilisation de l'azote libéré par la minéralisation estivale et donc diminution des risques de lessivage. Cet azote fixé à l'automne peut être ensuite partiellement libéré après l'enfouissement et permettre ainsi une économie d'engrais.

c - La fertilisation azotée :

• **Fertilisation minérale** : Depuis plusieurs années, une méthode de rationalisation de la fertilisation azotée a été mise au point. Elle repose sur deux principes fondamentaux :

- Le principe des bilans : il faut apporter au sol ce dont la plante a besoin pour se développer de façon optimale, compte tenu des reliquats d'azote issus de la culture précédente.
- Le fractionnement des apports : Afin de limiter les pertes par réorganisation et par lessivage, il faut répartir les apports dans le temps en fonction des besoins de la plante.

• **Fertilisation organique** : Dans le cas présent des grandes cultures. La fertilisation se réduit à l'enfouissement des résidus de la culture ou de l'engrais vert. Ce dernier ayant été traité, nous nous limiterons ici à l'enfouissement de résidus de culture. Ceux-ci peuvent être de deux types :

- Ceux qui favorisent une immobilisation d'azote. Il s'agit des résidus à teneur en C/N élevée, c'est à dire essentiellement des pailles. Certains auteurs estiment que lorsque les pailles sont enfouies, une dizaine de kilos d'azote environ serait réorganisé. L'effet varie cependant avec de nombreux facteurs, en particulier l'époque d'enfouissement avant la période de drainage. De plus, l'azote est fixé partiellement sous forme de matière organique labile. A moyen terme, il s'agit donc là d'azote minéralisable.

Il faut noter qu'au niveau des agriculteurs, le choix entre l'enfouissement et le brûlage des pailles dépend des priorités de chacun : ceux qui mettent le plus de matière organique au premier plan ne brûlent pas systématiquement leurs pailles, tandis que ceux qui ont des rotations basées sur des successions répétées de céréales à paille, préfèrent les brûler (sauf après tête d'assolement) afin de limiter les risques de maladies.

- Ceux qui favorisent une minéralisation d'azote, dans le cas qui nous intéresse, il s'agit essentiellement des verts de betterave. La minéralisation de ces résidus augmente le pool d'azote-nitrate et donc le risque d'azote potentiellement lessivable. Le risque est donc élevé, cependant dans une région de grande culture sans élevage on peut difficilement envisager d'autres solutions, possible d'utiliser des défoliants comme cela est fait à d'autres fins sur les verts de pomme de terre.

CONCLUSION

Les agriculteurs, après avoir refusé de reconnaître la part de responsabilité qu'ils avaient dans la pollution des nappes par les nitrates, sont maintenant conscients qu'ils doivent se sentir concernés par ce problème. Cependant, du fait des multiples contraintes qui pèsent sur leurs exploitations, la marge de manœuvre qu'ils ont pour modifier leurs systèmes de culture est très faible. Ainsi c'est souvent parce qu'ils ont d'autres

priorités, d'ordre économique, de calendrier de travail... qu'ils n'utilisent pas les techniques culturales pourtant reconnues comme limitant le lessivage d'azote. Pourtant dans certains cas les intérêts des agriculteurs et des personnes préoccupées de qualité des eaux convergent sur de nombreux points. On peut donc espérer que, lorsque la recherche mettra à la disposition du développement agricole des données plus précises et plus généralisables que ce qui existe actuellement ; des conseils précis, tenant compte des conditions locales, pourront être donnés aux agriculteurs afin que leurs pratiques culturales affectent le moins possible la qualité des eaux souterraines.

"Prévenir vaut mieux que guérir" : Seule une réflexion qui va dans le sens de la prévention pourra mettre à l'abri une eau dont les générations futures auront fort besoin dans un pays comme le MAROC où l'eau est presque toujours un facteur limitant.

CONSULTATION - PLANIFICATION - RÉALISATION DE PROJETS DE DÉVELOPPEMENT AGRICOLE ET RURAL

Nos activités englobent :

organisation et financement des exploitations agricoles

développement rural intégré

production végétale

production animale

amélioration du sol
(fertilisation et irrigation)

conditionnement et transformation des produits agricoles;
stockage



Nous offrons une équipe hautement qualifiée et dotée d'une grande expérience à l'étranger pour des travaux conceptionnels et pratiques. Nous avons exécutés et planifiés nombreux projets agricoles en Afrique.



INSTRUPA Consulting GmbH, Tannenwaldallee 49, D-6380 Bad Homburg v.d.H. - Tél. : (06172) 3 50 41 - Télex : 415116 inco d

Station météorologique assistée par ordinateur

Application : Logiciel de calcul de l'évapotranspiration potentielle

Résumé du mémoire de fin d'étude présenté par Mr ACHIQ bdellah
en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome (Option Génie-Rural)
Université catholique de Louvain - (Septembre 1989)

I - INTRODUCTION

Le développement de la société moderne suscite une connaissance de plus en plus des phénomènes de la nature, une application adéquate des lois scientifiques et une pénétration plus accrue de la technique dans le quotidien. A l'heure actuelle, il nous semble que l'informatique et l'électronique sont les éléments essentiels susceptibles de répondre à cet objectif. En effet, ces deux outils offrent beaucoup de moyens permettant de faciliter la tâche et de contribuer à résoudre une bonne part des problèmes.

Les recherches scientifiques et leurs conséquences techniques s'interpénètrent en une vaste exigence de la mesure de la conservation des résultats acquis et de leur interprétation.

Ce processus de développement de la mesure tendant à répondre aux besoins des hommes et concourant à l'amélioration de leur vie a connu une nouvelle ère avec les nombreuses possibilités que lui offrent l'électronique et l'informatique.

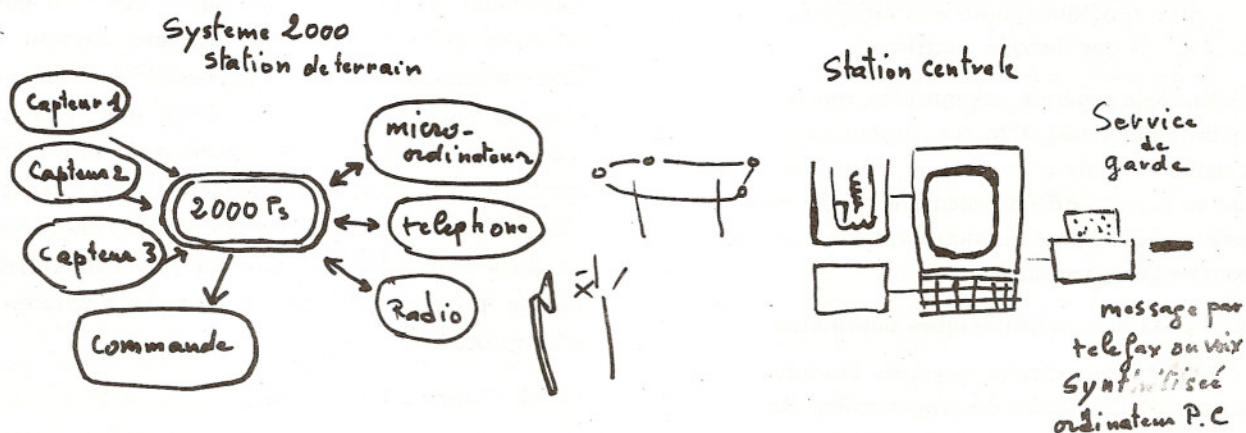
En agrométéorologie, par exemple, le recours à l'électronique et à l'informatique ne vient que de commencer, et les années futures promettent d'être d'un grand progrès pour cette science.

En effet, l'acquisition des mesures par microprocesseur, dont les nombreux avantages en font un outil puissant pour l'agronome, l'élaboration de logiciels bien adaptés à leur problématique - qu'il s'agisse de modèles prédictifs à partir de données expérimentales ou d'utiliser un modèle afin d'en extraire la conception d'un système opérationnel - ont fait l'objet de plusieurs applications dans le domaine de l'agrométéorologie.

II - L'ACQUISITION DES DONNEES

1 - Introduction

Il y'a quelques années, l'observateur a été l'élément essentiel de l'acquisition de mesures. Aujourd'hui, tout a changé et l'homme qui jadis notait la valeur d'une précipitation, d'un débit ou d'une température peut aisément être remplacé par un capteur et un système autonome d'acquisition de mesures, basé sur un microprocesseur.



Ceci offre l'avantage d'éliminer un travail répétitif et ingrat, et ainsi d'éviter beaucoup de sources d'erreurs. Plusieurs technologies possèdent leurs capteurs et un système d'acquisition répondant à leurs besoins.

Nous nous limiterons à une approche plus spécifique à l'agronomie et aux avantages que celle-ci offre et pourra encore offrir d'une application plus poussée de cette nouvelle technique.

2 - Technique de mesure

La mesure d'une caractéristique physique s'obtient de différentes manières, suivant le signal et sa facilité d'exploitation. Il est souvent nécessaire de substituer une mesure physique à une autre. Par exemple, dans le cas de mesure de la température, le phénomène thermique sera remplacé par un phénomène électrique (variation de la résistivité d'un conducteur ou phénomène thermo-générateur de couple).

3 - Les capteurs

Le capteur est le seul élément en contact avec la mesurande, c'est donc lui qui va traduire une grandeur physique en une grandeur généralement électrique.

Il existe deux types de capteur :

- **Les capteurs passifs** : la variation de la mesurande entraîne une modification de l'impédance du capteur. La saisie de cette modification se fera par l'intermédiaire de la mesure de tension ou de courant et demande donc le plus souvent une source d'énergie.
- **Les capteurs actifs** : l'action de la mesurande sur le capteur produit, par l'intermédiaire d'un effet physique (photoélectrique, piézoélectrique, etc ...) une énergie électrique.

En règle générale, on considère que le capteur est constitué par l'ensemble des composants fournissant un signal à l'unité d'acquisition. Ainsi, un capteur de débit est constitué d'un système de poulie et de flotteur agissant sur un potentiomètre, qui est le convertisseur mesure-signal électrique.

4 - Stations météorologiques automatisées

Les stations météorologiques automatisées sont équipées d'instruments d'enregistrement électroniques permettant une acquisition de données fréquentes et précises, avec un minimum de travail, les consommations en énergie sont faibles, assurant de longues périodes entre les services.

Pour ces stations, les capteurs usuellement branchés sur un système d'acquisition sont des capteurs de température, débit, vitesse du vent, direction du vent, hauteur d'eau. Le signal produit doit être mesuré et mémorisé ; c'est le rôle de l'unité d'acquisition. Notons que ce signal peut être de type analogique ou digital. Un signal digital impulsionnel peut être stocké tel quel, puisque c'est à chaque fois un signal unique, qui est envoyé vers l'unité d'acquisition le relais "reed" placé sur l'auget basculeur d'un pluviomètre, et produire à chaque basculement un signal unique qui incrémentera un compteur du microprocesseur. Le signal analogique (tension, courant) doit être discrétisé de manière à en stocker une valeur échantillonnée.

5 - L'unité d'acquisition de mesure

L'unité d'acquisition de mesures est basée autour d'un microprocesseur, ce dernier est une machine permettant d'ordonner le processus de calcul. Dans la plupart des cas, un microprocesseur unique est chargé de la gestion de l'ensemble des capteurs, il élabore les messages, assure le stockage sur le site et éventuellement les affichages pour la visualisation des données sur place. Une horloge interne permet de rythmer l'ensemble des opérations de mise en veilleuse de la station, de cycle de mesures et de dialogue.

6 - Stockage des données

Dans le cas où l'unité d'acquisition n'est pas raccordée directement à une mémoire de mesure, elle doit pouvoir enregistrer la période de mesure comprise entre deux passages de l'opérateur, pour ce faire, le système bénéficie d'une mémoire de volume déterminé. Cependant les processus physiques que l'on désire observer (T° , humidité, etc...) sont souvent des phénomènes continus, il est impossible de stocker des mesures en continu, cela ne ferait que remplir la mémoire d'une suite trop rapprochée de mesures. Il faut donc gérer les capteurs de manière à ne scruter leurs états qu'à des moments ponctuels. Cette gestion dépend du phénomène à observer, ainsi que possibilités offertes par le programme contenu dans la mémoire du microprocesseur.

7 - Transfert des données

Une fois les mesures enregistrés dans la mémoire de l'unité d'acquisition, celle-ci doivent être transférés dans une mémoire de masse, permettant la création d'une banque de données.

8 - Potentialités et applications

Potentiellement, l'agronomie offre de vastes domaines d'application pour ce genre d'équipements. Que ce soit en temps réel ou différé, un système d'acquisition de données conçu autour d'un microprocesseur présente actuellement suffisamment de fiabilité pour être placé dans des conditions de terrain difficiles.

L'acquisition en temps réel permet également une gestion précise des systèmes productifs. Cela s'étend de la gestion du niveau d'eau barrage, par application de modèles hydrologiques, avec mesure en temps réel des précipitations, à la distribution des quantités exactes d'eau d'irrigation.

L'acquisition en différé entre autre, la création de banque de données, facilement utilisables. A ce niveau, il faut noter l'utilité de cette banque de données pour toute étude scientifique visant à comprendre les phénomènes qui contribuent au développement de notre agriculture ou, au contraire portent préjudice à celle-ci.

III - APPLICATION : LOGICIEL DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (E.T.P).

Dans cette partie, nous abordons une des applications actuelles de ces systèmes d'acquisition à microprocesseur. L'application en question concerne l'acquisition des paramètres météorologiques : température, humidité relative, vitesse du vent, radiation globale, ..., via une station météorologique automatique et l'exploitation de ces mesures pour le calcul de l'ETP par différents modèles comme nous le verrons plus loin.

1 - Concepts de l'évapotranspiration potentielle.

L'évapotranspiration est le procédé par lequel l'eau est transférée de la plante et du sol à l'atmosphère. Elle englobe l'évaporation de l'eau des surfaces du sol et de la plante, aussi bien que la transpiration de l'eau à travers le tissu végétal.

Le concept de "l'évapotranspiration potentielle" est une tentative de caractérisation de l'environnement micrométéorologique d'un champ en termes de puissance évaporative ou demande (c'est à dire en terme d'un régime d'évaporation maximale pouvant être extrait par l'atmosphère à partir d'un champ ayant des propriétés de surfaces données).

Penman (1956) l'a définie d'une manière plus spécifique comme étant "la quantité d'eau transférée

par unité de temps par une végétation courte et verdoyante, recouvrant complètement le sol, de hauteur uniforme et qui ne manque jamais d'eau".

Les taux d'évapotranspiration sont directement liés aux conditions climatiques, édaphiques et de la plante.

Les radiations solaires, la température, le vent et l'humidité sont des facteurs climatiques premiers.

La couverture du sol, la physiologie et le métabolisme sont certainement des facteurs végétaux qui affectent également les taux d'évapotranspiration.

2 - Modèles basés sur l'équation du bilan énergétique.

Cette partie sera consacrée à la présentation sommaire des différents modèles de calcul de l'E.T.P, servant de base pour l'élaboration du logiciel, pour plus de renseignement sur le développement théorique de certains modèles j'invite le lecteur à consulter les ouvrages mentionnés en bibliographie ou bien le présent mémoire dont une grande partie est réservée au développement mathématique de la formule de Penman.

a - Equation de Penman modifiée par Doorenbos et Pruitt

L'équation de Penman, comme modifiée par Doorenbos et Pruitt (1977) dans le bulletin FAO 24 est la suivante :

$$ET_o = C [W \times R_n + (1 - W) \times f(u) \times (e_a - e_d)]$$

terme radiatif terme aérodynamique

où :

W : est un facteur de température qui tient compte des effets radiatifs sur ET_o à différentes altitudes

R_n : est la radiation solaire nette (mm/jour)

$f(u)$: est la fonction du vent (mm/jour)

$e_a - e_d$: est la différence entre la pression de vapeur à saturation à la température moyenne de l'air et pression de vapeur de l'air (e_d) en mb.

C : est le facteur d'ajustement pour l'effet jour/nuit.

b - Modèle radiatif de Hargreaves.

Hargreaves (1975) a développé une méthode empirique simple, utilisant seulement la température et la radiation pour estimer l'ETP, la formule radiatif de Hargreaves est la suivante :

$$ETP = 0,0075 \times R_s \times T_f$$

où :

R_s : est la radiation solaire incidente ou global en mm/j.

T_f : est la température moyenne en degré F.

c - Modèle de Turc

Turc (1961) a proposé une équation simplifiée pour l'évaluation de l'ETP, basée sur l'observation de la température de l'air et du rayonnement global pour une humidité relative plus grande que 50%.

$$ETP = K \frac{T}{T + 45} (Rs + 50)$$

où :

T : Température de l'air

Rs : Rayonnement solaire global (cal/cm².j)

K : 0,013 × n

n : nombre de jours

Si l'humidité relative de l'atmosphère durant la période est inférieure à 50 %, on multiplie alors l'ETP calculée ci-dessus par le facteur correctif suivant :

$$\left(1 + \frac{(50 - Hr)}{70}\right)$$

où :

Hr = L'humidité relative moyenne de l'air pendant la période considérée (en %)

d - Modèle de Jenson et Haise

Le modèle de Jenson et Haise (1963) s'exprime uniquement en fonction du rayonnement solaire à la surface et de la température moyenne de l'air :

$$ETP = Rs (0,025 T + 0,08)$$

où :

Rs : radiation solaire globale (mm/jour).

T : Température moyenne de l'air (en °c)

e - Modèle de température de Hargreave

Hargreave et Samani (1985) ont présenté un modèle estimant ETP qui demande seulement les données de températures maximales et minimales. L'équation est dérivée de l'équation radiative de Hargreaves et intègre empiriquement la radiation solaire extraterrestre, ainsi que la différence des températures maximales et minimales. L'équation est la suivante :

$$ETP = 0,0023 Ra \sqrt{T_{max} - T_{min}} [(T_{max} + T_{min})/2 + 17,8]$$

où :

Ra : radiation extraterrestre (mm) qui est une fonction de la latitude et de la période de l'année

Tmax : température maximale journalière (°c)

Tmin : température minimale journalière (°c)

3 - Logiciel de calcul de l'ETP

Ce logiciel a été conçu pour permettre de calculer la valeur de l'évapotranspiration potentielle journalière

pour un site donné. Plusieurs modèles de calcul sont offerts par le logiciel. Le choix d'un modèle donné se fait moyennant un dialogue entre l'opérateur et le logiciel qui, après un choix donné, va chercher les paramètres météorologiques nécessaires stockés soit sur disquette soit sur le disque dur du micro-ordinateur. Le calcul peut aussi se faire automatiquement si l'unité d'acquisition est branchée directement sur l'unité centrale (micro-ordinateur) via le standard Rs 232. Ce logiciel a été conçu pour la latitude de Louvain-la-Neuve en Belgique, mais il pourra facilement être adapté à d'autres sites moyennant de légères modifications. Ce logiciel permet, entre autre, de procéder à l'étude comparative des différents modèles décrits précédemment.

•- Organigramme de calcul

voir organigramme

4 - Comparaison des modèles à celui de Penman

a - Comparaison journalière

L'avantage de l'acquisition des mesures par microprocesseur nous permet de procéder à des comparaisons journalières détaillées. Dans notre cas, les mesures ont été prises toutes les 30 minutes, ce qui est équivalent à 48 mesures pour une journée.

Dans cette partie, nous allons aborder seulement les modèles de Turc et de Jensen et Haise, car les deux modèles de Hargreaves ne peuvent être traités sans des modifications préalables, qui consistent à prendre la température pour la période de mesure choisie, chose que nous ne voulons pas faire, car on va modifier le fondement du modèle dans une comparaison censée être rigoureuse.

• Modèle de Turc : voir fig. 1

Il est extrêmement important de rappeler que le modèle de Turc a été conçu au début pour des évaluations hebdomadaires de l'ETP. Dans ce travail, nous avons tenté de tester sa validité pour des évaluations journalières voire même momentanées (toutes les 30 minutes, par exemple). Le résultat que nous avons obtenu est très satisfaisant (voir figure suivante).

On constate que ce modèle colle très bien au modèle de référence, avec une légère sous-estimation qui ne cesse d'augmenter jusqu'à la fin de la journée. Remarquons qu'au début d'une journée, le modèle de Turc suit parfaitement celui de Penman sans déphasage ni différence, mais vers la fin une nette différence est enregistrée. Nous avons cherché l'origine de cette dif-

Organigramme de calcul.

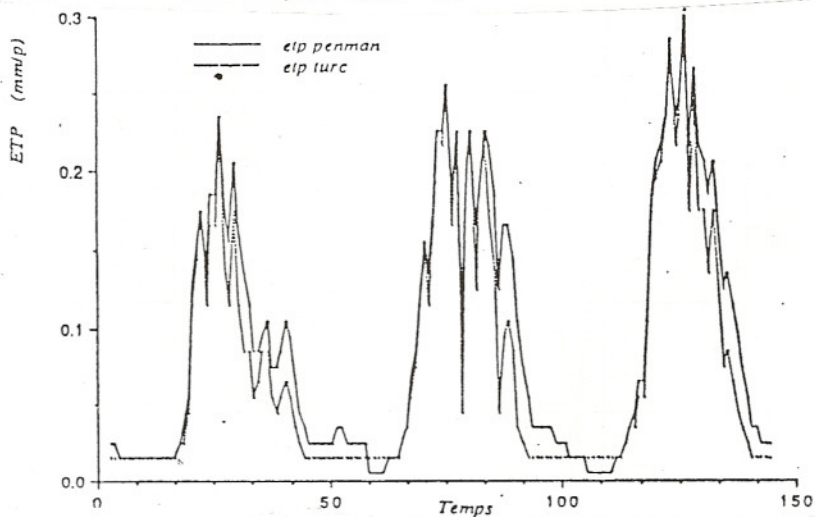
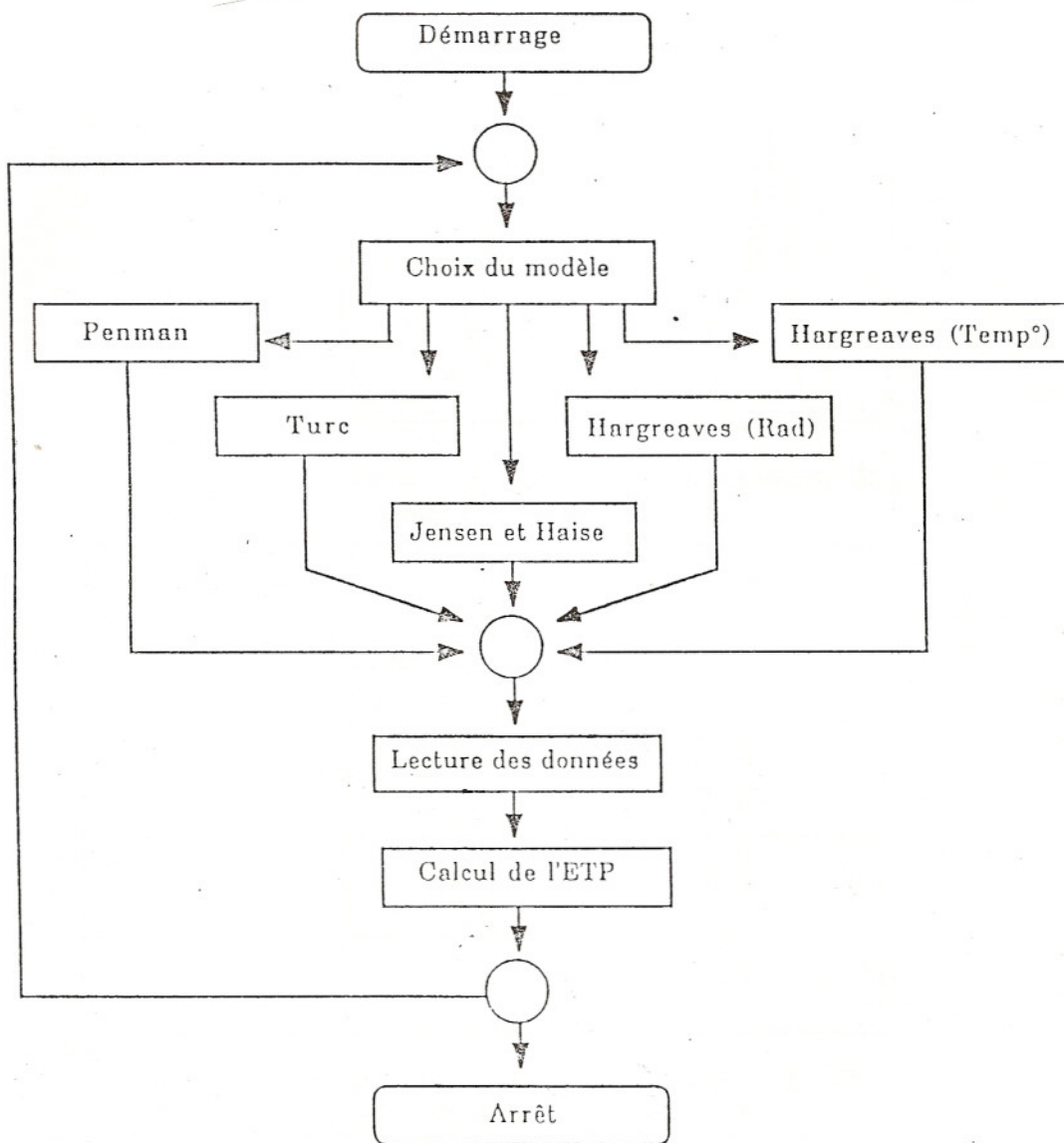


Fig. 1. Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Turc (pas de temps: 30 minutes)

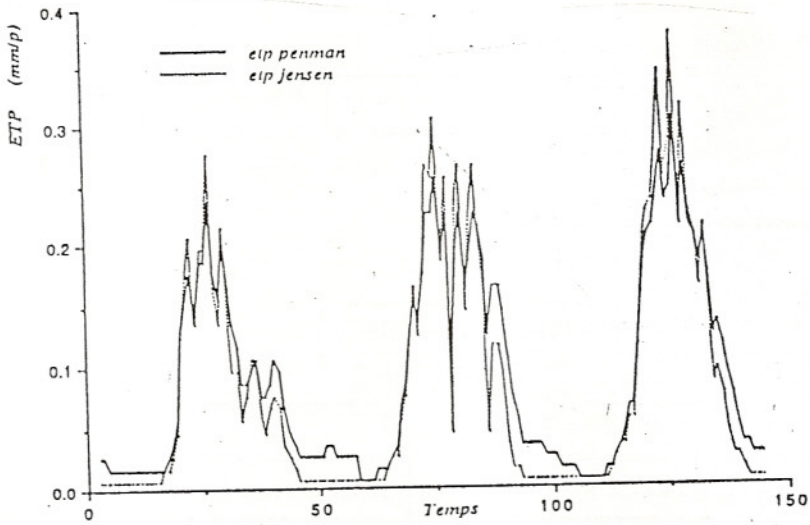


Fig. 2 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Jensen et Haise (pas de temps: 30 minutes)

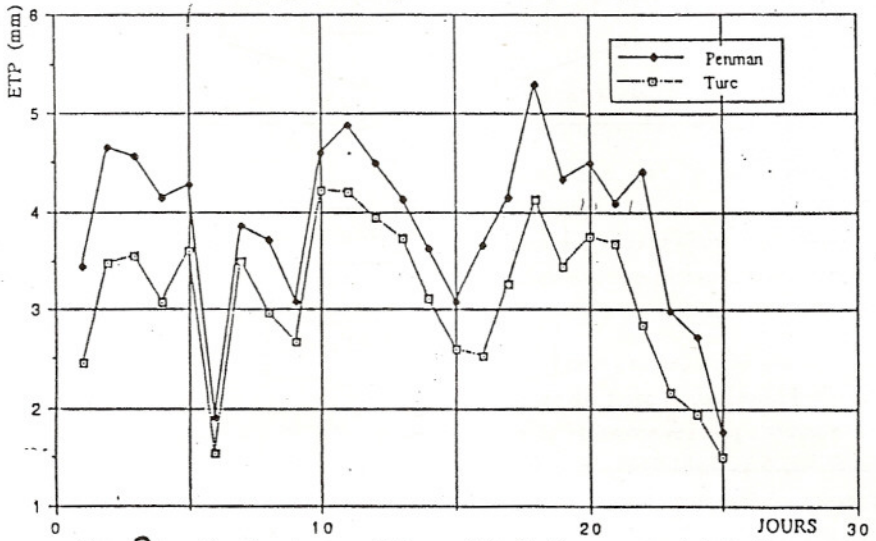


Fig. 3 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Turc (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88)

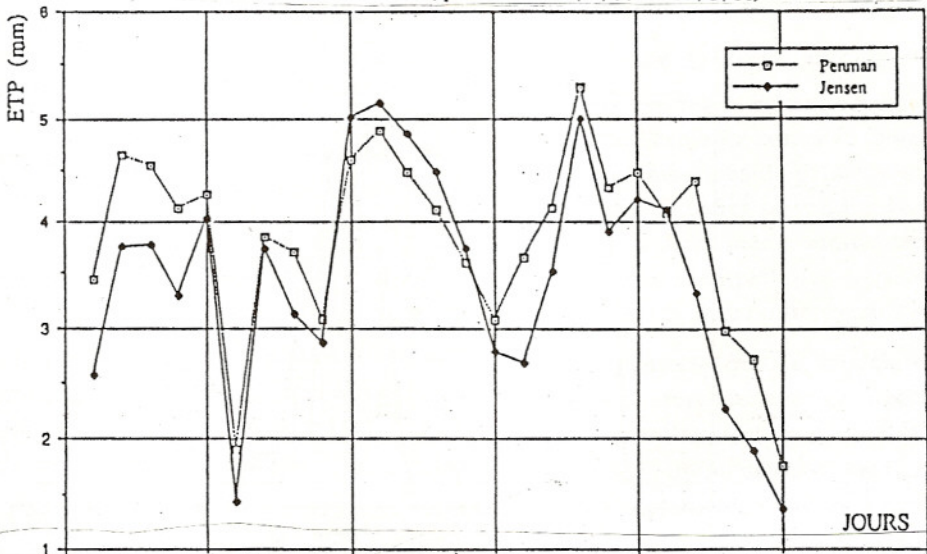


Fig. 4 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de Jensen et Haise (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88).

c) Modèle radiatif de Hargreaves:

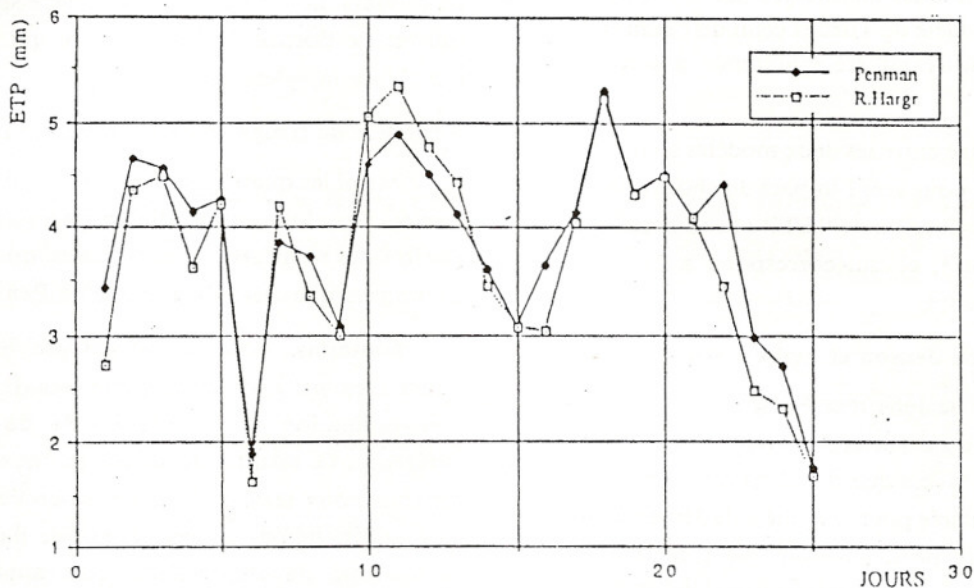


Fig. 5 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui radiatif de Hargreaves (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88)

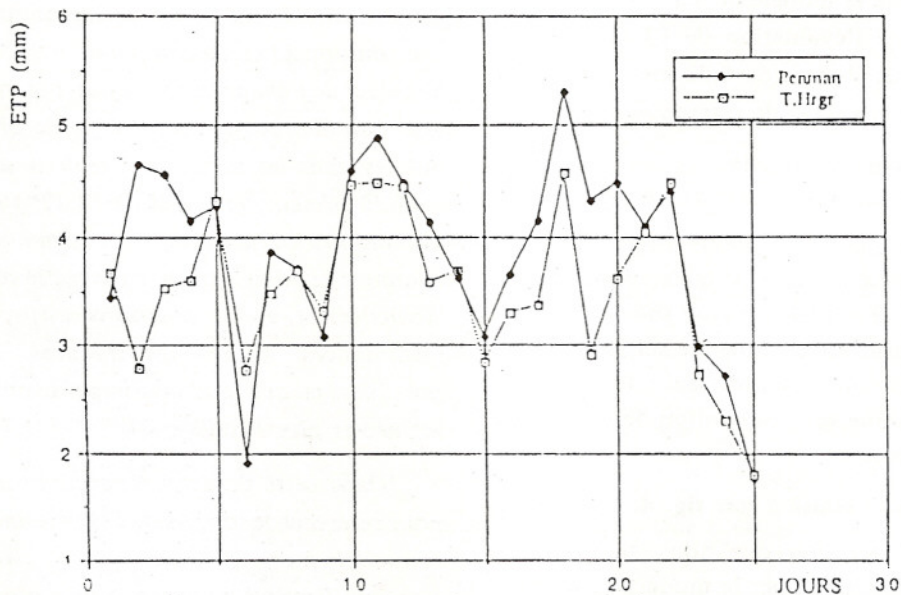


Fig. 6 : Graphe comparatif du modèle de Penman et celui de température de Hargreaves (Louvain-la-Neuve, période du 27/7/88 au 20/8/88).

férence, seule une chute de la radiation solaire globale a été maintenue. Rappelons que le modèle de Turc tient compte de la température et de la radiation solaire globale. Ceci a été mis en évidence sur le graphique de la deuxième journée.

En effet, à la moitié de celle-ci, une chute de la radiation globale s'est manifestée par une différence nette entre le modèle de Turc et celui de Penman, bien que la température ait été maintenue à son niveau normal.

La différence entre les deux modèles a été intégrée sur une journée pour voir l'impact du choix du modèle de Turc sur l'évaluation de l'ETP : la sous-estimation est de 0,73 mm/j, ce qui correspond à 21 % de la valeur de référence.

• **Modèle de Jensen et Haise : voir fig. 2**

Le modèle de Jensen et Haise tient compte de la radiation solaire globale et de la température. D'après le graphique il s'avère que ce qui est dit pour le modèle de Turc reste valable pour le modèle de Jensen et Haise, à une différence près, à savoir que : des radiations hautes induisent une surestimation de l'ETP par rapport toujours au modèle de Penman, alors que des radiations basses donnent lieu à une sous-estimation de l'ETP. Les deux variations ont été intégrées sur une journée. Il ressort que le modèle de Jensen et Haise, lui aussi, sous-estime l'évaluation de l'ETP. Cette sous-estimation est de l'ordre de 0,52 mm/j, ce qui représente 16 % de la valeur de référence.

b - Comparaison mensuelle

• **Modèle de Turc : voir fig. 3**

La conclusion que nous avons tirée pour la comparaison journalière reste valable pour celle mensuelle. En effet, le modèle de Turc sous-estime la valeur de l'ETP. La différence intégrée sur la période de 25 jours donne comme résultat final : 18,38 mm, ce qui correspond à une sous-estimation de 19 % de la valeur de référence.

• **Modèle de Jensen et Haise : voir fig. 4**

Ici aussi, la conclusion que nous avons tirée auparavant reste valable. Donc, le modèle surestime l'ETP pour des radiations élevées et le sous-estime dans le cas contraire. La variation, dans les deux sens, intégrée sur la période des 25 jours, donne lieu à une légère sous-estimation de l'ordre de 9,27 mm, ce qui représente 9 % de la valeur de référence.

• **Modèle radiatif de Hargreaves : voir fig. 5**

Le modèle radiatif de Hargreaves suit la même allure que le modèle précédent (Jensen et Haise). Donc, la valeur de l'ETP est sous-estimée pour une radiation basse. Par contre, elle est surestimée pour le cas inverse. La variation, dans les deux sens, intégrée sur la période de 25 jours, donne lieu à une très légère sous-estimation qui est de l'ordre de 3,43 mm, ce qui correspond à 3,5 % de la valeur de référence.

• **Modèle de température de Hargreaves : voir fig. 6**

Parmi les quatre modèles, seul ce dernier s'écarte parfois trop loin du modèle de référence, avec même parfois des résultats contradictoires, qui vont dans un autre sens que celui du modèle de Penman.

Toutefois, nous avons intégré les différences constatées sur la période des 25 jours. Il en résulte une sous-estimation qui est de 8,7 % de la valeur de référence. Ce résultat ne justifie pas que ce modèle est valable pour le site de Louvain-la-Neuve. Il serait prudent de ne pas classer ce modèle parmi les autres et surtout de déconseiller son application pour Louvain-la-Neuve, voire même pour la Belgique caractérisée par un climat humide et tempéré.

V - CONCLUSION

Le travail, objet de ce mémoire constitue une contribution à l'étude comparative de certains modèles de calcul de l'évapotranspiration potentielle. D'autres sujets similaires ont fait l'objet de plusieurs articles publiés dans les différentes régions du globe, mais, jusqu'à présent, le calcul de l'ETP s'est limité à des estimations journalières, voire même hebdomadaires, comme c'était souvent le cas avec le modèle de Turc. Actuellement, avec le microprocesseur, des estimations instantanées, toutes les minutes, sont devenues possibles, ce qui rend la comparaison beaucoup plus affinée et plus détaillée.

Dans cette étude comparative, nous avons pris pour référence le modèle de Penman modifié. En effet, ce modèle a une base physique et, par conséquent, a une signification intrinsèque plus grande.

Deux types de comparaison ont été établis : une comparaison à l'échelle du jour et l'autre à l'échelle du mois. Les conclusions des deux comparaisons se rejoignent. En effet, les différents modèles, décrits

auparavant, sous-estiment sévèrement l'ETP. Le classement des modèles, du point de vue sous-estimation par rapport au modèle de Penman, pris comme référence, est le suivant :

- 1 - Modèle radiatif de Hargreaves avec 3,5 %
- 2 - Modèle de Jensen et Haise avec 9 %
- 3 - Modèle de Turc avec 19 %

Il est important de signaler que cette classification est uniquement valable pour Louvain-la-Neuve, car les modèles qui donnent de bons résultats dans les zones côtières n'ont pas nécessairement bien fonctionné dans les zones continentales semi-arides.

BIBLIOGRAPHIE

- BERGER A (1981) "cours de météorologie et physique de l'atmosphère" Institut d'Astronomie et de Géophysique, UCL
- BRUNEAU J. LOUIS(1984), "Etude comparative entre valeurs calculées et mesurées de l'évapotranspiration" - Mémoire, UCL
- DANIEL HILLEL (1984), "L'eau et le sol, principes et processus physiques" Editions Cabay, Louvain-la-Neuve.
- DECLERCQ M. "Cours d'électronique", UCL
- DUBOIS R. (1980), "Comprendre les microprocesseurs et leurs circuits associés" - Editions du PSL, Langy/marne, 126 p.
- E. PERSOONS, "Complément au cours d'hydrologie agricole - calcul des besoins en eau des plantes", - Unité de Génie Rural, UCL, 52 p.
- EDITIONS BORTLAND, "Le livre du turbo-Pascal" Version 4
- GEZA STRAMMER (1987), "Microprocesseurs et agrométéorologie" - Mémoire UCL, 134 p.
- GILMORE G.M. (1982), "Introduction aux microprocesseurs" - Editions Mc Graw Hill, Paris, 340 p.
- LAUBET VINCENT (1988), "Cartographie des facteurs de l'environnement : L'insolation" - Mémoire UCL, 95 p.
- LEROY SALAZAR GEORGE H.HARGREAVES, R. KERN STUTLER, "Manuel d'administration de l'irrigation" the International Irrigation Center, Utah State University
- MATHER JOHN R. and RUSSEL A. AMBRE ZIAK
"A search for understanding potential evapotranspiration"
The Geographic Review, Vol 76, octobre 86
- PENMAN H.L. (1949), "The dependence of transpiration on weather and soil conditions" - Edin Sci, 74-89
- PENMAN H.L., "Vegetation and Hydrology" - Collesion Technical Communication, Commonwealth - Bureau of soils
- PENMAN H.L. (1948) "Natural evaporation from water, bare soil and grass" - Proc. Roy Landon A 193
- PERSOONS E., ROUMIEUX S.(1987), - "Systèmes d'acquisition de mesures de terrain à microprocesseur longue autonomie"
- Unité de Génie rural, UCL
- PIETMONT MAURICE, "Mesure numériques, principes pratiques, réalisations" - Editions Radio
- RODANY ZAKS ET PIERRE LE BEUX, - "Les microprocesseurs (techniques et applications)" - Editions Sybex-Euro
- ROUMIEUX S. (1986), "Mesure et calcul de flux d'évapotranspiration par microprocesseur in situ" - Mémoire UCL, 193p.
- SCHAYES G. "Cours d'agrométéorologie", UCL
- SCHAYES J., GOLOT (1976), - "Evapotranspiration réelle-mesure aérologiques" - Institut d'Astronomie et de Géophysique,
5 p.
- TILMAN E., "Evapotranspiration potentielle-calcul selon la méthode de Penman" - Unité de Génie Rural, UCL, 6p.

Pratiques culturales et lessivage d'azote

Par

BERRAHA Mohamed

Ingénieur G.R. ORMVAD - El Jadida

Depuis plusieurs années, la pollution des nappes phréatiques par les nitrates préoccupe de nombreux responsables européens et stimule des recherches visant à la prévenir efficacement. En 1989, plusieurs communes en France ont été privées temporairement d'eau potable suite à la contamination de leurs sources par des produits chimiques. Au Maroc, même si actuellement ce problème ne se pose pas avec autant d'acuité, la contamination chronique de nos nappes finira un jour par nous poser les mêmes problèmes si d'ici-là des mesures préventives ne sont pas prises en temps opportun.

L'Etude ci-après, réalisée en France à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts-Paris, dans le cadre d'un thème pratique d'environnement, montre comment certaines pratiques culturales peuvent rapprocher les intérêts du dépollueur et ceux des agriculteurs.

LA POLLUTION DES NAPPES PAR LES NITRATES

L'intensification de l'agriculture, l'encouragement à l'utilisation des engrais et la pratique irrationnelle de la fertilisation azotée - la seule qui nous intéresse dans ce sujet - sont à l'origine d'une pollution progressive des nappes phréatiques par les résidus azotés. Cependant, l'agriculture n'est pas la seule à mettre en cause, les eaux usées et industrielles, même si celles-ci agissent de manières ponctuelles, peuvent induire des pollutions beaucoup plus dangereuses.

1 - Constat de qualité :

Normalement, une eau souterraine qui n'est exposée à aucun facteur polluant ne contient que quelques mg de NO_3 , par litre (pollution naturelle due à l'azote atmosphérique drainé par les pluies). Mais cette teneur est plus élevée dans les aquifères dont le bassin d'alimentation est occupé par une agriculture intensive, par l'urbanisation ou par des équipements industriels et routiers.

Bien que l'on parle toujours de nitrates, ce sont en fait les nitrites (NO_2) qui en résultent qui sont les plus à craindre. Le passage des nitrates aux nitrites se

fait, le plus souvent, au niveau du tube digestif (par réduction microbienne) lorsque le pH est basique. Ce sont les nourrissons et les adultes ayant une hyperacidité stomacale qui sont les plus sensibles. Ainsi, l'ingestion d'une eau contenant plus de 40 à 50 mg/l de nitrates entraîne la réduction de ces derniers en nitrites au niveau de l'estomac et du duodénum avant qu'il ne soient passés dans la circulation sanguine pour être éliminés par voie rénale. L'apparition dans l'organisme de substances oxydantes comme les nitrites entraîne la transformation partielle de l'hémoglobine en méthémoglobine incapable de fixer l'oxygène par liaison réversible.



La cyanose devient perceptible dès que le taux de méthémoglobine dans le sang dépasse 10% (chez un sujet normal, le rapport méthémoglobine/hémoglobine est de 0,8% chez l'adulte, 1,5% chez le nouveau-né) ; au-delà de 20% commencent à apparaître des signes cliniques (polypnée, asthénie...).

De plus, on a récemment découvert l'effet cancérigène des nitrosamines, substances résultant de la transformation des nitrites et d'amines secondaires après incubation avec le suc gastrique.

Quels sont les effets sur la faune et la flore ?

Alors que les nitrates sont stimulants pour les algues et les plantes aquatiques, d'ailleurs la prolifération de celles-ci est indicateur de pollution, les nitrites sont toxiques pour les poissons comme pour l'homme. Une forte teneur en nitrates dans les cours d'eau entraîne une surabondance relative de certaines espèces végétales et une modification du comportement chez les espèces animales : migration, diminution de la reproduction, apparition de certaines maladies, etc.

En 1978, le Conseil d'Environnement de la Commission des Communautés Européennes a établi des réglementations concernant les concentrations des

différents dérivés azotés dans l'eau de boisson :

	Niveau guide	Concentrat. max admise
Nitrates (mg/l)	25,0	50,0
Nitrites (mg/l)	-	0,1

2 - Responsabilité de l'agriculture :

Lorsqu'on parle de pollution des nappes par les nitrates, il vient tout de suite à l'esprit le "rôle majeur" de l'agriculture, et notamment des engrais. Or le problème n'est pas aussi simple qu'on l'imagine : d'autres facteurs participent à des pollutions ponctuelles dont les effets sont catastrophiques là où ils agissent (points d'eau, rivières, lacs, etc.) :

- Les eaux usées urbaines : l'azote est dans ce cas sous forme d'urée et d'acide urique essentiellement. Elles contribuent tout particulièrement à la pollution des eaux de surface.
- Les eaux résiduaires industrielles : la quantité et la qualité des produits azotés rejetés par ces eaux varient d'une industrie à l'autre. Les rejets les plus importants viennent essentiellement des industries d'engrais, de produits chimiques et de l'agro-alimentaire. Mais en fait, ce type d'eau est surtout dangereux à cause de la pollution par les métaux lourds et les produits soufrés qu'il véhicule.

L'agriculture n'est donc pas la seule responsable de la pollution des nappes par les nitrates, mais son impact reste potentiellement très important. Quant à la pollution due aux cultures, si elle n'est pas à l'origine de la plupart des problèmes locaux très vivants, elle n'en reste pas moins quantitativement la plus forte.

3 - Actions menées vis-à-vis de la pollution d'origine agricole :

En France, la réglementation en vue de protéger les captages servant à l'alimentation humaine existe déjà. En effet, l'article L.20 du code de la santé prévoit l'instauration de trois périmètres de protection autour de ces captages :

- Un premier périmètre de protection immédiate (100 m²) qui est systématiquement clôturé.
- Un deuxième périmètre de protection dont la surface varie en fonction de la géologie et dans lequel l'utilisation de fertilisants ou de traitements chimiques est interdite.
- Un troisième périmètre de protection éloigné où certaines activités humaines sont très réglementées.

PRATIQUES CULTURALES ET LESSIVAGE D'AZOTE

1 - Rappel des principales caractéristiques du cycle de l'azote :

Les principales origines de l'azote-nitrate dans le sol se résument ainsi :

- engrais nitriques,
- apports atmosphériques,
- minéralisation de la matière organique.

Cette matière organique peut-être sous différentes formes : l'humus, les résidus de cultures, les micro-organismes, etc. L'humus contient la plus grande partie de l'azote du sol et, contrairement à la matière organique libre, est très stable. Les résidus végétaux, eux, se décomposent plus ou moins rapidement selon les cas : il faut distinguer les résidus à C/N (rapport Carbone sur Azote du sol) faible qui libèrent plus d'azote que n'en consomment les microorganismes qui les décomposent, des résidus à C/N fort (supérieur à 20-25, cas des pailles) dont la décomposition nécessite une fixation de l'azote minéral du milieu.

Les principaux facteurs de la minéralisation du sol sont ceux agissant sur les microorganismes responsables de l'ammonification et la nitratisation (aération, température) et ceux ayant un effet sur la stabilité de la matière organique (texture du sol, teneur en calcaire...). Ainsi, par exemple, la période estivale est une période d'intense minéralisation, contrairement à la période hivernale où elle est pratiquement inexistante.

A l'inverse, les principales "voies de sortie" de l'azote-nitrate sont :

- la réorganisation, phénomène inverse de la minéralisation,
- le ruissellement dans les eaux superficielles.
- le lessivage dans les eaux souterraines.

C'est ce dernier point qui nous intéresse particulièrement. Ce phénomène est dû au fait que l'azote, sous forme de nitrate, migre très facilement dans le sol grâce à certains mécanismes (convection, diffusion, entraînement direct, etc.). On considère que l'azote est potentiellement lessivable à partir du moment où il sort de la zone de développement racinaire. Cela dépend en particulier de la profondeur du sol, de sa structure et de la nature de la culture. Il va de soi que les pratiques culturales ayant un effet sur la quantité d'azote lessivée sont d'une part celles qui agissent sur la quantité de nitrates disponible et d'autres part celles qui agissent sur la quantité d'eau drainée. Il est utile pour la suite de bien noter ces deux aspects.

Influence des techniques culturales :

Une technique culturale donnée agit sur la quantité d'azote potentiellement lessivable par :

- sa consommation en azote,
- ses restitutions,
- La réorganisation d'azote qu'elle induit, probablement par des exsudats de son système racinaire,
- L'effet mécanique que le développement des racines a sur le sol.

La répartition de ces phénomènes dans l'année, notamment par rapport aux périodes de drainage ou de minéralisation intensive, est importante. On distingue principalement deux sortes de grande culture : celle d'hiver et celle de printemps. Le cas des cultures dérobées sera traité à part.

a - Les cultures d'hiver et de printemps :

Les cultures dites d'hiver, semées à l'automne, assurent un couvert végétal hivernal capable d'une part de consommer une partie des nitrates potentiellement lessivables (présents dans le sol après la minéralisation estivale) et d'autre part d'induire la réorganisation d'une autre partie de ces nitrates. Par exemple, un blé d'hiver semé suffisamment tôt consomme 30 à 35 kg d'azote entre le semis et le stade A.

Contrairement au groupe précédent, les cultures de printemps sont encore en pleine croissance en été au moment de la minéralisation estivale ; elles consomment donc une partie de l'azote libéré et diminuent ainsi la quantité d'azote potentiellement lessivable au cours de l'hiver suivant.

b - Les cultures dérobées :

On appelle culture dérobée une culture à cycle de végétation très court, pouvant être insérée dans la rotation avant ou après la culture, il s'agit essentiellement des engrais verts, c'est à dire des cultures implantées le plus vite possible après la récolte et enfouies avant implantation de la culture suivante. On les utilise en général après une céréale à paille et avant une tête d'assolement de printemps ; on en trouve aussi quelques fois entre deux céréales à paille.

L'engrais vert a deux rôles principaux :

- augmentation de la teneur en matière organique du sol et donc amélioration de sa stabilité au printemps. Cet effet se fait sentir à moyen terme, plus rapidement mais de façon moins durable que le fumier. Ce rôle est particulièrement important

dans les sols à faible stabilité structurale dans lesquels les accidents de végétation sont fréquents,

- utilisation de l'azote libéré par la minéralisation estivale et donc diminution des risques de lessivage. Cet azote fixé à l'automne peut être ensuite partiellement libéré après l'enfouissement et permettre ainsi une économie d'engrais.

c - La fertilisation azotée :

• **Fertilisation minérale** : Depuis plusieurs années, une méthode de rationalisation de la fertilisation azotée a été mise au point. Elle repose sur deux principes fondamentaux :

- Le principe des bilans : il faut apporter au sol ce dont la plante a besoin pour se développer de façon optimale, compte tenu des reliquats d'azote issus de la culture précédente.
- Le fractionnement des apports : Afin de limiter les pertes par réorganisation et par lessivage, il faut répartir les apports dans le temps en fonction des besoins de la plante.

• **Fertilisation organique** : Dans le cas présent des grandes cultures. La fertilisation se réduit à l'enfouissement des résidus de la culture ou de l'engrais vert. Ce dernier ayant été traité, nous nous limiterons ici à l'enfouissement de résidus de culture. Ceux-ci peuvent être de deux types :

- Ceux qui favorisent une immobilisation d'azote. Il s'agit des résidus à teneur en C/N élevée, c'est à dire essentiellement des pailles. Certains auteurs estiment que lorsque les pailles sont enfouies, une dizaine de kilos d'azote environ serait réorganisé. L'effet varie cependant avec de nombreux facteurs, en particulier l'époque d'enfouissement avant la période de drainage. De plus, l'azote est fixé partiellement sous forme de matière organique labile. A moyen terme, il s'agit donc là d'azote minéralisable.

Il faut noter qu'au niveau des agriculteurs, le choix entre l'enfouissement et le brûlage des pailles dépend des priorités de chacun : ceux qui mettent le plus de matière organique au premier plan ne brûlent pas systématiquement leurs pailles, tandis que ceux qui ont des rotations basées sur des successions répétées de céréales à paille, préfèrent les brûler (sauf après tête d'assolement) afin de limiter les risques de maladies.

- Ceux qui favorisent une minéralisation d'azote, dans le cas qui nous intéresse, il s'agit essentiellement des verts de betterave. La minéralisation de ces résidus augmente le pool d'azote-nitrate et donc le risque d'azote potentiellement lessivable. Le risque est donc élevé, cependant dans une région de grande culture sans élevage on peut difficilement envisager d'autres solutions, possible d'utiliser des défoliants comme cela est fait à d'autres fins sur les verts de pomme de terre.

CONCLUSION

Les agriculteurs, après avoir refusé de reconnaître la part de responsabilité qu'ils avaient dans la pollution des nappes par les nitrates, sont maintenant conscients qu'ils doivent se sentir concernés par ce problème. Cependant, du fait des multiples contraintes qui pèsent sur leurs exploitations, la marge de manœuvre qu'ils ont pour modifier leurs systèmes de culture est très faible. Ainsi c'est souvent parce qu'ils ont d'autres

priorités, d'ordre économique, de calendrier de travail... qu'ils n'utilisent pas les techniques culturales pourtant reconnues comme limitant le lessivage d'azote. Pourtant dans certains cas les intérêts des agriculteurs et des personnes préoccupées de qualité des eaux convergent sur de nombreux points. On peut donc espérer que, lorsque la recherche mettra à la disposition du développement agricole des données plus précises et plus généralisables que ce qui existe actuellement ; des conseils précis, tenant compte des conditions locales, pourront être donnés aux agriculteurs afin que leurs pratiques culturales affectent le moins possible la qualité des eaux souterraines.

"Prévenir vaut mieux que guérir" : Seule une réflexion qui va dans le sens de la prévention pourra mettre à l'abri une eau dont les générations futures auront fort besoin dans un pays comme le MAROC où l'eau est presque toujours un facteur limitant.

CONSULTATION - PLANIFICATION - RÉALISATION DE PROJETS DE DÉVELOPPEMENT AGRICOLE ET RURAL

Nos activités englobent :

organisation et financement des exploitations agricoles

développement rural intégré

production végétale

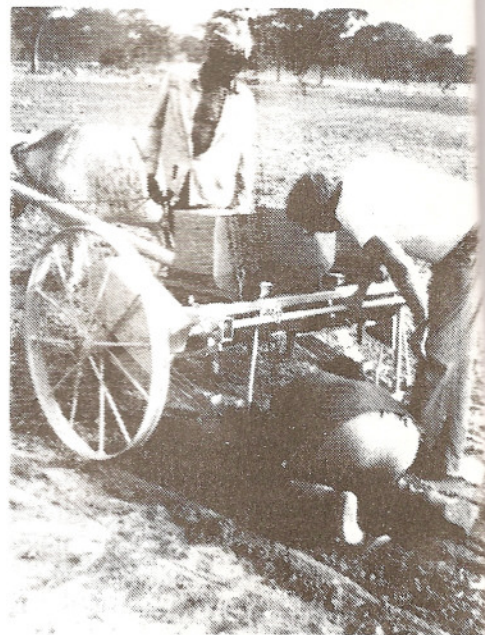
production animale

amélioration du sol
(fertilisation et irrigation)

conditionnement et transformation des produits agricoles;
stockage



Nous offrons une équipe hautement qualifiée et dotée d'une grande expérience à l'étranger pour des travaux conceptionnels et pratiques. Nous avons exécutés et planifiés nombreux projets agricoles en Afrique.



INSTRUPA Consulting GmbH, Tannenwaldallee 49, D-6380 Bad Homburg v.d.H. - Tél. : (06172) 3 50 41 - Télex : 415116 inco d