

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION

272.2

79 EV

ÉVALUATION
DES QUANTITÉS D'EAU
NÉCESSAIRES
AUX
IRRIGATIONS

Ministère de l'Agriculture
C.T.G.R.E.F.

272.2-79EV-6914

ÉVALUATION
DES QUANTITÉS D'EAU NÉCESSAIRES
AUX IRRIGATIONS

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION

Collection Techniques rurales en Afrique

ÉVALUATION
DES QUANTITÉS D'EAU NÉCESSAIRES
AUX IRRIGATIONS

LIBRARY, INTERNATIONAL INSTITUTE OF
AGRICULTURE, 1103 AVENUE DE LA
PROSPERITE, WASHINGTON, D.C. 20002
Tel. (301) 596-1242

RN: 6914
LO: 272.2 79 EV

par le
Ministère de l'Agriculture
C.T.G.R.E.F.
Groupement d'Aix-en-Provence
Division Irrigation

Tous droits d'adaptation, de traduction et de reproduction,
y compris la photographie et le microfilm, réservés pour tous pays.
© Ministère de la Coopération, 1979.

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION	13
CHAPITRE I. — NOTIONS LIÉES AU CLIMAT	17
CHAPITRE II. — NOTIONS LIÉES AU SOL.	63
CHAPITRE III. — NOTIONS LIÉES À LA PLANTE	103
CHAPITRE IV. — AUTRES FACTEURS INFLUANT SUR LES BESOINS EN EAU	131
CHAPITRE V. — APPLICATION À LA CONDUITE PRA- TIQUE DES ARROSAGES ET À LA DÉTERMINATION DES BESOINS EN EAU D'UN PÉRIMÈTRE	151
ANNEXE	181
BIBLIOGRAPHIE	189
GLOSSAIRE	197

Remarque : Les mots ou expressions marqués d'un astérisque figurent dans le glossaire par ordre alphabétique.

	Page
CHAPITRE I. – NOTIONS LIÉES AU CLIMAT	17
I. – DÉFINITIONS	17
1.1. – Évapotranspiration potentielle	17
1.2. – Évapotranspiration maximale	18
1.3. – Évapotranspiration réelle.	18
1.4. – Évapotranspiration optimale.	18
II. – FACTEURS INFLUENÇANT L'ETP	19
2.1. – Bilan Radiatif ou rayonnement net	19
2.1.1. – Définition du bilan radiatif	19
2.1.1.1. – Le rayonnement d'origine solaire	19
2.1.1.2. – Le rayonnement terrestre ou infrarouge	21
2.1.1.3. – Le rayonnement atmosphérique	21
2.1.2. – Expression du bilan radiatif	21
2.1.3. – Variation journalière du bilan radiatif	21
2.2. – Le bilan d'énergie	22
2.2.1. – Expression générale du bilan d'énergie	22
2.2.2. – Le flux de chaleur sensible	22
2.2.3. – Le flux de chaleur latente	22
2.2.4. – Variation journalière du bilan d'énergie	23
2.2.5. – Expression simplifiée du bilan d'énergie	23
Remarque 1 : La variation de l'ETP en fonction de la mise à l'irrigation d'un périmètre.	24
Remarque 2 : L'effet d'oasis.	25
2.3. – Conclusion	27
III. – MESURE DE L'ETP	28
3.1. – Détermination de l'ETP à partir des mesures sur éva- potranspiromètre.	29
3.2. – Mise en œuvre d'un évapotranspiromètre	29
3.2.1. – Choix du site	29
3.2.2. – Anneau de garde	29
3.2.3. – Surface de la cuve	29
3.2.4. – Remplissage de la cuve	29
3.2.5. – Végétation	29
3.3. – Conduite des mesures sur évapotranspiromètre.	29
IV. – ESTIMATION DE L'ETP	30
4.1. – Formule de Penman	30
4.1.1. – Établissement de la formule de Penman.	30
4.1.2. – Calcul de l'ETP par la formule de Penman.	31
4.1.2.1. – Estimation du rayonnement net	32

4.1.2.1.1. – Détermination du rayonnement global.	32
4.1.2.1.2. – Détermination de l'albedo	42
4.1.2.1.3. – Détermination du rayonnement de courte longueur d'onde.	42
4.1.2.2. – Estimation du pouvoir évaporant de l'air.	42
4.1.2.3. – Valeur des coefficients Δ et γ	43
4.1.3. – Calcul de l'ETP par la formule de Penman avec des données manquantes	43
4.1.4. – Conclusion	46
4.2. – Formules empiriques	46
4.2.1. – Formules basées sur le rayonnement global	47
4.2.2. – Formules basées sur la température	48
4.2.3. – Formules basées sur la température et le rayonne- ment global (TURC).	50
4.2.4. – Formule de la Météorologie Nationale	51
4.2.5. – Formule basée sur la pluviométrie	55
4.2.6. – Formules basées sur la mesure de l'évaporation.	56
4.2.6.1. – Mesure de l'évaporation : Bacs d'évaporation.	56
4.2.6.2. – Estimation de l'ETP à partir de l'évaporation d'un bac	59
V. – CARTOGRAPHIE DE L'ETP	59
CHAPITRE II. – NOTIONS LIÉES AU SOL.	63
I. – RAPPELS	63
1.1. – Texture et structure du sol	63
1.2. – Densité et porosité du sol	64
1.3. – Mesure de la densité apparente	68
1.3.1. – Le densitomètre à membrane	69
1.3.2. – La sonde à prélèvement volumétrique	70
1.3.3. – La sonde gammamétrique	70
II. – HUMIDITÉS DU SOL	71
2.1. – Définitions.	72
2.1.1. – Humidité à la saturation	72
2.1.2. – Humidité à la capacité de rétention	72
2.1.3. – Humidité équivalente	72
2.1.4. – Humidité de rupture du lien capillaire.	72
2.1.5. – Humidité au point de flétrissement permanent.	72
2.1.6. – Humidité hygroscopique	73
2.1.7. – Eau de constitution	73
2.2. – Expression de l'humidité d'un sol	75
2.2.1. – Humidité pondérale	75
2.2.2. – Humidité volumique	75
2.3. – Mesure de l'humidité d'un sol	75
2.3.1. – Méthodes destructives	75

2.3.1.1. – Méthode gravimétrique	75
2.3.1.2. – Autres méthodes destructives	76
2.3.2. – Méthodes non destructives	76
2.3.2.1. – Humidimètre à neutrons	76
2.3.2.2. – Gammamétrie	78
III. – LA TENSION DE L'EAU DANS LE SOL : LE POTENTIEL HYDRIQUE	79
3.1. – Définition du potentiel hydrique	79
3.2. – Expression du potentiel hydrique	79
3.3. – Relation entre le pF et l'humidité du sol	81
3.4. – Mesure de la tension de l'eau du sol	82
3.4.1. – Le tensiomètre	82
3.4.2. – Le micropsychromètre	83
3.4.3. – Méthodes électriques	84
3.4.4. – Méthode d'extraction de l'eau sous pression	86
3.5. – Détermination des humidités caractéristiques	87
3.5.1. – Utilisation de la marmite de RICHARDS	87
3.5.2. – Autre méthode	88
IV. – LA RÉSERVE EN EAU DU SOL	89
4.1. – La réserve utile (RU)	89
4.2. – La réserve facilement utilisable (RFU)	89
V. – CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES DES DIFFÉRENTS TYPES DE SOL. Exemple de calcul de la réserve en eau	92
5.1. – Formule de GRAS et BETREMIEUX	92
5.2. – Formule de CHAROY	92
VI. – AUTRES CARACTÉRISTIQUES DU SOL LIÉES À SON APTI- TITUDE À L'IRRIGATION	95
6.1. – La perméabilité	95
6.1.1. – Définition de la perméabilité	95
6.1.2. – Variation de la perméabilité	95
6.1.3. – Mesure de la perméabilité	97
6.1.3.1. – Méthode du puits ou méthode de PORCHET	97
6.1.3.2. – Méthode de l'infiltromètre ou méthode de MUNTZ	98
6.1.3.3. – Méthode du cube ou méthode Vergière	99
6.2. – La conductivité hydraulique	100
6.3. – Propriétés mécaniques des sols	101
CHAPITRE III. – NOTIONS LIÉES À LA PLANTE	103
I. – L'EAU DANS LA PLANTE	103
1.1. – Localisation de l'eau. Teneur en eau des tissus	103
1.2. – Circulation de l'eau. Sa régulation	103

II. – CONSÉQUENCES AGRONOMIQUES DU DÉFICIT HYDRIQUE.	105
2.1. – Évapotranspiration et matière sèche.	105
2.2. – Transpiration et matière sèche	106
2.3. – Efficience de l'eau transpirée	107
2.4. – Efficience (ou productivité) de l'eau d'irrigation.	108
2.4.1. – Efficience agronomique	108
2.4.2. – Efficience économique	108
2.5. – Relation entre production et évapotranspiration	110
III. – COEFFICIENTS CULTURAUX	111
3.1. – Définition des coefficients cultureux	111
3.2. – Valeur des coefficients cultureux de quelques cultures.	112
3.2.1. – Cultures maraîchères.	112
3.2.2. – Céréales	114
3.2.3. – Café	114
3.2.4. – Agrumes	115
3.2.5. – Ananas	115
3.2.6. – Cotonnier.	116
3.2.7. – Riz.	118
3.2.8. – Canne à sucre.	120
3.2.9. – Bananier	126
3.2.10. – Cultures fourragères	128
CHAPITRE IV. – AUTRES FACTEURS INFLUANT SUR LES BESOINS EN EAU	131
I. – MODE D'IRRIGATION.	131
1.1. – Irrigation de surface	131
1.1.1. – Irrigation par submersion	132
1.1.2. – Irrigation par planches	132
1.1.3. – Irrigation à la raie	132
1.2. – Irrigation par aspersion.	132
1.3. – Micro-irrigation (ou irrigation localisée)	133
II. – TECHNIQUES CULTURALES	135
2.1. – Fertilisation	135
2.2. – Paillage	137
2.3. – Densité de plantation.	137
2.4. – Problèmes phytosanitaires	137
2.5. – Adventices	138
III. – TECHNIQUES SPÉCIALES AYANT POUR BUT DE RÉDUIRE L'ÉVAPOTRANSPIRATION.	138
3.1. – Brise-vent	138
3.2. – Brumisation.	140
3.3. – Antitranspirants	140
3.4. – Travail du sol.	140

IV. – PROBLÈMES LIÉS A LA SALINITÉ	141
4.1. – Expression de la salinité	141
4.2. – Étude quantitative	143
4.3. – Seuils de tolérance en fonction de la culture	144
4.4. – Étude qualitative	145
4.5. – Mise en valeur des terrains salés	148
4.5.1. – Origine de la salinisation des sols	148
4.5.2. – Buts et techniques de la restauration des sols	148
4.5.3. – Exemple de restauration des sols	150
CHAPITRE V. – APPLICATION À LA CONDUITE PRACTIQUE DES ARROSAGES ET À LA DÉTERMINATION DES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION D'UN PÉRIMÈTRE	151
I. – CONNAISSANCE DES ÉLÉMENTS DU BILAN HYDRIQUE	151
1.1. – Pluviométrie	154
1.1.1. – Mesure de la pluviométrie	154
1.1.2. – Pluviométrie efficace	155
1.2. – Évapotranspiration potentielle	156
1.3. – Évapotranspiration maximale. Coefficients culturaux	156
1.4. – Réserve utile – Réserve facilement utilisable	157
1.5. – Évapotranspiration réelle	157
II. – TENUE DU BILAN HYDRIQUE	160
2.1. – Expression du bilan hydrique	160
2.2. – Calcul du bilan hydrique (Méthode graphique)	161
2.2.1. – Conduite pratique des arrosages	161
2.2.2. – Détermination du bilan hydrique au niveau d'un projet	163
2.2.2.1. – 1 ^{er} exemple	163
2.2.2.2. – 2 ^e exemple	170
III. – CALCUL DES BESOINS EN EAU D'UN PÉRIMÈTRE D'IRRIGATION	172
3.1. – Choix du niveau d'intensification	172
3.2. – Choix du système de culture et de l'assolement	175
3.3. – Besoins nets en eau d'irrigation	177
3.4. – Besoins bruts en eau d'irrigation	177
3.5. – Choix du taux de pénurie acceptable	178
3.6. – Exemple d'application pour la planification	179
ANNEXE : VALEUR NORMALE DE QUELQUES FACTEURS CLIMATIQUES POUR DIVERSES STATIONS AFRICAINES	181
BIBLIOGRAPHIE	189
GLOSSAIRE	197

INTRODUCTION

Selon une estimation de la C.I.I.D. (Commission Internationale pour l'Irrigation et le Drainage), la superficie irriguée dans le monde s'étendrait à 200 millions d'hectares environ, soit le 1/5 de la surface totale cultivée. Cette proportion est importante, vu les équipements et la technicité que demande l'irrigation. Cependant, un examen plus détaillé montre que cette proportion varie considérablement suivant les différentes grandes régions du globe :

En millions d'ha	Surface cultivée (S.C.)	Surface irriguée (S.I.)	$\frac{SI}{SC}\%$
Europe (moins U.R.S.S.)	171,480	12,275	7,2%
Afrique (moins Afrique du Nord et Afrique du Sud)	65,321	3,343	5,1 %
Afrique du Nord	21,707	3,702	17,1 %
Moyen-Orient	51,001	10,570	20,7 %
Asie (moins U.R.S.S.)	330,945	136,708	41,3 %
U.R.S.S.	225,500	9,900	4,4 %
Amérique du Nord	201,267	17,559	8,7 %
Amérique Latine	149,117	7,796	5,2 %
Océanie	15,050	1,352	9,0 %
TOTAL (Afrique du Sud non com- prise)	1005,888	203,205	20,2%

On constate que ce sont d'abord les zones à forte densité de population qui ont recours à l'irrigation pour intensifier leur production agricole, et en premier lieu l'Asie — où la riziculture est l'activité de base — qui possède les 2/3 des surfaces irriguées dans le monde.

Cependant, l'irrigation est pratiquée dans la quasi-totalité des pays, qu'elle soit une nécessité absolue comme dans certains pays arides ou simplement un moyen d'intensifier la production, dans les régions d'irrigation dites « de complément ».

L'Afrique tropicale et équatoriale est pourtant assez nettement une des zones du globe les moins irriguées : on peut y trouver plusieurs explications : d'abord la faible densité de la population n'a pas poussé

à rechercher de fortes productions à l'hectare; ensuite, sous presque tous les climats de cette zone, il existe au moins une saison pluvieuse, plus ou moins abondante, mais dont le retour, chaque année, assure la possibilité d'effectuer des cultures « pluviales », c'est-à-dire sans apport d'eau complémentaire.

Depuis quelques années, les efforts de modernisation qui sont accomplis en Afrique s'accompagnent de la création de périmètres d'irrigation, soit pour des plantations industrielles contraintes d'être compétitives sur le marché mondial, soit pour des périmètres d'agriculture vivrière, où l'on souhaite voir s'élever le niveau de vie.

Mais on se heurte parfois dans les régions chaudes à des difficultés importantes pour rentabiliser l'irrigation : en effet, les besoins en eau y sont plus élevés que dans les régions tempérées sans que les rendements agricoles le soient toujours. Si bien que la productivité* de l'irrigation y est souvent moins bonne. En céréales, par exemple, elle est approximativement, suivant le climat :

- de 0,6 à 1 kg de grain/m³ d'eau en région tempérée,
- de 0,3 à 0,4 kg de grain/m³ d'eau en région tropicale,
- de 0,1 à 0,2 kg de grain/m³ d'eau en région sahélienne.

On retrouve des écarts analogues pour d'autres cultures.

Par exemple, dans le cas de la tomate, la productivité est de :

- 10 à 15 kg de fruit/m³ d'eau en région méditerranéenne,
- 4 à 6 kg de fruit/m³ d'eau en région tropicale.

Dans certains périmètres l'irrigation pourra donc être réservée, tout au moins en tant que spéculation principale, aux cultures ayant un produit brut/ha élevé.

On rencontre également des difficultés de rentabilisation lorsque l'eau est un facteur limitant, ce qui est fréquemment le cas en Afrique, surtout dans la zone sahélienne. Et la productivité de l'irrigation en valeur monétaire peut être très faible, si l'on ne veille pas à ce que les conditions de la pratique de l'irrigation soient réellement optimales.

Une autre grave préoccupation des pays du Sahel réside dans l'avancée du désert à un rythme de plus en plus inquiétant. Par rapport à ce problème, la création de zones irriguées doit être faite avec discernement : en effet, si l'irrigation permet le maintien d'une population dans une région déjà menacée par l'érosion et le surpâturage, elle est à coup sûr un facteur de désertification; par contre, si elle permet la création de ceintures vertes, comme cela se fait au Nord du Sahara, si elle permet aux régions mieux préservées d'accroître leur production et d'accueillir les populations des régions menacées, on peut espérer que l'on a là un moyen de freiner l'avancée du désert.

Vu la complexité des répercussions de la création d'un périmètre irrigué sur l'environnement socio-économique et sur le milieu naturel, et vu l'importance des moyens généralement mis en œuvre pour sa réa-

lisation, les études préalables à tout projet d'irrigation méritent d'être envisagées sous les différents aspects suivants :

– *Aspects techniques.*

Recherche des moyens techniques qui doivent permettre de maximiser les rendements, ou d'améliorer la qualité des produits.

Évaluation des besoins en eau.

– *Aspects économiques.*

Recherche des niveaux d'intensification qui permettent de maximiser le revenu net :

- pour chaque culture,
- pour chaque système de culture.

Étude des répercussions sur les marchés, et sur l'économie de la région.

– *Aspects sociaux.*

Recherche des conséquences possibles sur l'élévation du niveau de vie, sur le marché de l'emploi, sur les mouvements de population.

– *Aspects écologiques.*

Recherche des conséquences sur le milieu naturel et sur l'environnement.

Le présent manuel porte essentiellement sur les aspects techniques et plus particulièrement sur la détermination des besoins en eau nécessaires aux irrigations.

– *Le premier chapitre* traite des notions liées au climat. Il expose d'abord les notions fondamentales qui permettent de comprendre le phénomène d'évapotranspiration. Il donne ensuite un certain nombre de méthodes de mesure ou d'estimation de l'évapotranspiration potentielle ou ETP, base de tout calcul de besoins en eau.

– *Le second chapitre* traite des notions liées au sol. Il définit les caractéristiques du sol qui interviennent directement sur le comportement des cultures à l'irrigation, puis aborde les méthodes de mesure de l'humidité du sol et de la tension de l'eau dans le sol; ces notions aboutissent à la définition de la réserve en eau du sol, laquelle impose l'importance des doses, donc la fréquence des arrosages.

– *Le troisième chapitre* traite des notions liées à la plante; après un rappel des mécanismes de transfert d'eau dans la plante, il donne un ordre de grandeur des paramètres spécifiques permettant le calcul des besoins en eau des principales cultures rencontrées en zone tropicale, c'est-à-dire principalement les coefficients culturaux $K = ETM/ETP$.

– *Le quatrième chapitre* traite de notions moins fondamentales, mais

dont l'importance dans l'évaluation des besoins en eau ne saurait être sous-estimée; ce sont d'abord les modalités d'apport de l'eau, ensuite certaines techniques culturales, puis un certain nombre de techniques ayant pour but de réduire l'évapotranspiration, enfin les problèmes liés à la salinité auxquels on a fait une place importante, bien qu'ils soient plus cruciaux en zone méditerranéenne qu'en zone tropicale.

Ces quatre premiers chapitres permettant au projeteur de rassembler les principales données nécessaires au calcul des besoins en eau, et aussi d'apprécier leur importance et leur validité; le calcul proprement dit ne peut se faire qu'après cette collecte de données.

— *Le cinquième chapitre* traite enfin des méthodes de calcul des besoins en eau, en distinguant 2 niveaux :

- *Le niveau de la parcelle* qui intéresse l'agriculteur. Le calcul du bilan hydrique permet d'évaluer quantitativement ce qui se passe en un point donné du point de vue de l'alimentation en eau d'une culture donnée, avec un mode d'apport donné.

- *Le niveau du périmètre* qui intéresse le projeteur. C'est une extrapolation du calcul précédent à l'ensemble des parcelles, des cultures et (éventuellement) des modes d'apport de l'eau que l'on trouve dans un périmètre d'irrigation. Il permet d'arriver à une estimation prévisionnelle des quantités d'eau nécessaires aux irrigations.

La rédaction de ce manuel a pu être menée à bien grâce aux documents qu'ont bien voulu nous fournir différents organismes spécialisés. Signalons particulièrement la contribution apportée par l'I.R.A.T. (Institut de Recherches en Agronomie Tropicale) et tout spécialement par son Service d'Hydraulique Agricole qui possède une grande expérience en matière d'irrigation et d'évaluation des besoins en eau dans les pays tropicaux et méditerranéens, expérience d'autant plus intéressante qu'elle est acquise en liaison étroite avec les diverses écoles européennes ou internationales. L'apport de l'O.R.S.T.O.M. (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer) est également important, particulièrement en ce qui concerne la connaissance des climats. Sur le plan fondamental, les travaux de l'I.N.R.A. (Institut National de la Recherche Agronomique) ont permis de préciser bien des points. Enfin, l'application des notions fondamentales à des méthodes d'évaluation des besoins en eau s'est inspirée aussi des travaux d'organismes de développement tels que la S.A.T.E.C., la S.C.E.T. International et le B.D.P.A. *

* S.A.T.E.C. : Société d'Aide Technique et de Coopération — S.C.E.T. International : Société Centrale pour l'Équipement du Territoire International — B.D.P.A. : Bureau pour le Développement de la Production Agricole.

CHAPITRE I

NOTIONS LIÉES AU CLIMAT

Les phénomènes de transfert d'eau à la surface de la Terre sont dus à des *processus énergétiques* : les facteurs climatiques conditionnent donc directement ces phénomènes.

Les disponibilités énergétiques, liées au climat, peuvent être assimilées à une « demande », tandis que l'ensemble sol-plante avec l'eau qu'il contient, correspond à une « offre ».

On appelle « *évapotranspiration* » la quantité d'eau consommée qui comprend d'une part l'eau transpirée par la plante, d'autre part l'évaporation directe à partir du sol. Mais celle-ci n'est vraiment importante que dans le cas de couverts végétaux discontinus.

L'évapotranspiration comme l'évaporation consiste en un passage de l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse : c'est un phénomène consommateur d'énergie : chaque gramme d'eau passant de l'état liquide à l'état vapeur exige 590 calories environ. 1 mm d'évaporation représente donc une absorption de 59 calories par cm^2 .

I. – DÉFINITIONS

1.1. – ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE * = ETP

C'est en principe la valeur maximale possible de l'évapotranspiration dans des conditions climatiques données. Cette définition se heurtant à certaines difficultés d'interprétation, on considère plutôt, dans la pratique, l'Évapotranspiration Potentielle comme une *référence* et on la définit comme étant l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, continu et homogène, dont l'alimentation en eau n'est pas limitante, et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.

L'ETP ainsi définie correspond donc sensiblement à l'évapotranspiration d'une prairie ou d'un gazon en pleine croissance (mais non épié), fauché régulièrement, correctement fumé et bien enraciné, sur un sol maintenu à une humidité proche de la capacité de rétention * (mais sans excès d'eau).

On emploie également couramment le terme ETP pour désigner la valeur approchée de l'Évapotranspiration Potentielle obtenue par le

calcul à partir d'une formule d'estimation fondée sur des données climatiques. L'ETP ainsi définie est considérée comme une donnée climatique; les facteurs culturaux n'interviennent pas dans son estimation.

1.2. – ÉVAPOTRANSPIRATION MAXIMALE* = ETM

C'est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif donné et dans des conditions climatiques données.

Sa valeur est théoriquement inférieure ou égale à l'ETP. En fait, il n'est pas rare de trouver pour certaines cultures hautes (maïs, canne à sucre, bananier...) des valeurs de l'ETM supérieures à l'ETP mesurée ou calculée. On définit l'ETM par rapport à l'ETP en posant :

$$ETM = K \cdot ETP$$

où K dépend : – de la culture,
– du stade végétatif.

Le coefficient K peut également être influencé par le climat; il sera plus élevé lorsque l'advection* est importante et, pour certaines plantes, ses valeurs seront d'autant plus élevées que l'ETP instantanée sera plus faible.

1.3. – ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE* = ETR

C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles données : l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des contraintes d'ordre physique (suction du sol), chimique (concentration des solutions), biologique (régulation stomatique), et l'on a alors une réduction de la transpiration par rapport à la valeur maximale qu'elle pourrait atteindre en l'absence de contrainte.

$$ETR \leq ETM$$

Nous reviendrons plus loin sur l'étude des phénomènes qui peuvent limiter l'évapotranspiration.

1.4. – ÉVAPOTRANSPIRATION OPTIMALE* = ETR opt

$$ETR \text{ opt} = K \text{ opt} ETP$$

C'est une notion plus difficile à approcher que les précédentes, et dont l'intérêt se fait sentir lorsque l'on constate que l'optimum économique est atteint pour des valeurs inférieures à l'ETM, soit parce que le rendement commercialisable maximal – ou la qualité maximale – est atteint pour des valeurs de l'ETR inférieures à l'ETM, soit parce que le rendement marginal au voisinage de l'ETM est trop faible en comparaison du coût marginal de l'irrigation. Dans ce dernier cas, la notion d'ETR opt intègre donc également des critères économiques,

et peut donc être sujette à certaines variations en fonction de la conjoncture.

On a donc en principe : $ETR \leq ETM \leq ETP$.

L'importance de l'E.T.P. vient du fait qu'elle constitue une évaluation maximale des besoins en eau de toutes les cultures et qu'à partir d'elle on peut estimer les besoins maximaux (ETM) ou optimaux (ETR opt), moyennant la connaissance des coefficients K ou K opt pour les différentes phases végétatives d'une culture donnée.

On mettra donc l'accent, dans les chapitres qui suivent, sur l'ETP, notion certes ambiguë, voire criticable, mais d'emploi commode aussi bien pour celui qui doit calculer un réseau que pour celui qui doit l'utiliser.

Notons pourtant le développement récent en matière de recherche bioclimatologique de certaines techniques de mesure directe de l'ETR d'une culture. Elles consistent à mesurer, et à intégrer sur de courts espaces de temps, les divers flux d'énergie immédiatement au-dessus du couvert végétal, entre 2 niveaux distants verticalement de 0,5 à 1 mètre. Ce qui nécessite des instruments de mesure extrêmement précis et, à l'aval, tout un appareillage permettant soit l'enregistrement des mesures en vue d'un traitement ultérieur, soit le calcul direct des divers flux et leur impression sur bande (appareil B.E.A.R.N. de l'I.N.R.A.).

Ces techniques ouvrent des perspectives entièrement nouvelles en matière de connaissance des besoins en eau et même de pilotage des irrigations, mais leur vulgarisation n'est pas pour demain et, en attendant, l'évaluation de l'ETP conserve toute son importance.

II. – FACTEURS INFLUENÇANT L'ETP

2.1. – LE BILAN RADIATIF OU RAYONNEMENT NET * RN

2.1.1. – **Définition du bilan radiatif** : c'est la résultante au niveau de la surface de la terre de l'ensemble des transferts d'énergie sous forme radiative. Il comprend :

- Le rayonnement d'origine solaire.
- Le rayonnement terrestre.
- Le rayonnement atmosphérique.

2.1.1.1. – *Le rayonnement d'origine solaire.*

Le flux radiatif émis par le soleil peut être considéré comme constant.

La constante solaire C (flux radiatif traversant une surface normale au rayonnement solaire à l'extérieur de l'atmosphère) est voisine de 2 cal/cm²/mn, ce qui donne une idée de la valeur maximale observable du rayonnement solaire.

Ce rayonnement est en quasi totalité de courte longueur d'onde, c'est-à-dire entre 0,15 et 4 microns; la moitié fait partie du rayonnement visible, le reste de l'ultra-violet et surtout du proche infra-rouge.

Au niveau de l'atmosphère, puis de la surface terrestre et des végétaux, ce flux radiatif subit des phénomènes de diffusion, d'absorption et de réflexion (figure 1).

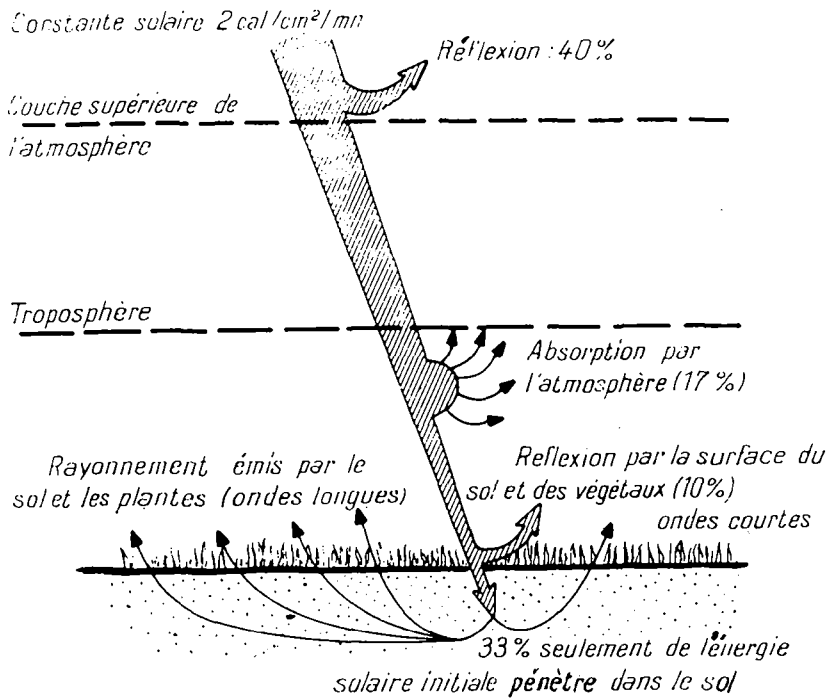


FIGURE 1. — Bilan de la radiation solaire
(selon GOUROU et POPY. Schéma repris par GAUCHER).

Le rayonnement solaire reçu au sol peut être direct, si le ciel est clair, ou diffus s'il est nuageux.

On appelle *rayonnement global* RG la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

Ce rayonnement est réfléchi par la surface du sol. La fraction réfléchie que l'on appelle *albedo*, varie suivant la nature de la surface, et également la hauteur du soleil.

L'albedo moyen a sur l'ensemble des longueurs d'onde composant le rayonnement solaire est, pour différents types de surface :

Prairie	$a = 0,20$ à $0,25$
Surface d'eau libre	$a = 0,05$ à $0,08$
Sol nu	$a = 0,05$ à $0,20$
Forêt	$a = 0,14$ à $0,17$
Neige	$a = 0,70$ à $0,90$

2.1.1.2. – Le rayonnement terrestre ou infra-rouge (RT).

La surface terrestre se comporte comme un corps noir; elle émet vers l'atmosphère un rayonnement de grande longueur d'onde se situant presque entièrement entre 4 et 120 microns de longueur d'onde.

$$RT = \varepsilon \sigma Ts^4$$

$$\text{avec : } \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \text{émissivité} \\ \sigma = \text{constante de STEFAN} \\ Ts = \text{température de surface en } ^\circ \text{ Kelvin} \end{array} \right.$$

Ce rayonnement est absorbé essentiellement dans les basses couches de l'atmosphère.

2.1.1.3. – Le rayonnement atmosphérique (RA).

L'atmosphère émet un rayonnement qui lui est propre en fonction de la température des tranches d'atmosphère considérées.

L'expression du rayonnement atmosphérique descendant est de la forme :

$$RA = \sigma Ta^4$$

Où Ta est une température fictive de l'atmosphère qui varie entre -40°C et -10°C , Ta étant d'autant plus faible que le ciel est clair et l'humidité faible.

Remarque :

Le bilan du rayonnement de grande longueur d'onde est en général négatif. $RA - RT$ est de l'ordre de $-0,2 \text{ cal/cm}^2/\text{mn}$.

2.1.2. – Expression du bilan radiatif.

En comptant positivement les flux descendants et négativement les flux ascendants, l'expression du bilan radiatif ou rayonnement net est :

$$RN = (1-a) RG + RA - RT$$

2.1.3. – Variation journalière du bilan radiatif.

De jour $RG > 0$

Rn est positif

La surface reçoit de l'énergie



De nuit $RG = 0$ et $RN = RA - RT$

RN est donc négatif

La surface perd de l'énergie



2.2. – LE BILAN D'ÉNERGIE

2.2.1. – Expression générale du bilan d'énergie.

Le principe de la conservation de l'énergie appliquée au niveau du couvert végétal permet d'écrire :

$$(1) \quad RN = S + Q_h + Q_e$$

qui est l'équation du bilan d'énergie

$$\text{avec : } \begin{cases} RN = \text{Rayonnement net}^* ; \\ S = \text{Flux de chaleur dans le sol} ; \\ Q_h = \text{Flux de chaleur sensible}^* \text{ vers l'atmosphère} ; \\ Q_e = \text{Flux de chaleur latente}^* \text{ vers l'atmosphère} . \end{cases}$$

2.2.2. – **Le flux de chaleur sensible** Q_h correspond aux échanges calorifiques entre le sol et l'atmosphère (> 0 du sol vers l'atmosphère).

Il est proportionnel au gradient thermique au voisinage du sol. Il dépend également d'un coefficient d'échange turbulent pour la chaleur, lequel varie essentiellement en fonction du vent. On peut en donner l'expression simplifiée suivante :

$$Q_h = \gamma f(u) (T_s - T_a) ;$$

$$\text{avec : } \begin{cases} \gamma = \text{constante psychrométrique} ; \\ f(u) = \text{fonction du vent déterminée empiriquement} ; \\ T_s = \text{température de la surface} ; \\ T_a = \text{température de l'air} . \end{cases}$$

En général T_s est supérieur à T_a pendant la journée ; Q_h est donc positif ; le flux de chaleur sensible va du sol vers l'atmosphère ; c'est le *régime suradiabatique*.

Par contre la nuit, le sol se refroidit plus vite que l'air ; T_s est alors inférieure à T_a , et Q_h est négatif ; le flux de chaleur sensible est dirigé de l'atmosphère vers le sol ; c'est le *régime d'inversion*.

2.2.3. – **Le flux de chaleur latente** Q_e correspond aux processus d'évaporation ou de condensation, qui sont également des processus d'échange d'énergie.

Il est proportionnel au gradient d'humidité de l'atmosphère au voisinage du sol. Il dépend également d'un coefficient d'échange turbulent pour la vapeur d'eau, qui est fonction du vent.

On peut l'exprimer selon la loi de DALTON :

$$Q_e = f(u) (e_s - e_a)$$

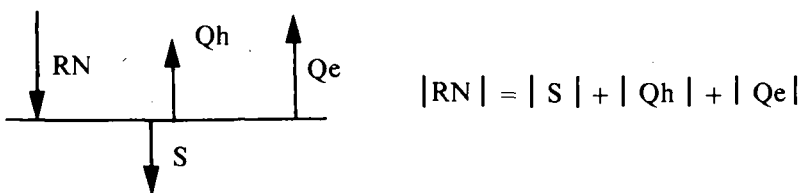
avec : $\left\{ \begin{array}{l} f(u) = \text{fonction du vent déterminée empiriquement;} \\ e_s = \text{tension de vapeur d'eau au niveau de la surface;} \\ e_a = \text{tension de vapeur d'eau dans l'air.} \end{array} \right.$

Il y a évaporation lorsque $e_s > e_a$; il y a condensation dans le cas contraire.

2.2.4. – Variations journalières du bilan d'énergie.

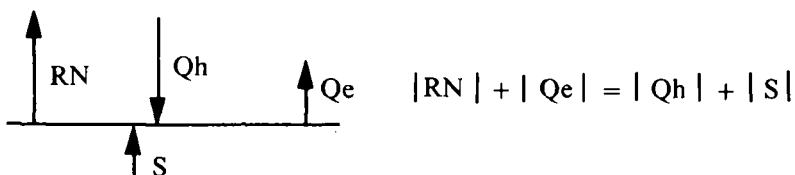
(Les flèches indiquent les transferts réels d'énergie vers ou à partir de la surface du sol).

– DE JOUR : $R_N > 0$

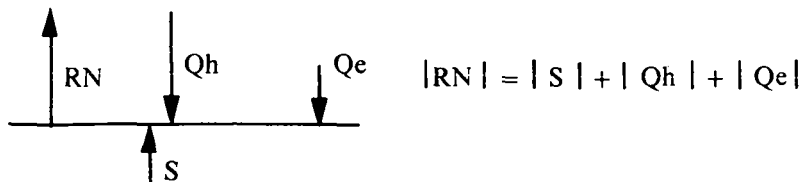


– DE NUIT : $R_N < 0$

avec évaporation soit $Q_e > 0$



avec condensation soit $Q_e < 0$



2.2.5. – Expression simplifiée du bilan d'énergie.

Nous avons exposé jusqu'ici ce qui se passe à l'instant t ou sur un laps de temps court. Mais si l'on intègre sur une journée entière, on constate que S est pratiquement nul : en effet, le jour, le sol absorbe de la chaleur ($S > 0$), la nuit il cède cette chaleur ($S < 0$).

À partir de l'équation (1), on peut donc admettre à l'échelle journalière, l'égalité suivante en remarquant que le flux de chaleur latente

n'est autre que l'évapotranspiration ($Q_e > 0$) ou la condensation ($Q_e < 0$).

$$(2) \quad RN = Q_h + ETR$$

Remarque 1 : Variation de l'ETP en fonction de la mise à l'irrigation d'un périmètre.

L'équation met en évidence l'antagonisme existant entre chaleur sensible et chaleur latente : en effet, pour un rayonnement net donné, si l'eau est facilement disponible, l'ETR sera maximale, donc Q_h sera minimal; au contraire, si l'ETR est limitée, le bilan d'énergie sera équilibré par une augmentation de Q_h , donc une élévation de la température. La mauvaise alimentation en eau d'une culture provoquera donc une hausse plus ou moins importante de la température.

Appelons ETP_0 la valeur de l'ETP climatique lorsque l'eau n'est pas limitante à l'échelle de la région. On a dans ce cas (selon Bouchet) :

$$ETR = ETP_0$$

Lorsque l'eau devient un facteur limitant, on a :

$$ETR = ETP_0 - q$$

Une certaine quantité d'énergie q n'est pas utilisée pour l'évaporation; elle est donc utilisée sous forme de chaleur sensible, c'est-à-dire qu'elle augmente la température, donc provoque aussi une augmentation de l'ETP :

$$ETP = ETP_0 + q$$

d'où en additionnant membre à membre :

$$ETR + ETP = 2 ETP_0$$

Cette égalité montre qu'à la limite, l'absence totale de ressources en eau dans une région donnée ($ETR = 0$) provoquerait un doublement de l'ETP (climat désertique). À l'inverse, *la mise à l'irrigation d'une région aride d'une certaine importance, a pour effet une diminution notable de l'ETP.*

Ce phénomène peut avoir une grande importance dans l'évaluation des besoins en eau de certains périmètres dont le climat est particulièrement sec.

Une bonne illustration de cette théorie nous est donnée par des évaluations d'ETR et d'ETP effectuées en Afrique, entre 0° et 15° de latitude. (C. RIOU « La détermination pratique de l'évaporation », ORSTOM, 1975). On voit clairement sur la figure 2 que lorsqu'on passe du climat sahélien* (15° Nord), au climat tropical* (entre 5° et 10° Nord), puis au climat équatorial*, l'ETP diminue au fur et à mesure que l'ETR augmente, et ce jusqu'à ce que les 2 valeurs se confondent.

On a approximativement :

$$\begin{aligned} \text{ETR} + \text{ETP} &= 2\,200 \text{ mm/an} \\ \text{d'où } \text{ETPo} &= 1\,100 \text{ mm/an} \end{aligned}$$

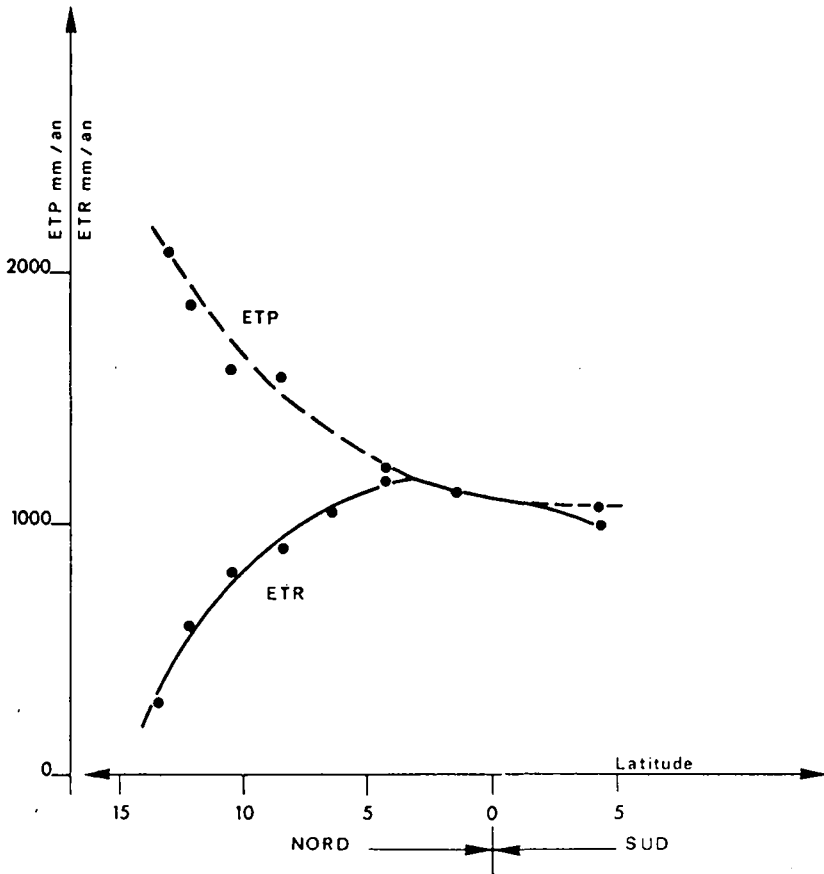


FIGURE 2. – Variation de l'ETP et de l'ETR annuelles en fonction de la latitude (entre 15° et 22° de longitude).

Remarque 2 : Effet d'oasis :*

C'est un phénomène important à connaître lorsque l'on se préoccupe d'évaluer la consommation d'eau sur de petits périmètres.

L'effet d'oasis se manifeste en effet à la juxtaposition d'une zone désertique et d'une zone irriguée (voir figure 3).

L'air chaud et sec, moins dense que l'air frais de la zone irriguée, se place au-dessus de ce dernier. Il se produit donc, au niveau de la zone de transition, un phénomène d'inversion de température : le flux de chaleur sensible Q_h n'est plus dirigé vers le ciel mais vers le sol soit $Q_h < 0$.

D'autre part, toujours dans la zone de transition, le gradient d'humidité dans l'air ($e_s - e_a$) se trouve d'autant plus accusé que l'on se

rapproché de la bordure. L'ETP est, par suite, augmentée dans les mêmes proportions.

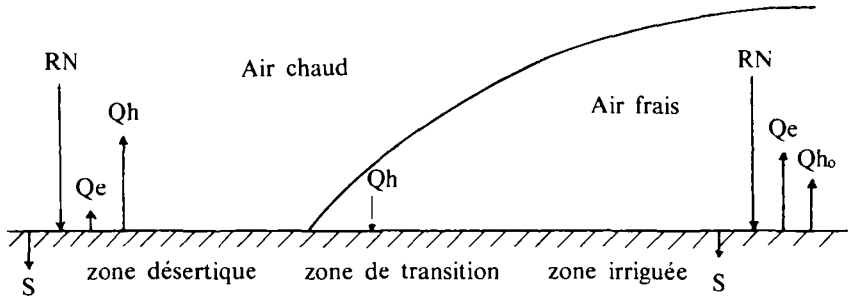


FIGURE 3. - Effet d'oasis.

Le bilan d'énergie (équation (1)) nous permet d'écrire d'une façon générale (puisque $Q_e = ETR$ et que dans la zone irriguée $ETR = ETP$).

$$ETP + Q_h = RN - S = \text{Constante}$$

Au milieu de la zone irriguée, suffisamment loin de la bordure, on aura donc :

$$ETPo + Q_{ho} = RN - S$$

Alors que dans la zone désertique, on aura :

$$2 ETPo + Q_h = RN - S$$

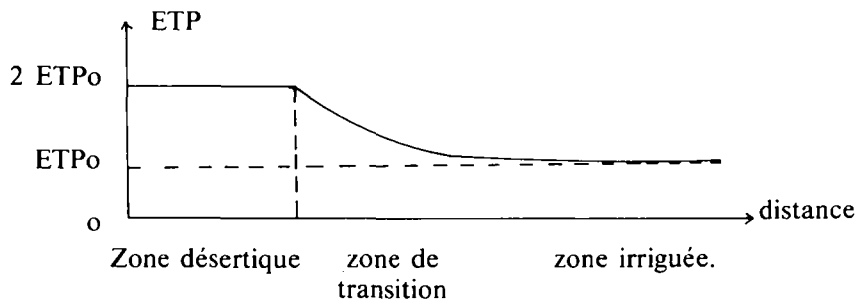
Lorsque l'on se déplace à l'intérieur du périmètre irrigué de la zone de transition vers le centre de la zone irriguée, l'ETP décroît de sa valeur limite $2 ETPo$ jusqu'à $ETPo$. Par contre Q_h , d'abord négatif et égal à Q_h' , croît jusqu'à la valeur positive Q_{ho} (voir figure 4).

On peut remarquer que dans ce cas-là, la quantité d'énergie disponible pour ETP peut dépasser quelquefois très largement l'énergie fournie par le rayonnement net. Ceci s'explique par le fait que l'énergie supplémentaire est fournie par la zone désertique sous forme de chaleur sensible : il y a transfert horizontal d'énergie.

Le cas extrême des oasis arrosées intensivement en plein désert n'est pas seul justiciable de ce genre de phénomène. En effet, c'est la même chose qui se passe au voisinage de 2 parcelles dont le niveau d'ETR est différent ; de même, des variations brusques d'albedo*, de rugosité*, ou de caractéristiques thermiques du sol, peuvent induire des effets similaires, avec phénomène d'advection* horizontale, que l'on appelle aussi quelquefois « effet de bordure ».

La connaissance de l'existence de tels phénomènes est importante pour deux raisons :

- Les effets d'oasis* sont très fréquents dans la pratique, et il est bon de pouvoir se rendre compte que les processus énergétiques, étudiés



Flux de chaleur sensible.

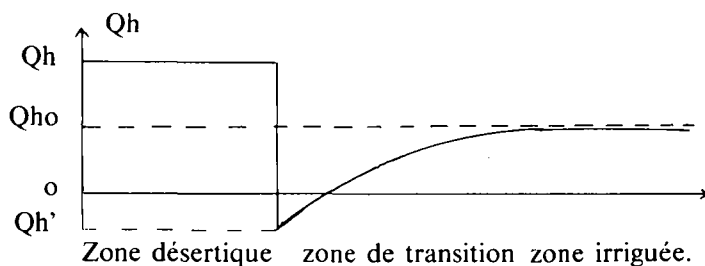


FIGURE 4. – Variations de ETP et de Q_h dans le cas d'un effet d'oasis.

généralement pour des surfaces homogènes, ne sont applicables que dans certaines limites.

- Ces effets sont des sources de perturbation fréquentes lorsque l'on doit choisir le site d'un poste météorologique, ou de mesure de l'ETP; la représentativité du poste est tributaire du caractère homogène de son environnement immédiat.

2.3. – CONCLUSION

L'étude du bilan d'énergie nous montre donc bien l'interdépendance des différents termes de ce bilan. Toute modification d'un facteur physique intervenant dans le bilan entraînera donc une modification de l'évapotranspiration.

On peut résumer comme suit les principaux facteurs influençant l'ETP d'une surface donnée :

- *Facteurs dépendant du climat :*

- le rayonnement solaire, qui est la principale source d'énergie reçue directement par la surface;
- le déficit de saturation de l'air, dont le gradient détermine le flux de vapeur d'eau dans l'atmosphère;

- le vent, qui accentue les effets du déficit de saturation, en augmentant les coefficients d'échange turbulent pour la vapeur d'eau et pour la chaleur;
- la température de l'air, qui commande en partie ce déficit de saturation.

• *Facteurs dépendant de la surface :*

- l'albedo *, qui dépend surtout de la nature du couvert végétal, mais qui varie également un peu en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement sur la surface;
- la rugosité du couvert *, qui a en général pour effet une augmentation de l'évapotranspiration (augmentation de la surface foliaire soumise à l'évaporation) si le déficit de saturation et le vent sont importants. Mais elle peut aussi avoir l'effet contraire dans des conditions de plus forte humidité (diminution du gradient d'humidité atmosphérique au voisinage des feuilles supérieures).

Nous verrons plus loin comment ces différents facteurs peuvent être pris en compte dans un calcul d'estimation de l'ETP. Mais voyons d'abord les problèmes que pose la mesure pratique de l'ETP.

III. – MESURE DE L'ETP

Bien que l'ETP soit souvent considérée comme une donnée climatique, sa mesure se fait sur un couvert végétal. On appelle « évapotranspiromètre » * l'installation utilisée pour cette mesure : il s'agit d'une cuve enterrée placée au milieu d'une parcelle irriguée, qui sert d'anneau de garde, et dans laquelle on reconstitue un sol recouvert de la même culture dans les mêmes conditions (voir figure 5). La culture dans la cuve est arrosée avec un léger excès d'eau, et l'eau de drainage est récupérée au moyen d'un tuyau se déversant dans un bac de récupération.

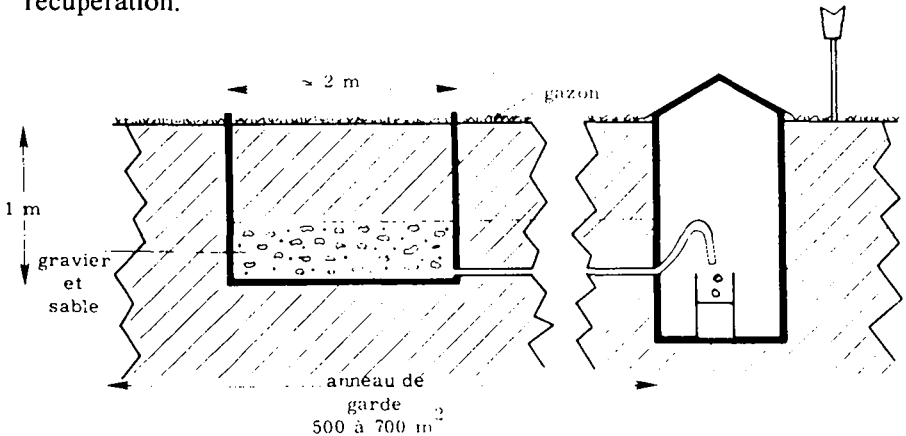


FIGURE 5. — Évapotranspiromètre (à nappe).

3.1. – DÉTERMINATION DE L'ETP À PARTIR DES MESURES SUR ÉVAPOTRANSPIROMÈTRE

Cette détermination se fait par différence entre apports et pertes.

$$\text{ETP} = \text{Pluie} + \text{Irrigation} - \text{Drainage} \pm \Delta R$$

Les variations de réserve du sol ΔR seront négligeables en valeur relative si l'alimentation en eau est régulière, et si la période de calcul est suffisamment longue (1 semaine à 10 jours au minimum).

3.2. – MISE EN ŒUVRE D'UN ÉVAPOTRANSPIROMÈTRE

La mise en œuvre d'une installation de mesure de l'ETP doit s'entourer d'un certain nombre de précautions, si l'on veut aboutir à des résultats valables. Nous en énumérerons ci-dessous brièvement les principales :

3.2.1. – Choix du site.

Zone dégagée et représentative de la région étudiée, suffisamment éloignée de tout objet susceptible de perturber le rayonnement, le régime de turbulence, ou les échanges advectifs (bâtiments, relief, plan d'eau...).

3.2.2. – Anneau de garde.

Environnement homogène de 1 000 m², voire plus pour des cultures hautes; irrigation et entretien réguliers, comme sur l'évapotranspiromètre.

3.2.3. – Surface de la cuve.

2 à 3 m² au minimum.

3.2.4. – Remplissage de la cuve.

Sol suffisamment filtrant, meuble, sans risques d'hydromorphie.

3.2.5. – Végétation.

Végétal présentant le moins possible de limitations d'évapotranspiration d'ordre physiologique. On choisit habituellement des graminées fourragères (fétuque en régions tempérées ou méditerranéennes, *digitaria*, *cynodon*, *paspalum* en régions chaudes...).

3.3. – CONDUITE DES MESURES SUR ÉVAPOTRANSPIROMÈTRE

Irrigations journalières; fertilisations et coupes régulières; bilans sur des périodes telles que l'on soit assuré que $\Delta R = 0$ (à moins que ΔR

puisse être mesuré, soit par pesée de l'évapotranspiromètre, soit par mesures neutroniques).

La précision des mesures obtenues avec un évapotranspiromètre ordinaire est le plus souvent de l'ordre de 10%, même avec une conduite soignée. Par contre, le moindre laisser-aller peut aboutir à des distorsions de l'ordre de 30% ou 40%, ou plus. Ce n'est qu'avec des évapotranspiromètres pesables que l'on peut atteindre des précisions de l'ordre du 1/2 mm d'évaporation (pesée piézométrique ou dynamométrique), ou même de l'ordre de 0,05 mm d'évaporation (pesée par bascule mécanique). Seuls de tels dispositifs peuvent permettre d'envisager des mesures d'ETP pour des périodes de 24 h. ou même de suivre l'évolution de l'ETP au cours de la journée.

La mesure de l'ETP doit s'accompagner de mesures météorologiques complètes; d'abord la mesure de la pluviométrie est indispensable au calcul du bilan hydrique dans les évapotranspiromètres; ensuite, il est important de pouvoir rapprocher les mesures d'ETP de mesures climatiques effectuées sur le même site (rayonnement, durée d'insolation, températures maximale et minimale, psychrométrie, vent à 2 m, évaporation Piche, évaporation sur nappe d'eau libre).

IV. – ESTIMATION DE L'ETP

Vu la complexité de la mise en œuvre d'un dispositif de mesure de l'ETP, il est presque toujours préférable de recourir à des méthodes d'estimation. On dispose en effet actuellement de formules et de méthodes suffisamment variées, et adaptées à différents climats. De plus, une bonne estimation vaut mieux qu'une mauvaise mesure.

4.1. – FORMULE DE PENMAN OU FORMULE DITE « DU BILAN D'ÉNERGIE »

La formule mise au point par le physicien anglais PENMAN découle directement du bilan d'énergie*. Son intérêt est donc primordial quant à la compréhension du phénomène physique. De plus, elle donne les meilleures estimations de l'ETP, et ceci sous tous les climats. Son seul inconvénient est de nécessiter un nombre assez important d'informations climatiques, rarement toutes disponibles sur une même station.

4.1.1. – Établissement de la formule de PENMAN.

L'équation simplifiée du bilan d'énergie, appliquée à une surface évaporante de caractéristiques déterminées, et non limitée en eau, s'écrit :

$$(3) \text{ RN} = \text{Qh} + \text{ETP}$$

Par ailleurs, on a vu que Qh et ETP peuvent s'exprimer de la façon suivante :

$$(4) \text{ Qh} = \gamma f(u) (\text{Ts} - \text{Ta})$$

$$(5) \text{ ETP} = f(u) (\text{es} - \text{ea})$$

Cette dernière expression peut être transformée, en appelant Δ la pente de la courbe de tension de vapeur d'eau saturante au voisinage de la température T_a :

$$\Delta = \frac{e_s - E}{T_s - T_a}$$

E étant la tension de vapeur d'eau saturante à la température T_a (voir tableau 11).

L'expression (5) devient :

$$\begin{aligned} \text{ETP} &= f(u) [(e_s - E) + (E - e_a)] \\ \text{d'où (6) ETP} &= \Delta f(u) (T_s - T_a) + f(u) (E - e_a) \end{aligned}$$

Par ailleurs, en éliminant Q_h entre (3) et (4), on obtient :

$$\text{RN} - \text{ETP} = \gamma f(u) (T_s - T_a)$$

Et en portant dans (6) :

$$\begin{aligned} \text{ETP} &= \frac{\Delta}{\gamma} (\text{RN} - \text{ETP}) + f(u) (E - e_a) \\ \text{d'où (7) ETP} &= \frac{\Delta \text{RN} + \gamma f(u) (E - e_a)}{\Delta + \gamma} \end{aligned}$$

On convient d'appeler « pouvoir évaporant de l'air » la quantité $E_a = f(u) (E - e_a)$. C'est l'évaporation qui se produirait si la température de surface était égale à la température de l'air.

$$\text{ETP} = \frac{\Delta \text{RN} + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

RN et E_a étant exprimés dans la même unité que ETP (mm).

Cette expression montre que l'Évapotranspiration Potentielle est en fait la moyenne pondérée de deux termes :

- le premier, RN (rayonnement net) représente l'énergie radiative ;
- le second, E_a (pouvoir évaporant de l'air) représente l'énergie dite *advective* (ou indirecte).

Chacun de ces termes dépend essentiellement de paramètres climatiques. Cependant, RN dépend également de l'albedo, et E_a de la rugosité de la surface. *L'ETP est donc bien une donnée climatique, mais propre à la surface considérée.*

L'utilisation de la formule de PENMAN passe souvent par le calcul de l'évaporation E_o d'une nappe d'eau libre d'albedo 0,05, que l'on utilise alors comme référence pour l'étude de l'Évapotranspiration Potentielle de couverts végétaux.

4.1.2. – Calcul de l'ETP par la formule de PENMAN.

Ce calcul exige l'estimation préalable du rayonnement net RN et du pouvoir évaporant de l'air E_a ainsi que celle des coefficients Δ et γ .

4.1.2.1. – *Estimation du rayonnement net.*

Le rayonnement net RN est donné par l'expression :

$$RN = RG (1 - a) + RA - RT$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} RG = \text{rayonnement global}^* ; \\ a = \text{albedo} ; \\ RA = \text{rayonnement atmosphérique}^* ; \\ RT = \text{rayonnement terrestre}^* ; \end{array} \right.$

Il est donc nécessaire de déterminer RG, a, RA - RT.

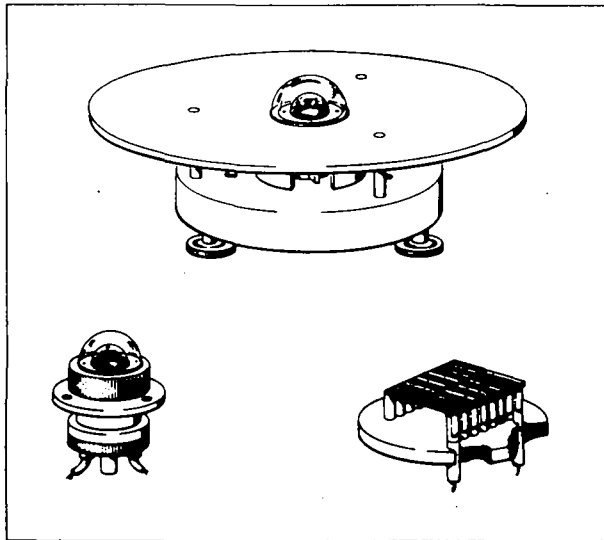
4.1.2.1.1. – *Détermination du rayonnement global RG.*

Rg peut être mesuré directement par un pyranomètre. À défaut de cette mesure, on l'estime à partir de la durée d'insolation mesurée à l'héliographe* de CAMPBELL ou solařimètre* (figure 6).

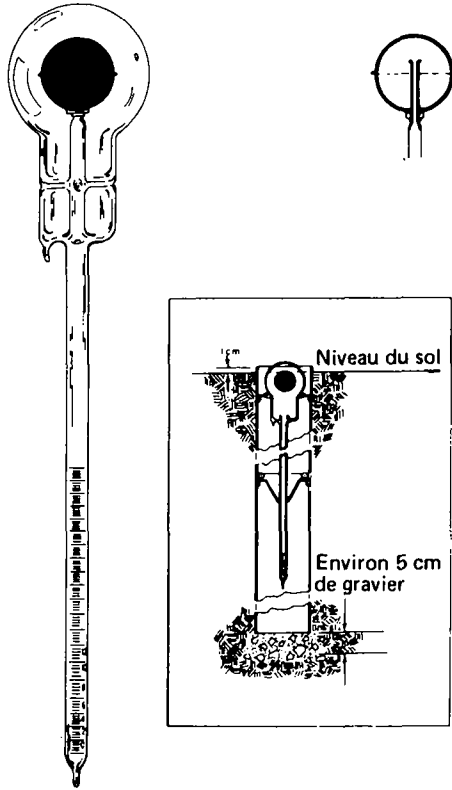
La formule d'estimation la plus couramment utilisée dans les régions tropicales est la formule de GLOVER et MAC CULLOCH :

$$RG = RGo (0,29 \cos \Phi + 0,52 h/H)$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} RGo = \text{rayonnement solaire qui atteindrait le sol en l'absence} \\ \text{d'atmosphère. C'est une donnée astronomique indépen-} \\ \text{dante du climat. Les tableaux 7a, 7b, 7c, 7d en four-} \\ \text{nissent les valeurs journalières en fonction de la période} \\ \text{de l'année et de la latitude, en calories/Cm}^2/\text{jour,} \\ \Phi = \text{latitude du lieu,} \\ h = \text{durée d'insolation réelle mesurée en heures,} \\ H = \text{durée d'insolation maximale théorique, c'est-à-dire la} \\ \text{durée du jour en heures. Sa valeur est fournie par les} \\ \text{tableaux 8a, 8b, 8c, 8d en fonction de la période de} \\ \text{l'année et de la latitude.} \end{array} \right.$



PYRANOMÈTRE THERMO-ÉLECTRIQUE



PYRANOMÈTRE BELLANI



HÉLIOGRAPHE CAMPBELL-STOKES
POUR ENREGISTREMENT DE L'INSOLATION

FIGURE 6. – Appareils de mesure de rayonnement global.

TABLEAU 7a. - VALEURS MOYENNES DÉCADAIRES DU RAYONNEMENT GLOBAL EXTRATERRESTRE RG EN CALORIES PAR CM² ET PAR JOUR (HÉMISPHERE NORD)

Latitude		2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
JANV.	1	829	808	787	764	742	718	694	668	643	617
	2	838	819	799	777	756	733	710	685	661	636
	3	851	833	815	795	776	754	732	709	687	663
FÉV.	1	864	849	833	816	798	779	760	739	718	696
	2	877	864	851	836	821	805	787	768	750	730
	3	885	876	865	853	841	827	812	796	780	762
MARS	1	891	885	877	868	858	847	835	821	808	793
	2	894	891	886	881	874	867	858	847	837	825
	3	893	892	892	889	887	883	877	870	864	855
AVR.	1	886	890	892	894	894	894	892	888	885	880
	2	876	883	889	893	897	899	901	901	901	899
	3	864	874	882	890	896	902	906	909	912	913
MAI	1	850	862	873	884	893	901	908	914	919	923
	2	837	851	864	876	887	898	907	915	923	929
	3	824	840	854	869	882	894	905	915	925	933
JUIN	1	814	831	847	863	877	890	903	914	925	935
	2	808	826	842	858	873	887	900	912	924	935
	3	807	825	841	857	872	886	899	911	923	933
JUIL.	1	810	827	843	858	873	886	899	910	922	932
	2	816	832	847	862	875	888	899	909	920	928
	3	827	841	854	867	879	889	900	908	916	923
AOÛT	1	839	851	862	873	882	891	898	904	911	915
	2	851	861	870	878	885	891	896	900	903	905
	3	863	870	876	881	885	888	890	890	891	890
SEPT.	1	872	876	879	882	882	882	881	878	875	871
	2	878	879	879	878	876	872	868	862	856	848
	3	881	879	875	870	865	858	851	841	832	822
OCT.	1	880	874	867	860	851	841	830	818	806	792
	2	875	866	856	845	833	820	807	791	776	759
	3	866	854	841	827	812	796	780	761	743	724
NOV.	1	855	840	825	807	790	772	752	731	711	689
	2	844	827	809	789	770	750	728	705	683	660
	3	834	815	795	775	753	731	707	683	660	634
DÉC.	1	826	806	785	762	740	716	692	667	642	616
	2	822	801	779	756	733	709	684	658	633	607
	3	823	802	780	756	734	709	685	659	633	606

TABLEAU 76. — VALEURS MOYENNES DÉCADAIRES DU RAYONNEMENT GLOBAL EXTRATERRESTRE RG EN CALORIES PAR CM² ET PAR JOUR (HÉMISPHERE NORD)

Latitude		22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
JANV.	1	590	563	535	507	479	450	421	392	363	334
	2	610	583	556	529	501	473	444	415	386	357
	3	638	613	587	561	534	507	479	451	422	394
FÉV.	1	673	649	625	601	575	549	522	495	468	440
	2	710	688	666	643	619	595	570	544	518	491
	3	744	725	704	683	662	639	616	592	567	542
MARS	1	777	761	743	724	705	684	663	641	619	595
	2	813	799	784	768	751	734	715	696	676	655
	3	846	835	824	811	798	783	768	751	734	716
AVR.	1	874	867	859	850	840	828	816	803	789	774
	2	896	892	887	882	874	866	857	847	837	825
	3	913	913	910	908	904	899	893	886	878	870
MAI	1	926	928	929	929	928	926	923	919	914	908
	2	935	939	943	945	947	947	947	946	943	940
	3	940	947	953	957	960	963	965	966	966	965
JUIN	1	943	951	958	964	969	974	977	979	981	982
	2	944	953	960	967	973	978	982	985	988	989
	3	943	952	959	966	972	977	981	985	987	989
JUIL.	1	940	948	955	962	967	971	975	978	979	980
	2	936	943	949	954	958	961	963	964	964	964
	3	929	934	938	941	943	944	944	943	942	939
AOÛT	1	919	921	923	923	923	922	919	916	912	906
	2	906	906	904	902	899	895	890	884	877	868
	3	888	885	880	875	869	862	853	844	834	822
SEPT.	1	865	859	851	843	833	823	811	799	786	771
	2	840	830	819	808	795	782	767	752	735	718
	3	810	797	784	769	753	737	719	701	682	662
OCT.	1	777	761	745	727	708	689	669	648	627	604
	2	742	723	704	684	663	641	618	595	572	547
	3	704	683	661	638	615	591	567	542	516	490
NOV.	1	667	644	620	596	571	545	518	492	465	437
	2	635	610	585	559	533	506	478	450	422	394
	3	609	583	556	529	502	474	445	417	388	359
DÉC.	1	590	563	535	507	479	452	422	393	364	335
	2	580	552	524	496	467	439	410	380	351	322
	3	579	552	524	495	467	438	409	380	350	321

TABLEAU 7c. - VALEURS MOYENNES DÉCADAIRES DU RAYONNEMENT GLOBAL EXTRATERRESTRE RG EN CALORIES PAR CM² ET PAR JOUR (HÉMISPHERE SUD)

Latitude		2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
JANV.	1	868	886	903	919	934	949	962	974	986	996
	2	874	891	907	922	936	949	961	971	981	990
	3	883	898	912	924	936	947	957	965	973	980
FÉV.	1	892	904	915	925	934	942	949	955	960	964
	2	898	908	916	923	929	934	938	941	943	944
	3	902	908	914	918	921	923	924	924	923	921
MARS	1	902	905	908	909	909	908	906	903	899	894
	3	898	898	898	895	892	887	882	876	868	860
	3	889	886	881	875	869	861	853	842	832	820
AVR.	1	876	869	861	852	842	831	819	806	793	778
	2	860	850	839	827	815	801	786	771	754	737
	3	842	829	816	802	786	770	753	735	716	697
MAI	1	823	809	793	776	759	740	721	702	681	660
	2	806	789	772	753	734	714	693	672	649	627
	3	790	771	752	732	712	691	669	646	623	599
JUIN	1	777	758	738	717	696	674	651	627	603	579
	2	771	751	731	709	687	665	642	618	593	568
	3	770	750	729	708	686	663	640	616	592	567
JUIL.	1	773	754	734	713	691	669	646	623	598	574
	2	782	763	744	724	703	682	660	637	614	590
	3	795	778	760	741	722	702	681	659	637	614
AOÛT	1	811	796	780	763	745	727	708	687	666	645
	2	828	815	801	786	771	754	737	718	700	680
	3	845	835	824	812	799	784	769	754	737	719
SEPT.	1	861	854	846	836	826	815	803	789	775	760
	2	874	869	864	858	851	843	833	823	812	799
	3	883	882	880	877	873	868	861	854	846	837
OCT.	1	888	890	892	892	891	890	887	883	877	871
	2	890	895	900	903	906	907	907	907	905	902
	3	887	896	904	911	917	922	925	928	929	930
NOV.	1	882	890	905	915	924	932	939	944	949	952
	2	876	890	904	916	928	933	947	956	963	969
	3	869	886	901	916	929	942	953	964	974	982
DEC.	1	864	882	899	915	930	944	957	969	980	991
	2	862	881	899	915	931	946	960	973	985	996
	3	863	882	899	916	932	947	961	974	987	998

TABLEAU 7d. - VALEURS MOYENNES DÉCADAIRES DU RAYONNEMENT GLOBAL EXTRATERRESTRE RG EN CALORIES PAR CM² ET PAR JOUR (HÉMISPHERE SUD)

Latitude		22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
JANV.	1	1005	1014	1021	1028	1033	1038	1041	1044	1045	1046
	2	998	1005	1011	1016	1020	1022	1024	1025	1025	1024
	3	985	990	993	996	997	997	997	995	992	989
FÉV.	1	966	968	969	968	967	964	961	956	950	944
	2	943	942	939	936	931	925	919	911	902	892
	3	918	913	908	901	894	885	875	865	853	841
MARS	1	888	880	872	862	852	840	828	814	800	784
	2	850	840	828	815	802	787	772	755	738	719
	3	807	793	779	763	746	729	710	691	671	650
AVR.	1	762	745	728	709	690	670	649	628	605	582
	2	718	700	680	659	637	615	593	569	545	520
	3	677	655	634	611	588	564	540	515	489	463
MAI	1	638	615	592	568	543	518	492	466	440	413
	2	603	579	555	530	504	478	452	425	398	371
	3	574	550	524	498	472	445	418	391	364	337
JUIN	1	554	528	502	476	449	422	395	368	340	313
	2	543	517	491	465	438	411	384	356	329	301
	3	541	516	489	463	436	409	382	354	327	300
JUIL.	1	549	523	498	471	445	418	390	363	336	308
	2	565	540	515	489	463	436	409	382	355	328
	3	590	566	542	517	491	465	439	412	385	358
AOÛT	1	623	600	577	553	528	503	478	452	425	399
	2	659	638	616	593	570	546	522	497	471	446
	3	701	682	661	641	619	597	574	551	526	502
SEPT.	1	744	727	710	691	672	652	631	609	587	564
	2	786	772	757	740	724	706	687	667	647	626
	3	826	815	803	789	775	760	744	727	709	690
OCT.	1	864	856	847	836	825	813	799	785	770	754
	2	898	893	887	880	872	863	853	841	829	816
	3	929	928	925	921	916	911	904	896	887	877
Nov.	1	955	957	957	957	955	953	949	944	939	932
	2	975	979	982	984	986	986	985	983	980	976
	3	990	996	1002	1006	1009	1012	1014	1014	1014	1013
DÉC.	1	1000	1008	1015	1022	1027	1031	1034	1036	1038	1038
	2	1006	1015	1023	1030	1037	1042	1046	1049	1052	1053
	3	1008	1017	1025	1033	1039	1044	1049	1052	1055	1056

TABLEAU 8a. - VALEURS MOYENNES DÉCAIDAIRES DE LA DURÉE DU JOUR EN HEURES ET DIXIÈMES D'HEURE (HÉMISPÈRE NORD)

		2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
JANV.	1	11.9	11.8	11.7	11.6	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0	10.8
	2	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.1	11.0	10.9
	3	11.9	11.8	11.7	11.7	11.5	11.4	11.4	11.3	11.2	11.0
FÉV.	1	11.9	11.8	11.8	11.7	11.6	11.5	11.5	11.4	11.3	11.2
	2	11.9	11.9	11.8	11.8	11.7	11.6	11.6	11.5	11.4	11.4
	3	12.0	11.9	11.9	11.8	11.8	11.7	11.7	11.6	11.6	11.5
MARS	1	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.7	11.7	11.7
	2	12.0	12.0	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
	3	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	
AVR.	1	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3
	2	12.0	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.4	12.5
	3	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.4	12.5	12.6	12.7
MAI	1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.6	12.7	12.8
	2	12.1	12.2	12.3	12.3	12.5	12.6	12.7	12.7	12.8	13.0
	3	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	13.0	13.1
JUIN	1	12.1	12.2	12.3	12.4	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.2
	2	12.1	12.2	12.3	12.4	12.6	12.7	12.8	13.0	13.1	13.2
	3	12.1	12.2	12.3	12.4	12.6	12.7	12.8	13.0	13.1	13.2
JUIL.	1	12.1	12.2	12.3	12.4	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.2
	2	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.8	12.9	13.0	13.1
	3	12.1	12.2	12.3	12.3	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0
AOÛT	1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9
	2	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7
	3	12.0	12.1	12.2	12.2	12.3	12.3	12.4	12.4	12.5	12.5
SEPT.	1	12.0	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3
	2	12.0	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	3	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
OCT.	1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8
	2	12.0	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.7	11.6	11.6	11.6
	3	11.9	11.9	11.8	11.8	11.7	11.6	11.6	11.5	11.5	11.4
NOV.	1	11.9	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.5	11.4	11.3	11.2
	2	11.9	11.8	11.7	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1
	3	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	10.9
DÉC.	1	11.9	11.8	11.7	11.6	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0	10.9
	2	11.9	11.8	11.7	11.6	11.4	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8
	3	11.9	11.8	11.7	11.6	11.4	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8

TABLEAU 8b. - VALEURS MOYENNES DÉCADAIRES DE LA DURÉE DU JOUR EN HEURES ET DIXIÈMES D'HEURES (HÉMISPHERE NORD)

Latitude		22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
JANV.	1	10.7	10.6	10.4	10.3	10.1	10.0	9.8	9.7	9.5	9.3
	2	10.8	10.7	10.6	10.4	10.3	10.1	10.0	9.8	9.7	9.5
	3	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.2	10.1	9.9	9.8
FÉV.	1	11.1	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.3	10.2
	2	11.3	11.2	11.2	11.1	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5
	3	11.5	11.4	11.4	11.3	11.3	11.2	11.1	11.1	11.0	10.9
MARS	1	11.7	11.6	11.6	11.6	11.5	11.5	11.5	11.4	11.4	11.3
	2	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
	3	12.1	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2
AVR.	1	12.3	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.5	12.6	12.6	12.7
	2	12.5	12.6	12.6	12.7	12.8	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1
	3	12.7	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5
MAI	1	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.8	13.9
	2	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.8	13.9	14.1	14.2
	3	13.2	13.3	13.4	13.6	13.7	13.9	14.0	14.2	14.3	14.5
JUIN	1	13.3	13.4	13.6	13.7	13.8	14.0	14.2	14.3	14.5	14.7
	2	13.3	13.5	13.6	13.8	13.9	14.1	14.3	14.4	14.6	14.8
	3	13.3	13.5	13.6	13.8	13.9	14.1	14.3	14.4	14.6	14.8
JUIL.	1	13.3	13.4	13.6	13.7	13.9	14.0	14.2	14.4	14.6	14.8
	2	13.2	13.3	13.5	13.6	13.8	13.9	14.1	14.2	14.4	14.6
	3	13.1	13.2	13.3	13.5	13.6	13.7	13.8	14.0	14.1	14.3
AOÛT	1	12.9	13.0	13.1	13.2	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	14.0
	2	12.8	12.9	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6
	3	12.6	12.6	12.7	12.8	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2
SEPT.	1	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.6	12.6	12.7	12.7	12.8
	2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
	3	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
OCT.	1	11.7	11.7	11.7	11.7	11.6	11.6	11.6	11.5	11.5	11.5
	2	11.5	11.5	11.4	11.4	11.3	11.3	11.2	11.2	11.1	11.0
	3	11.3	11.3	11.2	11.1	11.0	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6
Nov.	1	11.1	11.0	11.0	10.9	10.8	10.7	10.5	10.4	10.3	10.2
	2	11.0	10.9	10.8	10.6	10.5	10.4	10.3	10.1	10.0	9.8
	3	10.8	10.7	10.6	10.5	10.3	10.2	10.0	9.9	9.7	9.5
DÉC.	1	10.7	10.6	10.5	10.3	10.2	10.0	9.9	9.7	9.5	9.3
	2	10.7	10.5	10.4	10.2	10.1	9.9	9.8	9.6	9.4	9.2
	3	10.7	10.5	10.4	10.2	10.1	9.9	9.7	9.6	9.4	9.2

TABLEAU 8c. - VALEURS MOYENNES DÉCAIRES DE LA DURÉE DU JOUR EN HEURES ET DIXIÈMES D'HEURE (HÉMISPÈRE SUD)

		2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16°	18°	20°
JANV.	1	12.1	12.2	12.4	12.4	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.2
	2	12.1	12.2	12.4	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	13.0	13.1
	3	12.1	12.2	12.3	12.4	12.5	12.6	12.6	12.7	12.8	13.0
FÉV.	1	12.1	12.2	12.3	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7	12.8
	2	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.4	12.5	12.6	12.6
	3	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3	12.4	12.4	12.5
MARS	1	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3
	2	12.0	12.0	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
	3	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
AVR.	1	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.8	11.7	11.7
	2	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.7	11.7	11.6	11.6	11.5
	3	11.9	11.9	11.8	11.7	11.7	11.6	11.6	11.5	11.4	11.3
MAI	1	11.9	11.8	11.7	11.7	11.6	11.5	11.4	11.4	11.3	11.2
	2	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.3	11.2	11.0
	3	11.9	11.8	11.6	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.0	10.9
JUIN	1	11.9	11.8	11.6	11.6	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0	10.8
	2	11.9	11.8	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	10.9	10.8
	3	11.9	11.8	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	10.9	10.8
JUIL.	1	11.9	11.8	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0	10.8
	2	11.9	11.8	11.6	11.6	11.5	11.4	11.2	11.1	11.0	10.9
	3	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0
AOÛT	1	11.9	11.8	11.7	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1
	2	11.9	11.9	11.8	11.7	11.7	11.6	11.5	11.5	11.4	11.3
	3	11.9	11.9	11.8	11.8	11.7	11.7	11.6	11.6	11.5	11.5
SEPT.	1	12.0	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.8	11.7	11.7	11.7
	2	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
	3	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
OCT.	1	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2
	2	12.0	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3	12.4	12.4
	3	12.1	12.1	12.2	12.2	12.3	12.4	12.4	12.5	12.5	12.6
NOV.	1	12.1	12.1	12.3	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6	12.7	12.8
	2	12.1	12.2	12.3	12.4	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9
	3	12.1	12.2	12.4	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.1
DÉC.	1	12.1	12.2	12.4	12.4	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.1
	2	12.1	12.2	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.1	13.2
	3	12.1	12.2	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.1	13.2

TABLEAU 8d. — VALEURS MOYENNES DÉCADAIRES DE LA DURÉE DU JOUR EN HEURES ET DIXIÈMES D'HEURE (HÉMISPHERE SUD)

		22°	24°	26°	28°	30°	32°	34°	36°	38°	40°
JANV.	1	13.3	13.4	13.6	13.7	13.9	14.0	14.2	14.3	14.5	14.7
	2	13.2	13.3	13.4	13.6	13.7	13.9	14.0	14.2	14.3	14.5
	3	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.8	13.9	14.1	14.2
FÉV.	1	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8
	2	12.7	12.8	12.8	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5
	3	12.5	12.6	12.6	12.7	12.7	12.8	12.9	12.9	13.0	13.1
MARS	1	12.3	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.5	12.6	12.6	12.7
	2	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2
	3	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8
AVR.	1	11.7	11.6	11.6	11.6	11.5	11.5	11.5	11.4	11.4	11.3
	2	11.5	11.4	11.4	11.3	11.2	11.2	11.1	11.0	11.0	10.9
	3	11.3	11.2	11.1	11.0	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5
MAI	1	11.1	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.2	10.1
	2	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4	10.2	10.1	9.9	9.8
	3	10.8	10.7	10.6	10.4	10.3	10.1	10.0	9.8	9.7	9.5
JUIN	1	10.7	10.6	10.4	10.3	10.2	10.0	9.8	9.7	9.5	9.3
	2	10.7	10.5	10.4	10.2	10.1	9.9	9.7	9.6	9.4	9.2
	3	10.7	10.5	10.4	10.2	10.1	9.9	9.7	9.6	9.4	9.2
JUIL.	1	10.7	10.6	10.4	10.3	10.1	10.0	9.8	9.6	9.4	9.2
	2	10.8	10.7	10.5	10.4	10.2	10.1	9.9	9.8	9.6	9.4
	3	10.9	10.8	10.7	10.5	10.4	10.3	10.2	10.0	9.9	9.7
AOÛT	1	11.1	11.0	10.9	10.8	10.6	10.5	10.4	10.3	10.2	10.0
	2	11.2	11.1	11.1	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.4
	3	11.4	11.4	11.3	11.2	11.2	11.1	11.0	11.0	10.9	10.8
SEPT.	1	11.6	11.6	11.6	11.5	11.5	11.4	11.4	11.3	11.3	11.2
	2	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
	3	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
OCT.	1	12.3	12.3	12.3	12.3	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.5
	2	12.5	12.5	12.6	12.6	12.7	12.7	12.8	12.8	12.9	13.0
	3	12.7	12.7	12.8	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4
NOV.	1	12.9	13.0	13.0	13.1	13.2	13.3	13.5	13.6	13.7	13.8
	2	13.0	13.1	13.2	13.4	13.5	13.6	13.7	13.9	14.0	14.2
	3	13.2	13.3	13.4	13.5	13.7	13.8	14.0	14.1	14.3	14.5
DÉC.	1	13.3	13.4	13.5	13.7	13.8	14.0	14.1	14.3	14.5	14.7
	2	13.3	13.5	13.6	13.8	13.9	14.1	14.2	14.4	14.6	14.8
	3	13.3	13.5	13.6	13.8	13.9	14.1	14.3	14.4	14.6	14.8

4.1.2.1.2. – *Détermination de l'albedo a.*

La valeur de l'albedo généralement retenue pour le calcul de l'Évapotranspiration Potentielle est de 20%.

4.1.2.1.3. – *Détermination du rayonnement de courte longueur d'onde RA – RT.*

Le rayonnement de courte longueur d'onde peut être estimé par la formule de BRUNT :

$$RA - RT = - q \sigma T^4$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \text{température en } ^\circ \text{ Kelvin} \\ \sigma = \text{constante de STEPHAN} = 1,19 \cdot 10^{-7} \text{ cal/cm}^2/\text{jour;} \\ q = (0,56 - 0,092 \sqrt{ea}) (0,10 + 0,90 \text{ h/H}). \end{array} \right.$$

ea étant la tension moyenne de vapeur d'eau dans l'air, en mm de mercure.

En Afrique centrale, RIOU (« La détermination pratique de l'évaporation » ORSTOM, 1975) préconise l'utilisation d'une formule d'estimation de q légèrement différente, mieux adaptée aux climats africains :

$$q = (0,40 - 0,05 \sqrt{ea}) (0,50 + 0,50 \text{ h/H}).$$

Il existe également un appareil permettant de mesurer la totalité du rayonnement entre 0,2 et 100 microns de longueur d'onde : le pyrromètre. Les mesures simultanées du rayonnement total descendant (RG + RA) et ascendant (aRG + RT) au moyen d'un pyrromètre différentiel, ou bilanmètre, permettent d'obtenir une valeur directe du rayonnement net. Cette mesure est jusqu'ici très rarement effectuée.

Remarque : La valeur obtenue pour le rayonnement net est en calories/cm²/jour. Elle doit ensuite être convertie en mm d'évaporation (1 mm d'évaporation équivaut à 59 cal/cm²).

On aura donc, en mm/jour :

$$RN = \frac{1}{59} [(1 - a) RG - q \sigma T^4]$$

4.1.2.2. – *Estimation du pouvoir évaporant de l'air.*

Rappelons la formule :

$$Ea = f(u) (E - ea)$$

Le déficit de saturation (E – ea) de l'air étant exprimé en mm de mercure, la fonction f(u) a été déterminée empiriquement :

$$f(u) = 0,35 (1 + 0,54 u)$$

u étant la vitesse du vent en m/s, mesurée à 2 m du sol.

4.1.2.3. – Valeurs des coefficients Δ et γ .

Les valeurs du coefficient Δ en fonction de la température sont fournies dans le tableau 9.

t	Δ	t	Δ	t	Δ
0	0,33	10	0,62	20	1,09
1	0,36	11	0,65	21	1,15
2	0,38	12	0,69	22	1,21
3	0,40	13	0,73	23	1,27
4	0,43	14	0,78	24	1,35
5	0,46	15	0,82	25	1,42
6	0,48	16	0,87	26	1,49
7	0,52	17	0,92	27	1,57
8	0,55	18	0,97	28	1,66
9	0,58	19	1,03	29	1,74

TABLEAU 9. – VALEUR DE Δ (EN MM DE MERCURE PAR °C) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE t (en °C)

Quant au coefficient γ qui est appelé constante psychrométrique, il varie peu avec la température; sa valeur moyenne est 0,485 mm de mercure/°C.

Il est toujours intéressant, dans le cadre d'un projet d'irrigation, d'avoir une estimation de l'ETP par la formule de Penman.

4.1.3. – Calcul de l'ETP par la formule de PENMAN avec des données manquantes.

Il arrive souvent que certaines données climatiques ne sont pas disponibles pour permettre le calcul de l'ETP par la formule de PENMAN. Dans ce cas, on peut avoir recours aux artifices suivants :

– si la mesure du vent fait défaut, il est possible de calculer une fourchette de l'ETP mensuelle, en prenant les valeurs maximale et minimale estimées du vent.

– si le vent prend des valeurs trop importantes, la fourchette de l'ETP devient trop large et l'intérêt du calcul précédent est moindre; on peut alors estimer la vitesse du vent u à partir de l'évaporation Piche Ep, il s'agit de l'évaporation sous abri d'un disque de papier-filtre de 30 mm de diamètre maintenu à saturation au moyen d'un tube de verre rempli d'eau (figure 10).

En effet on a la formule suivante :

$$E_p = 0,59 (t - t_m) u$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} E_p = \text{Évaporation Piche en mm,} \\ t = \text{température de l'air en } ^\circ\text{C,} \\ t_m = \text{température sous abri du thermomètre mouillé,} \\ u = \text{vitesse du vent à 2 m du sol en m/s.} \end{array} \right.$

Connaissant E_p , t et t_m , on en déduit l'estimation de u :

– si l'on dispose de mesures d'évaporation par bac Colorado (bac enterré), l'estimation de la fonction $f(u)$ peut se faire par la formule :

$$f(u) = \frac{E_{\text{bac}}}{e_s - e_a}$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{bac}} : \text{évaporation sur bac en mm,} \\ e_s = \text{tension de vapeur d'eau au niveau de la surface en mm} \\ \text{de mercure,} \\ e_a = \text{tension de vapeur d'eau dans l'air en mm de mercure.} \end{array} \right.$

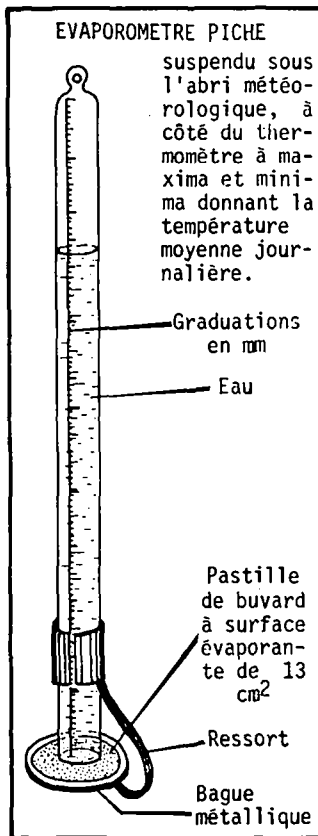


FIGURE 10.

TABLEAU 11. – TENSION MAXIMALE DE VAPEUR D'EAU E EN MM DE MERCURE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Température en °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10°	9,165	9,227	9,288	9,350	9,412	9,474	9,537	9,601	9,665	9,738
11	9,792	9,857	9,923	9,989	10,054	10,120	10,187	10,255	10,322	10,389
12	10,457	10,526	10,596	10,665	10,734	10,804	10,875	10,947	11,019	11,090
13	11,162	11,235	11,309	11,383	11,456	11,530	11,605	11,681	11,757	11,832
14	11,908	11,986	12,064	12,142	12,220	12,298	12,378	12,458	12,538	12,619
15	12,699	12,781	12,864	12,947	13,029	13,112	13,197	13,281	13,366	13,451
16	13,536	13,623	13,710	13,797	13,885	13,972	14,062	14,151	14,241	14,331
17	14,421	14,513	14,605	14,697	14,790	14,882	14,977	15,072	15,167	15,262
18	15,357	15,454	15,552	15,650	15,747	15,845	15,945	16,045	16,145	16,246
19	16,346	16,449	16,552	16,655	16,758	16,861	16,967	17,073	17,179	17,285
20	17,391	17,500	17,608	17,717	17,826	17,935	18,047	18,159	18,271	18,285
21	18,495	18,610	18,724	18,839	18,954	19,069	19,187	19,305	19,423	19,541
22	19,659	19,780	19,901	20,022	20,143	20,265	20,389	20,514	20,639	20,763
23	20,888	21,016	21,144	21,272	21,400	21,528	21,659	21,790	21,921	22,053
24	22,184	22,319	22,453	22,588	22,723	22,858	22,996	23,135	23,273	23,411
25	23,550	23,692	23,834	23,976	24,119	24,261	24,406	24,552	24,697	24,842
26	24,988	25,138	25,288	25,438	25,588	25,738	25,891	26,045	26,198	26,351
27	26,505	26,663	26,820	26,978	27,136	27,294	27,455	27,617	27,778	27,939
28	28,101	28,267	28,433	28,599	28,765	28,931	29,101	29,271	29,441	29,612
29	29,782	29,956	30,131	30,305	30,479	30,654	30,833	31,011	31,190	31,369
30	31,548	31,729	31,911	32,094	32,278	32,463	32,650	32,837	33,026	33,215
31	33,406	33,596	33,787	33,980	34,174	34,368	34,564	34,761	34,959	35,159
32	35,359	35,559	35,760	35,962	36,165	36,370	36,576	36,783	36,991	37,200
33	37,410	37,621	37,832	38,045	38,258	38,475	38,689	38,906	39,124	39,344
34	39,565	39,786	40,007	40,230	40,455	40,680	40,907	41,135	41,364	41,595
35	41,827	42,059	42,293	42,527	42,763	43,000	43,238	43,477	43,717	43,959
36	44,201	44,445	44,690	44,936	45,183	45,431	45,681	45,932	46,184	46,437
37	46,691	46,947	47,203	47,462	47,721	47,981	48,243	48,506	48,770	49,035
38	49,302	49,570	49,839	50,110	50,382	50,655	50,929	51,205	51,481	51,759
39	52,039	52,320	52,602	52,885	53,170	53,456	53,743	54,032	54,322	54,613
40	54,006	55,200	55,496	55,793	56,091	56,391	56,692	56,994	57,298	57,683

– Enfin si c'est la mesure du *rayonnement global* qui manque, ou si l'on ne peut pas faire d'estimation à partir de la durée d'insolation, on peut utiliser les cartes de J. N. BLACK qui donnent sur toute la surface du globe les valeurs moyennes mensuelles du rayonnement global; ce sont des cartes à très petite échelle, mais la variabilité spatiale de cette

donnée est bien moindre que celle de la température, du vent ou de l'humidité ; elles sont donc utilisables pour les calculs au niveau d'une grande région, et pour des valeurs normales*.

4.1.4. – Conclusion.

Si la formule de PENMAN est l'une de celles qui donnent universellement les meilleures approximations de l'ETP, elle est aussi celle qui reproduit le plus fidèlement les variations saisonnières de cette donnée.

Cependant le grand nombre de données climatiques nécessaires pour la calculer en limite l'emploi. De plus, certaines approximations sont nécessaires au cours du calcul, qui en limitent la précision. Enfin, l'application de cette formule à différents types de cultures exigerait d'adopter différentes valeurs d'albedo* et de rugosité* ; la non connaissance de ces paramètres est une source importante d'imprécision.

Enfin, notons que les résultats obtenus sont d'autant plus précis que le pas de temps choisi est court.

Remarque.

J. DOORENBOS et W. O. PRUITT (« Les besoins en eau des cultures », *Bulletin d'irrigation et de drainage*, n° 24 – F.A.O. 1975) proposent une modification de la formule de PENMAN qui tient compte des variations des conditions climatiques entre le jour et la nuit. En effet, en calculant l'ETP à partir des valeurs moyennes des différents paramètres climatiques, le résultat est généralement sous-estimé, particulièrement dans le cas où le rayonnement solaire est élevé, et où les vents s'atténuent fortement au cours de la nuit.

La formule proposée est du type :

$$ETP = C. \frac{\Delta RN + \gamma fl(u)(E - ea)}{\Delta + \gamma}$$

C paramètre variable avec le rayonnement solaire, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent diurne et nocturne, fl(u) fonction du vent révisée.

Enfin, la simplicité de l'expression générale de la formule de PENMAN a pu susciter la réflexion pour la mise au point de formules dérivées, mais nécessitant moins d'informations climatologiques, telle la formule de la Météorologie Nationale en France, exposée plus loin, mise au point par P. BROCHET et N. GERBIER.

4.2. – FORMULES EMPIRIQUES

Un très grand nombre de formules empiriques ont été mises au point pour le calcul de l'ETP. La démarche générale consiste à rassembler des valeurs d'ETP mesurées en évapotranspiromètre*, ou estimées par

des méthodes fines, et à les corrélérer avec des facteurs climatiques facilement accessibles. Beaucoup de ces formules ne sont vraiment utilisables que pour des climats analogues à celui des zones où elles ont été mises au point. D'autres peuvent prétendre à une plus large utilisation. Nous présentons ci-dessous celles qui sont le mieux adaptées aux climats tropicaux.

4.2.1. – Formules basées sur le rayonnement global.

Dans la plupart des cas le rayonnement global* est le facteur qui pèse le plus dans l'évaluation de l'ETP. C'est en effet la principale source d'énergie directe, et il est facilement compréhensible que la corrélation entre ETP et rayonnement global soit généralement bonne.

Tout particulièrement sous climat tropical, où la part advective est relativement faible, vis-à-vis de la part radiative, les estimations à partir du rayonnement global donnent des résultats très fiables.

Les coefficients sont cependant différents selon les climats :

– À Brazzaville par exemple, sous climat équatorial*, on a :

$$ETP = 0,45 \left(\frac{RG}{L} \right) \quad r = 0,99$$

Le rayonnement global étant exprimé en cal/cm², et L étant la chaleur latente de vaporisation de l'eau (L = 59 cal/cm²/mm d'eau), le terme $\left(\frac{RG}{L} \right)$ est l'expression du rayonnement global converti en mm d'évaporation.

– À N'Djaména, sous climat sahélien*, on a une corrélation moins bonne, et l'ajustement pendant les mois les plus secs est de la forme :

$$ETP = 0,70 \left(\frac{RG}{L} \right)$$

Ces résultats sont à rapprocher de l'analyse théorique de BOUCHET qui, à partir de l'étude du bilan d'énergie, a montré que, à quelques approximations près, l'ETP est une fraction du rayonnement global d'autant plus forte que le climat est plus sec :

$$0,5 (1 - a) \left(\frac{RG}{L} \right) \leq ETP \leq (1 - a) \left(\frac{RG}{L} \right)$$

Ce qui donne, en prenant un albedo de 0,20 :

$$0,4 \left(\frac{RG}{L} \right) \leq ETP \leq 0,8 \left(\frac{RG}{L} \right)$$

et, en exprimant RG en cal/cm² :

$$0,0065 RG \leq ETP \leq 0,013 RG$$

La borne inférieure est atteinte lorsque $ETR = ETP$ (climats équatoriaux, saison humide). La borne supérieure est atteinte lorsque $ETR = 0$ (climats sahéliens* en saison sèche ou climat désertique*).

Une formule un peu plus élaborée a été proposée par MAKKINK, qui, en s'inspirant de la formule de PENMAN, introduit le paramètre

$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$ dépendant de la température.

$$ETP = 0,61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{RG}{L} - 0,12$$

(en mm/jour)

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<i>Rayonnement global en cal/cm²/jour</i>												
N'DJAMENA	493	565	608	597	588	556	512	473	525	557	534	507
BANGUI	362	419	457	471	457	411	357	388	417	416	414	382
BRAZZAVILLE	388	441	470	464	375	303	273	328	382	388	414	385
<i>Rayonnement net en cal/cm²/jour</i>												
N'DJAMENA	192	234	276	306	322	307	298	286	312	286	224	189
BANGUI	163	216	258	276	256	223	190	216	246	234	227	184
BRAZZAVILLE	215	258	285	273	204	143	120	156	193	212	238	217

TABLEAU 12. — VALEURS NORMALES DU RAYONNEMENT GLOBAL ET DU RAYONNEMENT NET DE 3 STATIONS AFRICAINES :

N'DJAMENA	(12° lat. Nord)	1957 – 1963 et 1967 – 1969;
BANGUI	(4° lat. Nord)	1960 – 1961 et 1969 – 1971;
BRAZZAVILLE	(4° lat. Sud)	1968 – 1971.

4.2.2. — Formules basées sur la température.

L'une des méthodes les plus anciennes d'estimation de l'ETP est la *formule de THORNTHWAITTE*, mise au point à partir de nombreuses mesures en cases lysimétriques* ; elle ne fait intervenir que la température et la durée du jour. Nous ne l'exposerons pas ici en détail, car avec un calcul plus complexe, elle n'est pas beaucoup plus précise que la *formule de BLANEY – CRIDDLE* dont l'expression originale est :

$$ETP = K \cdot t_F \cdot P$$

avec :

- ⎧ K coefficient dépendant de la culture et de la zone climatique;
- ⎧ t_F température en degrés Fahrenheit (° F);
- ⎧ P rapport de la durée du jour pendant la période considérée à la durée du jour pour l'année entière.

ETP est alors exprimé en pouces par jour.

On remarque d'abord que la formule de BLANEY – CRIDDLE donne

en fait la mesure de l'ETM, puisque des coefficients différents ont été établis pour chaque culture. On remarque ensuite que si, apparemment, la température est la seule donnée météorologique nécessaire, le coefficient K, variable, permet d'adapter la formule à des climats différents.

Nous ne détaillerons pas ici les variations de ce coefficient K, qui fait double emploi avec les coefficients culturaux exposés dans la 3^e partie de ce chapitre. Nous nous contenterons de donner la méthode pour calculer l'expression de BLANEY – CRIDDLE en unités métriques, pour des conditions climatiques moyennes (ni trop arides, ni trop ventées...), et pour des conditions de végétation correspondant à l'ETP (culture fourragère basse, homogène). On a alors :

$$K = 0,8;$$

$$t_F = 32 + 1,8 t \text{ (t en } ^\circ \text{ Celsius);}$$

$$P = H/4400;$$

H = étant la durée du jour en heures pendant la période considérée, et 4400 le nombre total d'heures de jour pendant l'année, nombre qui varie peu avec la latitude.

Ce qui donne, en exprimant ETP en mm (1 pouce = 25,4 mm).

$$ETP = 25,4 \cdot 0,8 \cdot (32 + 1,8 t) H/4400$$

$$\text{soit ETP} = (15 + 0,84 t) H/100$$

(en mm/jour)

La durée du jour H, exprimée en heures, est donnée en fonction de la latitude et de la période de l'année par le tableau 8 (voir ci-dessus).

Remarque.

La formule de BLANEY – CRIDDLE a tendance à sous-estimer les fortes ETP. Elle sous-estime particulièrement la demande climatique dans les zones arides ou semi-arides, en ne tenant pas compte de l'accroissement de l'ETP due aux phénomènes advectifs.

Diverses approches ont été entreprises pour corriger les valeurs obtenues par cette formule et, ainsi lui permettre une application plus large. Citons en particulier celle de J. DOORENBOS et W. O. PRUITT (« Les besoins en eau des cultures », *Bulletin d'irrigation et de drainage* n° 24, F.A.O. 1975), qui proposent des abaques différents selon les conditions d'humidité de l'air, de vent, et d'insolation relative.

Conclusion.

L'emploi de la formule de BLANEY – CRIDDLE sera réservé aux cas où l'on ne dispose d'aucune estimation des paramètres climatiques autres que la température. En effet, la connaissance d'un ou deux facteurs de plus permet d'utiliser des formules plus précises telles celles de TURC (cf. ci-dessous) ou de PENMAN.

4.2.3. – Formules basées sur la température et le rayonnement global (TURC).

La formule de TURC a été mise au point par ce chercheur à partir de l'étude de bilans hydriques de nombreux bassins versants dans le monde entier. C'est donc une formule qui vise une *estimation régionale de l'évapotranspiration*.

– Une première formule estime l'ETR au niveau décadaire, sur sol nu :

$$\text{ETR (mm/décade)} = \frac{P + a}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l}\right)^2}}$$

avec :

- P = précipitations décadaires (mm);
- a = réserve d'eau du sol susceptible d'être utilisée au cours de la décade (mm);
- l = facteur héliothermique : c'est la limite supérieure de l'évaporation (lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant) :

$$l = \frac{(t + 2) \sqrt{RG}}{16}$$

Pour tenir compte de la végétation, TURC introduit un « facteur végétation » V , égal à la quantité d'eau perdue par cette dernière. Deux formules différentes (que nous ne détaillerons pas ici) permettent d'estimer V . On a alors :

$$\text{ETR (mm/décade)} = \frac{P + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l} + \frac{V}{2l}\right)^2}}$$

– Une deuxième formule estime l'ETP qui est définie comme la valeur maximale de l'ETR pour toutes les cultures possibles d'une station donnée. Son expression est la suivante :

- Si l'humidité de l'air est supérieure à 50% :

$$\text{ETP (mm/décade)} = C \frac{t}{t + 15} (RG + 50)$$

- Si l'humidité de l'air est inférieure à 50% :

$$\text{ETP (mm/décade)} = C \frac{t}{t + 15} (RG + 50) \left(1 + \frac{50 - HR}{70}\right)$$

avec :

- t = température moyenne de l'air, mesurée sous abri, pendant la période considérée (en ° Celsius);
- RG = rayonnement global, qui peut être estimé par la formule de GLOVER et MAC CULLOCH;

$$\text{avec : } \left\{ \begin{array}{l} \text{RG} = \text{RGo} (0,29 \cos \Phi + 0,52 \text{ h/H}) \text{ (voir les paragraphes pré-} \\ \text{cédents)}; \\ \text{HR} = \text{humidité relative de l'air mesurée en \%}; \\ \text{C} = \text{coefficient égal à } 0,13 \text{ pour une estimation décadaire et} \\ \text{à } 0,40 \text{ pour une estimation mensuelle.} \end{array} \right.$$

La formule de TURC peut donc se calculer facilement à partir de deux variables météorologiques : la température et la durée d'insolation.

Remarque.

Le coefficient de correction pour les faibles humidités de l'air a été introduit après coup, et n'est pas très précis, bien qu'il puisse entraîner d'assez fortes majorations. On évitera donc l'emploi de cette formule dans les régions où le déficit de saturation reste fort pendant une grande partie de l'année. À l'inverse, sous climat équatorial, on peut aboutir à une surestimation qui peut atteindre 20%. Signalons enfin, que si *les résultats sont généralement bons à une échelle régionale*, on a, pour des études très localisées, une forte sous-estimation lorsque le vent est fort.

4.2.4. – Formule de la Météorologie Nationale.

L'expression de la formule de PENMAN fait apparaître, on l'a vu, que la valeur de l'ETP peut se décomposer en :

$$\begin{array}{l} - \text{ une part radiative : } \frac{\Delta \text{ RN}}{\Delta + \gamma} \\ - \text{ une part advective : } \frac{\gamma \text{ Ea}}{\Delta + \gamma} \end{array}$$

Ces deux composantes répondent différemment aux variations du climat, comme le montre la figure 13 : à N'Djaména (climat sahélien), la part advective est plus importante qu'à Brazzaville (climat équatorial); par contre les variations de la part radiative au cours de l'année sont dans les deux cas, plus importantes que celles de la part advective.

D'une manière assez constante, on remarque que :

– La part radiative varie peu dans l'espace (du moins à l'échelle de quelques dizaines de kilomètres), mais son estimation nécessite un appareillage plus coûteux ou plus compliqué (pyranomètre ou héliographe).

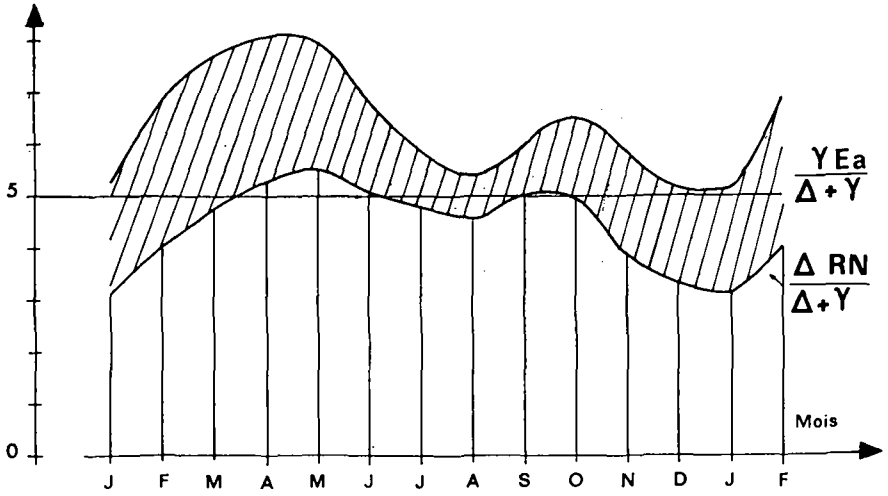
– La part advective est soumise à des influences locales qui peuvent être plus ou moins accentuées en des points très voisins; les différences dans l'espace peuvent donc être importantes, mais son estimation est beaucoup plus accessible par des moyens simples (évaporomètre de Piche, hygromètre...).

En partant de ces constatations, l'idée développée par P. BROCHET et N. GERBIER (Météorologie Nationale – Paris – 1974), est que l'on

peut aboutir à une estimation précise de l'ETP en évaluant séparément les deux fractions.

ETP

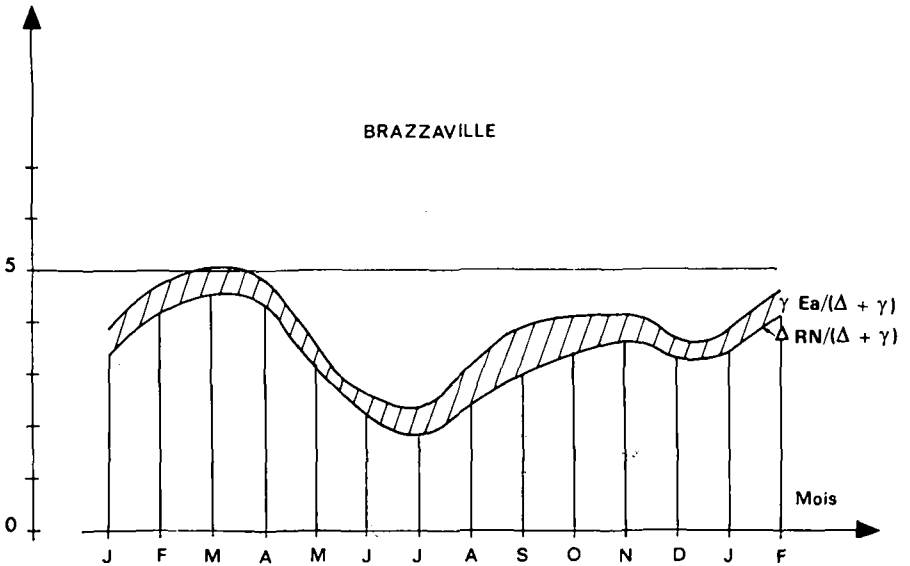
mm / jour



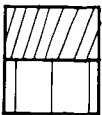
FORT-LAMY

ETP

mm / jour



BRAZZAVILLE



Terme advectif

Terme radiatif

FIGURE 13. - Part respective des deux termes de la formule de PENMAN ($a = 0,05$).

La part radiative peut être estimée à partir du rayonnement global RG.

La part advective peut être estimée soit à partir de l'Évaporation Piche E_p , soit à partir du déficit de saturation de l'air ($E - e_a$) et de la vitesse du vent (u).

L'expression mise au point par BROCHET et GERBIER est finalement :

$$\text{soit (1) } ETP = m \text{ RG} + n \text{ Ep}$$

$$\text{soit (2) } ETP = m \text{ RG} + p \text{ f}(u) (E - e_a)$$

1^{re} expression :

$$ETP = m \text{ RG} + n \text{ Ep}$$

avec :

- RG = rayonnement global en calories/cm², qui peut être estimé à partir de la formule de GLOVER et MAC CULLOCH ;
- RG = RGo ($0,29 \cos \Phi + 0,52 \text{ h}/\text{H}$) (voir précédemment) ;
- Ep = évaporation Piche en mm ;
- m = coefficient dépendant du lieu et de la période de l'année ;
- n = coefficient dépendant du type d'abri.

La formule de la Météorologie Nationale a d'abord été conçue pour l'estimation de l'ETP en France ; par conséquent l'estimation statistique des coefficients m et n a d'abord été faite pour la France. Cette estimation a permis de mettre en évidence que :

– la variation saisonnière de m est très marquée. Par contre, sa variation dans l'espace est assez limitée, et l'on adopte, pour la latitude 47° par exemple, les valeurs suivantes :

	1 ^{re} décade	2 ^e décade	3 ^e décade
Avril	0,0041	0,0044	0,0047
Mai	0,0050	0,0053	0,0056
Juin	0,0058	0,0060	0,0061
Juillet	0,0062	0,0063	0,0062
Août	0,0061	0,0058	0,0055
Septembre	0,0051	0,0046	0,0040

– la variation saisonnière de n est plus faible (inférieure à 20%). Par contre, sa variation en fonction de la latitude est plus importante : on a, par exemple, pour l'abri en bois grand modèle, en juin-juillet :

$$\text{lat. } 43^\circ \quad n = 0,30$$

$$\text{lat. } 47^\circ \quad n = 0,33$$

$$\text{lat. } 52^\circ \quad n = 0,43$$

Enfin, n doit être majoré pour les abris autres que l'abri en bois grand modèle ; pour les types suivants, on prendra :

pour l'abri plastique grand modèle : 1,30 n

pour l'abri agrométéorologique : 1,35 n

pour l'abri plastique petit modèle : 1,10 n

L'étude précise des variations des coefficients m et n selon les lieux, les saisons, les types d'abri, est donnée de façon complète, pour la France, dans la monographie n° 65 éditée par la Météorologie Nationale : « L'évapotranspiration » par P. BROCHET et N. GERBIER.

2^e expression :

$$ETP = m \text{ RG} + p \text{ f}(u) (E - e_a)$$

Le coefficient m est le même que dans la 1^{re} expression.

Le second terme est estimé de la même façon que dans la formule de PENMAN.

Notons que lorsque l'on peut calculer la 2^e expression de la formule de BROCHET – GERBIER, on dispose alors des éléments nécessaires au calcul de la formule de PENMAN. La différence entre les deux formules ne consiste alors plus qu'en une simplification des calculs.

Sous les climats d'Afrique, il n'existe aucune étude systématique des variations des coefficients m ou n , ce qui rend difficile l'application de la formule de BROCHET et GERBIER. Signalons cependant une approche analogue à cette dernière, faite sous climat tropical insulaire, en Martinique et Guadeloupe (14° et 16° de latitude Nord) : l'estimation de l'ETP est de la même forme :

$$ETP = m \text{ RG} + n \text{ Ep}$$

les valeurs de m et n étant les suivantes :

	m	n
Janvier	0,00585	0,37
Février	0,00610	«
Mars	0,00665	«
Avril	0,00720	«
Mai	0,00745	«
Juin	0,00760	«
Juillet	0,00745	«
Août	0,00720	«
Septembre	0,00665	«
Octobre	0,00610	«
Novembre	0,00585	«
Décembre	0,00570	«

On peut utiliser aussi une estimation de m à partir de la température moyenne de l'air :

$$m = (4,9 \text{ t} - 63) 10^{-4}$$

d'où

$$ETP = (4,9 \text{ t} - 63) \text{ RG} \cdot 10^{-4} + n \cdot \text{Ep}$$

Notons que lorsque l'on se rapproche de l'équateur, les variations de température s'amenuisent, et les phénomènes advectifs perdent de l'importance; une telle formule prend alors la forme d'une estimation à partir du seul rayonnement global.

4.2.5. – Formule basée sur la pluviométrie.

La pluviométrie est la donnée climatique observée le plus fréquemment dans la plupart des régions du globe. Il était donc *a priori* séduisant d'étudier les relations éventuelles entre la pluie et l'ETP.

Nous avons vu plus haut la relation théorique qui existait entre ETR et ETP :

$$\text{ETR} + \text{ETP} = 2 \text{ETP}_0$$

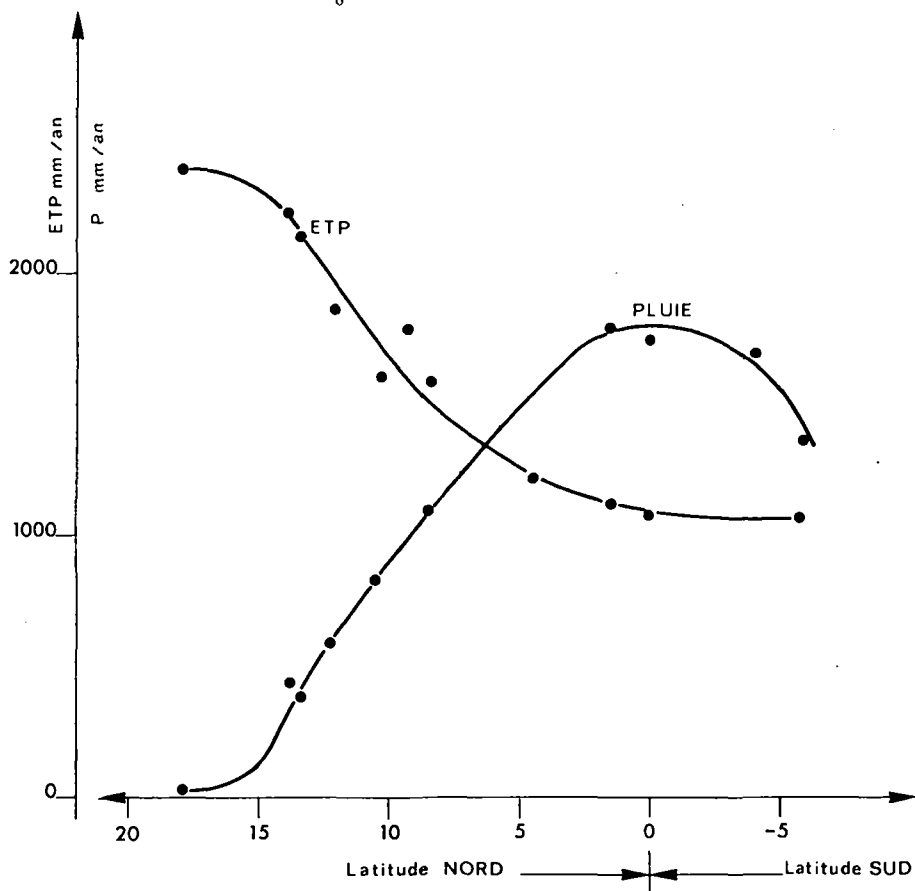


FIGURE 14. – Variation comparée de l'ETP et de la pluie annuelle selon la latitude (entre 15° et 22° de longitude environ).

Or l'ETR varie de la même façon que la pluviométrie lorsque l'on passe des zones arides aux zones tropicales.

Pour les régions de l'Afrique Centrale, qui, pour une quantité d'énergie reçue sous forme de rayonnement à peu près équivalente, se caractérisent par des climats fortement différenciés, nous avons vu que cette relation théorique se vérifie assez bien.

Or l'ETR est peu différente de la pluviométrie pour les climats désertique, sahélien, et même tropical humide, puisque les pertes par ruissellement et drainage sont faibles.

Le graphique de la figure 14 montre qu'effectivement les variations annuelles de l'ETP et de la pluie sont liées, au moins en zone continentale entre 5° et 20° de latitude. Pour le climat équatorial, cette liaison est moins nette.

Dans ce cas-là, il est possible d'imaginer une formule d'estimation de l'ETP annuelle au niveau régional, qui s'exprimerait linéairement en fonction de la pluie.

$$ETP = - aP + b$$

Cette relation, intéressante à remarquer dans le cas exposé, ne peut guère être extrapolée car :

- pour des pas de temps plus courts que l'année, cette liaison s'estompe très rapidement ;
- pour des régions aux climats moins typés, on retrouve rarement une relation aussi nette.

L'estimation de l'ETP à partir de la pluviométrie ne pourra donc être faite que tout à fait exceptionnellement. Citons cependant un travail de ce genre effectué par l'Institut Sénégalais de Recherches Agronomiques (DANCETTE 1974) pour une esquisse cartographique de l'ETP (voir ci-dessous figure 19).

4.2.6. – Formules basées sur la mesure de l'évaporation.

4.2.6.1. – *Mesure de l'évaporation : bacs d'évaporation.*

L'utilisation de bacs d'évaporation a été répandue d'abord par les hydrologues qui cherchaient à avoir une référence pour l'estimation de l'évaporation de grandes étendues d'eau. Par la suite, la simplicité de leur principe et leur commodité d'emploi les a fait adopter dans de nombreux pays comme principale référence climatique pour l'estimation des besoins en eau.

Il existe trois grands types de bacs d'évaporation :

- **Le bac de classe A** : (figures 15-16).

C'est un bac cylindrique en fer galvanisé non peint, de 4 pieds (121,9 cm) de diamètre, et de 10 pouces (25,4 cm) de profondeur. L'eau est maintenue entre 2 et 3 pouces du rebord; l'ensemble est posé sur un caillebotis à 6 pouces (15,2 cm) au-dessus du sol.

La mesure du niveau se fait avec une pointe limnimétrique équipée

d'un vernier. Le calcul de l'évaporation se fait par différence en tenant compte de la pluviométrie et des recharges effectuées pendant la période considérée.

$$E = (N - N_i) + \Sigma \text{Rech} + \Sigma P$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} E \text{ Évaporation en mm;} \\ (N - N_i) \text{ Différence de niveau en mm;} \\ \Sigma \text{Rech Recharges en mm;} \\ \Sigma P \text{ Pluviométrie en mm.} \end{array} \right.$

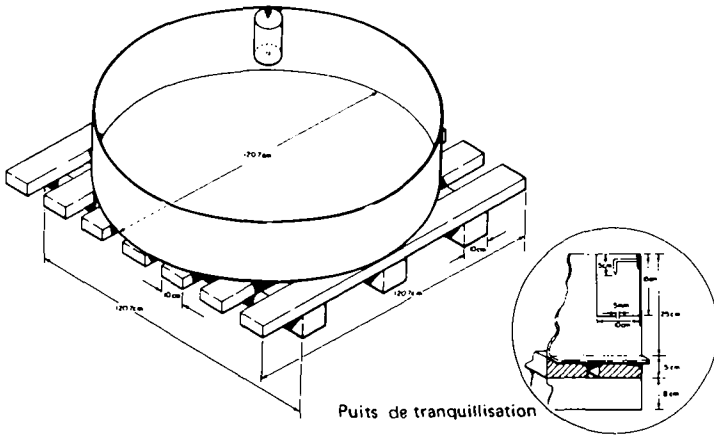


FIGURE 15. — Bac d'évaporation classe A.

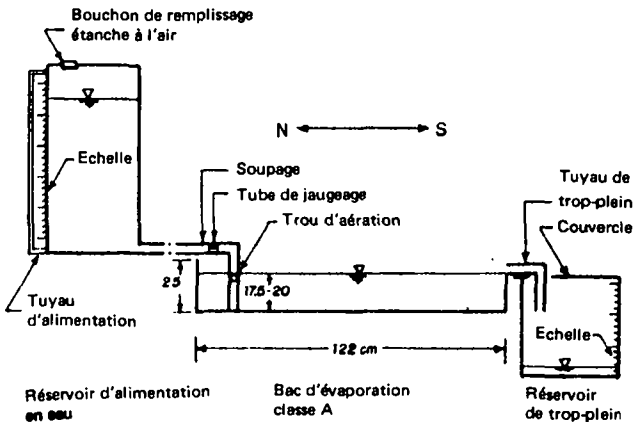


FIGURE 16. — Bac d'évaporation classe A, du type à longue période.

Recommandé aux Etats-Unis par l'U.S. Weather Bureau, il est très répandu dans la plupart des pays anglo-saxons. En ce qui concerne l'irrigation de la canne à sucre, par exemple, c'est la référence la plus souvent utilisée.

Son emploi est cependant très critiqué du fait qu'il est placé au-dessus du sol : les échanges d'énergie qui se produisent à travers les parois (rayonnement, température...) faussent complètement l'équation du bilan d'énergie. Les valeurs obtenues sont toujours supérieures à celles des autres types de bac d'évaporation.

– **Le bac Colorado** : (figure 17).

C'est un bac carré, enterré, de 3 pieds (91,4 cm) de côté et 18 pouces (45,7 cm) de profondeur (version anglo-saxonne), ou bien de 100 cm de côté et 50 cm de profondeur (version métrique vulgarisée par l'ORSTOM). L'eau est maintenue au niveau du sol, soit à 4 pouces (ou 10 cm) du rebord.

Il est souvent utilisé pour les études préliminaires aux projets d'irrigation ou de drainage en Afrique.

D'installation et d'entretien plus délicats que le précédent, il est cependant moins sensible que celui-ci aux influences parasites du rayonnement et de la température.

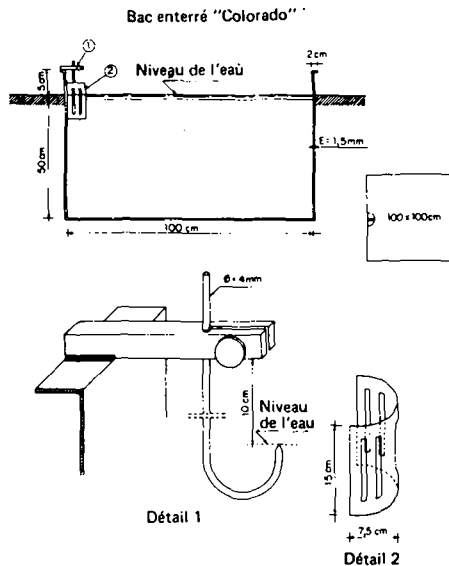


FIGURE 17. – Bac d'évaporation enterré.

– **Les bacs flottants.**

L'Institut de Géographie des États-Unis a préconisé l'installation de bacs au sein même des nappes d'eau à étudier. Leur installation et leur exploitation présentent de grandes difficultés, mais ce sont eux qui fourniraient les mesures les plus proches de celles de l'évaporation d'une grande surface d'eau, bien que sous certains climats, des auteurs aient montré que leurs valeurs étaient voisines de celles d'un bac enterré.

On peut estimer l'évaporation d'une grande nappe d'eau libre en multipliant la valeur mesurée au bac par un certain coefficient; pour

le bac de classe A, on indique en général un coefficient de 0,75, mais qui peut varier de 0,60 à 0,90. Pour le bac Colorado, on indique plutôt un chiffre de 0,80 avec une amplitude de 0,70 à 0,90; sous climat équatorial humide, on estime même que ce coefficient est voisin de 1.

Dans tous les cas, il convient de noter que la mesure de l'évaporation au bac devient très délicate en période pluvieuse, l'imprécision sur la mesure de la pluviométrie pouvant être non négligeable par rapport à la valeur de l'évaporation.

4.2.6.2. — Estimation de l'ETP à partir de l'évaporation d'un bac.

Pour établir la relation entre l'évaporation en bac et l'évapotranspiration potentielle ETP, il est suggéré d'utiliser des coefficients déterminés empiriquement qui tiennent compte du climat, du type de bac et du milieu environnant.

On peut prédire l'évapotranspiration potentielle à l'aide de la formule ci-après :

$$ETP = K_b E \text{ bac}$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} \text{ETP en mm/jour;} \\ \text{E bac évaporation sur bac;} \\ K_b \text{ coefficient d'évaporation sur bac.} \end{array} \right.$

Le tableau 18 donne les valeurs de K_b pour différentes conditions d'humidité, de vent et de milieu environnant ainsi que divers types de bac. Celles-ci doivent s'appliquer à des bacs situés dans un milieu libre, la hauteur des cultures ne dépassant pas 1 m dans un rayon d'une cinquantaine de mètres autour du bac. Si l'on excepte le cas d'un sol nu, l'environnement immédiat dans un rayon de 10 m doit être constitué d'un gazon vert, tondu fréquemment. La station est supposée située dans une zone agricole où la densité de culture est de 50%. Le bac n'est pas muni d'un écran.

En ce qui concerne l'utilisation du bac d'évaporation pour l'évaluation des besoins en eau d'irrigation, on ne saurait trop insister sur le fait que la mesure faite au bac constitue une référence climatique et qu'en tant que telle, elle est sujette à une certaine normalisation du matériel et des conditions dans lesquelles elle est faite. Le respect de cette normalisation est la seule garantie valable de la fiabilité des mesures.

V. — CARTOGRAPHIE DE L'ETP

Lorsque dans une région ou dans un pays, on dispose d'un réseau suffisamment dense d'estimations de l'ETP, l'interpolation dans l'espace peut se faire facilement grâce à la cartographie de cette donnée.

On cartographie en général les *valeurs normales** de l'ETP, par mois, ou pour l'année entière.

Des isoclines ne peuvent être tracées que si l'on est certain de l'homogénéité des données recueillies, et des formules d'estimation utilisées.

Par ailleurs, de telles représentations, faites en général à petite échelle, ne peuvent tenir compte des variations locales dues à l'orographie et à la topographie (altitude, exposition, orientation), ou à d'autres influences locales (effets d'oasis).

L'utilisation de ces cartes ne peut donc être considérée que comme une première approche.

Peu de cartes d'ETP existent pour l'Afrique. À titre d'exemple, nous reproduisons figure 19 la carte de l'ETP en hivernage au Sénégal faite par l'ISRA (DANCETTE 1974).

Valeurs climatiques normales.

Nous donnons en annexe un tableau des valeurs normales* des principaux facteurs climatiques à prendre en compte dans le calcul des besoins en eau d'irrigation pour un certain nombre de stations d'Afrique.

TABLEAU 18. — Coefficients d'évaporation en bac (K_b) compte tenu du type de couvert du sol, du niveau d'humidité relative moyenne et de la vitesse moyenne du vent.

1. — Bac de classe A.

Bac classe A	<u>CAS A</u> } Bac environné d'une culture verte courte				<u>CAS B'</u> } Bac environné d'une jachère sèche			
	HR Moyenne %	Faible < 40	Moyenne 40-70	Forte > 70		Faible < 40	Moyenne 40-70	Forte > 70
Vent km/jour	Distance de la culture verte du côté exposé au vent m				Distance de la jachère sèche du côté exposé au vent m			
Léger > 175	0	0,55	0,65	0,75	0	0,7	0,8	0,85
	10	0,65	0,75	0,85	10	0,6	0,7	0,8
	100	0,7	0,8	0,85	100	0,55	0,65	0,75
	1 000	0,75	0,85	0,85	1 000	0,5	0,6	0,7
Modéré 175-425	0	0,5	0,6	0,65	0	0,65	0,75	0,8
	10	0,6	0,7	0,75	10	0,55	0,65	0,7
	100	0,65	0,75	0,8	100	0,5	0,6	0,65
	1 000	0,7	0,8	0,8	1 000	0,45	0,55	0,6
Fort 425-700	0	0,45	0,5	0,60	0	0,6	0,65	0,7
	10	0,55	0,6	0,65	10	0,5	0,55	0,65
	100	0,6	0,65	0,7	100	0,45	0,5	0,6
	1 000	0,65	0,7	0,75	1 000	0,4	0,45	0,55
Très fort > 700	0	0,4	0,45	0,5	0	0,5	0,6	0,65
	10	0,45	0,55	0,6	10	0,45	0,5	0,55
	100	0,5	0,6	0,65	100	0,4	0,45	0,5
	1 000	0,55	0,6	0,65	1 000	0,35	0,4	0,45

2. - Bac Colorado.

Bac Colorado enterré	CAS A } Bac environné d'une culture verte courte				CAS B' } Bac environné d'une jachère sèche			
	HR Moyenne %	Faible < 40	Moyenne 40-70	Forte > 70	Faible < 40	Moyenne 40-70	Forte > 70	
Vent km/jour	Distance de la culture verte du côté exposé au vent m				Distance de la jachère sèche du côté exposé au vent m			
Léger < 175	0	0,75	0,75	0,8	0	1,1	1,1	1,1
	10	1,0	1,0	1,0	10	0,85	0,85	0,85
	100	1,1	1,1	1,1	100	0,75	0,75	0,8
					1 000	0,7	0,7	0,75
Modéré 175-425	0	0,65	0,7	0,7	0	0,95	0,95	0,95
	10	0,85	0,85	0,9	10	0,75	0,75	0,75
	100	0,95	0,95	0,95	100	0,65	0,65	0,70
					1 000	0,6	0,6	0,65
Fort 425-700	0	0,55	0,6	0,65	0	0,8	0,8	0,8
	10	0,75	0,75	0,75	10	0,65	0,65	0,65
	100	0,8	0,8	0,8	100	0,55	0,6	0,65
					1 000	0,5	0,55	0,6
Très fort > 700	0	0,5	0,55	0,6	0	0,7	0,75	0,75
	10	0,65	0,7	0,7	10	0,55	0,6	0,65
	100	0,7	0,75	0,75	100	0,5	0,55	0,6
					1 000	0,45	0,5	0,55

1. Dans le cas de vastes étendues de sols en jachère nue et en l'absence de toute mise en valeur agricole, réduire les valeurs K en bac de 20% par temps chaud et venteux, et de 5 à 10% quand le vent, la température et l'humidité sont modérés.

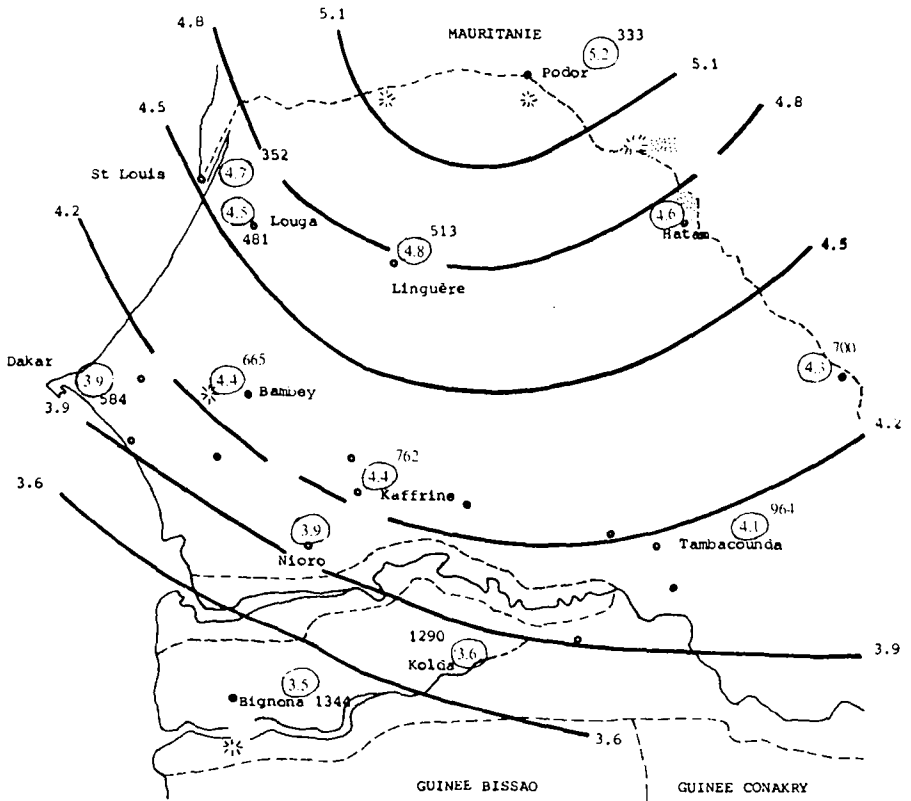


FIGURE 19. - ETP moyenne d'hivernage utile en mm/jour au Sénégal d'après la pluviométrie moyenne par jour d'hivernage utile 1932-1965 (d'après DANCETTE - ISRA - Nov. 1974).

CHAPITRE II

NOTIONS LIÉES AU SOL

En ce qui concerne l'alimentation en eau des plantes, *le sol joue essentiellement un rôle de réservoir*. Ce sont les caractéristiques de ce réservoir et son mode de fonctionnement qu'il est utile de connaître dans un périmètre d'irrigation, qu'il s'agisse pour un ingénieur de dimensionner le réseau de distribution ou, pour les usagers, de bien utiliser l'eau qui est mise à leur disposition.

I. – RAPPELS

Le sol est un système à 3 phases : solide, liquide, gazeuse (figure 20). Ses propriétés physiques résultent des rapports entre les éléments solides et les deux fluides air et eau. La phase solide (45 à 65%) est celle dont le volume est le plus constant, tandis que les volumes occupés par les phases liquides et gazeuses sont très variables.

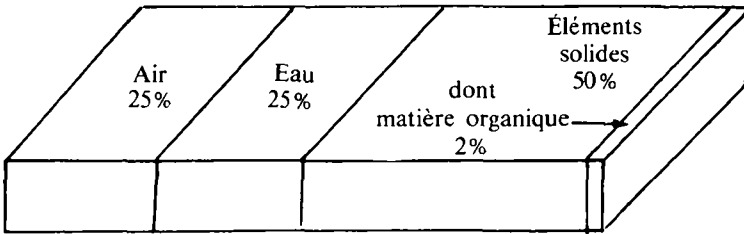


FIGURE 20. – Répartition des différentes phases dans un sol normalement ressuyé.

La phase solide constitue la charpente du sol. Elle est caractérisée par sa texture et sa structure.

1.1. – TEXTURE ET STRUCTURE DU SOL

– La **texture du sol** caractérise la nature, la taille et la distribution des particules solides qui le constituent.

Qualitativement, elle peut s'apprécier par le « toucher » du matériau sol, qui peut être grossier et rugueux, ou fin et moëlleux. On parle aussi de « terres lourdes » ou de « terres légères », selon qu'elles sont plus ou moins difficiles à travailler.

Quantitativement, elle s'exprime par l'analyse granulométrique, qui décrit les proportions relatives des diverses tailles des particules solides. Les résultats de cette analyse permettent de classer un sol en utilisant, soit le triangle textural équilatéral (figure 21 a) de l'U.S. Conservation Soil Service, soit le triangle textural rectangulaire (figure 21 b) recommandé par le GEPPA (Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée), soit enfin la courbe granulométrique (figure 21 c).

– La **structure du sol** caractérise la façon dont sont associées les particules élémentaires solides ou agrégats. C'est de la structure du sol que découlent directement des propriétés telles que la porosité, la cohésion, l'ameublissement. La structure se prête moins facilement que la texture à des analyses quantitatives.

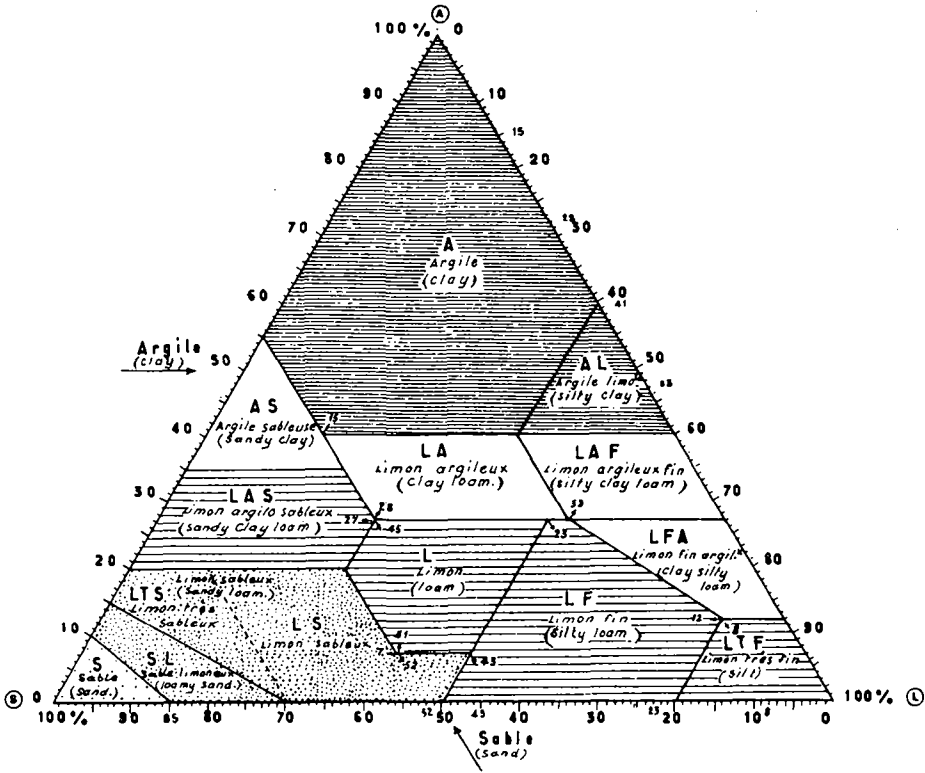
1.2. – DENSITÉ ET POROSITÉ DU SOL

– *Densité réelle (D).*

Elle correspond à la densité des éléments constituant la phase solide. Constante pour un sol donné, elle varie avec les proportions de ces éléments. Elle est en général comprise entre 2,4 et 2,8. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'elle peut s'en écarter : dans le cas des sols très humifères par exemple, elle peut descendre à des valeurs voisines de 2.

À titre indicatif, on peut donner les valeurs moyennes de D pour les sols suivants :

Sol moyen	2,6
Sol calcaire	2,4
Sol humifère	2,0
Sol sableux	2,8
Horizon ferrugineux des podzols	2,7



Les Chiffres sont donnés en pourcentage pondéral
 Les flèches indiquent le sens de lecture pour les différents éléments.
 Les limites entre les textures simplifiées peuvent être interprétées à 2% près.

TEXTURES SIMPLIFIÉES






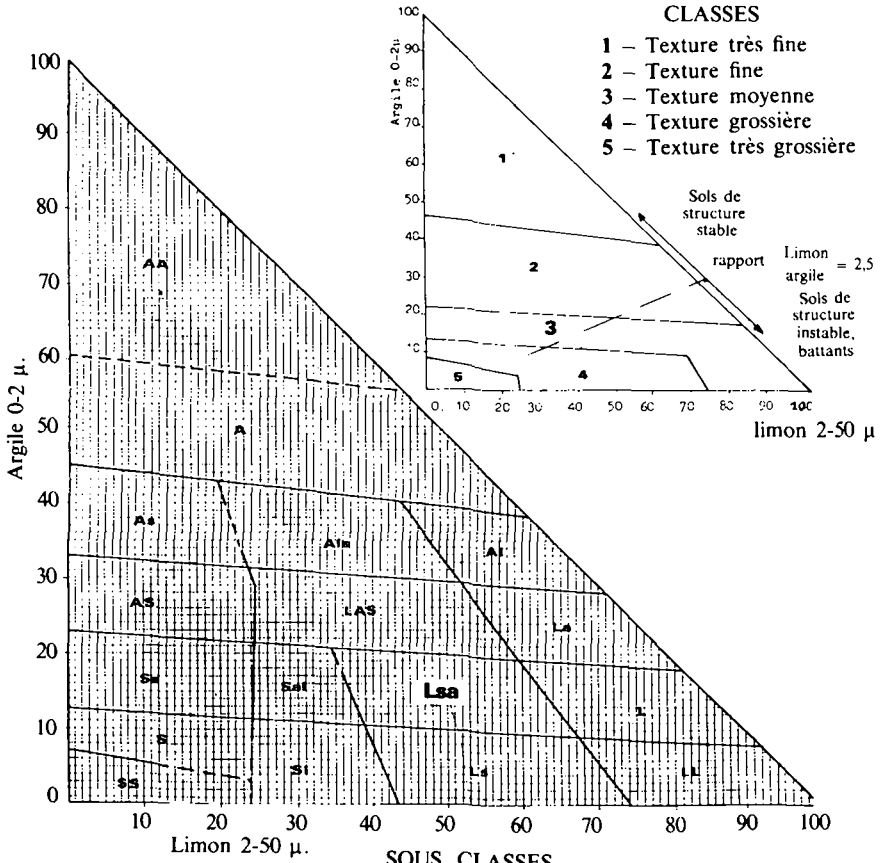
-  Texture très fine: A, AL.
-  Texture fine: AS, LA, LAF, LFA.
- Limon (Silt.)**  Texture moyenne: LAS, L, LF, LTF.
-  Texture grossière: SL, LTS, LS.
-  Texture très grossière: S.

FIGURE 21a. — Triangle des textures de l'U.S. Conservation Soil Service montrant les pourcentages d'argile (< 0,002 mm) de limon (0,002 – 0,05 mm) et de sable (0,05 – 2,0 mm) dans les classes fondamentales de texture du sol.

DIAGRAMME DE TEXTURE (G.E.P.P.A.)
(Chiffres donnés en pourcentage pondéral.)



- CLASSES**
- 1 – Texture très fine
 - 2 – Texture fine
 - 3 – Texture moyenne
 - 4 – Texture grossière
 - 5 – Texture très grossière
- SOUS CLASSES**
- | | | |
|---|---|--------------------------------------|
| AA Texture d'argile | LAS Texture limono-argilo-sableuse | Ls Texture de limon sableux |
| As Texture d'argile sableuse | Sal Texture de sable argilo-limoneux | A Texture argileuse |
| AS Texture argilo-sableuse | Lsa Texture de limon sablo-argileux | Al Texture d'argile limoneuse |
| Sa Texture de sable argileux | SI Texture de sable limoneux | La Texture de limon argileux |
| S Texture sableuse | | L Texture limoneuse |
| SS Texture de sable | | LL Texture de limon |
| Als Texture d'argile limono-sableuse | | |

FIGURE 21 b. – Triangle des textures recommandé par le GEPPA. La teneur en sable est le complément à 100 % de la somme des teneurs en argile et en limon.

% des particules < Φ.

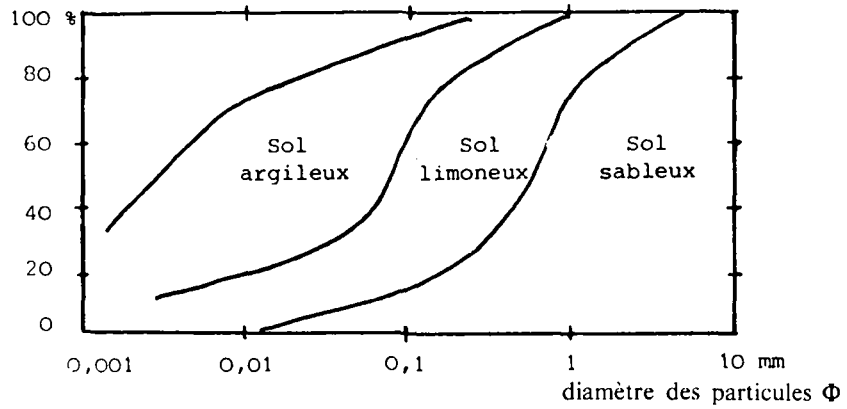


FIGURE 21 c. – Courbes granulométriques. (Distribution de la taille des particules du sol).

– *Densité apparente* (d_a).

Définition.

C'est le rapport du poids de sol sec d'un échantillon, au poids de l'eau qui occuperait le même volume que cet échantillon occupait dans le sol non perturbé :

$$d_a = \frac{P_s}{P_e}$$

Mais, si l'on exprime les poids en grammes, et les volumes en cm^3 , P_e s'exprime avec la même valeur numérique que V_t , volume total de sol en place. On peut donc écrire en pratique :

$$d_a = \frac{P_s}{V_t}$$

Dans tous les cas, on convient d'appeler sol sec un sol séché à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant.

En	}	Sols sableux	$d_a = 1,50$ à $1,80$
pratique		Sols limoneux	$d_a = 1,30$ à $1,50$
		Sols argileux	$d_a = 1,10$ à $1,30$

Comparée à la densité réelle, la densité apparente permet de déduire la proportion des vides ou *porosité*.

– *Porosité.*

Définition.

C'est la fraction de l'unité de volume du sol en place qui n'est pas occupée par les éléments solides.

$$p = \frac{\text{Volume de vides}}{\text{Volume total}} = \frac{V_e + V_a}{V_t}$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} V_e \text{ Volume occupé par l'eau;} \\ V_a \text{ Volume occupé par l'air;} \\ V_t \text{ Volume total du sol en place.} \end{array} \right.$

On peut cependant faire une distinction entre la *macroporosité* d'une part, qui comprend les pores les plus gros (> 8 microns en moyenne) dans lesquels l'air et l'eau circulent librement sans être retenus par le sol (l'eau qu'on peut y trouver est l'*eau de gravité*, qui est rapidement évacuée si la perméabilité est bonne), et la *microporosité* d'autre part

(pores < 8 microns), dans laquelle se trouve l'eau de rétention (eau capillaire et eau d'adhésion superficielle) (figure 22).

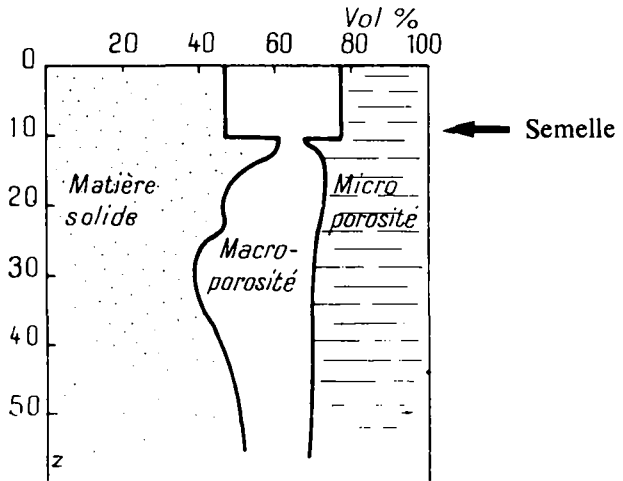


FIGURE 22. — Figuration des 2 sortes de porosité.

La répartition des constituants du sol en volume et en masse, est donnée par la figure 23.

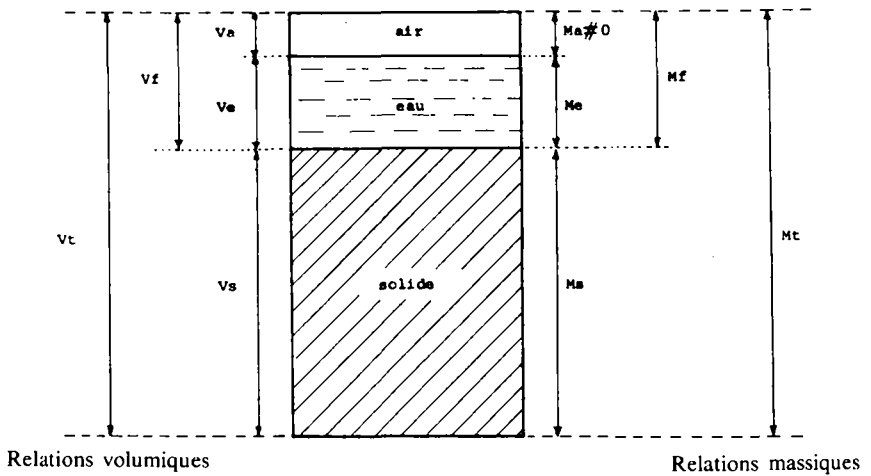


FIGURE 23. — Schéma de la répartition des constituants du sol en volume et en masse.

1.3. — MESURE DE LA DENSITÉ APPARENTE DE LA TERRE SÈCHE

D'après la définition donnée ci-dessus, on a :

$$d_a = \frac{\text{Poids de sol sec}}{\text{Volume de sol en place}}$$

La densité apparente de la terre sèche dépend de la porosité p et de la densité de la phase solide d_s (densité moyenne des particules)

$$d_a = (1 - p) d_s$$

La valeur de d_s varie peu selon le matériau : $2,55 < d_s < 2,65$.

Pour un sol donné, d_a est donc surtout influencé par le degré de compaction ou d'ameublissement du sol.

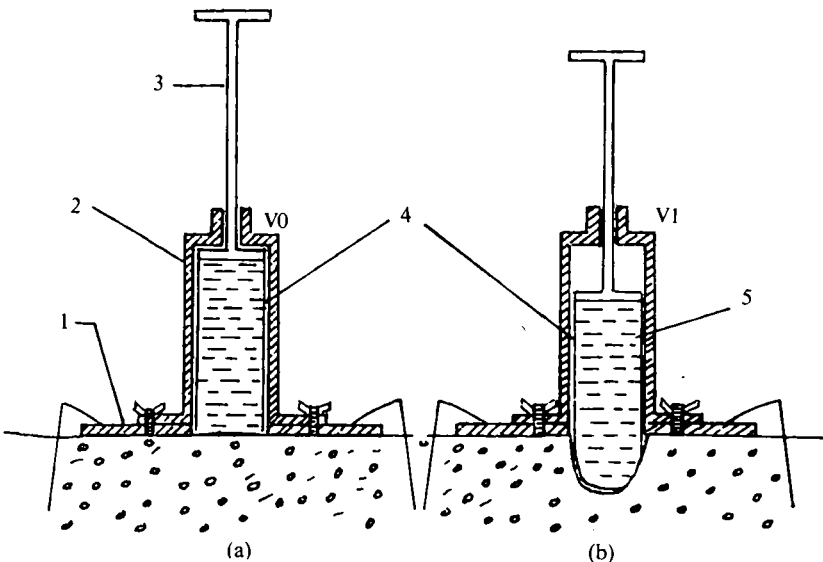
Il est indispensable de connaître la densité apparente de la terre sèche lorsque l'on veut passer de l'humidité pondérale à l'humidité volumique ou inversement.

Parmi les méthodes de mesure les plus courantes, citons les trois suivantes :

1.3.1. – Le densitomètre à membrane (figure 24).

La méthode consiste à déterminer le volume de la cavité laissée par un prélèvement de sol, prélèvement dont on déterminera le poids sec en laboratoire. Le densitomètre à membrane est un appareil formé d'un cylindre dans lequel se déplace un piston, et dont la base est fermée par une membrane en caoutchouc. Une première lecture de volume (V_0) est faite avant prélèvement, sur le terrain aplani. Une deuxième lecture (V_1) est faite après prélèvement. Le volume de terre prélevé est $V_1 - V_0$. On en déduit :

$$d_a = \frac{P_s}{V_1 - V_0}$$



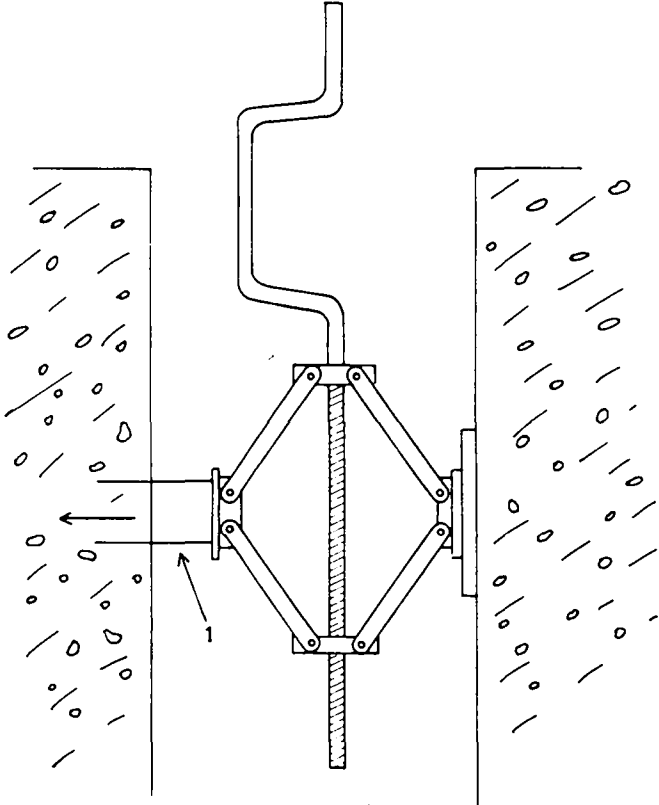
1. Socle fixe. – 2. Partie supérieure amovible.

3. Piston et tige gradués avec vernier de lecture. – 4. Membrane souple. – 5. Eau.

FIGURE 24. – Densitomètre à membrane.

1.3.2. – La sonde à prélèvement volumétrique (figure 25).

Le sol est prélevé au moyen d'un cylindre d'acier à bords tranchants de volume connu, que l'on enfonce lentement dans le sol. On obtient un échantillon de sol non remanié dont on déterminera le poids sec. La méthode Vergière est basée sur le même principe : le prélèvement est fait dans ce cas au moyen d'un cube en zinc de 1 dm³ de volume.



– Mode de prélèvement pour la mesure des densités apparentes.
1. Cylindre tranchant.

FIGURE 25. – Sonde à prélèvement volumétrique.

1.3.3. – La sonde gammamétrique (figure 26).

L'absorption des rayons γ émis par une source d'intensité I_0 est donnée par la loi de BEER et LAMBERT :

$$I(x) = I_0 e^{-a \cdot d \cdot x}$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} I(x) \text{ intensité reçue par le détecteur après avoir traversé la} \\ \text{longueur } x; \\ a \text{ coefficient massique d'atténuation;} \\ d \text{ masse volumique du matériau traversé;} \\ x \text{ longueur traversée;} \end{array} \right.$

a et x étant connus, on en déduit d :

$$d = \frac{1}{a \cdot x} \cdot \text{Log} \frac{I_0}{I}$$

d est donc la densité du sol humide. La densité du sol sec d_a est calculée après mesure de l'humidité du sol. Si la variation d'humidité du sol ne s'accompagne pas de variations de volume importantes, on a :

$$d_a = \frac{d}{H_p/100 + 1}$$

La mesure de la densité au moyen d'une sonde gammamétrique peut se faire en introduisant dans le sol, au moyen de 2 tubes d'acier, d'une part une source de rayons gamma, d'autre part un détecteur. Il existe aussi des dispositifs permettant d'introduire source et détecteur dans le même tube ; la mesure de la densité est faite dans une sphère d'influence de quelques centimètres de rayon, comme dans le cas de la sonde à neutrons.

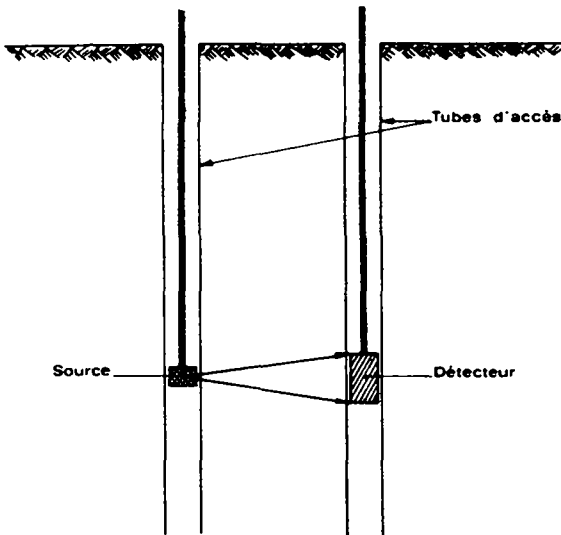


FIGURE 26. — Mesure de la densité par la méthode gammamétrique.

II. — HUMIDITÉ DU SOL

Le sol constitue un milieu convenable pour les racines lorsqu'un équilibre est respecté entre les 3 phases : l'air est nécessaire à la respiration des racines et l'eau doit pouvoir leur être cédée sans difficulté. Aussi distingue-t-on *différents niveaux d'humidité dans le sol* qui correspondent à des définitions précises.

2.1. – DÉFINITIONS

2.1.1. – Humidité à la saturation.

C'est l'humidité du sol lorsque l'eau occupe toute la porosité. Le sol ne contient plus d'air. Les pores les plus gros sont occupés par l'eau de gravité.

2.1.2. – Humidité à la capacité de rétention (HCR) (ou humidité à la capacité au champ HCC).

C'est l'humidité d'un sol ressuyé, c'est-à-dire après disparition de l'eau de gravité ; l'eau restante occupe la microporosité (eau capillaire). Elle est retenue dans les cavités du sol par les forces de tension superficielle. Ces forces correspondent à des hauteurs d'ascension capillaire définies par la loi de JURIN : de 1 mètre environ pour des sables (pores de 15 microns) à 10 mètres pour des argiles (pores de 1,5 microns).

2.1.3. – Humidité équivalente (HE).

Cette mesure est faite en laboratoire : on extrait l'eau d'un échantillon de sol à saturation, au moyen d'une centrifugeuse produisant une accélération de 1 000 fois l'accélération de la pesanteur pendant 30 mn. L'humidité du sol après traitement est proche de l'humidité à la capacité de rétention.

2.1.4. – Humidité de rupture du lien capillaire (HC) (ou humidité critique).

C'est l'humidité du sol en-dessous de laquelle la plante commence à souffrir d'un déficit hydrique ($ETR < ETM$). Elle correspond à une pression de succion dans la feuille de 8 à 10 atmosphères, mais ne se réfère pas à une valeur fixe pour le sol.

On constate que HC est d'autant plus faible que la vitesse de dessèchement est plus lente, c'est-à-dire :

- que l'évapotranspiration est moins forte ;
- que le volume du sol exploré est plus important (système racinaire bien développé et en bon état).

Cette valeur de l'humidité est donc une notion importante, mais essentiellement fluctuante, puisqu'elle ne dépend pas seulement du sol, mais aussi du climat ainsi que des caractéristiques de la plante.

2.1.5. – Humidité au point de flétrissement permanent (HPF).

C'est l'humidité au-dessous de laquelle la plante subit des dommages irréversibles à cause de la sécheresse. Elle correspond à l'humidité pour laquelle la force de succion du sol équilibre la force de succion des cellules des racines : le débit d'eau du sol à la plante s'annule. C'est également une notion variable selon la nature de la plante. On con-

vient en général de la définir comme correspondant à une pression de succion dans le sol de 15 atmosphères, bien que certaines plantes soient capables d'extraire par leurs racines de l'eau à des tensions bien supérieures.

2.1.6. – Humidité hygroscopique.

C'est l'humidité d'un sol séché à l'air. L'eau du sol est alors en équilibre avec la tension de vapeur d'eau dans l'air.

2.1.7. – Eau de constitution.

C'est l'eau qui reste dans le sol après passage à l'étuve à 105° C. Elle est très fortement liée au sol par des forces d'absorption moléculaire (sur les silicates par exemple), ou par des forces liées au champ électrique développé par les ions échangeables des argiles.

Les caractéristiques hydriques des sols sont, comme on le voit, étroitement liées à leur nature minéralogique et aux conditions pédologiques; ce sont essentiellement les caractéristiques physiques qui en découlent (texture, structure) qui conditionnent leur comportement vis-à-vis de l'eau.

La figure 27 regroupe les différents types d'eau dans le sol et la figure 28 établit les relations existant entre les humidités caractéristiques et les volumes d'eau correspondants.

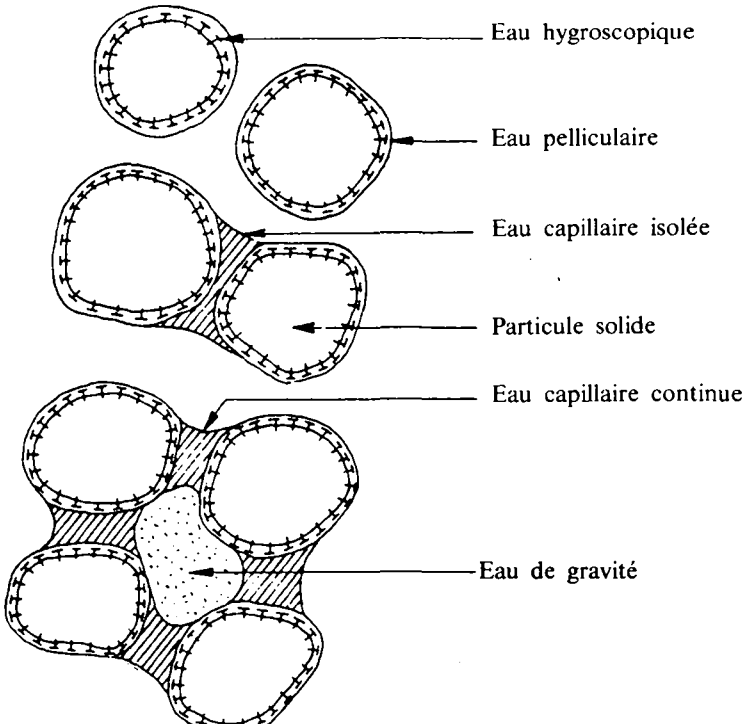


FIGURE 27. – Différents types d'eau dans le sol.

CARACTERISTIQUES DU SOL VIS A VIS DE L'EAU	UTILISATION DE L'EAU PAR LES PLANTES	STADES PARTICULIERS	APPLICATION IRRIGATION
<p>CAPACITÉ MAXIMALE POUR L'EAU</p> <p>EAU DE GRAVITE</p> <p>CAPACITE DE STOCKAGE OU DE RETENTION</p> <p>RESERVE UTILE</p> <p>Capacité au point de flétrissement</p> <p>55 %</p> <p>HPF</p> <p>15 %</p> <p>HC</p> <p>30 %</p> <p>HCR</p>	<p>Eau très mobile très accessoirement utilisée par les plantes</p> <p>0microns</p> <p>Eau mobile source essentielle d'alimentation des végétaux (eau capillaire continue)</p> <p>Eau peu mobile difficilement utilisable</p> <p>0,2microns</p> <p>Eau très peu mobile qui n'est utilisable qu'au contact des poils absorbants des racines des végétaux (Eau capillaire isolée + eau pelliculaire)</p> <p>Eau hygroscopique</p> <p>Eau de constitution</p>	<p>SATURATION</p> <p>RETENTION</p> <p>Limite pratique de dessiccation</p> <p>Flétrissement</p> <p>Chauffage à 105° C</p>	<p>← Dose "pratique" d'arrosage →</p> <p>← Dose théorique d'arrosage →</p> <p>← Dose exceptionnelle d'arrosage après longue sécheresse →</p>

FIGURE 28. – Schéma récapitulatif du réservoir sol. États de l'eau dans le sol, son utilisation par les plantes (d'après document SCP : revue eau et aménagement de la région provençale, mars 1977).

2.2. – EXPRESSION DE L'HUMIDITÉ D'UN SOL

L'humidité d'un sol peut être exprimée soit en humidité pondérale, soit en humidité volumique.

2.2.1. – L'humidité pondérale.

Elle est définie par la relation :

$$\begin{aligned} \text{Hp \%} &= \frac{\text{Poids d'eau}}{\text{Poids de sol sec}} \times 100 = \frac{\text{Me}}{\text{Ms}} \times 100 \\ &= \frac{\text{Poids de sol humide} - \text{Poids de sol sec}}{\text{Poids de sol sec}} \times 100 \end{aligned}$$

2.2.2. – L'humidité volumique.

Elle est définie par la relation :

$$\begin{aligned} \text{Hv \%} &= \frac{\text{Volume d'eau}}{\text{Volume de sol}} \times 100 = \frac{\text{Ve}}{\text{Vs}} \times 100 \\ &= \frac{(\text{Poids de sol humide} - \text{Poids de sol sec})/d_e}{\text{Poids de sol sec}/d_a} \times 100 \end{aligned}$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} d_e = \text{densité de l'eau;} \\ d_a = \text{densité apparente du sol.} \end{array} \right.$

On peut exprimer l'humidité volumique en fonction de l'humidité pondérale :

$$\text{Hv} = \text{Hp} \times d_a$$

Il est donc indispensable de connaître la densité apparente de la terre sèche lorsque l'on veut passer de l'humidité pondérale à l'humidité volumique ou inversement.

2.3. – MESURE DE L'HUMIDITÉ D'UN SOL

2.3.1. – Méthodes destructives.

Les méthodes de mesure de l'humidité d'un sol consistent soit à extraire l'eau d'un échantillon de ce sol, soit à étudier les variations d'une de ses propriétés influencée par l'humidité.

2.3.1.1. – Méthode gravimétrique

L'échantillon de sol est pesé frais puis après séchage à l'étuve pendant 24 h à 105° C. L'humidité pondérale est alors donnée par la formule :

$$H_p = \frac{\text{Poids de sol humide} - \text{Poids de sol sec}}{\text{Poids de sol sec}} \times 100$$

Moyennant certaines précautions d'échantillonnage et de manipulations, cette méthode est une des plus précises et sert de référence.

2.3.1.2. – *Autres méthodes destructives.*

L'échantillon de sol peut être desséché par combustion d'une dose d'alcool dont on arrose la terre à analyser. La dessiccation étant relativement rapide, cette méthode est facilement applicable sur le terrain. L'utilisation d'une balance romaine directement graduée en humidité pondérale permet d'obtenir assez rapidement les résultats. La précision de la mesure est suffisante pour les besoins de l'irrigant, mais non du chercheur ou de l'expérimentateur.

L'extraction de l'eau peut être réalisée par l'action d'autres liquides (acétone, chlorure de calcium), ou par réaction chimique (avec le carbure ou l'hydrure de calcium).

2.3.2. – **Méthodes non destructives.**

2.3.2.1. – *Humidimètre à neutrons* (figure 29).

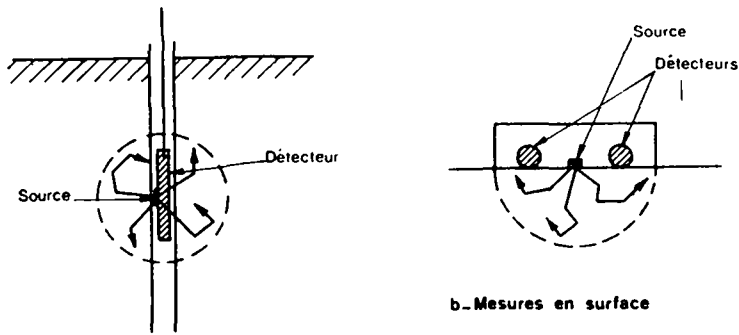
C'est un appareil relativement coûteux, qui de ce fait sera réservé à la recherche ou à l'expérimentation sur le terrain. Son emploi est particulièrement intéressant dans le cas de mesures répétitives.

Son principe repose sur la propriété qu'a l'hydrogène de ralentir les neutrons rapides. Si l'on place dans le sol une source de neutrons rapides, ces derniers sont d'autant plus ralentis que le sol est plus humide.

La mesure se fait au moyen d'un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol où il est laissé en permanence; un bon contact entre la terre et le tube est une condition essentielle de précision de la mesure. La source de neutrons rapides (Radium-Béryllium ou Américium-Béryllium), accompagnée du détecteur de neutrons lents, est amenée à la profondeur désirée. Le nombre de neutrons lents détectés par unité de temps est approximativement proportionnel à l'humidité volumique (figure 30).

L'étalonnage de l'appareil peut se faire par comparaison d'un profil neutronique au profil de l'humidité volumique établi par la méthode associant humidité équivalente et densité apparente. On peut également, d'après Couchat et Moutonnet, calculer la courbe d'étalonnage à partir d'une analyse neutronique du sol.

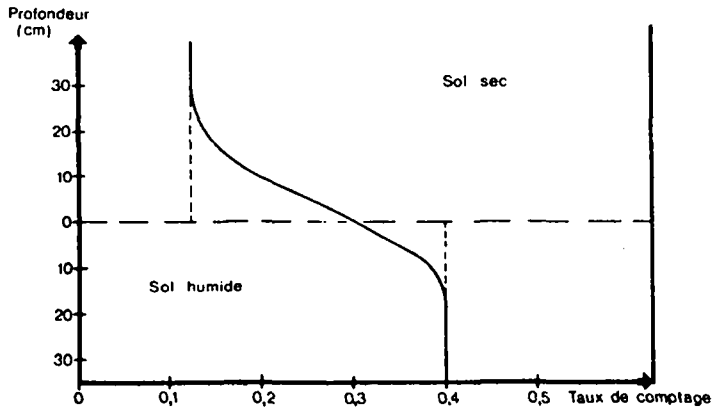
La figure 30 permet de comparer les mesures d'humidité volumique obtenues par le C.T.G.R.E.F. d'Antony, d'une part avec la méthode classique (gravimétrie et densitomètre à membrane); d'autre part avec une sonde à neutrons dotée d'un dispositif gammamétrique. On voit que si pour le sable la correspondance est bonne, par contre une correction est à faire pour le sol d'Antony. La méthode par sonde est en effet rapide, donc pratique pour les études nécessitant de faire dans le temps



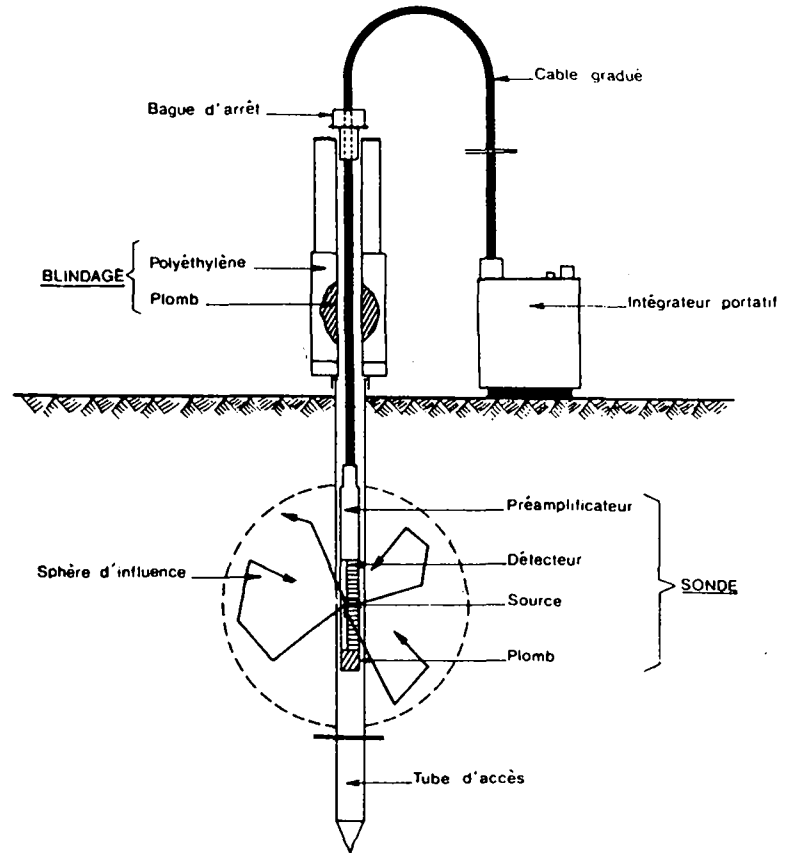
a. Mesures en profondeur

b. Mesures en surface

MESURES D'HUMIDITE PAR RETRODIFFUSION



RÉPONSE DE LA SONDE PASSANT D'UN MILIEU HUMIDE A UN MILIEU SEC



SONDE A NEUTRONS

FIGURE 29. - Humidimètre à neutrons.

plusieurs mesures au même endroit. Elle exige cependant un étalonnage par comparaison avec la méthode classique qui sert de référence, mais a l'inconvénient d'être plus lente et destructive.

Les deux méthodes se complètent donc bien.

Méthode neutronique (et gammamétrie)

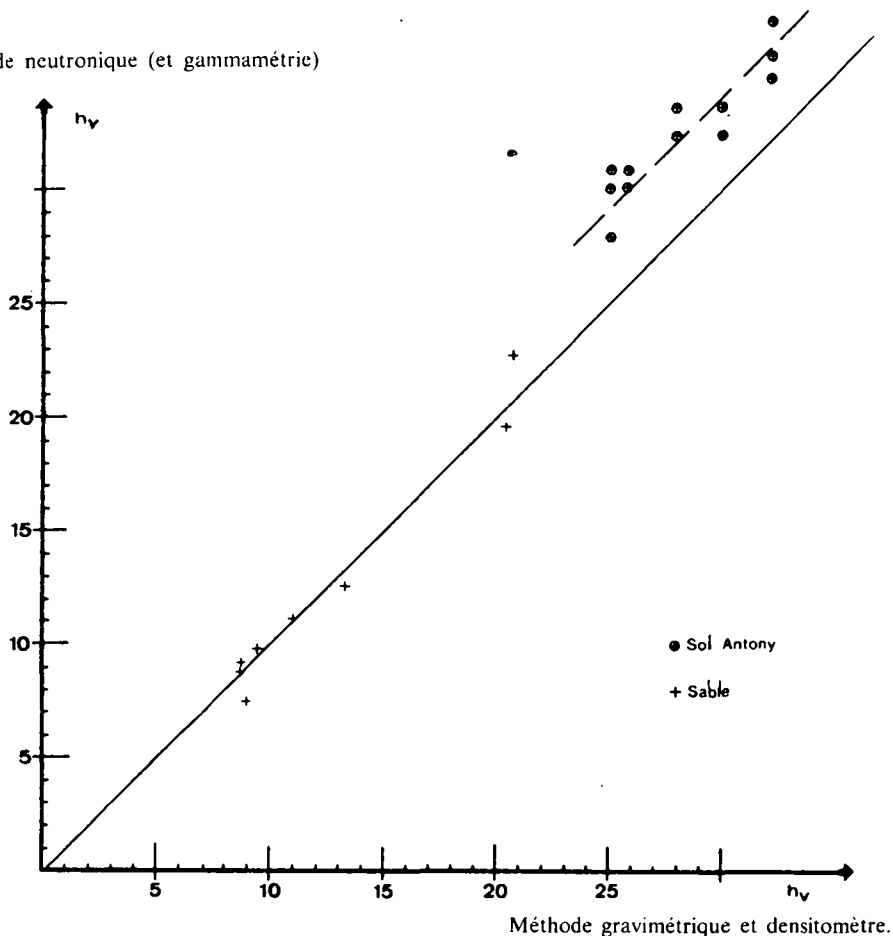


FIGURE 30. — Relation entre les mesures d'humidité volumique obtenues par la méthode neutronique et la méthode gravimétrique.

2.3.2.2. — Gammamétrie.

La sonde gammamétrique (voir ci-dessus), permet une mesure de la densité du milieu.

On peut cependant utiliser également la gammamétrie pour la mesure de l'humidité, en comparant la densité du sol humide à celle du sol sec. Il est possible de tenir compte des phénomènes de gonflement du sol, et donc d'obtenir une meilleure précision.

C'est essentiellement une technique de laboratoire ; sa mise en œuvre au champ se révèle assez délicate.

D'autres méthodes non destructives de mesure de l'humidité existent (propagation d'ultra-sons, mesure de la conductibilité thermique, de la conductivité électrique, de la permittivité du sol). Elles se prêtent également plutôt aux mesures en laboratoire.

L'humidité d'un sol exprime la quantité d'eau contenue dans ce sol, mais cette notion est insuffisante car elle ne donne pas d'indication sur la disponibilité de cette eau. Il est nécessaire de définir en plus le degré de liaison de cette eau avec le sol d'où la notion de *tension de l'eau dans le sol*.

III. – LA TENSION DE L'EAU DANS LE SOL : LE POTENTIEL HYDRIQUE

3.1. – DÉFINITION DU POTENTIEL HYDRIQUE

Le *potentiel hydrique* correspond à l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à l'unité de masse d'eau pure pour la faire passer, au cours d'une transformation réversible, de l'état d'eau libre à la pression atmosphérique, à l'état qu'elle a dans le système considéré.

Le potentiel hydrique ainsi défini est négatif en milieu non saturé (c'est généralement le cas de l'eau du sol); il est positif pour l'eau sous pression.

Lorsqu'il existe des différences de potentiel, *la circulation* de l'eau se fait *dans le sens des potentiels décroissants*, c'est-à-dire, en général, des zones les plus humides vers les plus sèches.

La définition du potentiel hydrique fait qu'il s'exprime en principe en unités d'énergie par unité de masse, soit en Joules/kg dans le système MKSA.

Dans la pratique, on le rapporte à l'unité de volume d'eau, et il a la dimension d'une pression ($FL \times L^{-3} = F.L^{-2}$). On peut donc l'exprimer en atmosphères, en bars, en kg/cm^2 , ou en mètres de colonne d'eau. On parle alors plutôt de *tension*, que l'on donne généralement *en valeur absolue*, sans tenir compte du signe. Les relations entre les différentes unités étant les suivantes :

$$1 \text{ atmosphère} = 1,03323 \text{ kg/cm}^2 = 1,01325 \text{ bar};$$

$$1 \text{ bar} = 10,19719 \text{ m. de colonne d'eau.}$$

3.2. – EXPRESSION DU POTENTIEL HYDRIQUE

Le potentiel hydrique est la résultante de différents phénomènes agissant sur l'eau, et dont les plus importants sont :

– *la pesanteur* (potentiel newtonien)

$$\psi_n = gz$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} g = \text{accélération de la pesanteur;} \\ z = \text{cote du point considéré, comptée à partir d'un plan horizontal de référence;} \end{array} \right.$

– la tension superficielle et les phénomènes de capillarité, auxquels s'ajoutent l'adhésion superficielle sur certaines particules du sol. L'ensemble de ces effets est regroupé sous le nom de potentiel matriciel (ψ_m);

– le potentiel osmotique de l'eau (ψ_o) dû à la présence de substances dissoutes dans l'eau;

– le potentiel de turgescence (ψ_t) : dans le végétal on peut parler aussi de la pression due à l'élasticité des membranes : c'est elle qui crée le potentiel de turgescence dans l'eau des cellules.

Le système est en équilibre lorsque le potentiel hydrique total est le même en tout point.

$$h = \psi_n + \psi_m + \psi_o + \psi_t = \text{constante.}$$

Les deux premières colonnes du tableau 31 ci-dessous donnent les correspondances entre certaines valeurs caractéristiques de la tension de l'eau du sol exprimées en cm de colonne d'eau, ou en atmosphères.

On remarque que ces valeurs augmentent très rapidement, c'est pourquoi on a jugé commode de créer une échelle logarithmique des potentiels hydriques, le pF, défini de la manière suivante :

$$pF = \log_{10} h$$

h étant exprimé en centimètres de colonne d'eau.

Quelques valeurs caractéristiques du pF sont données dans la troisième colonne du tableau 31.

La quatrième colonne donne l'humidité relative d'un air à 25° C dont l'eau serait en équilibre avec celle du sol, c'est-à-dire à une tension identique : on remarque qu'un sol correctement pourvu en eau correspond à des valeurs d'humidité relative dans l'air très élevées. Dans les conditions normales, la tension de l'eau en valeur absolue est donc beaucoup plus faible dans le sol que dans l'air; par conséquent la circulation de l'eau se fera le plus souvent du sol vers l'air.

TABLEAU 31.

Potentiel h		pF	Humidité relative e _a à 25° C	Observations
Atm	cm C.E.			
– 0,10	– 100	2,0	99,99 %	C.R. des sols à texture grossière
– 0,31	– 316	2,5	99,98 %	C.R. des sols à texture moyenne
– 0,97	– 1000	3,0	99,93 %	C.R. des sols à texture fine
– 15,3	– 15850	4,2	98,9 %	Point de flétrissement permanent
– 96,7	– 100000	5,0	93 %	(C.R. = capacité de rétention)
– 967,5	– 1000000	6,0	49 %	

3.3. – RELATION ENTRE LE pF ET L'HUMIDITÉ DU SOL

La tension de l'eau du sol est évidemment en relation étroite avec sa teneur en eau : le pF varie en raison inverse de l'humidité du sol. La mesure du pF permet donc une mesure indirecte de l'humidité, à condition de tenir compte des points suivants :

– la relation tension-humidité est différente pour chaque type de sol : par exemple, pour les 2 mêmes valeurs de pF, les valeurs correspondantes de l'humidité seront d'autant plus importantes et présenteront entre elles des différences d'autant plus grandes, que la teneur en éléments fins sera plus élevée (figure 32);

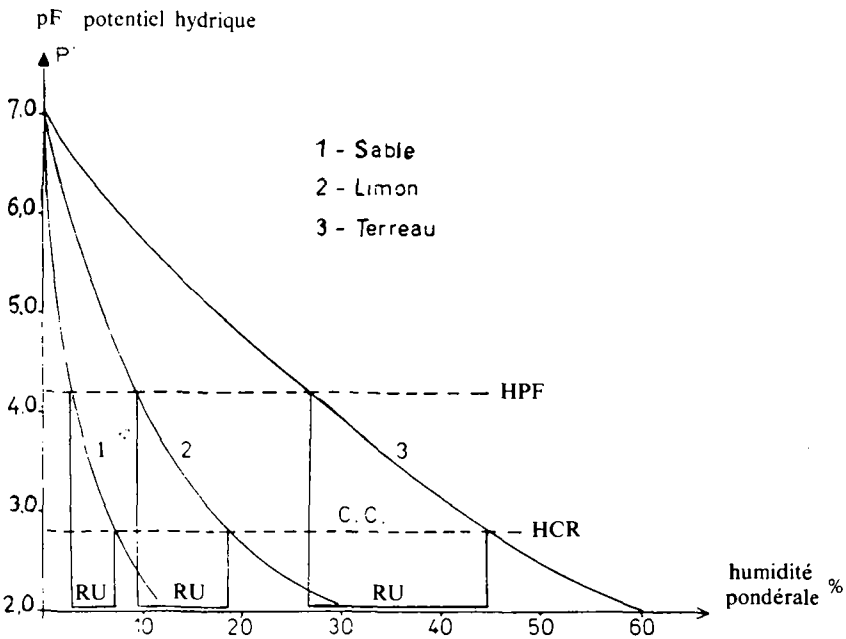


FIGURE 32. – Relation potentiel – humidité pour trois types de sol.

– cette relation n'est pas la même en phase d'humectation et en phase de dessiccation : pour une même valeur de l'humidité d'un sol, le pF est moins élevé dans la phase de réhumectation que dans la phase de dessiccation. On observe donc un retard ou « hystérésis ». Ce phénomène est très nettement marqué sur des sols riches en argiles, mais presque insignifiant sur des sols sableux (figure 33);

– enfin, toujours pour une même valeur d'humidité, le pF est d'autant plus élevé que la vitesse de dessèchement est plus rapide.

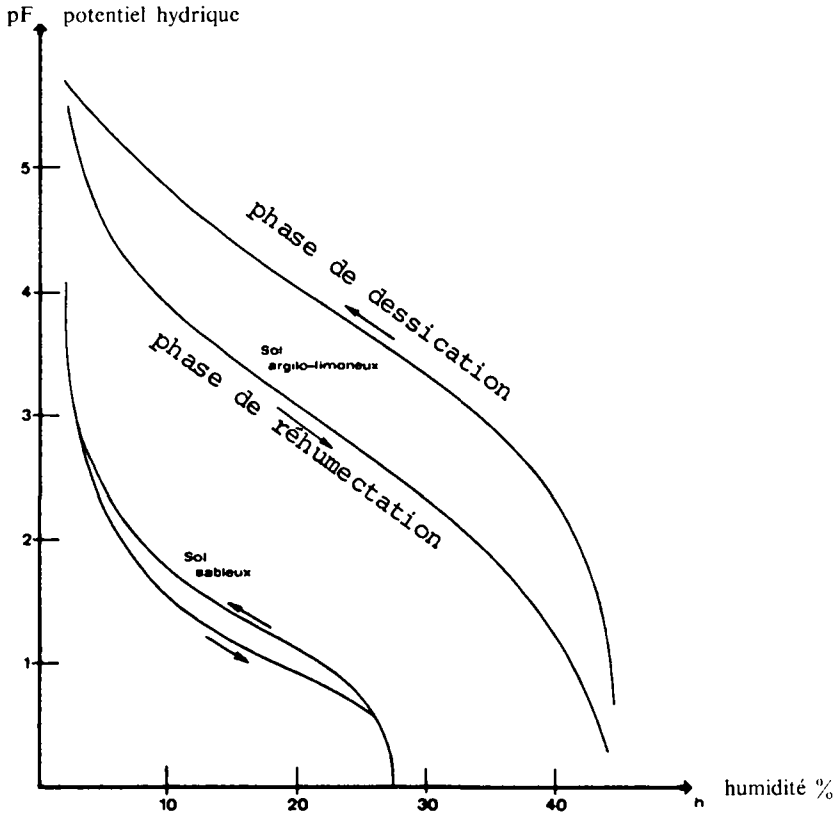


FIGURE 33. – Relation potentiel – humidité (effet d'hystérésis).

3.4. – MESURE DE LA TENSION DE L'EAU DU SOL

Il existe différents appareils capables de mesurer la tension de l'eau dans le sol.

3.4.1. – Le tensiomètre.

Le tensiomètre est constitué par une bougie poreuse remplie d'eau que l'on place dans le sol. La succion du sol provoque à l'intérieur de la bougie une dépression, que l'on mesure grâce à un manomètre.

La bougie est en céramique poreuse, avec des pores de l'ordre du micron.

Le manomètre peut être à eau, à mercure, ou plus simplement à dépression avec lecture directe sur un cadran (voir figure 34).

La mise en place de ce genre d'appareil est assez délicate : il est important d'éviter au maximum la présence d'air dans l'eau ; par ailleurs, le contact entre la bougie et le sol doit être parfait.

Dans la pratique, l'utilisation du tensiomètre présente quelques difficultés :

– le tensiomètre *ne permet pas la mesure de tensions très élevées* : au-delà de 0,7 bars (pF 2,9 environ), c'est-à-dire pour des humidités inférieures à la capacité au champ, il devient impossible d'éviter la pénétration de bulles d'air dans la bougie : le manomètre ne répond alors plus aux augmentations de la succion ;

– *le temps de réponse est lent* à cause de l'amortissement provoqué par la paroi poreuse : des variations brusques de tension ne sont donc décelées qu'au bout de plusieurs heures ;

– il y a *nécessité de purger* périodiquement l'appareil pour éliminer l'air dissous qui peut y pénétrer à la suite d'une pluie ou d'une irrigation.

L'emploi du tensiomètre en irrigation est donc délicat, puisqu'il ne mesure que des tensions faibles ; il peut cependant être employé utilement pour contrôler le sens des flux d'eau dans le sol (puisque l'eau ne circule que dans le sens des tensions décroissantes), et, en pratique, pour vérifier que les doses apportées ne sont pas excessives.

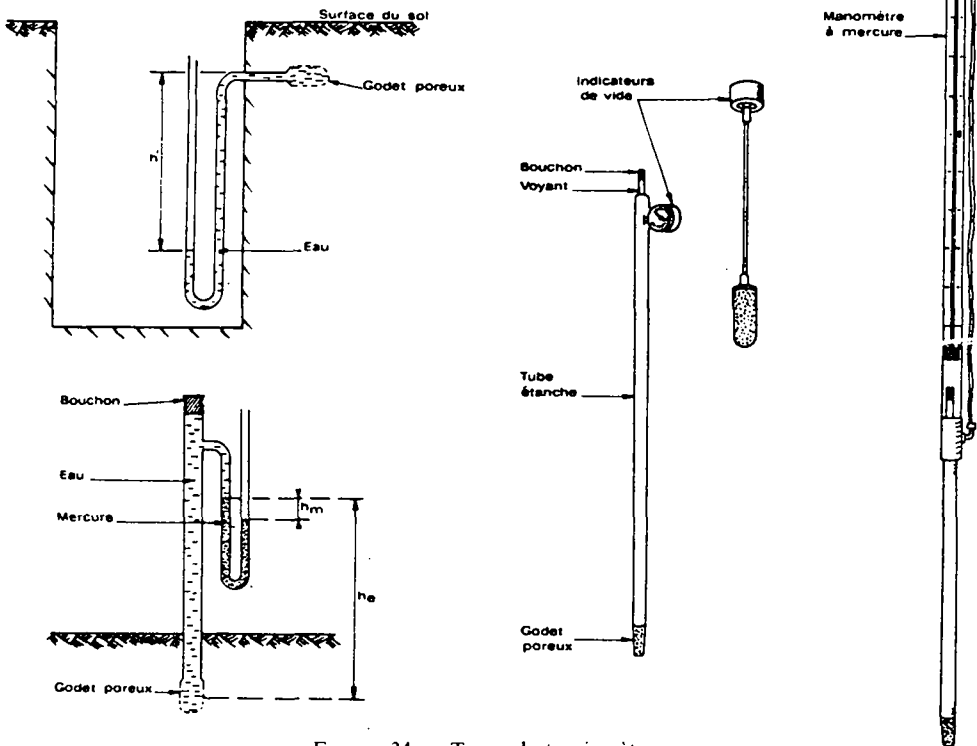


FIGURE 34. – Types de tensiomètre.

3.4.2. – Le micropsychromètre.

Le principe de la micropsychrométrie est basé sur le fait que l'équilibre des tensions d'eau entre deux corps en contact tend à se réaliser,

même si l'eau s'y trouve sous 2 phases différentes. Grâce au micro-psychromètre, on cherche à mesurer le potentiel de l'eau sous forme de vapeur, dans un volume d'air en équilibre hygroscopique avec le sol.

Le potentiel de l'eau sous forme de vapeur est donné par la formule :

$$h = \frac{RT}{M} \text{Log} \frac{f}{F(T)}$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \text{constante des gaz parfaits;} \\ T = \text{température absolue en } ^\circ\text{K;} \\ f = \text{pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air;} \\ F(T) = \text{pression saturante de la vapeur d'eau à la température } T; \\ M = \text{masse moléculaire de l'eau;} \end{array} \right.$$

A noter que $ea = \frac{f}{F(T)} 100$ (humidité relative de l'air).

Le micro-psychromètre est constitué par une coupelle poreuse, disposée dans le sol et à l'intérieur de laquelle sont placés des thermocouples destinés à mesurer la température de l'air et celle du point de rosée. On en déduit T et ea , d'où le potentiel h grâce à la formule ci-dessus.

La difficulté essentielle réside dans le fait que les mesures de température par thermocouple doivent être assez fines pour permettre une bonne précision. Le tableau 31 ci-dessus montre que plus les tensions sont faibles (en valeur absolue), plus les valeurs de ea correspondantes se stabilisent à des valeurs proches de la saturation.

Le pouvoir de résolution de l'appareil devient donc très faible lorsque l'on s'approche de ces valeurs.

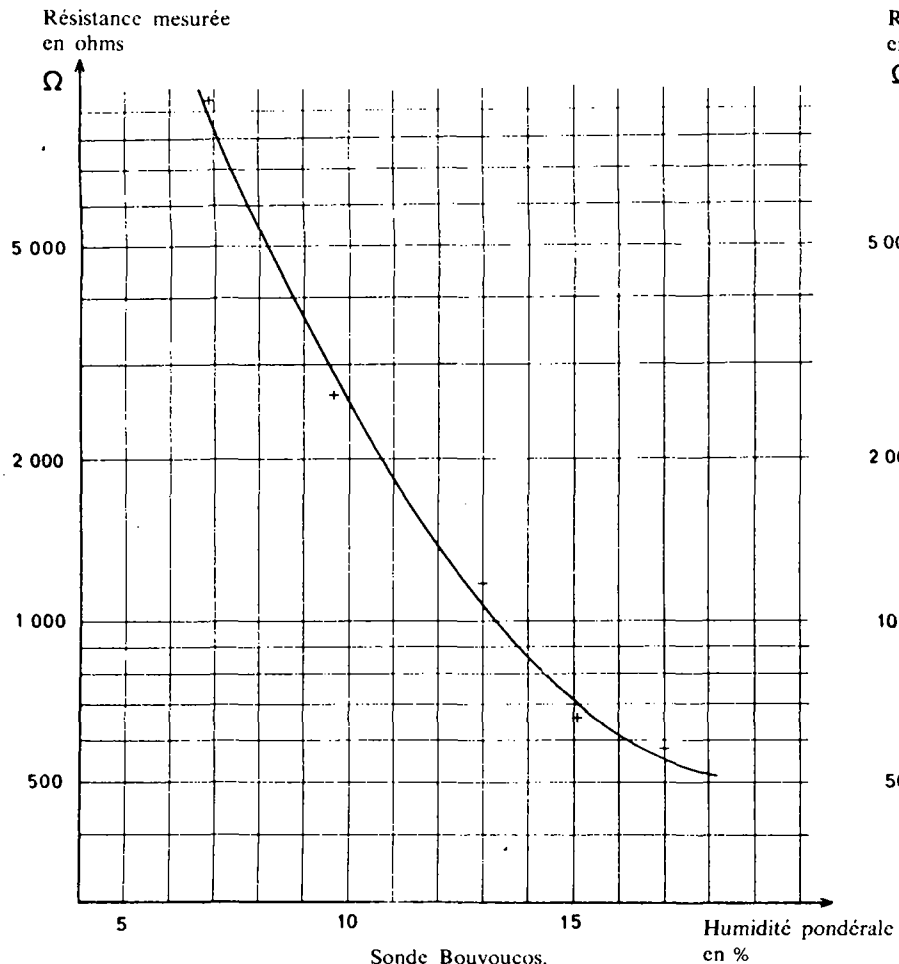
En ce sens, le micro-psychromètre complète bien le tensiomètre : ce dernier permet les mesures de potentiels faibles dans le sol (humidités élevées), le premier étant plus précis pour les mesures de potentiel élevé (humidités faibles), dépassant largement 1 bar.

3.4.3. – Méthodes électriques.

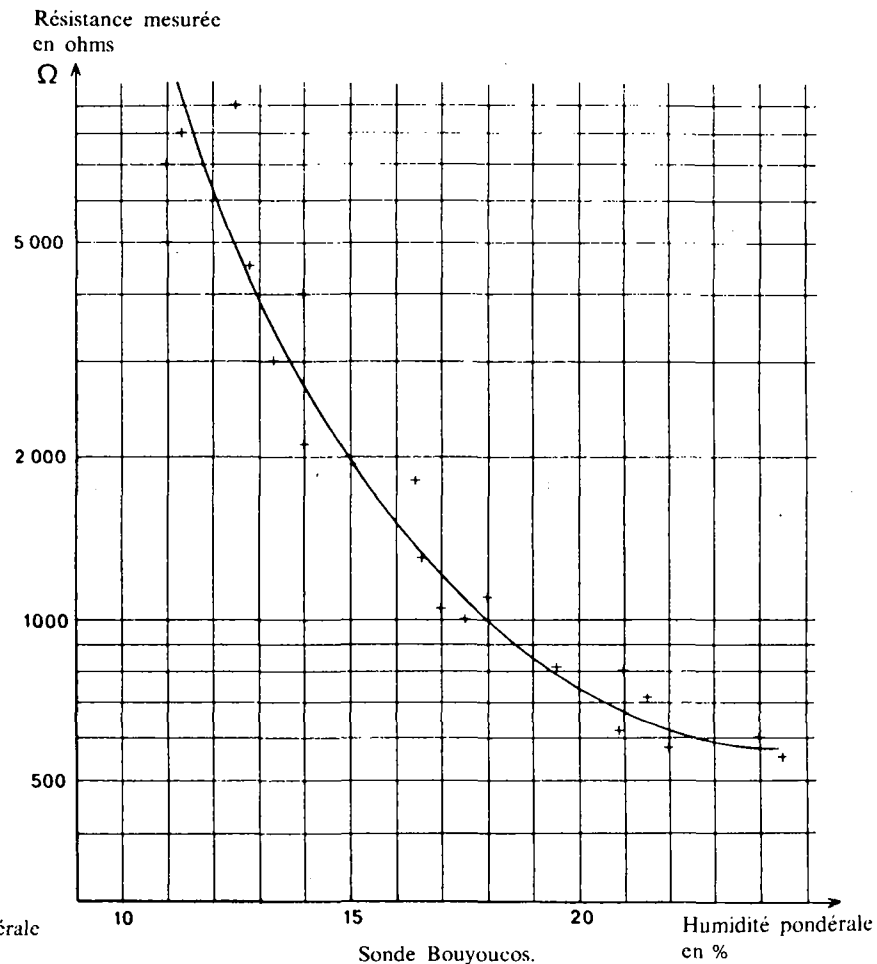
Les méthodes de mesure du potentiel de l'eau dans le sol basées sur des propriétés électriques sont les plus simples à mettre en œuvre et les appareils utilisés sont les plus robustes. On utilise soit des mesures de résistivité, soit des mesures de permittivité (constante diélectrique).

Citons par exemple le dispositif de BOUYOCOS, qui consiste à mesurer la résistivité d'un bloc de plâtre en contact avec le sol. L'étalonnage doit se faire pour chaque type de sol, afin de donner directement l'humidité en fonction de la résistance mesurée (figure 35).

Un dispositif couramment rencontré est constitué par un capteur ayant l'aspect d'une lame sur laquelle sont fixées les armatures d'un



Courbe d'étalonnage dans le cas d'un limon.



Courbe d'étalonnage dans le cas du sol d'Antony.

FIGURE 35. — Relation entre résistivité et humidité du sol (d'après Normand).

condensateur dont le diélectrique est le sol entourant la lame. De tels appareils simples, robustes et portatifs sont très séduisants en utilisation au champ, pour des dispositifs d'alerte à l'irrigation; malheureusement, leur précision est très médiocre; de plus, dans des sols lourds, la difficulté d'obtenir un bon contact entre le sol et la sonde en limite fortement l'emploi.

3.4.4. — Méthode d'extraction de l'eau sous pression : Marmite de Richards.

On dispose l'échantillon de sol saturé sur une plaque de porcelaine poreuse dont la face inférieure est maintenue à la pression atmosphérique P_a (figure 36) et la face supérieure à une pression égale à P (au-dessus de la pression atmosphérique). Le flux d'eau, qui sort alors du sol et traverse la porcelaine poreuse, cesse lorsque l'équilibre des potentiels est réalisé de part et d'autre de la plaque.

À l'équilibre, on a : $\Psi(A) = \Psi(B)$

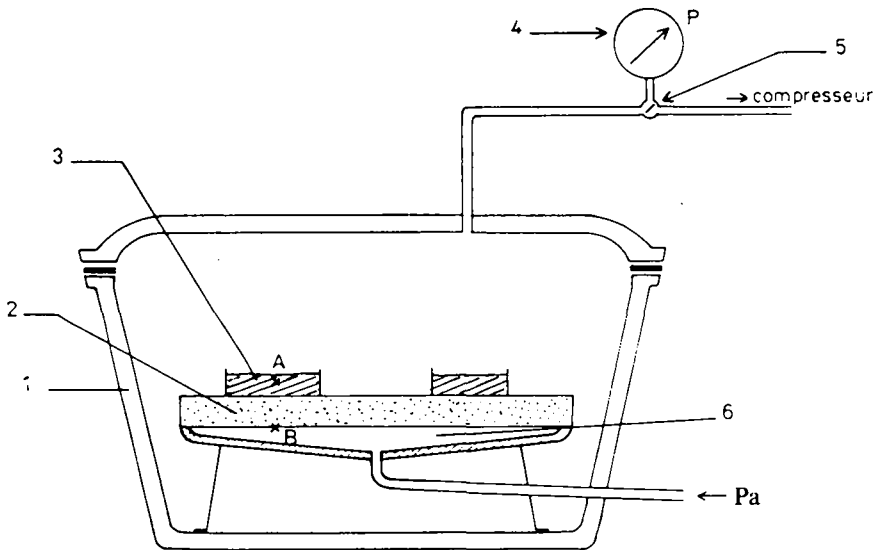
ou, si l'on raisonne en terme de succion :

$$S(A) = S(B)$$

Or : $S(B) = 0$ (eau libre à la pression atmosphérique);

$$S(A) = S(M) + P.$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} S(A) : \text{succion totale en A;} \\ S(M) : \text{succion matricielle de l'eau à l'équilibre;} \\ P : \text{pression au-dessus de la pression atmosphérique.} \end{array} \right.$



1. Autoclave. — 2. Porcelaine poreuse. — 3. Échantillon de sol. — 4. Manomètre. — 5. Détendeur. — 6. Chambre à la pression atmosphérique.

FIG. 36. — Marmite de Richards pour l'extraction de l'eau sous pression.

À l'équilibre, on a donc : $S(M) = -P$

En imposant différentes valeurs de P , il est possible de réaliser dans le sol autant d'états d'hydratation. Ceux-ci correspondent à des potentiels matriciels bien définis. Il reste à déterminer l'humidité pondérale de l'échantillon pour obtenir les points de la courbe $\Psi\theta$.

3.5. – DÉTERMINATION DES HUMIDITÉS CARACTÉRISTIQUES

3.5.1. – Utilisation de la marmite de Richards.

On peut à l'aide de la marmite de Richards déterminer les valeurs des humidités caractéristiques du sol, c'est-à-dire essentiellement :

- l'humidité à la capacité de rétention (HCR);
- l'humidité au point de flétrissement permanent (HPF).

– HCR correspond approximativement au pF 2,8 (2 à 3 suivant la texture).

Exemples de valeurs de HCR (valeurs pondérales, en %) :

A	Argile	35	(31-39)
AL	Argilo-limoneux	31	(27-35)
LA	Limono-argileux	27	(23-31)
L	Limoneux	22	(18-26)
AS	Argilo-sableux	21	
LS	Limono-sableux	14	(10-18)
Sa	Sable argileux		(12-14)
Sf	Sable fin (20-200 μ)		(16-17)
Sg	Sable grossier (200 à 2 000 μ)		(4-13)

TABLEAU 37.

TYPE DE SOL	HPF/HCR
Sables fins (100 à 300 μ) purs ou argileux (10 % d'argile).	$\frac{1}{5,5}$ à $\frac{1}{6}$
Sables limoneux contenant 10 à 25 % d'argile, suivant limons.	$\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{4}$
Sables « moyens » (500 à 800 μ) assez argileux, 20 à 25 % d'argile.	$\frac{1}{2}$
Argiles sableuses ou plastiques (sous-sol) 40 à 80 % d'argile.	$\frac{1}{1,7}$ à $\frac{1}{1,5}$

– HPF correspond approximativement au pF, 4,2. Cette humidité est plus délicate à mesurer.

En l'absence de données précises, on admettra qu'elle vaut la moitié de l'humidité à la capacité de rétention :

$$\text{HPF} = 1/2 \text{ HCR}$$

En fait le coefficient $\frac{\text{HPF}}{\text{HCR}}$ varie en fonction de la texture du sol comme l'indique le tableau 37.

3.5.2. – Autre méthode.

Une méthode pratique de mesure de la capacité de rétention du sol consiste à analyser *in situ* la cinétique de l'eau au cours d'un ressuyage après apport d'une dose d'arrosage sur un sol sec et bien drainé au départ.

Il est nécessaire pour cela de pouvoir effectuer des mesures répétées au même endroit pendant plusieurs jours : la sonde à neutrons se prête donc bien à ce genre de manipulation.

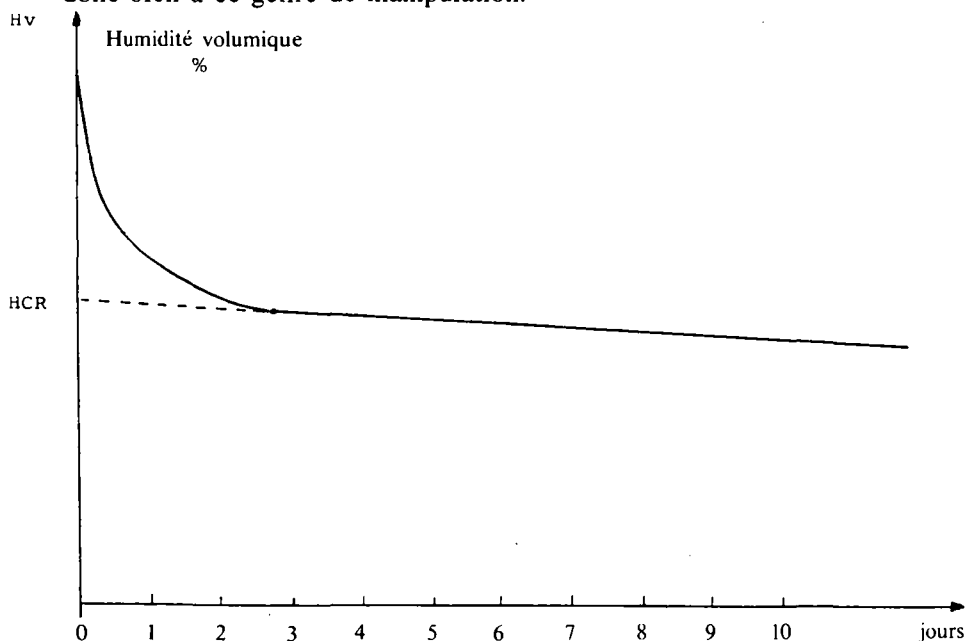


FIGURE 38. – Évolution du taux d'humidité volumique en fonction du temps dans un sol en cours de ressuyage.

Le profil neutronique est relevé avant l'irrigation, et au cours de l'irrigation, pour tracer l'évolution du front d'humectation au cours du temps. Une bâche plastique sera placée ensuite sur le sol pour empêcher l'évaporation au cours du ressuyage.

L'examen des profils montre que, dans les horizons supérieurs, fortement réhumectés, le taux d'humidité décroît très rapidement pendant

les premières heures, puis évolue plus lentement jusqu'à tendre vers une valeur d'équilibre; la cinétique rapide correspond à l'intervention des forces de gravité; la cinétique lente correspond à l'intervention des forces capillaires (voir figure 38).

La capacité de rétention est définie sur le graphique comme la fin de la cinétique rapide, et le début de la cinétique lente. Cette limite est mise en évidence de façon très nette si le graphique est établi en coordonnées logarithmiques.

IV. – LA RÉSERVE EN EAU DU SOL

La quantité d'eau maximale disponible dans le sol pour la plante dépend :

- des caractéristiques hydrodynamiques du sol (c'est-à-dire essentiellement HCR et HPF),
- de la profondeur de sol z exploitée par la plante (c'est approximativement la profondeur d'enracinement).

On définit : *la réserve utile* (RU) et la réserve facilement utilisable (RFU).

4.1. – LA RÉSERVE UTILE (RU)

C'est la valeur maximale de la quantité d'eau du sol utilisable par la plante.

$$RU = da (HCR - HPF) . z$$

$$\text{avec : } \left\{ \begin{array}{l} RU = \text{réserve utile en mm;} \\ da = \text{densité apparente de la terre sèche;} \\ HCR = \text{humidité pondérale à la capacité de rétention, en \%;} \\ HPF = \text{humidité pondérale au point de flétrissement permanent en \%;} \\ z = \text{épaisseur de la tranche de sol correspondant à la profondeur d'enracinement, en dm.} \end{array} \right.$$

4.2. – LA RÉSERVE FACILEMENT UTILISABLE (RFU)

C'est la fraction de la RU disponible à une tension suffisamment faible pour que la plante transpire à l'ETM.

$$RFU = da (HCR - HC) . z$$

$$\text{avec : } \left\{ \begin{array}{l} RFU = \text{réserve facilement utilisable, en mm;} \\ HCR = \text{humidité pondérale à la capacité de rétention, en \%;} \\ HC = \text{humidité critique pondérale, en \%;} \\ z = \text{épaisseur de la tranche de sol correspondant à la profondeur d'enracinement, en dm.} \end{array} \right.$$

Dans la pratique, il est difficile d'avoir une estimation satisfaisante de HC, et l'on se contente d'estimer la RFU à partir de la RU :

$$RFU = \alpha RU$$

Avec $0,5 \leq \alpha < 1$ (La valeur $2/3$ est la plus couramment employée).

Ces notions conduisent à considérer schématiquement le sol comme un réservoir dont une partie est disponible à volonté (RFU), et dont le reste, que l'on peut appeler « Réserve de survie » ($RS = RU - RFU$), est d'autant plus rationné que l'on est proche de l'épuisement.

Les modalités de ce rationnement ont été étudiées par HALLAIRE sur des échantillons de sol en laboratoire. Les résultats sont illustrés par le graphique suivant (figure 39).

Pour des conditions d'évaporation continue et uniforme, la vitesse de dessèchement du sol (dH/dt) est constante tant que l'on ne descend pas en-dessous de l'humidité critique HC; en-dessous de cette valeur, la vitesse de dessèchement décroît régulièrement. Enfin, on remarque que HC est d'autant plus faible que l'évaporation (donc la vitesse de dessèchement) est elle-même plus faible.

Nous avons vu que la notion d'humidité critique est fluctuante. La notion de RFU l'est donc aussi. Pour un même sol, la RFU est d'autant plus faible que la vitesse de dessèchement du sol est plus rapide; par contre, elle augmente quand le système racinaire se densifie.

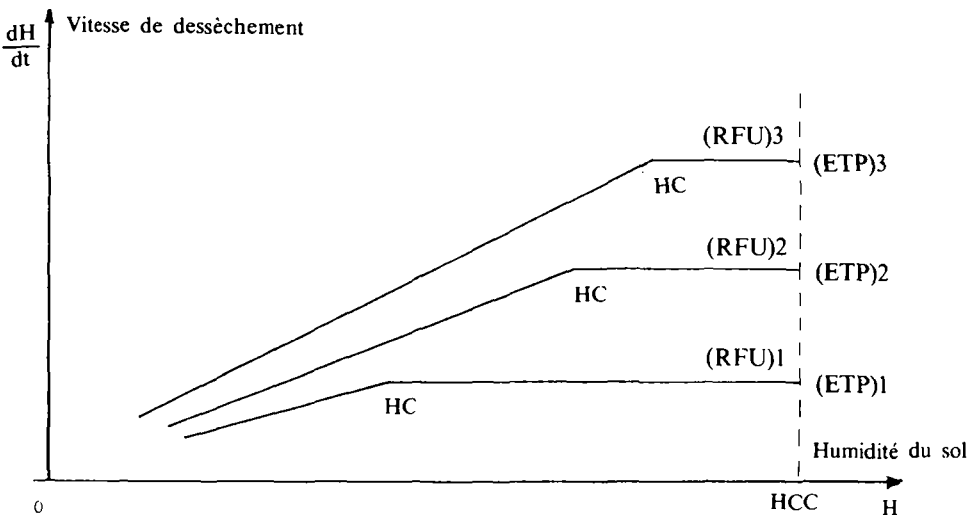


FIGURE 39. — Vitesses de dessèchement d'un même sol en fonction de son humidité pour différents niveaux d'évapotranspiration.

La réserve utile d'un sol est d'autant plus élevée que sa texture est plus fine (figure 40).

Cependant, le rapport RFU/RU est plus faible pour les sols à texture fine que pour les sols grossiers. Comme par ailleurs l'enracinement est

généralement moins bien développé dans les sols lourds que dans les sols légers, il en résulte que l'éventail des valeurs de RFU pour différents types de sols est plus réduit que celui des valeurs de RU (cf. tableau 41).

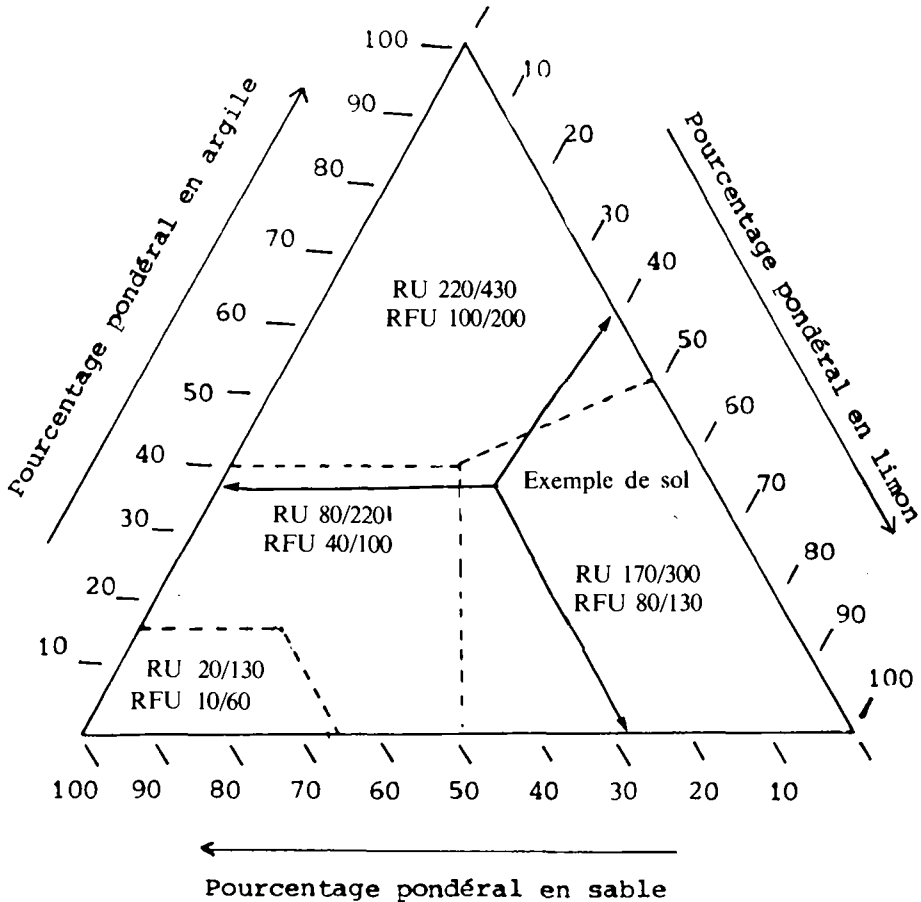


FIGURE 40. — Valeurs de la réserve utile et de la réserve facilement utilisable pour quelques grandes classes de sol.

RU : réserve utile en mm;

RFU : réserve facilement utilisable en mm;

Valeurs données pour une profondeur de sol de 1 mètre.

Les chiffres donnés ont valeur d'ordre de grandeur. L'idée est de rattacher à une donnée connue, la texture du sol, quelques valeurs de la RU et de la RFU (inspiré de références américaines).

V. – CARACTÉRISTIQUES HYDRIQUES DE DIFFÉRENTS TYPES DE SOL. EXEMPLE DE CALCUL DE LA RÉSERVE EN EAU

À défaut de mesure des caractéristiques hydriques d'un sol, on dispose quelquefois d'une analyse granulométrique, laquelle peut permettre une estimation de son humidité équivalente ou de sa réserve utile.

5.1. – FORMULE DE GRAS ET BETREMIEUX

$$\begin{aligned} HE &= 0,51 A + 0,14 L + 7,35 && \text{Si } HE < 20 \% \\ HE &= 0,59 A + 0,16 L + 5,47 && \text{Si } HE > 20 \% \end{aligned}$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} HE \text{ humidité équivalente exprimée en \% pondéral;} \\ A \text{ teneur en argile (particules inférieures à 2 microns) en \% ;} \\ L \text{ teneur en limon (particules de 2 à 50 microns) en \% .} \end{array} \right.$

5.2. – FORMULE DE CHAROY

GILLET et CHAROY ont déterminé une relation entre la teneur en éléments fins du sol et sa réserve utile pour des sols alluviaux peu évolués, de textures très différentes, de la vallée du Goulbi de Maradi au Niger.

Quatre classes de sol ont été déterminées en fonction de la plasticité. La relation existant entre la capacité de rétention, la plasticité, la teneur en argile et limon et le pF est la suivante :

Notation de la classe	Plasticité	$A + \frac{L}{2}$ en %	pF
NP	Sols non plastiques	5 à 12	2,5
PP	Sols peu plastiques	12 à 22	2,5 à 3
P	Sols plastiques	22 à 50	3
TP	Sols très plastiques	50 à 72	3

Dans ces limites, l'humidité pondérale à la capacité de rétention s'établit comme suit en fonction de $X = A + \frac{L}{2}$ en % :

$$\begin{aligned} \text{sols non plastiques } Y &= 0,901 X - 0,77; \\ \text{sols peu plastiques } Y &= 0,821 X + 0,194; \\ \text{sols plastiques et très plastiques } Y &= 0,330 X + 10,98. \end{aligned}$$

L'humidité pondérale au point de flétrissement (à pF = 4,2 pour les quatre types de sols) est par ailleurs :

$$Y = 0,254 X + 0,403$$

Les résultats des nombreuses analyses effectuées ont permis de tracer le graphique de la figure 41.

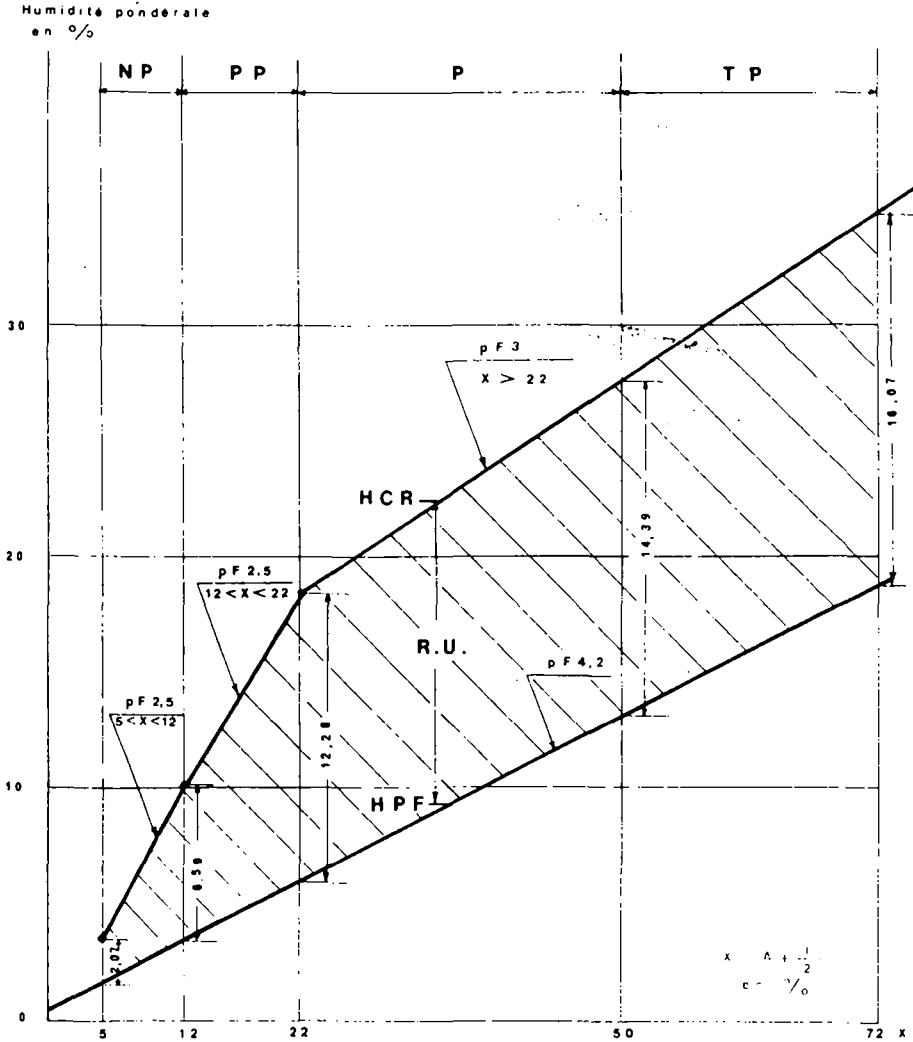


FIGURE 41. - Caractéristiques hydriques et plasticité de divers types de sols de textures très différentes, en provenance de la vallée du Goulbi de Maradi au Niger (d'après Gillet et Charoy).

NP PP P TP Classes de plasticité.
 RU Réserve utile.

Remarque.

Le tableau 42 nous montre quelques exemples de calcul de la réserve en eau pour certains sols. On voit nettement qu'en plus de la connaissance des valeurs de HCR et HPF il importe d'avoir une bonne estimation de la profondeur d'enracinement.

Ceci est encore plus important lorsque l'on a affaire à des sols lourds. Les sols ferrallitiques, par exemple, sont des sols souvent riches en argiles, assez compacts, que l'on ne peut souvent exploiter que sur une

TABLEAU 42. – EXEMPLES DE CALCUL DE LA RÉSERVE UTILE

	Argile A (%)	Limon L (%)	Sable S (%)	HCR pondéral (%)	HPF pondéral (%)	z cm	da	RU = da (HCR - HPF) z mm	α	RFU mm
Sol argileux	55	25	20	40	24	50	1,20	RU = 1,20 (40-24) 5 = 96	0,50	48
Sol limoneux	15	70	15	28	15	60	1,40	RU = 1,40 (28-15) 6 = 109	0,60	66
Sol argilo-sableux	10	45	45	16	9	80	1,60	RU = 1,60 (16-9) 8 = 90	0,70	63
Sol sableux	8	27	65	12	5	100	1,75	RU = 1,75 (12-5) 10 = 123	0,75	92

faible épaisseur. Les vertisols, que l'on rencontre couramment en Afrique dans les zones à saison sèche marquée (Niger par exemple), sont des sols également très compacts, de faible perméabilité, dans lesquels l'eau diffuse mal ; on a généralement tendance à surestimer la réserve de ces sols : l'eau n'est en fait facilement disponible que pour une faible plage d'humidité, et la réserve du sol est rarement bien exploitée au-delà de 50 cm. Ce sont donc des sols que, malgré leur capacité de rétention élevée, on est obligé d'irriguer de façon fréquente et à faible dose.

VI. – AUTRES CARACTÉRISTIQUES DU SOL LIÉES À SON APTITUDE À L'IRRIGATION

6.1. – LA PERMÉABILITÉ

6.1.1. – Définition de la perméabilité.

La perméabilité du sol est définie par sa *vitesse d'infiltration* qui est la quantité maximale d'eau qui peut traverser le sol dans un temps donné. On l'exprime en général en mm/h.

La loi reliant la vitesse d'infiltration K au débit d'eau observé à travers une colonne de terre, au champ ou au laboratoire, est exprimée par la formule de DARCY :

$$Q = K \cdot S \cdot \frac{h}{l}$$

avec :

- Q = débit d'eau en cm^3/s ;
- K = vitesse d'infiltration exprimée en cm/s ;
- S = section traversée en cm^2 ;
- h = charge d'eau au-dessus de la base de la colonne de sol en cm ;
- l = hauteur de la colonne de sol traversée, en cm .

Le rapport $\frac{h}{l}$ est appelé *pente de l'écoulement* ou *gradient hydraulique*.

6.1.2. – Variation de la perméabilité.

On peut définir, en fonction de la valeur de K exprimée suivant diverses unités, différentes classes de perméabilité :

Vitesse d'infiltration K.

cm/s	mm/h	m/s	m/j
Sols imperméables.			
10^{-5}	0,36	10^{-7}	0,00864
Sols peu perméables.			
10^{-4}	3,6	10^{-6}	0,0864
Sols moyennement perméables.			
10^{-3}	36	10^{-5}	0,864
Sols perméables.			
10^{-2}	360	10^{-4}	8,64
Sols très perméables.			

N. B. Les chiffres de ce tableau correspondent aux limites des diverses classes de perméabilité. Par exemple, les sols perméables ont une vitesse d'infiltration comprise entre 10^{-3} et 10^{-2} cm/s. Quant aux classes extrêmes, elles ne sont définies que par rapport à une seule valeur : les sols imperméables sont des sols dont la vitesse d'infiltration est inférieure à 10^{-5} cm/s, alors que les sols très perméables ont une vitesse d'infiltration supérieure à 10^{-2} cm/s.

Voici, suivant la nature du sol, un ordre de grandeur de la valeur de K en mm/h :

Très argileux	< 1,2
Argileux	1,2 à 1,5
Limoneux	5 à 20
Limono-sableux	60 à 120
Sableux	120 à 250
Sables grossiers	250 à 1000

On voit donc que la perméabilité d'un sol dépend beaucoup de sa *texture*, les sols à texture fine étant les moins perméables (voir fig. 43). Mais, pour un sol donné, la perméabilité dépend également de sa *structure*.

On pourra donc augmenter la perméabilité du sol en améliorant sa structure (travail du sol, amendement organique ou calcique...). Enfin, la perméabilité varie avec l'*état d'humectation* du sol, essentiellement pour les sols argileux et les sols humifères dont la perméabilité décroît au fur et à mesure de leur état d'humectation.

K en mm/h

Exemple : Vertisol, à l'état humide	0,5 à 1
Vertisol, à l'état sec	5 à 12

Dans certaines méthodes d'irrigation, aspersion par exemple, il est essentiel de limiter les apports d'eau à la capacité d'infiltration du sol. Sur les sols en pente, cette règle doit être encore plus strictement observée, si l'on veut éviter le ruissellement qui entraîne de l'érosion, un gaspillage de l'eau, et un manque d'uniformité de l'arrosage.

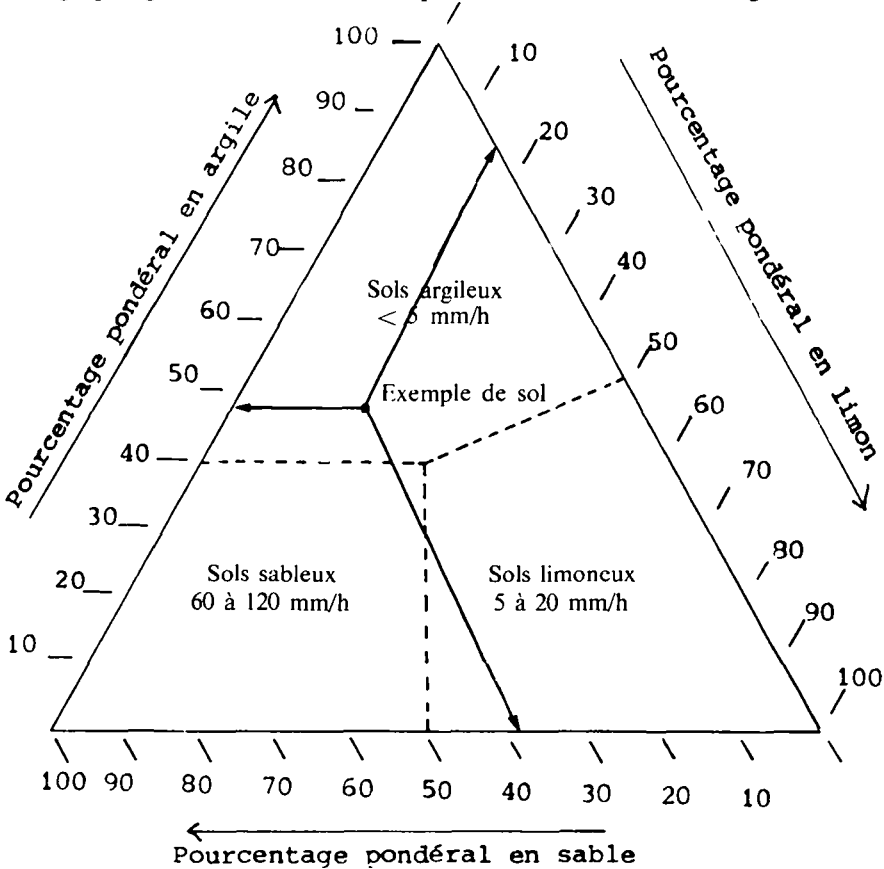


FIGURE 43. – Variation de la perméabilité en fonction de la texture du sol (ordres de grandeur).

6.1.3. – Mesure de la perméabilité.

6.1.3.1. – Méthode du puits ou Méthode de PORCHET.

Cette méthode consiste à creuser un trou cylindrique (par exemple à la tarière), de 10 cm de diamètre et de 50 cm de profondeur environ. Après l'avoir rempli d'eau, on observe la variation du niveau (figure 44).

On note la hauteur h_1 de l'eau à l'instant t_1 et la hauteur h_2 à l'instant t_2 . Soit r le rayon du puits; la vitesse d'infiltration K est donnée par la formule :

$$K = \frac{r}{2 (t_2 - t_1)} \text{Log} \frac{(h_1 + r/2)}{(h_2 + r/2)}$$

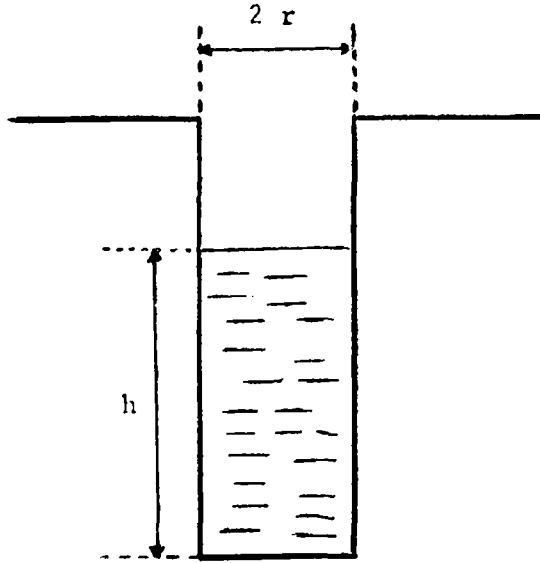


FIGURE 44. — Mesure de la vitesse d'infiltration par la méthode de PORCHET.

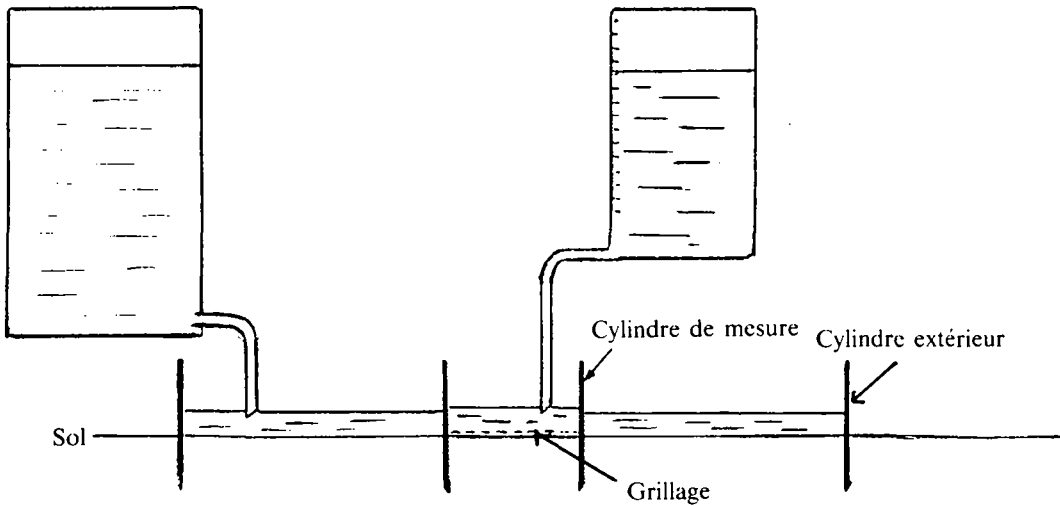


FIGURE 45. — Mesure de la vitesse d'infiltration par la méthode de MUNTZ.

6.1.3.2. — Méthode de l'infiltromètre, ou méthode de MUNTZ.

Cette méthode utilise un cylindre en tôle épaisse, de section intérieure 100 cm^2 ($\varnothing = 112 \text{ mm}$), et de 25 cm de haut. Le cylindre est enfoncé dans le sol de 5 cm environ, en prenant soin de l'ébranler le moins possible. Un fin grillage placé en surface permet d'éviter l'érosion et de régulariser l'infiltration.

L'alimentation en eau se fait, soit par flacon verseur à niveau cons-

tant, gradué en hauteur d'infiltration (voir figure 45), soit manuellement en ajoutant une même quantité d'eau chaque fois que l'on atteint le niveau repéré par une pointe fine enfoncée dans le sol.

On procède généralement à cette mesure en ajoutant au premier cylindre un second, concentrique, plus large, afin d'obtenir une infiltration orientée verticalement dans le cylindre de mesure.

6.1.3.3. – Méthode du cube ou méthode VERGIÈRE¹.

Enfin, il existe une troisième méthode, celle du cube VERGIÈRE, où la mesure n'est plus faite sur le terrain, mais en laboratoire.

Dans une tranchée pédologique, et à une profondeur déterminée en fonction des horizons du profil, on prélève, à l'aide d'un cube en zinc de 10 cm de côté, un échantillon de sol que l'on isole des parois avec de la paraffine (voir fig. 46).

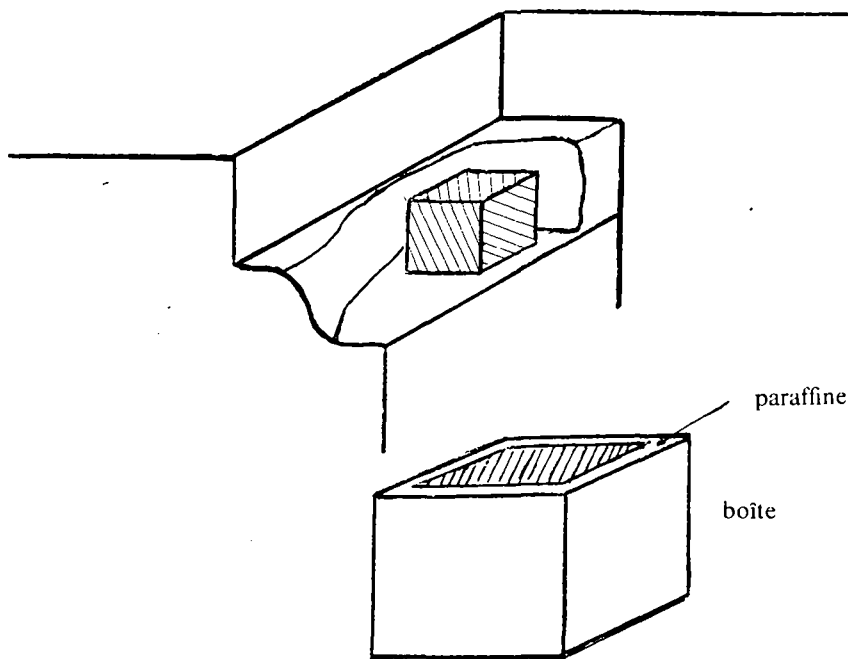


FIGURE 46. – Prélèvement d'un cube VERGIÈRE.

Au laboratoire, on place ce cube sous une charge d'eau constante de 10 cm (le gradient hydraulique est alors égal à 2); et l'on mesure le débit percolé.

On a alors :

1. Ancienne station du CREGR (Centre de Recherches et d'Expérimentation de Génie Rural) sur la commune de Saint-Martin-de-Crau (Bouches-du-Rhône).

$$K = \frac{Q}{200}$$

avec : $\begin{cases} K \text{ en cm/s;} \\ Q \text{ en cm}^3/\text{s.} \end{cases}$

Il est important de se rappeler que la vitesse d'infiltration peut varier au cours de la mesure, quelquefois dans des proportions assez importantes; il est bon de faire 3 mesures de K :

K_1 , immédiatement après la mise en eau;

K_2 , 3 heures après;

K_3 , 24 heures après.

Les valeurs de K_1 et K_2 correspondent aux conditions de l'irrigation, tandis que K_3 correspond mieux à celles du drainage (*).

Toutes ces mesures sont sujettes à des variations locales qui peuvent être importantes. Aussi est-il recommandé d'effectuer autant que possible des répétitions, pour obtenir une valeur moyenne plus précise.

6.2. – LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE

La diffusion de l'eau dans le sol est régie par les différences de tension entre les différents points. Le flux d'eau est donc proportionnel au gradient de tension, ce qui s'exprime par l'équation suivante :

$$\phi = - K_E \frac{d\Psi}{dx}$$

avec : $\begin{cases} \phi \text{ flux d'eau en cm/s;} \\ \Psi \text{ tension de l'eau du sol en atm;} \\ x \text{ distance en cm;} \\ K_E \text{ conductivité hydraulique du sol en cm}^2/\text{s/atm.} \end{cases}$

Le coefficient K_E exprime la plus ou moins grande facilité avec laquelle l'eau capillaire se déplace dans le sol, pour un gradient de tension donné.

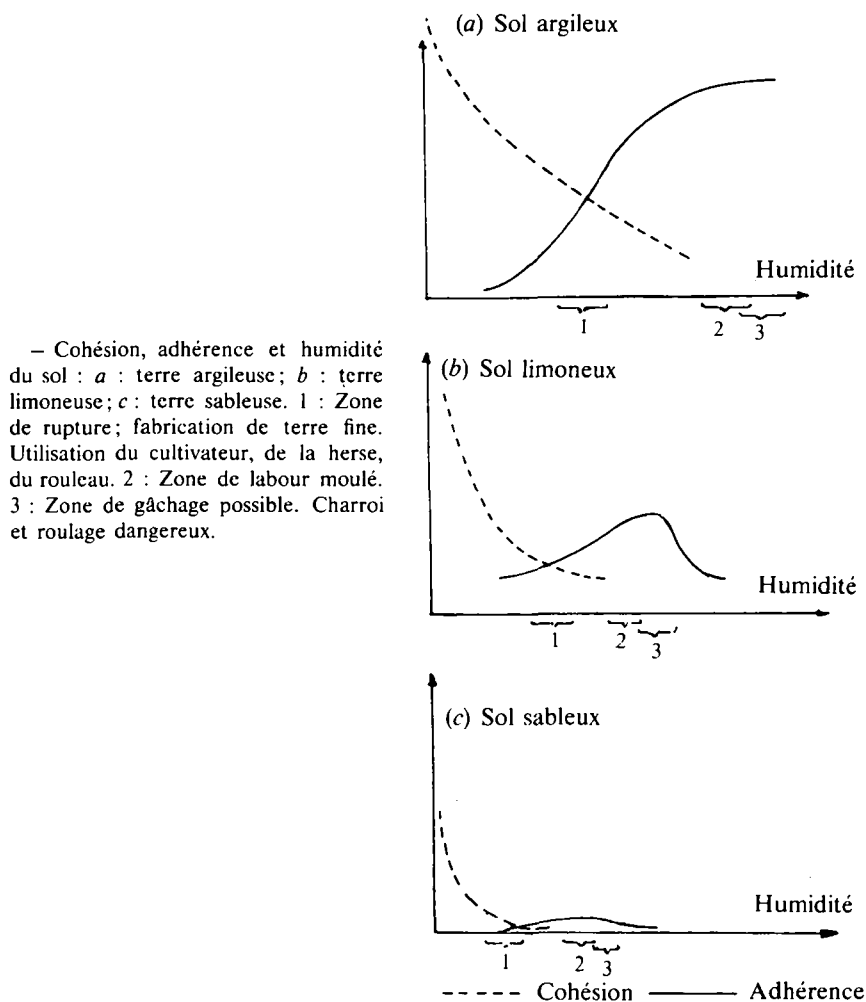
La conductivité hydraulique est plus élevée pour les sols légers que pour les sols lourds. Elle varie également avec l'état d'humidité du sol : elle est d'autant plus forte que le sol est plus humide.

La conductivité hydraulique ne peut se mesurer que de manière indirecte, à partir de mesures des flux hydriques et des tensions.

(*) Pour le drainage, il est recommandé de faire les prélèvements avec des cubes de 20 cm de côté et, si possible, d'effectuer les mesures d'infiltration à la fois dans le sens vertical et dans le sens horizontal, ce qui implique de prélever 2 cubes dans le même horizon.

6.3. – PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES SOLS

Il convient enfin de signaler que les propriétés mécaniques des sols sont étroitement liées à leur état d'humidité. Bien souvent, la conduite de l'irrigation devra tenir compte de ce fait : par exemple, lorsque le sol a tendance à se compacter, on essaiera d'éviter que son humidité soit trop élevée au moment où l'on doit passer avec des engins lourds (récolte par exemple); dans d'autres cas, on se préoccupera d'avoir une humidité optimale au moment du travail du sol, de façon à éviter les accidents dus au lissage des outils tant sur les mottes qu'en fond de raie (semelles), et à obtenir finalement une structure qui ne soit ni trop massive (mottes) ni trop fine.



– Cohésion, adhérence et humidité du sol : *a* : terre argileuse; *b* : terre limoneuse; *c* : terre sableuse. 1 : Zone de rupture; fabrication de terre fine. Utilisation du cultivateur, de la herse, du rouleau. 2 : Zone de labour moulé. 3 : Zone de gâchage possible. Charroi et roulage dangereux.

FIGURE 47. – Cohésion, adhérence et humidité du sol.

Des seuils d'humidité ont été définis pour caractériser les propriétés mécaniques des sols. Ces seuils, ou limites d'ATTERBERG, sont déterminés par des tests en laboratoire, effectués de manière standardisée. On distingue :

- la limite de liquidité (L.L.), au-delà de laquelle le sol a la consistance liquide ;
- la limite inférieure de plasticité (L.I.P.), en-deçà de laquelle le sol n'est plus plastique ;
- le point d'adhésivité (P.A.), situé entre les deux précédents, au-delà duquel la terre reste collée à un objet étranger.

La capacité de rétention (C.R.) se situe généralement entre le point d'adhésivité et la limite inférieure de plasticité ; les humidités se classent donc de la manière suivante :

$$\text{L.I.P.} < \text{C.R.} < \text{P.A.} < \text{L.L.}$$

Le sol sera difficile à travailler si le point d'adhésivité est proche de la capacité de rétention : en effet, la terre adhère alors fortement aux outils dès que le sol est trop humide. En sol très argileux, la limite de liquidité est elle-même souvent très proche de la capacité de rétention ; le danger de compaction est alors important.

Les graphiques de la figure 47 expriment la façon dont varient les propriétés de cohésion et d'adhérence d'un sol en fonction de son humidité.

CHAPITRE III

NOTIONS LIÉES À LA PLANTE

I. – L'EAU DANS LA PLANTE

L'eau est un constituant essentiel de la matière vivante et une très grande quantité d'eau est nécessaire au fonctionnement de tous les végétaux. La majeure partie de l'eau de la plante ne fait que circuler des racines vers les feuilles d'où elle s'échappe sous forme de vapeur. 98 % de l'eau absorbée est ainsi évaporée. L'eau assure un rôle de transport des éléments nutritifs et de régulation thermique au niveau des feuilles. L'eau de constitution par contre ne représente que 2% de l'eau utilisée.

1.1. – LOCALISATION DE L'EAU. TENEUR EN EAU DES TISSUS

L'eau se trouve à l'état liquide dans les cellules, les vaisseaux, les lacunes aquifères. Elle existe aussi à l'état de vapeur dans certains espaces intercellulaires et dans les cavités sous-stomatiques.

Dans les cellules, l'eau se trouve surtout dans le cytoplasme pour les cellules jeunes et dans les vacuoles pour les cellules adultes. La teneur en eau des tissus varie de 60% à 90% du poids frais, selon leur nature, leur état physiologique, leur âge. Cette teneur varie en fonction de celle du milieu extérieur; mais si ces variations peuvent être considérables pour les végétaux inférieurs (mousses, lichens, certaines fougères...), elles sont fortement atténuées pour les végétaux vasculaires, qui constituent la quasi-totalité des plantes cultivées. Remarquons cependant que parmi les plantes cultivées, certaines peuvent perdre d'assez grandes quantités d'eau sans trop en souffrir (canne à sucre), alors que d'autres ne le peuvent pas (bananier, maïs).

1.2. – CIRCULATION DE L'EAU. SA RÉGULATION

L'eau pénètre dans la plante par l'épiderme des racines et des poils absorbants, transite par les vaisseaux jusqu'aux feuilles; après avoir traversé le mésophyle, elle parvient aux cavités sous-stomatiques où elle passe à l'état gazeux, et quitte le végétal par le canal stomatique, qui débouche sur une ouverture à l'air libre, l'ostiole (voir figure 48).

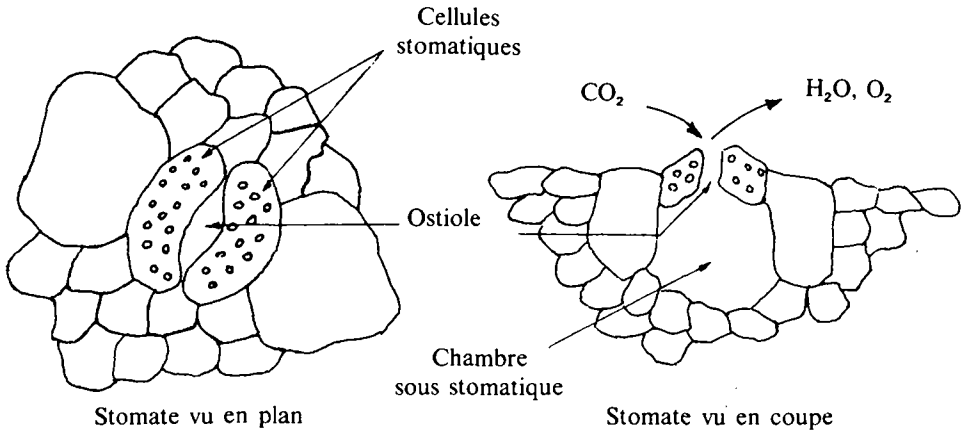


FIGURE 48.

La circulation de l'eau dans la plante est réglée en grande partie par les stomates qui sont des ouvertures de l'ordre de 20 à 50 microns, ménagées sur les faces inférieure et supérieure des feuilles ou seulement sur la face inférieure (tableau 49).

TABLEAU 49.

Nombre moyen de stomates par millimètre carré de feuilles (PERRY et WARD - 1959)			
Espèces	Épiderme supérieur	Épiderme inférieur	Total
Maïs	52	68	120
Blé	33	14	47
Avoine	25	23	48
Haricot	40	281	321
Pomme de terre	51	161	312
Tomate	12	130	142
Chou	141	226	367
Pommier	0	294	294
Pêcher	0	225	225
Cerisier	0	249	249
Chêne - saule	0	723	723

Ces ouvertures sont délimitées par une paire de cellules particulières, les cellules stomatiques, très riches en chloroplastes, dont les déforma-

tions provoquent l'ouverture ou la fermeture de l'ostiole. Le déficit en eau de la plante est le facteur essentiel de la régulation stomatique : un dessèchement relativement important du végétal entraîne une fermeture des stomates. En fait, cette relation n'est pas aussi simple pour de faibles déficits, car d'autres facteurs interviennent dans la régulation stomatique, comme la teneur en gaz carbonique, en oxygène, l'intensité lumineuse, etc.

De plus, les stomates répondent avec une certaine inertie aux variations des conditions du milieu : la régulation n'est pas instantanée ; par contre, la fermeture stomatique observée après un flétrissement important, même bref, persiste partiellement quelques jours après le retour à un état d'hydratation normal.

En définitive, si l'état moyen d'hydratation de la plante est le principal facteur de la régulation stomatique, d'autres éléments interviennent – en particulier la présence ou l'absence de lumière – qui font que ce phénomène est en réalité assez complexe.

II. – CONSÉQUENCES AGRONOMIQUES DU DÉFICIT HYDRIQUE

2.1. – ÉVAPOTRANSPIRATION ET MATIÈRE SÈCHE

Lorsque le sol est insuffisamment approvisionné en eau ou que la plante est physiologiquement incapable d'assurer le débit d'eau résultant de la demande climatique, le régime d'évapotranspiration maximale n'est pas atteint et on se trouve en *régime d'évapotranspiration réelle*, ETR, qui est réduite par rapport à ETM.

$$ETR < ETM$$

La fermeture partielle des stomates réduit les échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère, et freine son activité photosynthétique. On admet généralement que pour une espèce donnée la réduction des flux de vapeur d'eau et de gaz carbonique est sensiblement la même ; il en résulte que les phénomènes d'évapotranspiration et de photosynthèse apparaissent comme proportionnels :

$$\frac{MS_0 - MS}{MS_0} = \frac{ETM - ETR}{ETM}$$

avec : $\begin{cases} MS_0 = \text{production de matière sèche à l'E.T.M.} \\ MS = \text{production de matière sèche à l'E.T.R.} \end{cases}$

La représentation graphique de la variation MS/MS_0 pour différentes cultures en fonction de ETR/ETM nous donne un faisceau de droites passant par le point de coordonnées (1,1) (voir figure 50).

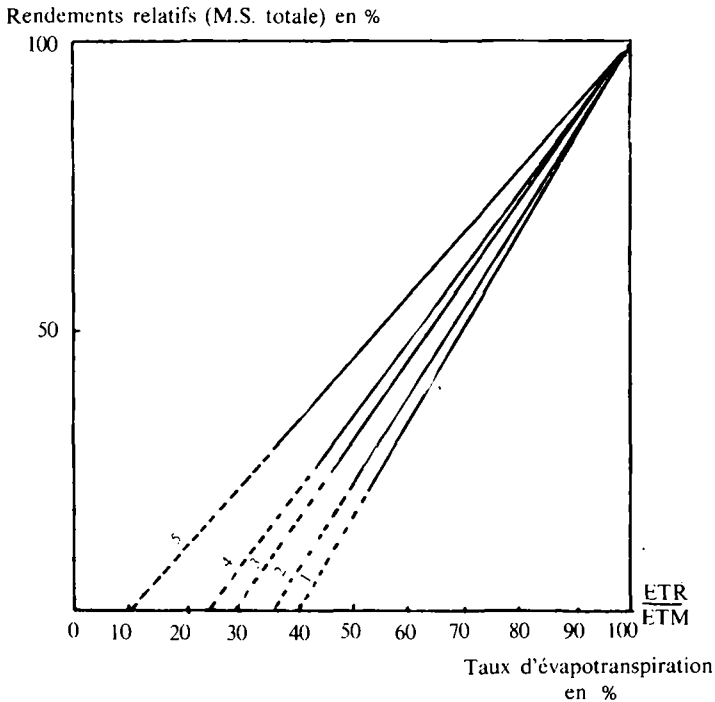


FIGURE 50. — Corrélation entre évapotranspiration et production : valeurs relatives (parcelles de petites dimensions). 1. maïs; 2. betterave sucrière; 3. 4. 5. mélange luzerne-dactyle, 1^{re}, 2^e, 3^e année.

Ainsi l'eau sera plus ou moins bien valorisée selon l'espèce cultivée. Ceci est lié à différents phénomènes, en particulier au mode de fixation du gaz carbonique dans les réactions de photosynthèse : on distingue en effet 2 processus de transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique :

- le cycle de type C₃ ou cycle de CALVIN, qui est suivi par la plupart des plantes cultivées des pays tempérés (blé, tabac, tomate, dactyle...);

- le cycle de type C₄, découvert plus récemment (KORTSCHAK 1965), qui se caractérise par un meilleur bilan photosynthétique. Ce type de métabolisme est suivi en particulier par certaines graminées d'origine tropicale (maïs, sorgho, canne à sucre).

2.2. — TRANSPIRATION ET MATIÈRE SÈCHE

On peut aussi représenter directement la variation de la production de matière sèche en fonction de la transpiration; la relation est linéaire (voir figure 51).

y = augmentation de poids sec
en grammes

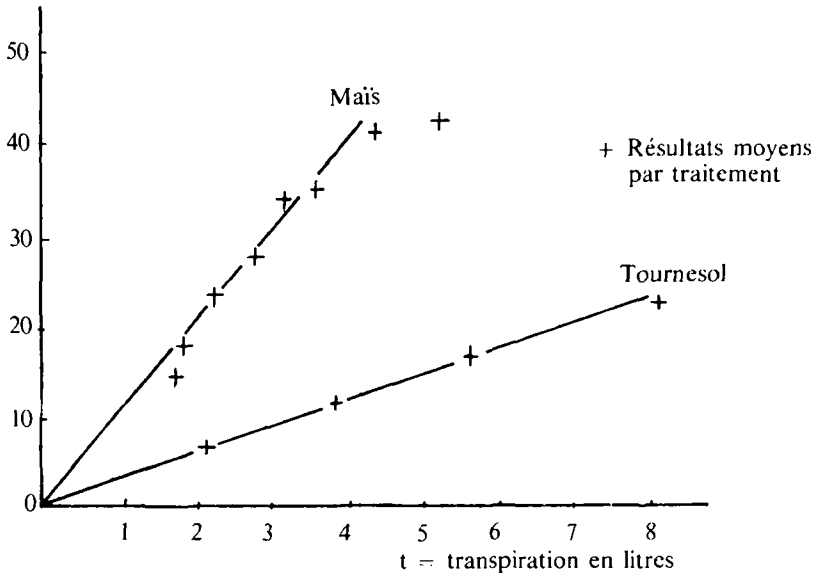


FIGURE 51. — Corrélation entre la transpiration et la quantité de matière sèche formée (plante isolée).

Ces relations deviennent plus complexes lorsque l'on s'intéresse à une partie seulement de la production du végétal (par exemple : production de grains, de fruits, de racines ou de tubercules). En effet :

- la relation entre la production commercialisable et l'évapotranspiration peut ne pas être linéaire ;
- les effets du rationnement ne sont pas les mêmes selon les stades végétatifs auxquels il est appliqué (il existe des périodes plus ou moins sensibles) ;
- les critères de qualité de la production peuvent prendre une importance prépondérante.

Pour tenir compte de ces remarques, on définit les notions d'efficacité et d'efficacité pour caractériser le rendement de l'eau sous ses différents aspects :

2.3. – EFFICIENCE DE L'EAU TRANSPIRÉE

C'est le rapport de la production de matière sèche totale, à l'eau transpirée par la plante :

$$E = \frac{\text{MST (en unité de masse)}}{T \text{ (en unité de masse ou de volume)}}$$

Bien que MST représente en principe la totalité de la plante (parties aériennes et souterraines), on parle souvent d'efficacité de l'eau en précisant qu'il ne s'agit que des parties aériennes.

La notion d'efficacité de l'eau est une notion dont l'intérêt n'est évident que pour le chercheur ou le physiologiste qui veut caractériser le comportement des plantes à la sécheresse; c'est une notion qui s'applique aux cultures irriguées ou non. Sa détermination nécessite des techniques justiciables du laboratoire.

2.4. – EFFICACITÉ (OU PRODUCTIVITÉ) DE L'EAU D'IRRIGATION

C'est une notion qui se rapporte non plus à l'eau transpirée, mais à l'eau apportée sous forme d'irrigation; cette quantité d'eau I est utilisée de différentes manières (évapotranspiration, drainage, ruissellement, stockage dans le sol...); elle ne représente pas non plus la totalité de l'eau fournie à la culture, puisqu'elle ne comprend ni l'eau de pluie, ni l'eau fournie par le sol. La notion d'efficacité de l'eau d'irrigation est donc une notion pratique qui se mesure au champ.

Elle peut s'exprimer en termes physiques (efficacité agronomique) ou en termes monétaires (efficacité économique).

2.4.1. – Efficacité agronomique.

$$E_a = \frac{\Delta P_u}{V}$$

Avec : ΔP_u Augmentation de la production utile (parties aériennes des fourrages, graines des céréales, huile des oléagineux, fruits des cultures fruitières...) exprimée dans l'unité de mesure de la production (masse ou volume).

V Quantité d'eau apportée.

2.4.2. – Efficacité économique.

$$E_e = \frac{R_u}{C_i}$$

Avec : ΔR Augmentation du revenu brut obtenu grâce à l'irrigation (c'est-à-dire valeur du supplément de produit), diminuée éventuellement du coût de production supplémentaire non lié à l'irrigation (frais supplémentaires de fertilisation, de récolte, etc.).

C_i Charges liées à l'eau (c'est-à-dire coût total de l'irrigation). Ce terme comprend le coût de l'eau (taxes, pompage), le coût de la main-d'œuvre nécessaire à l'irrigation, l'amortissement du matériel d'irrigation.

La courbe de variation du supplément de production y (en quantité ou en valeur) en fonction de l'irrigation x (en quantité ou en valeur) n'est pas linéaire et l'on distingue (figure 52) :

- une *production maximale* (en quantité ou en valeur) y_{max} ;
- une *productivité optimale* (avec efficacité maximale de l'irrigation) y_{opt} ;

• l'*efficacité maximale agronomique* est définie par $\frac{y}{x} max$ donc par la tangente à la courbe, passant par l'origine et ayant la plus grande pente. Elle correspond à la plus forte valeur du rendement en q^3/ha par m^3 d'eau d'irrigation ;

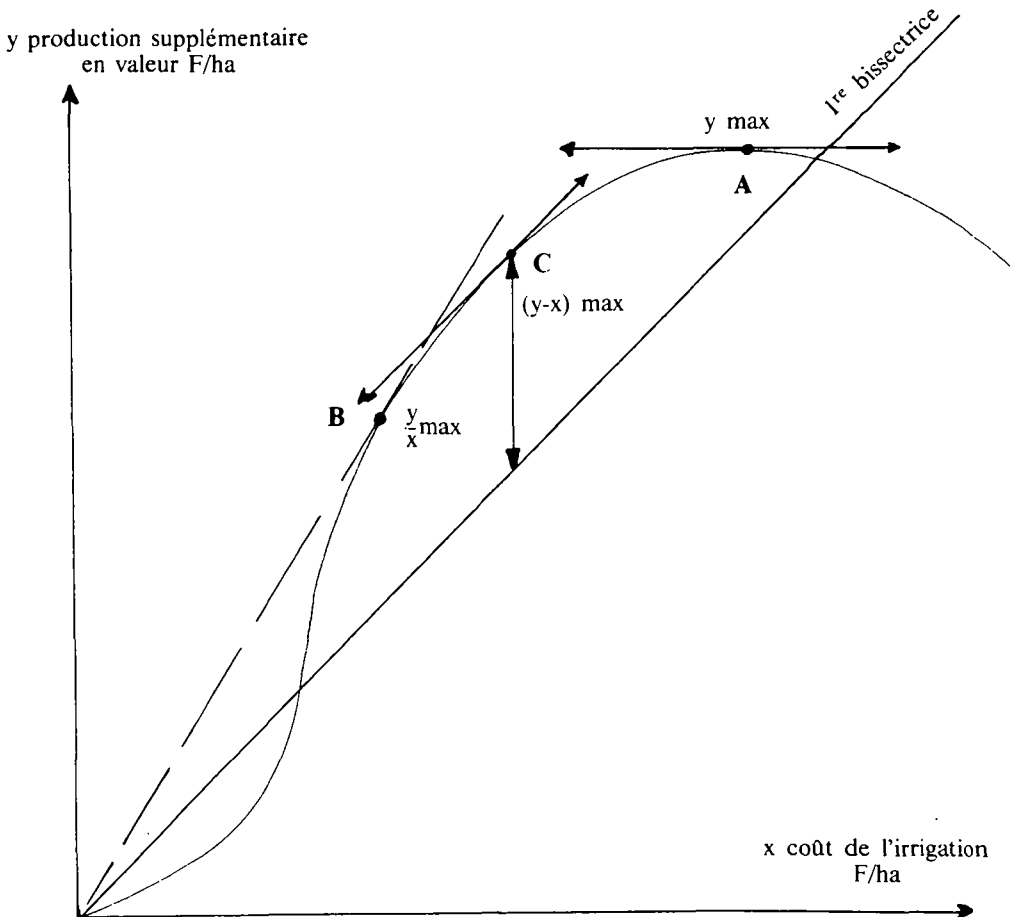


FIGURE 52. - Courbe de variation de la valeur de la production supplémentaire due à l'irrigation en fonction du coût de l'irrigation.

- | | |
|-------------------------------------|-------------------|
| A - production maximale | y_{max} |
| B - efficacité maximale agronomique | $\frac{y}{x} max$ |
| C - efficacité maximale économique | $(y-x) max$ |

• *l'efficience maximale économique* correspond au supplément maximal de revenu par ha résultant de l'irrigation, soit $(y-x)_{max}$. Elle est définie par la tangente à la courbe parallèle à la première bissectrice.

2.5. – RELATION ENTRE PRODUCTION ET ÉVAPOTRANSPIRATION

Le développement d'une plante annuelle passe généralement par plusieurs phases parmi lesquelles on retrouve toujours plus ou moins :

- une *phase initiale* (semis ou plantation);
- une *phase d'installation* avec développement du système racinaire et formation de l'appareil végétatif;
- une *phase de croissance active* pendant laquelle l'activité photosynthétique est maximale;
- une *phase de migration des réserves* suivie éventuellement d'une phase de maturation.

Une bonne alimentation en eau pendant les deux premières phases est le plus souvent impérative pour l'installation de la culture; mais cette période est généralement brève, et l'évapotranspiration relativement faible, si bien qu'il est facile de réunir les conditions hydriques d'une bonne installation (en fait, il s'agit plus de maintenir le sol à un certain niveau d'humidité, que de compenser la consommation en eau de la plante).

Pour le reste, il existe pour certaines cultures des périodes où la satisfaction des besoins en eau présente une grande importance : ce sont des *périodes critiques**, ou périodes de grande sensibilité (P.G.S.), ainsi que des *périodes sensibles** ou périodes de moindre sensibilité (P.M.S.), au cours desquelles l'effet, sur le rendement final, d'un rationnement en eau, est également important, mais de façon moins accusée.

Sans que l'on puisse l'énoncer comme une règle stricte, on observe en général :

que, pour les plantes dont on récolte le fruit (maraîchage, banane, agrumes...) ou la graine (céréales, maïs...), la période de formation des ébauches florales correspond à une période critique;

que cette période critique est suivie d'une période plus ou moins sensible (nouaison, grossissement du fruit ou du grain). Ceci ne signifie pas que pendant la période critique les besoins en eau soient plus élevés, mais seulement que l'effet d'un rationnement en eau a des conséquences sur le rendement plus graves et généralement irréversibles.

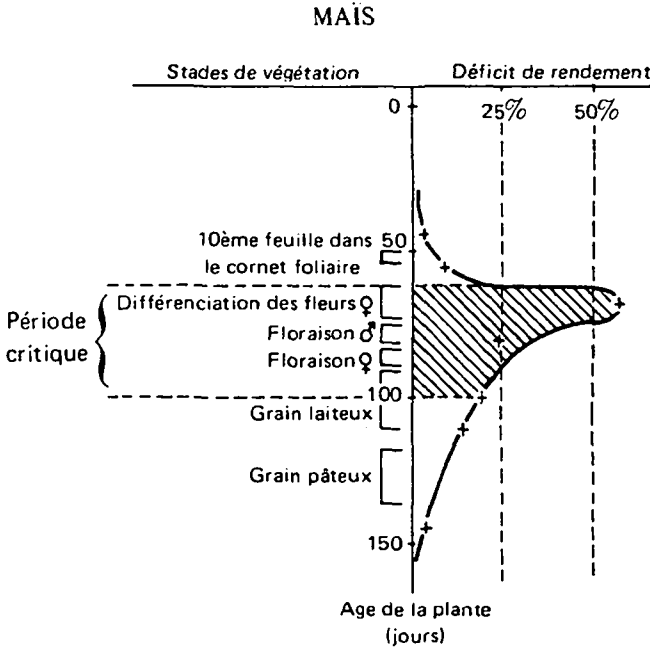


FIGURE 53. — Mise en évidence d'une période critique de sensibilité à la sécheresse (d'après ROBÉLIN 1967).

On peut caractériser l'importance d'une période critique :

- par sa durée ;
- par le déficit relatif de rendement occasionné par un taux donné de rationnement.

Le maïs est une des cultures qui manifestent le plus nettement ce phénomène de période critique, en ce qui concerne la production de grain.

D'après les travaux de ROBÉLIN, la période critique correspond aux 15 à 20 jours qui précèdent la floraison mâle, c'est-à-dire pendant la différenciation des fleurs femelles; cette période se poursuit 15 à 20 jours après la pollinisation. Par la suite, une sécheresse peut toujours provoquer un déficit de rendement, mais nettement moindre (voir figure 53).

III. – COEFFICIENTS CULTURAUX

3.1. – DÉFINITION DES COEFFICIENTS CULTURAUX

On appelle *coefficient cultural* d'une culture irriguée, le rapport

$$K = \text{ETM/ETP}$$

Pour une culture donnée, le coefficient cultural K varie avec :

- le stade végétatif;
- la variété;
- la densité de plantation;
- le climat.

K est plus élevé sous des climats chauds, venteux et secs que sous des climats frais, calmes et humides.

3.2. – VALEURS DES COEFFICIENTS CULTURAUX DE QUELQUES CULTURES

3.2.1. – Cultures maraîchères.

Les cultures maraîchères sont des cultures à cycle court. Les besoins en eau varient en fonction du stade végétatif suivant un schéma à peu près constant :

– *Phase initiale* : c'est la période qui suit immédiatement le semis ou la plantation. Le taux de couverture du sol par la végétation est très faible; donc la transpiration de la plante est minime. Cependant, l'irrigation doit assurer pendant cette période une *humidité constante et élevée* dans le sol pour permettre à la plante d'atteindre rapidement une vigueur normale. On devra avoir durant cette phase des *apports d'eau faibles mais réguliers*. On peut remarquer que pendant cette phase, les besoins en eau sont sensiblement les besoins en évaporation du sol nu.

– *Phase de développement* : la plante s'installe en développant son système racinaire et son appareil végétatif aérien. Les *besoins en eau* sont *croissants* tout au long de cette période et atteignent leur valeur maximale lorsque le taux de couverture du sol est maximal; la réserve du sol exploitée par la plante augmente également, et les doses peuvent être *plus importantes*. Le rapport ETM/ETP croît régulièrement jusqu'à sa valeur maximale.

Il est difficile de fournir des normes précises pendant ces deux premières phases, étant donné la grande variabilité des conditions de culture. Pour la conduite des irrigations, on se basera plutôt sur l'observation de l'état d'humidité du sol que sur le calcul du bilan hydrique.

– *Phase de pleine végétation* : après avoir développé son appareil végétatif, la plante développe les organes qui fournissent la production commercialisable (fruits, tubercules, bulbes). *Le début de cette phase* constitue généralement la *période critique*, au cours de laquelle un déficit hydrique peut avoir des conséquences graves et irréversibles sur la production finale. Quelquefois, cette période critique peut être étalée sur plusieurs semaines : c'est le cas, par exemple, de la tomate (variétés à croissance indéterminée), pour laquelle la floraison s'effectue bouquet après bouquet aussi longtemps qu'on le souhaite. Les besoins en eau pendant cette période sont maximaux.

– Phase de migration des réserves ou phase de maturation. La croissance des organes commercialisables est presque terminée, mais leur composition chimique n'est pas encore définitive. C'est souvent cette phase qui conditionne la qualité du produit final. Selon les espèces, un rationnement sera nécessaire ou non.

Pendant les phases de pleine végétation et de maturation, par contre, on peut estimer les besoins en eau à partir des coefficients suivants :

K = ETM/ETP	Phase de pleine végétation	Phase de maturation
Aubergines	1,0	0,9
Tomates	1,1	0,7
Poivrons	1,0	0,9
Haricots verts	1,0	0,9
Pois	1,1	1,0
Carottes	1,0	0,8
Oignons	0,9	0,7
Concombres	0,9	0,8
Courge	0,9	0,7
Melon	0,9	0,5

Rendement t/ha

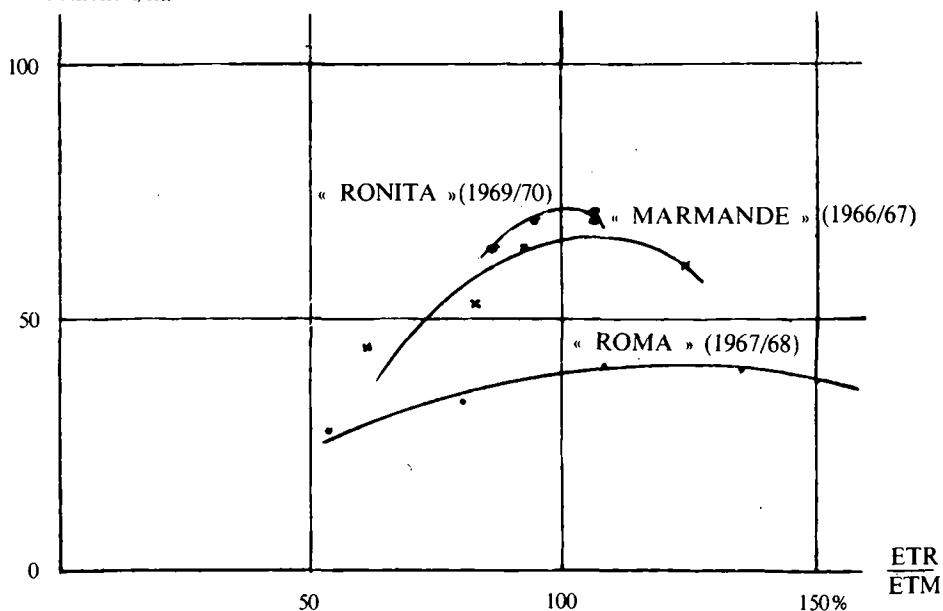


FIGURE 54. – Tomate. Rendement en t/ha en fonction du % de satisfaction des besoins en eau du 40^e au 85^e jour pour trois variétés : Marmande, Roma, Ronita.

Aucun rationnement de l'alimentation hydrique n'est économiquement envisageable sur cultures maraîchères, puisque ce sont des cultures à haut revenu, pour lesquelles l'on a pratiquement $ETR_{opt} = ETM$, au moins pendant la période de pleine végétation.

La réponse à l'irrigation est variable selon les variétés ; sur la figure 54 sont indiqués les rendements en t/ha de fruits sains de trois variétés de tomates (« Marmande », « Romà », « Ronita »), en fonction du pourcentage de satisfaction des besoins en eau du 41^e jour au 85^e jour du cycle, à Tarna au Niger.

3.2.2. – Céréales.

On peut distinguer pour les céréales, 4 phases de végétation :

- phase de germination et de levée ;
- phase de tallage – montaison ;
- phase d'épiaison ;
- phase de maturation (migration des réserves).

– Le coefficient cultural K varie de 0,2 à 0,5 pendant la période de germination et de levée. Les doses doivent être faibles.

– La consommation en eau augmente rapidement au cours de la phase tallage-montaison.

– Le maximum est atteint avant et pendant l'épiaison.

– La phase de maturation voit l'évapotranspiration diminuer sensiblement. La qualité du grain est en partie conditionnée par la façon dont se fait le rationnement pendant cette phase.

Pendant les phases d'épiaison et de maturation, les coefficients culturaux habituellement retenus sont les suivants :

K = ETM/ETP	Fin montaison – Épiaison	Maturation
Orge	1,1	0,2
Blé	1,1	0,2
Avoine	1,1	0,2
Mil	1,0	0,3
Sorgho	1,0	0,5
Mais grain	1,1	0,6

3.2.3. – Café.

Des deux principales espèces de café cultivées dans le monde, seul l'arabica est irrigué ; le robusta ne l'est pratiquement jamais. Pour des

cafétiers adultes, on recommande des coefficients culturaux de l'ordre de 0,9 à 1,1 selon que l'enherbement est réduit (valeurs faibles), ou que, au contraire, on tolère une forte croissance des herbes (valeurs fortes).

3.2.4. – Agrumes.

Les agrumes sont des arbres de climat sec. Leur niveau d'évapotranspiration maximale est réduit grâce à la couche de cire qui recouvre leurs feuilles :

– D'après Hoare et al. le coefficient $\frac{ETM}{E_0}$, E_0 étant l'évaporation d'une nappe d'eau libre, est de 0,9 pour les arbres fruitiers à feuilles caduques, et seulement de 0,7 pour les agrumes.

– D'après Keller et Karméli les besoins de pointe pratiques à considérer pour le dimensionnement d'un réseau d'irrigation à la parcelle sont de 5 à 7 mm/jour pour les vergers à feuilles caduques et seulement de 4 à 6 mm/jour pour les vergers d'agrumes.

De plus, la densité de plantation étant faible (200 à 400 arbres par ha), la consommation d'eau du verger est d'autant plus réduite que l'on peut avoir recours à des techniques d'irrigation localisée. L'effet du vent sur les besoins en eau est négligeable, car les agrumes ont une bonne régulation stomatique. Les coefficients culturaux sont variables essentiellement selon le caractère plus ou moins localisé de l'irrigation, le taux de couverture du sol par la culture, le mode de conduite (verger sol nu ou enherbé).

Voici les chiffres donnés par la F.A.O. pour l'aspersion :

K = ETM/ETP		Floraison	Floraison-récolte
Couverture du sol à 70 %	Sol nu	0,55	0,60
	enherbé	0,80	0,85
Couverture du sol à 50 %	Sol nu	0,50	0,55
	enherbé	0,80	0,85
Couverture du sol à 30 %	Sol nu	0,40	0,45
	enherbé	0,90	0,95

3.2.5. – Ananas.

L'ananas est une plante particulièrement bien adaptée à la sécheresse :

– de par sa morphologie : les feuilles, concaves vers le haut, concentrent l'eau de précipitation ou de rosée vers la base de la plante

où elle est stockée à l'aisselle des feuilles et libérée lentement dans le sol pour être absorbée par les racines ;

– de par son anatomie : les feuilles contiennent des tissus aquifères qui peuvent représenter les 2/3 de l'épaisseur de la feuille ; quand il y a déficit hydrique, la plante utilise cette eau : l'épaisseur de la feuille diminue, puis retrouve sa dimension normale dès que l'alimentation en eau redevient suffisante ;

– de par sa physiologie : comme toutes les plantes de la famille des crassulacées, sa régulation stomatique est d'un type particulier : les stomates restent fermés ou à peine ouverts pendant la journée ; l'énergie nécessaire à la photosynthèse est cependant captée par les chloroplastes.

Par contre, la nuit, les stomates sont ouverts : les échanges gazeux ont alors lieu avec le minimum de pertes d'eau, et les réactions de photosynthèse se produisent à ce moment-là.

L'irrigation est néanmoins une technique intéressante pour l'ananas, dans les climats tropicaux à saison sèche marquée ; elle l'est d'autant plus que l'écologie de cette plante exige des sols légers, souvent à faible réserve en eau. En fait, avant d'avoir recours à l'irrigation, on utilise au maximum les techniques qui permettent d'économiser l'eau du sol (désherbage, couverture du sol par des films polyéthylène...).

Les normes retenues pour l'irrigation sont de 0,6 ETP pendant presque la totalité du cycle. On recommande d'arrêter totalement l'irrigation 15 jours avant la récolte.

Il est important, à partir du moment où l'on irrigue, de veiller à la régularité des apports d'eau : en effet, une irrégularité de l'alimentation hydrique intervenant alors que le fruit est déjà formé, provoque des crevasses entre les yeux, par où pénètrent différents agents pathogènes qui peuvent entraîner la pourriture du fruit. Les irrigations faibles et fréquentes, sur la base de 15 à 25 mm par semaine, seront donc préférables.

3.2.6. – Cotonnier.

Des mesures d'évapotranspiration réalisées à Kogoni (Mali) et à Tanandava (Madagascar) (figure 55), nous permettent de proposer les normes suivantes pour le coefficient cultural K.

Stade	K = ETM/ETP
Phase végétative	0,90
Préfloraison	de 0,90 à 1,20
De la floraison à l'ouverture de la première capsule	de 1,20 à 1,30
Prérécolte	de 1,20 à 0,60

La période critique se situe à la préfloraison.

Les besoins sont importants surtout dans les deux mois qui suivent le début de la floraison. En fait, il n'est pas souhaitable d'apporter au cotonnier la totalité de l'eau qu'il est capable d'évapotranspirer. En effet dans des conditions optimales de végétation, la floraison peut se poursuivre pendant plusieurs semaines, et l'on se trouve au moment de la récolte avec une grande hétérogénéité dans la maturité des capsules. Par ailleurs, une bonne maturation des capsules exige un éclaircissement important, ce qui n'est pas obtenu lorsque la végétation est trop abondante : on observe, lorsque la densité du feuillage est trop importante, une chute précoce des jeunes capsules qui se forment à la base du plant. Ainsi, les cotonniers les plus grands sont souvent productifs et surtout plus hétérogènes. Enfin, l'irrigation, en prolongeant la période de floraison, allonge le cycle végétatif, ce qui peut être gênant lorsque les pluies de fin d'année peuvent compromettre la récolte, ou que l'on veut mettre en place une autre culture en rotation après le cotonnier.

Toutes ces raisons font qu'il est finalement *indispensable de rationner le cotonnier* dès la floraison. Bien qu'aucun essai de rationnement n'ait pu fournir de normes précises, on considère généralement que ce rationnement doit être progressif : en effet, dans la période de floraison, l'hygrométrie de l'air doit être encore importante pour permettre une bonne fécondation (un déficit hydrique trop important à ce moment-là provoque une chute des capsules 8 à 10 jours après la floraison). Par contre, dès que les capsules arrivent à maturité, la sécheresse doit être aussi parfaite que possible.

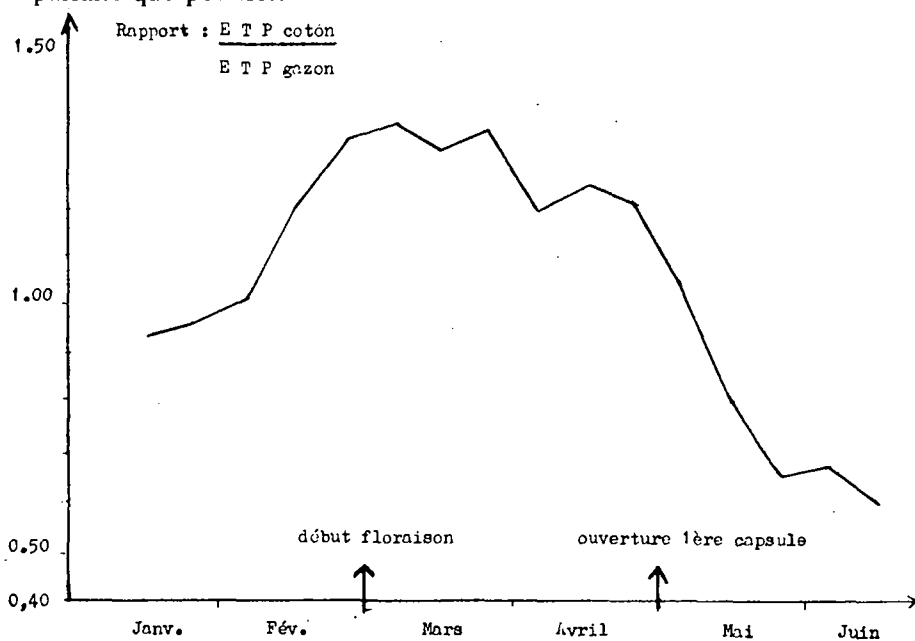


FIGURE 55. — Coefficients culturaux du coton, 1965, Tanandava — Madagascar.

En dernier lieu il faut signaler une particularité physiologique du cotonnier qui est son peu d'aptitude à répondre à un déficit hydrique par la régulation stomatique : on peut ainsi avoir un flétrissement déjà nettement marqué, alors que les stomates restent encore bien ouverts. Pour éviter ce flétrissement, il faut irriguer plus fréquemment et à doses plus faibles que celles qui résultent du calcul classique du bilan hydrique.

3.2.7. – Riz.

La recherche des besoins en eau d'une culture de riz est plus complexe, car les apports d'eau doivent satisfaire à *plusieurs exigences* :

- permettre l'imbibition du sol jusqu'à saturation ;
- permettre l'élévation du niveau du plan d'eau dans la rizière ;
- couvrir les besoins d'évapotranspiration de la culture ;
- assurer le renouvellement de l'eau pour une bonne oxygénation ;
- compenser les pertes par drainage, inévitables dans un sol à saturation.

– *L'imbibition du sol* a lieu à la mise en place (semis ou repiquage) ; les quantités d'eau nécessaires sont fonction de l'état initial d'humidité du sol :

$$Q = (H_s - H_i) d_a \times z$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} Q = \text{quantité d'eau nécessaire en mm;} \\ H_s = \text{humidité à saturation en \% pondéral;} \\ H_i = \text{humidité initiale en \% pondéral;} \\ d_a = \text{densité apparente de la terre sèche;} \\ z = \text{profondeur d'enracinement.} \end{array} \right.$

– *L'élévation du niveau du plan d'eau de la rizière* exige 10 à 15 cm d'eau (100 à 150 mm), selon les variétés. C'est aux environs du 2^e mois de végétation que cet apport est nécessaire ; le rythme d'apport est fonction de la vitesse de croissance du riz, qui est quelquefois voisin de 1 cm/jour au stade montaison. C'est donc généralement à ce stade qu'ont lieu les apports d'eau maximaux.

– *Les besoins d'évapotranspiration de la culture* peuvent être estimés au moyen du coefficient cultural $K = \text{ETM/ETP}$.

Au début de la culture, l'évapotranspiration de la rizière est identique à l'évaporation d'une nappe d'eau libre ; on a selon les climats :

$$\text{ETM} = 1,1 \text{ à } 1,2 \text{ ETP}$$

Par la suite, l'évapotranspiration du riz se rapproche de celle d'un couvert végétal.

L'albedo de la rizière augmente (il est de 0,05 pour l'eau et 0,25 pour

un gazon); sa rugosité augmente également. Si bien que, en climat humide et non venté (saison des pluies), on verra l'ETM diminuer légèrement, alors qu'en climat sec et venté, l'effet de rugosité provoquera au contraire une augmentation de l'ETM. Pratiquement on pourra prendre :

- en climat humide : ETM = 1 à 1,1 ETP;
- en climat sec : ETM = 1,2 à 1,3 ETP.

Enfin, les besoins en eau diminuent légèrement dans le dernier mois avant la récolte; on a alors :

$$\text{ETM} = 0,9 \text{ à } 1 \text{ ETP}$$

Pour le riz de montagne, les coefficients culturaux seront pratiquement identiques, car on recommande généralement de maintenir les couches supérieures du sol dans un état proche de la saturation. Ce n'est que pendant les premières semaines que l'ETM de la rizière non submergée sera nettement plus faible, tant que la végétation ne couvre qu'une partie du sol; on peut alors diminuer le coefficient cultural de 20 % environ.

Par contre, on ne peut pas concevoir un quelconque rationnement du riz irrigué; en effet, l'immersion du riz est une technique impérative, du moins pour les variétés les plus répandues (l'eau joue essentiellement un rôle de régulation thermique, cette culture exigeant une relative stabilité de la température de ses organes). Par conséquent, le riz irrigué consomme obligatoirement à l'ETM.

– *Le renouvellement de l'eau* devient nécessaire dans la plupart des cas, à partir du 3^e mois de végétation, pour assurer une oxygénation aussi bonne que possible du milieu de croissance. Un débit de renouvellement de l'eau de la rizière de 0,15 l/s/ha suffit en moyenne.

– Enfin, les *pertes par drainage* sont inévitables. Pour les minimiser, on cultive généralement le riz sur des sols riches en argiles, donc relativement imperméables; les sols alluvionnaires des deltas conviennent particulièrement bien de ce point de vue.

Le débit correspondant peut être évalué par la formule de DARCY :

$$Q = K.S. \frac{h}{l}$$

avec :

- Q = débit nécessaire en cm³/s;
- K = vitesse de filtration en cm/s;
- S = section de passage en cm²;
- $\frac{h}{l}$ = gradient hydraulique (rapport de la hauteur d'eau – de la surface libre à la base de la tranche de sol concernée – à la hauteur de la colonne de terre.

Si l'on exprime la vitesse de filtration K en mm/h on évalue directement les pertes par drainage D en mm/jour :

$$D = 2,4 K \frac{h}{l}$$

Exemple : pour un sol de rizière argileux, de 60 cm de profondeur, et avec un plan d'eau de 15 cm de hauteur, on aura :

$$K = 0,1 \text{ mm/h};$$

$$h = 75 \text{ cm};$$

$$l = 60 \text{ cm}.$$

$$\text{D'où } D = 2,4 \times 0,1 \times \frac{75}{60} = 0,30 \text{ mm/jour}.$$

La mesure de la vitesse de filtration K se fait par les méthodes exposées au chapitre précédent (méthode du puits, méthode de Muntz, ou méthode Vergière).

À titre d'exemple, les tableaux 56 et 57 détaillent le calcul de la consommation en eau du riz, à raison de 2 cultures par an, soit de juin à août et de novembre à février, soit de mars à juin et d'août à novembre.

Cette évaluation a été faite dans le cadre de la mise en valeur du bassin du Gorgol en Mauritanie (SCET International 1976).

3.2.8. – Canne à sucre.

C'est à la station expérimentale HSPA d'Honolulu aux îles Hawaï qu'ont été effectuées les recherches les plus approfondies sur les besoins en eau de la canne à sucre. Les principales conclusions sur ce thème ont été confirmées par d'autres essais conduits en Australie, en Afrique du Sud, ou à la Réunion :

– *de la plantation ou de la repousse jusqu'au recouvrement total du sol par la végétation* (« full canopy »), les besoins en eau de la canne augmentent linéairement de 0,40 Ebac à 1,00 Ebac lorsque le taux de recouvrement du sol passe de 0 à 100% ;

– *en pleine végétation*, les besoins en eau sont de l'ordre de 1 Ebac. La référence utilisée est l'évaporation d'un bac classe A maintenu au niveau des feuilles supérieures de la culture ;

– un rationnement progressif, puis un arrêt total des irrigations au cours des dernières semaines, est indispensable pour permettre une bonne *maturation*.

Le développement de la canne à sucre est plus ou moins rapide selon qu'il s'agit d'un premier cycle (canne plantée) ou d'un rejeton (repousse). Il est également variable selon les climats et les variétés.

La longueur même du cycle varie selon les modes d'exploitation ; elle

TABLEAU 56. – Consommation en eau du riz en m³/ha (Plantation en juin et novembre) d'après SCET International (Étude de mise en valeur du bassin du Gorgol en Mauritanie).

	1 ^{re} campagne					2 ^e campagne					
	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier	février	mars	avril
Durée de l'irrigation	←————→					←————→					
Imbibition (2 jours)	1 000					1 000					
Recharge et montée du plan d'eau	1 400	500				500	1 400				
Évapotranspiration potentielle × 1,2	1 000	1 800	1 600			300	1 500	1 700	2 000		
Renouvellement 0,15 l/s/ha		400	400				200	400	400		
Perte de drainage 0,2 l/s/ha	250	500	500			100	500	500	500		
	3 650	3 200	2 500			1 900	3 600	2 600	2 900		
TOTAUX ARRONDIS	9 000					11 000					

Phases d'irrigation	1 ^{re} campagne					2 ^e campagne				
	Dates du début des opérations	Nombre de jours après semis	Durée en jours	Consommation nette en m ³		Dates du début des opérations	Nombre de jours après semis	Durée en jours	Consommation nette en m ³	
Imbibition	1/6 au 12/6	0	2 j.	500	1 000	10/11 au 22/11	0	2 j.	500	1 000
Submersion	15/6 au 1/7	15	20 j.	180	3 600	25/11 au 10/12	15	20 j.	170	3 400
Entretien	5/7 au 20/7	35	55 j.	80	4 400	15/12 au 30/12	35	75 j.	90	6 700
TOTAL ARRONDI					9 000					11 000

TABLEAU 57. — Consommation en eau du riz en m³/ha (Plantation en mars et août) d'après SCET International (Étude de mise en valeur du bassin du Gorgol en Mauritanie).

	1 ^{re} campagne					2 ^e campagne					
	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Durée de l'irrigation	←—————→					←—————→					
Imbibition (2 jours)		1 000					1 000				
Recharge et montée du plan d'eau		1 500						1 900			
Évapotranspiration potentielle × 1,2		1 200	2 600	2 600	1 200			1 700	1 800	850	
Renouvellement 0,15 l/s/ha			300	400	200			100	400	200	
Perte de drainage 0,2 l/s/ha		250	500	500	250			500	500	250	
		3 950	3 800	3 500	1 650		1 000	4 200	2 400	1 300	
TOTAUX ARRONDIS		13.000					9 000				

Phases d'irrigation	1 ^{re} campagne					2 ^e campagne				
	Dates du début des opérations	Nombre de jours après semis	Durée en jours	Consommation nette en m ³		Dates du début des opérations	Nombre de jours après semis	Durée en jours	Consommation nette en m ³	
				en m ³ par jour	totale en m ³				en m ³ par jour	totale en m ³
Imbibition	1/3 au 15/3	0	2 j.	500	1 000	15/8 au 28/8	0	2 j.	500	1 000
Submersion	15/3 au 30/3	15	20 j.	190	3 800	1/9 au 15/9	15	20 j.	170	3 400
Entretien	5/4 au 20/4	35	70 j.	115	8 000	20/9 au 5/10	35	55 j.	85	4 600
TOTAL ARRONDI					13 000					9 000

est en général de 12 mois, mais est souvent un peu plus longue pour le premier cycle (16 à 18 mois); dans certaines régions, un léger décalage chaque année permet d'avoir des cycles de 13 à 14 mois; aux Hawaï, des techniques spéciales de récolte et des variétés adaptées permettent des cycles de 24 mois, ou même 36 mois.

On peut fournir les valeurs suivantes comme valeurs moyennes du coefficient $K = \frac{ETM}{ETP}$ pour une canne de 12 mois :

Âge de la culture	Taux de recouvrement du sol	$K = \frac{ETM}{ETP}$
0 à 1 mois	0 à 25%	0,50
1 à 2 mois	25% à 50%	0,80
2 à 2,5 mois	50% à 75%	0,95
2,5 à 4 mois	75% à 100%	1,10
4 à 10 mois	100%	1,20
10 à 11 mois	100%	0,90
11 à 12 mois	100%	Arrêt de l'irrigation

Bien entendu, si la méthode est satisfaisante aux Hawaï, les chiffres ne seront pas les mêmes sous d'autres climats, et avec d'autres conditions culturales. Il faut surtout retenir que le rationnement en eau doit être progressif, et qu'il doit coïncider avec le rationnement de l'alimentation minérale, particulièrement l'alimentation azotée.

La canne à sucre ne présente pas à proprement parler de période critique par rapport à l'irrigation; cependant, la période de tallage, que l'on situe généralement entre 2 et 4 mois de végétation, conditionne quelquefois fortement le potentiel de production, en cas de sécheresse prolongée: en effet, un tallage insuffisant est irrattrapable, la canne perdant sa faculté d'émettre de nombreuses talles après le début de la croissance rapide. On saura donc que sous climat sec, c'est au cours du 3^e et du 4^e mois que les irrigations seront le mieux valorisées. Les augmentations de rendement liées à ces irrigations peuvent atteindre 20 kg supplémentaires de canne, par m³ d'eau apporté.

La phase de levée, par contre, peut plus facilement supporter des sécheresses marquées: d'abord, les besoins en eau y sont encore très faibles; ensuite, un déficit hydrique n'occasionne qu'un retard de la végétation, sans compromettre le cycle.

Enfin, la phase de croissance est la plus consommatrice d'eau; en irrigation intensive c'est aussi la plus importante, puisque c'est la période pendant laquelle se développe la partie usable de la canne. Les essais d'irrigation entrepris partout dans le monde ont montré que si la vitesse d'élongation est variable selon la température, elle est toujours à peu près proportionnelle à l'évapotranspiration; l'efficiencia de

l'eau est donc la même pendant toute la phase de croissance; on la chiffre entre 9 et 12 kg de canne par m³ d'eau.

Notons enfin qu'un léger rationnement pendant cette phase est sans conséquence grave : en effet, la canne à sucre a la possibilité de rattraper par une élongation postérieure plus rapide un ralentissement momentané de la végétation. Enfin en cas de sécheresse plus accentuée, la canne est capable d'utiliser les rosées en absorbant l'eau par les feuilles.

Le point le plus délicat consiste dans le *choix du mode de rationnement de la canne en fin de cycle*; la richesse saccharimétrique à la récolte dépend en grande partie de ce mode de rationnement. À ce sujet il faut savoir que :

- la durée de la maturation est d'autant plus longue que le développement végétatif est important, et l'enracinement profond;
- le niveau de richesse saccharimétrique est également d'autant plus élevé que la maturation est longue;
- cette richesse, après avoir atteint un maximum, décroît; cette chute est d'autant plus rapide que la maturation a été mauvaise;
- d'autres facteurs régissent la plus ou moins bonne maturation et ne doivent pas être négligés (en particulier la fertilisation azotée).

Des essais réalisés par l'IRAT à Ferkessedougou (Côte d'Ivoire), ont permis de définir, dans les conditions locales, le mode de sevrage optimal de la canne; différents niveaux de rationnement ont été testés, chacun avec un arrêt plus ou moins précoce des arrosages. Les richesses en sucre obtenues sont les suivantes :

Coefficient de rationnement bac $K_b = \frac{ETR}{EVB}$	Date d'arrêt des arrosages	
	1 ^{er} janvier	1 ^{er} février
0,8	14,8 %	15,5 %
0,6	14,6 %	14,8 %
0,4	14,2 %	14,4 %

Un sevrage tardif (1 mois avant la récolte) semble préférable; le niveau des irrigations doit rester assez élevé en période de prématuration, d'autant plus que ces apports d'eau tardifs permettent d'accroître encore le tonnage. Il s'agit donc, dans ces conditions, d'une maturation rapide : les analyses en cours de végétation ont d'ailleurs montré que la richesse saccharine maximale était obtenue 20 jours après le sevrage.

À l'opposé, on pratique aux Hawaï, sur des cannes de 2 ans, une

maturation plus lente qui s'étend sur 6 mois. H. Cléments préconise un contrôle de la maturation à partir de mesures de l'humidité des gaines des feuilles n° 3 à 6 des cannes : il considère que cette humidité doit être ramenée linéairement de 83% (chiffre correspondant à une pleine croissance) à 73% (chiffre indicatif d'une bonne maturité) et ceci au cours des 6 mois précédant la récolte. Dans la pratique, on fait figurer sur un graphique la droite représentative de l'humidité recherchée, en fonction de la date ; les irrigations ne sont alors faites que si les humidités des gaines sont inférieures à ce qu'elles devraient être à l'époque considérée (voir figure 58).

Humidité des gaines foliaires

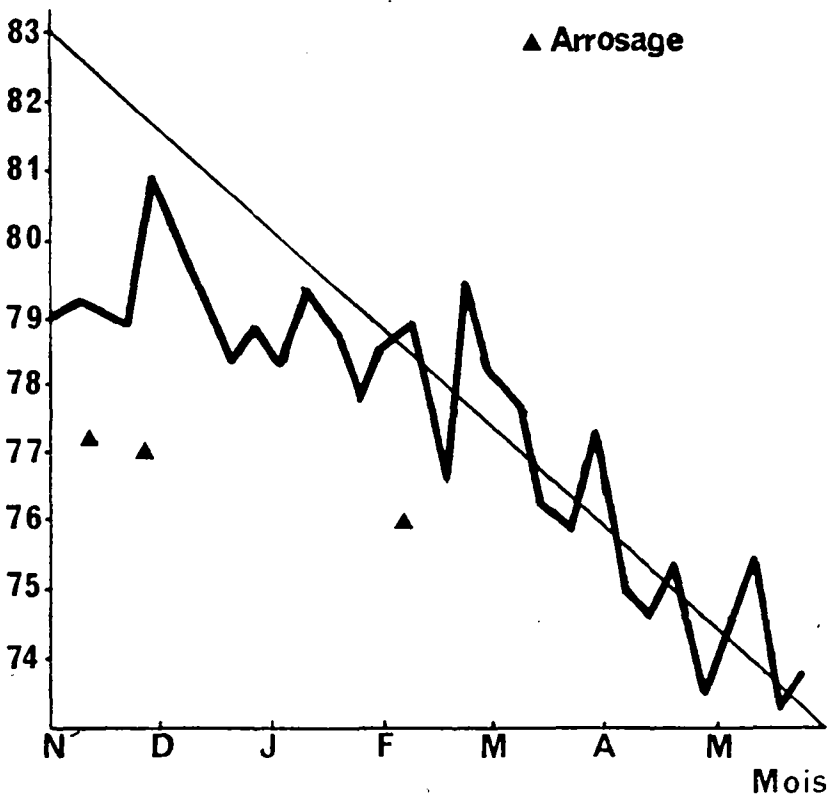


FIGURE 58. — Courbe Humidité-Temps d'après la méthode H. CLEMENTS sur canne à sucre.

Les techniques d'irrigation généralement utilisées pour la canne à sucre sont l'irrigation à la raie (dans les zones à relief peu accusé) et l'irrigation par aspersion (dans les zones plus accidentées, ou lorsque le prix de l'eau exige que l'on économise ce facteur de production).

L'irrigation au goutte à goutte s'est développée plus récemment, sur-

tout aux Hawaï, où 9 000 ha étaient équipés en 1976, 15 000 ha en 1977. De petites installations sont à l'essai en Australie, à l'île Maurice, ou au Natal. Le dispositif utilisé est original : il s'agit d'une double gaine en polyéthylène perforée au diamètre de 0,5 mm et fonctionnant à basse pression (200 à 500 g); cette gaine, de faible épaisseur et relativement bon marché, ne dure que le temps d'un cycle; elle est brûlée au moment de la récolte, en même temps que les feuilles sèches; sa durée de vie est donc de 2 à 3 ans seulement. Cette méthode permettrait une légère économie d'eau, mais avec des rendements pratiquement les mêmes qu'en aspersion.

3.2.9. — Bananier.

Les premières indications sur la consommation en eau du bananier ont été fournies par des mesures d'évapotranspiration d'échantillons foliaires; on a ainsi pu obtenir des renseignements intéressants sur les valeurs de la transpiration instantanée, qui peut atteindre $3\text{g}/\text{dm}^2/\text{h}$. Mais l'extrapolation de ces valeurs à des chiffres journaliers d'ETM demeurerait hasardeuse. Par ailleurs, en divers pays ont été effectués des essais d'irrigation qui donnent des ordres de grandeur des besoins optimaux, variables selon les conditions entre 14 et 66 mm par semaine.

Enfin, des mesures d'ETM ont été effectuées au Liban, au Honduras et en Martinique. Les consommations en eau varient notablement entre le 1^{er} cycle et les suivants, pour lesquels le développement végétatif est plus important. La longueur du cycle, qui est en moyenne de 9 mois sous climat tropical humide, est plus importante sous climat méditerranéen, mais peut être considérablement raccourcie dans des conditions de bonne alimentation en eau. Enfin, la densité de plantation, le choix des variétés, le mode d'irrigation influent également sur les besoins en eau.

Les mesures effectuées en Martinique et en Guadeloupe (J. P. MEYER et P. G. SCHOCH, 1976), avec une irrigation goutte à goutte, représentent donc la consommation en eau spécifique du bananier (figure 59). Comme par ailleurs des mesures d'évaporation du sol nu sous bananier ont été réalisées, nous disposons de coefficients culturaux estimés pour des parcelles irriguées par aspersion. Les valeurs ainsi obtenues selon les deux techniques sont les suivantes :

Âge de la culture	Stade	K = ETM/ETP	
		goutte à goutte	aspersion
0 – 2 mois	Plantation	0,1 à 0,2	0,8
2 – 3 mois		0,2 à 0,4	0,9
3 – 4 mois		0,4 à 0,7	1,0
4 – 5 mois		0,7 à 1,0	1,4
5 – 7 mois	Floraison	1,0	1,6
7 – 8 mois	Récolte	1,0 à 0,7	1,4
8 – 9 mois		0,7 à 0,4	0,8

$$K = \frac{ETM}{ETP}$$

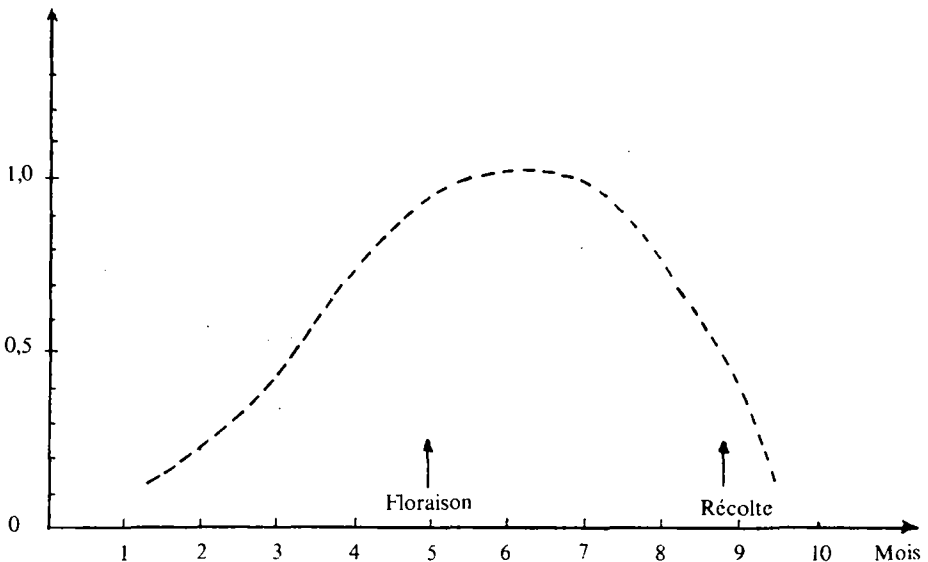


FIGURE 59. – Évapotranspiration maximale du bananier en goutte à goutte d'après MEYER (Martinique).

Les besoins en eau du bananier sont donc particulièrement élevés pendant la période qui suit la floraison. Les valeurs maximales sont en aspersion de l'ordre de 1,6 ETP, ou 1,4 Ebac (Évaporation au bac classe A). Les mesures effectuées au Honduras (M. GHAVAMI, 1973) confirment ces valeurs.

Bien qu'aucune étude des périodes critiques du bananier n'ait encore abouti à des résultats précis, on sait que les irrigations pendant la période qui précède la floraison sont primordiales. L'efficacité de l'eau

pendant la période qui précède la récolte est bien moindre; aussi, semble-t-il judicieux de pratiquer à partir de 7-8 mois au moins un rationnement par rapport à l'ETM, si l'on veut se rapprocher de l'optimum économique.

Enfin, l'économie d'eau considérable que permet l'irrigation goutte à goutte pour cette culture est à noter; cette technique semble donc particulièrement adaptée à la banane, du moins dans les sols où la teneur en argile n'est pas excessive.

Sous climat méditerranéen, les valeurs trouvées au Liban (S. SARRAF et A.C.J. BOVEE, 1973) sont plus modestes : elles varient de 0,5 ETP à 1,2 ETP au cours du cycle pour la plantation de première année, et de 0,7 ETP à 1,3 ETP pour les rejets; le bananier est moins bien adapté à ce type de climat, et il est probable qu'une régulation stomatique importante intervient lorsque le déficit de saturation de l'air est élevé.

Enfin, un dernier point particulier au bananier, est que l'enracinement est généralement peu développé, de l'ordre de 40 cm de profondeur environ, avec par conséquent des réserves utiles faibles; les doses d'irrigation devront être donc faibles et les apports fréquents. C'est encore une raison qui pousse à préconiser, pour l'irrigation intensive de la banane, des systèmes localisés (goutte à goutte ou microjets) ou une aspersion en couverture totale.

3.2.10. – Cultures fourragères.

L'évapotranspiration d'une parcelle de fourrage en pleine végétation, bien entretenue et homogène, est par définition, égale à l'évapotranspiration potentielle. Le rapport $K = \text{ETM}/\text{ETP}$ est alors égal à 1. Par contre, en début de cycle, c'est-à-dire juste après la coupe, les valeurs de K sont de l'ordre de 0,4 à 0,5 et augmentent rapidement avec le développement de la végétation. Le besoin de pointe est atteint au bout d'une durée variable (2 à 4 semaines), selon la saison et selon les espèces, mais généralement plus longue pour les légumineuses que pour les graminées tropicales.

Par exemple, les valeurs du coefficient cultural obtenues sur *Digitaria decumbens* (Pangola grass) en Martinique sont les suivantes :

1 ^{re} semaine après la coupe	ETM = 0,7 ETP;
2 ^e semaine après la coupe	ETM = 0,9 ETP;
Pleine végétation	ETM = 1,0 ETP.

En saison fraîche, le besoin de pointe est atteint un peu plus tardivement.

Dans le cas d'un fourrage, la totalité de la matière sèche produite est récoltée. Il n'y a donc pas de période critique par rapport à l'irrigation : la production de matière sèche est proportionnelle au niveau d'évapotranspiration. On n'envisagera donc pas, en général, de rationnement par rapport à l'ETM, sauf dans le cas particulier de récolte mécanique

sur des sols qui se ressuyent difficilement : on évitera alors des irrigations de fin de cycle pour ne pas se trouver à des humidités trop élevées qui risqueraient de poser des problèmes de portance pour les engins mécaniques, ou de compaction pour les sols.

L'efficiencia de l'irrigation d'une culture fourragère de graminées tropicales dans des conditions d'exploitation intensive, est de l'ordre de 2 à 3 kg de matière sèche par mètre cube d'eau évapotranspiré. L'efficiencia est moins bonne pour des exploitations à des stades jeunes, mais il faut compter avec la qualité du fourrage qui est meilleure dans ce cas (meilleure digestibilité, taux de matière azotée plus élevée). Cependant, dans des sols difficiles ou en exploitation moins intensive, les coupes tardives permettent d'espérer une meilleure longévité de la prairie.

Pour les prairies pâturées, qui sont généralement plus hétérogènes, il est plus difficile de donner des normes précises. Cependant, dans de bonnes conditions d'exploitation (excellente densité végétale, bonne fertilisation), on peut retenir des valeurs analogues à celles des prairies exploitées mécaniquement.

CHAPITRE IV

AUTRES FACTEURS INFLUANT SUR LES BESOINS EN EAU

Les facteurs, qui dépendent du climat, du sol ou de la plante, et conditionnent l'utilisation de l'eau par les cultures, ont été exposés dans les chapitres précédents. Cependant d'autres facteurs, comme les techniques culturales employées, ont également des conséquences plus ou moins directes sur l'efficacité de l'irrigation ou sur le rendement des cultures irriguées.

Parmi les principaux facteurs qui interviennent, on peut citer : le mode d'irrigation, les différentes techniques culturales, les techniques ayant pour but de réduire l'évapotranspiration, les problèmes liés à la salinité des sols.

I. – MODE D'IRRIGATION

Les divers systèmes d'irrigation existants peuvent être rassemblés en trois grands types :

- l'irrigation de surface ;
- l'irrigation par aspersion ;
- l'irrigation localisée (ou micro-irrigation).

Ces différents systèmes ont des effets variables :

- sur le niveau d'évaporation, donc sur les besoins en eau à satisfaire ;
- sur les conditions ambiantes au niveau des parties aériennes (humidité, voire température) ;
- sur le sol (répartition de l'eau, maintien de la structure et de l'aération).

1.1. – IRRIGATION DE SURFACE

C'est la technique la plus ancienne : elle consiste, soit à inonder le sol sous une lame d'eau d'une certaine épaisseur, soit à faire couler l'eau sur une partie ou sur la totalité de la surface de la parcelle. L'eau utilisée provient en général de réseaux gravitaires (l'eau est à la pression atmosphérique) et il est nécessaire d'aménager les parcelles (nivellement, création de terrasses, etc.).

Appartiennent à ce type d'irrigation :

- 1.1.1. – **L'irrigation par submersion** (ou par bassins) qui consiste à remplir d'eau des cuvettes ou des compartiments que l'on a préalablement aménagés en créant des diguettes de terre; c'est la méthode la plus simple, mais aussi celle qui demande le plus de travail pour sa mise en œuvre. La taille des bassins (de 200 m² à 2 ha) sera d'autant plus importante que le débit disponible est plus élevé, et le sol plus perméable.
- 1.1.2. – **L'irrigation par planches** (ou par calants) consiste à laisser l'eau s'écouler en nappe le long d'une bande de 3 à 30 m de large sur 100 à 800 m de long.
- 1.1.3. – **L'irrigation à la raie** consiste à laisser s'écouler l'eau dans des rigoles tracées entre les lignes de plantations. La longueur des raies et le débit d'eau sont fonction de la pente du terrain et de la nature du sol. En pratique, il faut d'abord apporter un fort débit afin d'avoir une humectation aussi homogène que possible du fond de la raie, puis un débit réduit pendant un temps plus long, pour que la totalité de la dose pénètre en profondeur.

Les méthodes d'irrigation de surface sont les plus exigeantes en eau; en effet, outre les pertes dans les canaux d'amenée, on a des pertes par percolation profonde ou par ruissellement d'autant plus importantes que les apports sont moins uniformes. Or l'uniformité (relative) de l'arrosage entre les diverses parties d'un bassin ou le long d'une planche ou d'une raie résulte d'un équilibre entre le débit apporté, la perméabilité du sol, le profil du terrain et la taille de l'unité d'arrosage, équilibre qui est difficile à maîtriser.

Un autre risque de l'irrigation de surface réside, en sol argileux, dans le gâchage de la structure par compaction du fait des apports d'eau massifs par unité de surface.

1.2. – IRRIGATION PAR ASPERSION

L'eau est apportée sur toute la surface sous forme de pluie plus ou moins fine, grâce à un appareil de projection d'eau par des jets fixes (buses ou diffuseurs) ou rotatifs (asperseurs ou canons) fonctionnant à basse pression (2 à 3 bars), moyenne pression (3 à 4 bars) ou haute pression (6 à 8 bars).

Par rapport aux systèmes précédents, il y a une meilleure uniformité de répartition, bien que celle-ci puisse varier selon les appareils utilisés, leur dispositif d'implantation, leur espacement, et surtout le régime du vent.

Lorsque l'irrigation est bien conduite, les pertes par ruissellement ou par percolation profonde peuvent être nulles.

Enfin, le risque de gâchage de la structure est moindre qu'en irrigation gravitaire sauf dans le cas de gros appareils à longue portée et

forte pluviométrie, qui forment de grosses gouttes et peuvent avoir des effets néfastes en sols battants.

L'irrigation par aspersion est plus coûteuse en énergie, mais permet un degré d'automatisation plus poussé. Elle est bien adaptée aux grandes cultures de plein champ, pour lesquelles de nombreux types de machines d'arrosage ont été mis au point (arroseurs géants, machines à pivot, canons automoteurs, etc.).

1.3. – MICRO-IRRIGATION (OU IRRIGATION LOCALISÉE)

Elle consiste à apporter l'eau sur une partie du sol seulement par *petites doses fréquentes* (systèmes goutte à goutte, Bas-Rhône, par mini-diffuseurs). L'installation à la parcelle est entièrement fixe.

En limitant la surface du sol mouillée, on limite l'évaporation; d'autre part le sol étant constamment à une humidité relativement élevée, les transferts d'eau sont plus faciles, donc l'alimentation hydrique des plantes plus régulière : il s'ensuit une *meilleure efficacité de l'eau d'irrigation*.

L'irrigation localisée est bien adaptée aux cultures pérennes. On a intérêt à l'utiliser lorsque l'eau ou l'énergie est chère, ou que la main-d'œuvre est rare.

Bien que l'économie d'eau que permet l'irrigation localisée soit très variable selon les cultures, les climats, les techniques, on peut donner des exemples d'essais comparatifs entre l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte.

– À Bambey (Sénégal), on a obtenu les résultats suivants (TRAN MINH DUC, 1978) sur une culture de tomates :

	Aspersion	Goutte à goutte				
		100% ETP	85% ETP	70% ETP	55% ETP	40% ETP
– Consommation totale (mm)	966	694	585	450	319	235
– Rendement (t/ha)	10,50	20,12	20,35	17,07	11,45	5,06

On remarque que l'économie d'eau est considérable et aussi que le rendement est presque doublé par rapport à l'aspersion; l'efficacité agronomique de l'eau atteint son maximum pour le traitement à 70% de l'ETP où elle est de 3,8 kg de tomates par m³ d'eau, alors qu'elle n'est que de 1,1 kg/m³ pour le traitement par aspersion.

– En Israël, où l'irrigation goutte à goutte se fait souvent avec des eaux légèrement salées, on observe des différences de rendement du même ordre (GOLDBERG 1976).

Région d'Arava :

	Aspersion	Goutte à goutte
Tomates	39,0 t/ha	65,3 t/ha
Poivrons	4,8 t/ha	9,6 t/ha
Concombres	0 t/ha	39,0 t/ha

Région d'El Arish :

	Aspersion	Goutte à goutte
Tomates	30,0 t/ha	79,0 t/ha
Poivrons	7,3 t/ha	12,0 t/ha
Concombres	3,6 t/ha	7,5 t/ha

Par contre, on ne note que de faibles différences entre les résultats obtenus en irrigation à la raie et en irrigation par aspersion.

Il est remarquable de noter que l'effet dépressif que l'on observe sur les rendements lorsque l'on irrigue par aspersion avec des eaux salées, est presque insignifiant avec les mêmes eaux en goutte à goutte. Les résultats ci-dessus proviennent de cultures de tomates en Israël :

Région d'Arava :

	Aspersion	Goutte à goutte
Eau à 0,4 mmhos/cm	54,0 t/ha	68,2 t/ha
Eau à 3,0 mmhos/cm	40,0 t/ha	66,0 t/ha

Région d'El Arish :

	Aspersion	Goutte à goutte
Eau à 0,4 mmhos/cm	78,5 t/ha	81,3 t/ha
Eau à 3,6 mmhos/cm	31,0 t/ha	80,2 t/ha

Il n'entre pas dans l'objet du présent ouvrage de donner plus de détails sur les avantages et les inconvénients des différentes techniques d'irrigation. Ce qui nous intéresse ici est de savoir quelles sont les conséquences du choix de telle ou telle technique sur les quantités d'eau nécessaires aux irrigations. *Dans tout ce qui précède, les valeurs fournies*

sont relatives à l'irrigation par aspersion, qui simule la pluie naturelle et en supposant une répartition au sol parfaitement uniforme. Par rapport à ces valeurs, il faut envisager une correction éventuelle selon le mode d'irrigation; ces corrections sont difficiles à systématiser, étant donné que l'économie ou la perte d'eau réalisée est extrêmement variable selon les techniques d'irrigation, les cultures, les sols. Des études comparatives ont cependant été faites dans des situations très diverses; elles permettent d'avoir des ordres de grandeur de l'incidence du mode d'irrigation sur les besoins en eau.

On peut signaler à cet égard que :

– en irrigation localisée, l'économie d'eau par rapport à l'aspersion varie entre 0 % et 50%. Elle est généralement faible pour les cultures maraîchères, denses, sous climat humide; elle est plus forte pour les cultures arbustives, espacées, sous climat sec et venté. L'économie d'eau réalisée est essentiellement due à une réduction de l'évaporation du sol.

– En irrigation de surface, les niveaux d'évapotranspiration observés sont généralement comparables à ceux de l'irrigation par aspersion; on peut cependant observer une certaine réduction de l'évapotranspiration pour des couverts végétaux très peu denses (vergers par exemple), lorsqu'ils sont arrosés par sillons ou cuvettes : la localisation de l'apport d'eau permet en effet, là encore, de limiter l'évaporation du sol nu.

Les apports d'eau d'irrigation sont cependant généralement plus élevés en irrigation de surface qu'en aspersion, à cause des pertes liées à l'irrégularité de la répartition de l'eau; ces pertes sont minimales si le nivellement des parcelles est correct, et si la surveillance de l'irrigation est bien assurée. Mais dans les conditions courantes, il n'est malheureusement pas rare d'observer des pertes d'eau à la parcelle de l'ordre de 50%.

II. – TECHNIQUES CULTURALES

Il y a souvent des phénomènes d'interaction entre l'irrigation et certaines techniques culturales. On peut citer notamment :

2.1. – FERTILISATION

La culture irriguée, qui conduit à des rendements souvent beaucoup plus élevés que la culture sèche, implique aussi des besoins alimentaires très supérieurs : ceci est nettement marqué pour les principaux éléments (N, P, K). La figure 60, par exemple, montre comment évolue pour une culture de blé, selon le niveau d'irrigation, la courbe de réponse à l'azote. On remarque que non seulement les apports d'azote sont plus efficaces avec l'irrigation, mais aussi que le rendement maximal est atteint pour un niveau de fertilisation plus élevé.

Par contre, l'effet de la fertilisation sur l'évapotranspiration est

minime, sauf peut-être pour le potassium qui permettrait une meilleure résistance à la sécheresse. Bien entendu, dans les cas extrêmes, si la croissance de la végétation a été compromise par un déficit important de l'alimentation minérale, l'évapotranspiration se trouve également réduite.

Rendements
en kg/ha

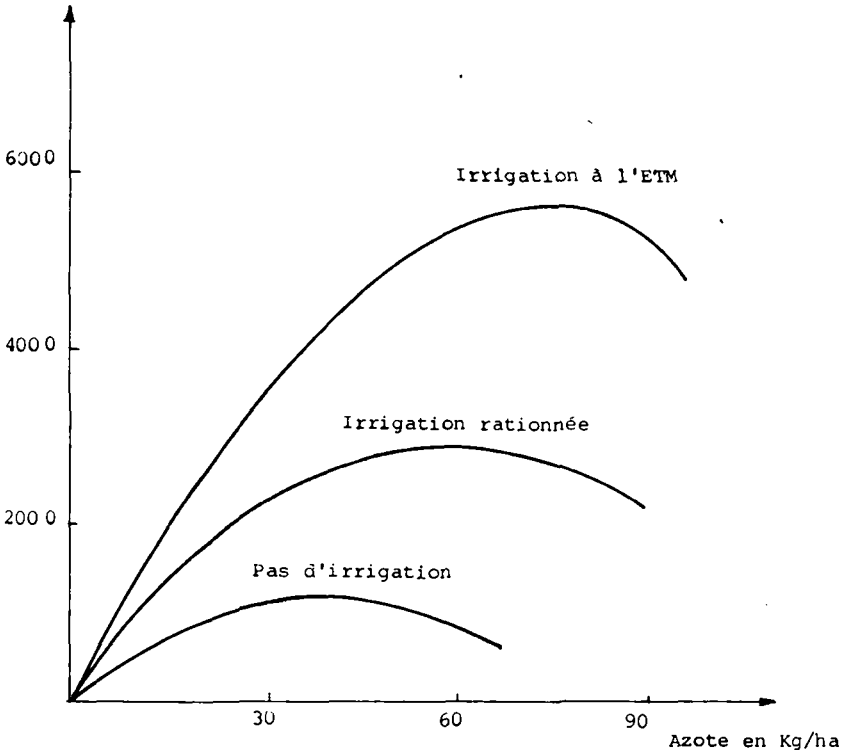


FIGURE 60. — Effet de l'apport d'eau sur la réponse du blé à l'azote (Source : E. W. BOLLEJONES et M. REZENIA, 1969).

Signalons d'autre part qu'une culture bien alimentée en éléments minéraux exploitera plus facilement un volume de sol plus important, ce qui modifiera les termes du bilan hydrique en permettant une meilleure alimentation en eau.

Enfin, il faut remarquer qu'un sol irrigué subira plus facilement des pertes par percolation profonde; les pertes d'éléments fertilisants risqueront donc d'être plus importantes.

2.2. – PAILLAGE

La technique de paillage du sol est quelquefois utilisée, soit pour empêcher le développement des mauvaises herbes, soit pour protéger le sol et diminuer l'érosion; cette technique peut avoir également pour effet une diminution de l'évaporation du sol, en particulier lorsqu'il s'agit de paillage par films plastiques (mais non lorsqu'il s'agit de paillage constitué par des résidus végétaux, car la matière organique utilise une partie de l'eau du sol).

Les autres conséquences du paillage sont une plus grande régularité de la température du sol dans les horizons supérieurs et une modification du bilan radiatif. L'économie d'eau, si elle est réelle dans certains cas, ne doit pas être l'effet primordial recherché par le paillage.

2.3. – DENSITÉ DE PLANTATION

D'une manière générale, l'accroissement de la densité de plantation accroît la consommation d'eau à l'unité de surface, mais jusqu'à une certaine limite.

Par contre, la transpiration par unité de surface foliaire se trouve diminuée, ce qui peut être un but recherché dans certains cas : par exemple, pour des cultures maraîchères sensibles aux fortes ETP, une augmentation de la densité végétale permet d'éviter un flétrissement du feuillage aux périodes les plus chaudes de la journée. Le même effet est obtenu avec des cultures associées : la culture installée en strate basse par rapport à la culture dominante, bénéficie d'une atmosphère plus humide, donc plus propice pour certaines espèces.

2.4. – PROBLÈMES PHYTOSANITAIRES

L'influence de l'irrigation sur le développement des maladies est un problème souvent évoqué en matière de cultures maraîchères, et pour lequel il n'est pas possible d'apporter une réponse générale.

L'irrigation permet un accroissement des potentialités de la plante, ce qui peut la rendre plus sensible à certaines maladies (par exemple l'extension du *Verticillium* est favorisée par une végétation active). D'autre part, elle maintient une humidité atmosphérique plus élevée au niveau du feuillage, et crée ainsi un terrain favorable à certains champignons.

Le choix du mode d'irrigation joue souvent un rôle important dans le développement des maladies : ainsi, en culture maraîchère, certains champignons du sol se propagent beaucoup plus rapidement en irrigation à la raie que par aspersion (cas de *Phytophthora Capsici* sur tomates ou sur courgettes).

L'aspersion est surtout nocive si elle est pratiquée tard le soir ou tôt le matin, ou de façon trop prolongée, ce qui a pour effet d'accroître la période d'humidité nocturne; par ailleurs, elle peut favoriser la dis-

persion de certains germes (surtout pour les anthracoses, septorioses, nettement moins pour les alternarioses et les mildious). Par contre, elle défavorise nettement les oïdiums.

L'irrigation localisée qui ne mouille pas le feuillage, présente, par rapport à l'aspersion, l'avantage de conserver l'efficacité des traitements phytosanitaires.

2.5. – ADVENTICES

L'irrigation par aspersion favorise le développement des adventices. Comme d'autre part la pullulation des adventices provoque une augmentation de l'évapotranspiration, il semble important d'attacher plus d'importance à la lutte contre les mauvaises herbes en culture irriguée qu'en culture sèche.

En irrigation localisée goutte à goutte, par contre, le contrôle des adventices est plus facile; seule l'irrigation localisée par minidiffuseurs pose un problème car elle induit un développement important des herbes sur la surface arrosée.

Enfin, notons que la régularité de l'irrigation est un facteur qui peut diminuer sensiblement l'importance d'une maladie physiologique de la tomate : le « blossom end rot » ou nécrose apicale; une fine nébulisation quotidienne aboutit à une proportion de fruits malades nettement moindre que si l'on avait pratiqué une irrigation classique.

En définitive, l'irrigation présente rarement des inconvénients pour la production légumière lorsqu'elle est pratiquée avec des méthodes « modernes » (aspersion, goutte à goutte), et qu'elle ne risque pas d'augmenter la durée de la période d'humidité. De plus, en aspersion, les traitements phytosanitaires devront tenir compte du programme d'irrigation, afin d'éviter le lavage par l'eau des pulvérisations de produits chimiques.

III. – TECHNIQUES SPÉCIALES AYANT POUR BUT DE RÉDUIRE L'ÉVAPOTRANSPIRATION

Pour limiter la consommation en eau des plantes, on a essayé dans de nombreux cas d'utiliser des techniques permettant de réduire l'évapotranspiration des cultures. Certaines, évoquées plus haut (paillage plastique par exemple), ont pour effet indirect une réduction de l'ETR. Parmi les autres techniques, voici les principales :

3.1. – BRISE-VENT

On a vu dans la première partie (« Notions liées au climat ») que le vent était en plus ou moins grande part responsable de l'évapotranspiration; en effet, le pouvoir évaporant de l'air E_a varie linéairement avec la vitesse du vent u .

L'emploi de brise-vent permet donc de réduire l'ETM d'une culture,

surtout si le vent est fort et si le déficit de saturation est élevé. Pour que les effets d'un brise-vent soient optimaux, il faut que l'espacement entre chaque haie soit égal à 7 à 8 fois la hauteur du brise-vent; en effet, si la réduction de la vitesse du vent peut se faire sentir sur une distance plus importante (25 fois la hauteur environ), elle n'est vraiment significative que sur le premier tiers (fig. 61). Les brise-vent doivent être perméables à l'air : un brise-vent imperméable provoque des phénomènes de turbulence qui peuvent accentuer localement la vitesse du vent; on admet qu'une perméabilité à l'air de 50% est nécessaire.

Les brise-vent peuvent être inertes (haies de roseaux secs, filets plastiques...), ou végétaux. Dans ce dernier cas la consommation en eau de la haie ne doit pas être négligée : si l'on veut éviter cet inconvénient, on peut avoir recours aux espèces peu consommatrices d'eau (agrumes, eucalyptus...). En irrigation localisée, il est recommandé d'arroser le brise-vent par des rampes spéciales disposées à leur pied.

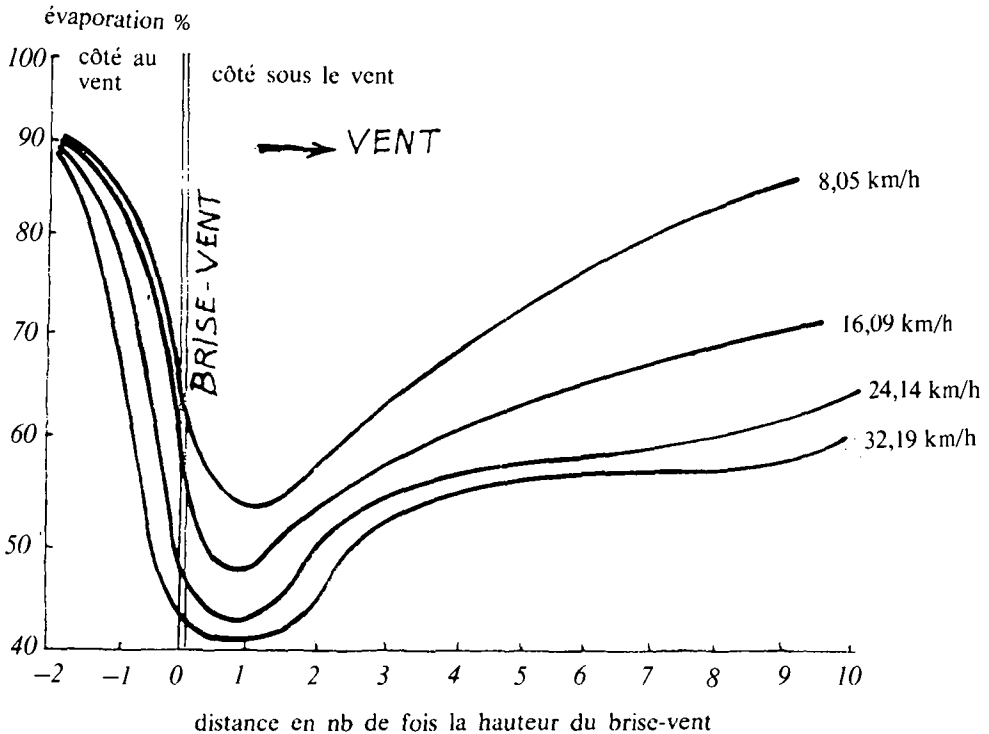


FIG. 61. — Effet d'un brise-vent sur l'ETP selon la vitesse du vent.

Observations :

— L'effet du brise-vent est également mécanique : il protège la culture de la verse, des cassures de branches, de la coulure des fleurs, etc.

– L'effet du brise-vent sur l'ETM peut être nul ou même négatif sous un climat humide : c'est le cas en zone tropicale où l'ETP ne dépend pratiquement que du rayonnement global : la réduction de la vitesse du vent derrière la haie ne permet aucune diminution de l'ETP, mais peut entraîner au contraire quelquefois une légère augmentation de la température.

3.2. – BRUMISATION

L'utilisation, par aspersion, de faibles pluviométries à fréquence élevée, a pour effet une augmentation de l'humidité de l'air, surtout si les pulvérisations sont fines ; il en résulte, au niveau de la feuille, une diminution de la transpiration, ce qui peut constituer des conditions plus favorables pour certaines plantes. Il peut également y avoir aussi une légère baisse de la température au niveau des organes végétaux, qui peut avoir des conséquences appréciables sur la production.

Cependant, si la température est réduite, l'évaporation directe est généralement augmentée, ainsi que les pertes liées au vent, si bien que l'économie d'eau est nulle. Enfin, il ne faut pas perdre de vue, lorsque l'on utilise de telles méthodes, que l'augmentation de l'humidité de l'air a des conséquences sur le plan phytosanitaire.

3.3. – ANTITRANSPIRANTS

Ce sont des produits qui, appliqués en pulvérisation à faible dose, se déposent sur les feuilles où ils forment un film de très faible épaisseur qui protège les stomates de la transpiration. Pour ne pas gêner la photosynthèse, ce film doit être perméable au gaz carbonique. D'autres produits ont seulement pour effet d'augmenter l'albedo du feuillage, donc de diminuer le rayonnement net, et ainsi de diminuer l'ETM.

Ces produits ont surtout pour effet de favoriser une reprise facile après plantation, pour certaines cultures ; en ce qui concerne leur utilisation pour économiser l'eau sans entraîner de chute de production, on en est encore au stade de la recherche pour mettre au point des produits réellement satisfaisants.

3.4. – TRAVAIL DU SOL

Le travail du sol avant mise en place de la culture conditionne la rapidité de son installation, mais aussi le développement du système racinaire et par conséquent l'importance de la réserve utile. Le bilan hydrique peut donc être fortement modifié par le travail du sol : dans les mêmes conditions climatiques, un sol profond bien travaillé sera irrigué plus tardivement et par doses plus importantes que le même sol travaillé superficiellement, surtout s'il s'agit de sols lourds et sensibles à la compaction.

IV. – PROBLÈMES LIÉS À LA SALINITÉ

4.1. – EXPRESSION DE LA SALINITÉ

Les problèmes de salure sont fréquents dans les zones arides. En effet, la forte évaporation provoque la concentration des sels dans les sols et les eaux se chargent en sels en traversant ces zones à forte salure.

La salinité peut s'exprimer de différentes manières :

- soit en millimhos par centimètre (mmhos/cm) si l'on mesure la conductivité de l'eau d'irrigation, ou de l'eau extraite du sol (extrait de sol),
- soit en milligrammes par litre (mg/l) ou parties par million (ppm),
- soit en milliéquivalents par litre (meq/l),
- soit par la pression osmotique de la solution (en bars).

Les relations entre ces différentes expressions sont les suivantes :

$$1 \text{ mmho/cm} \simeq 10 \text{ meq/l};$$

$$1 \text{ mmho/cm} \simeq 640 \text{ mg/l};$$

$$1 \text{ meq/l} = \text{Masse de l'équivalent-gramme} \times 1 \text{ mg/l};$$

$$1 \text{ mmho/cm} \simeq - 0,36 \text{ bars de pression osmotique.}$$

Rappelons que pour un ion donné, l'équivalent-gramme est égal à un ion-gramme, divisé par la valence de l'ion.

Ion	Symbole	Masse de l'ion-gramme	Valence	Masse de l'équivalent-gramme
Calcium	Ca ⁺⁺	40	2	20
Magnésium	Mg ⁺⁺	24,4	2	12,2
Sodium	Na ⁺	23	1	23
Carbonate	CO ₃ ⁻⁻	60	2	30
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	61	1	61
Chlorure	Cl ⁻	35,4	1	35,4
Sulfate	SO ₄ ⁻⁻	96	2	48

En matière d'irrigation, on exprime le plus souvent la salinité par la mesure de la conductivité de l'eau d'irrigation ou de l'extrait de sol. L'unité utilisée est le mmho/cm.

On prend comme référence *la résistance des plantes à la salinité du sol* qui peut s'exprimer en fonction de la conductivité de l'extrait de sol à saturation, suivant l'échelle proposée par l'United State Salinity Laboratory en 1954 :

0 – 2 mmhos/cm : Effets de la salinité négligeables;

2 – 4 mmhos/cm : Les rendements des cultures très sensibles peuvent baisser;

- 4 – 8 mmhos/cm : Les rendements de la plupart des cultures chutent ;
- 8 – 16 mmhos/cm : Plantes tolérantes seulement ;
- 16 – 32 mmhos/cm : Quelques plantes tolérantes seulement.

Les salinités limites de l'eau d'irrigation correspondant à l'échelle ci-dessus sont nettement moindres et dépendent en particulier de la fréquence des arrosages. En micro-irrigation, où les arrosages sont fréquents, elles ne seront pas très différentes des chiffres indiqués, alors qu'en macro-irrigation, où les arrosages sont espacés, les seuils correspondants seront nettement plus bas (environ les 2/3 des chiffres précédents) : à titre d'exemple, les normes de salinité de l'Université de Californie indiquent, pour la conductivité de l'eau d'irrigation :

< 0,75 mmhos/cm	Pas de problèmes
de 0,75 à 3 mmhos/cm	Quelques problèmes
> 3 mmhos/cm	Problèmes sérieux

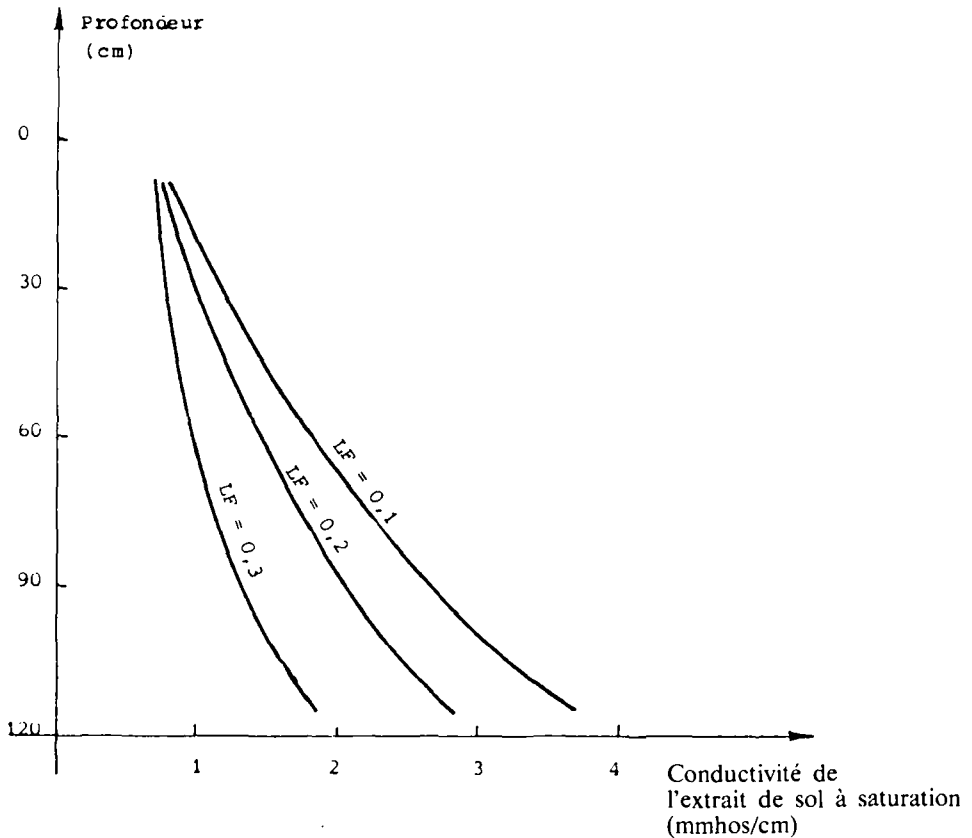


FIGURE 62. — Distribution de la salure en fonction de la profondeur du sol pour diverses valeurs du coefficient de lessivage LF.

4.2. – ÉTUDE QUANTITATIVE

L'étude quantitative des problèmes de salure passe par l'équation de la balance des sels :

$$\Delta S = V_i C_i - V_d C_d$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta S = \text{augmentation de salinité du sol;} \\ V_i = \text{volume de l'eau d'irrigation;} \\ C_i = \text{concentration moyenne en sels de l'eau d'irrigation;} \\ V_d = \text{volume d'eau de drainage;} \\ C_d = \text{concentration moyenne en sels de l'eau de drainage.} \end{array} \right.$$

En fait, V_i comprend l'eau d'irrigation et l'eau de précipitation.

On appelle coefficient de lessivage LF (« leaching fraction ») le rapport :

$$LF = \frac{V_d}{V_i}$$

Dans des sols homogènes, non salés au départ, régulièrement irrigués de façon uniforme (c'est-à-dire non localisée), les courbes de distribution de la salure en fonction de la profondeur ont des formes régulières, décalées les unes par rapport aux autres suivant la valeur de LF (voir figure 62).

Le profil de salure qui se forme pour un sol donné, ne dépend donc que de la valeur de LF.

La salinité est maximale à la base des racines. Les seuils de tolérance fixés pour les plantes correspondent à cette salinité maximale de la base du profil. On peut considérer que l'eau qui draine hors du profil à ce niveau, a cette salure maximale, soit C_d .

C_d est donc imposé par le seuil de tolérance des plantes.

C_i est imposé par l'eau d'irrigation.

À l'équilibre, on aura :

$$V_i C_i = V_d C_d$$

$$LF = \frac{V_d}{V_i} = \frac{C_i}{C_d}$$

Or $V_i = ETR + V_d$

On en déduit :

$$V_d = ETR \frac{C_i}{C_d - C_i}$$

$$V_i = ETR \frac{C_d}{C_d - C_i}$$

$$V_i = ETR \frac{1}{1 - LF}$$

Le volume d'eau à apporter est donc fixé à partir des données suivantes :

- Évapotranspiration de la culture : ETR ;
- Concentration de l'eau d'irrigation C_i ;
- Concentration maximale tolérée par la plante C_d .

On en déduit le volume à drainer :

$$V_d = V_i.LF$$

Si le volume d'irrigation effectivement distribué est inférieur à V_i , on verra la salure du sol augmenter jusqu'à atteindre un niveau d'équilibre $C'd > C_d$. Ce niveau dépend de l'humidité du sol, de sa profondeur, de sa texture.

Mais dans la plupart des cas, on cherchera à dessaler des sols dont la concentration est trop élevée; il faudra donc apporter un volume supérieur à V_i .

4.3. – SEUILS DE TOLÉRANCE EN FONCTION DE LA CULTURE

Les seuils de tolérance C_d sont propres à chaque espèce. Voici les concentrations maximales tolérées par les principales cultures que l'on peut rencontrer en régions méditerranéennes et tropicales :

<i>Cultures maraichères</i>		<i>Cultures fourragères</i>	
Fraisier	5 mmhos/cm	Luzerne	15,5 mmhos/cm
Haricot	6,5 »	Maïs fourrage	15,5 »
Oignon	7,5 »	Dactyle	17,5 »
Carotte	8 »	Trèfle	19 »
Poivron	8,5 »	<i>Agropyron elongatum</i>	22 à 31,5 »
Laitue	9 »	Cynodon-dactylon	22,5 »
Concombre	10 »	Fetouque	23 »
Pomme de terre	10 »	Sorgho	26 »
Igname	11,5 »		
Tomate	12,5 »		
Melon	16 »		
<i>Cultures arbustives</i>		<i>Céréales et cultures de plein champ</i>	
Avocatier	6 mmhos/cm	Arachide	6,5 mmhos/cm
Amandier	7 »	Maïs grain	10 »
Agrumes	8 »	Soja	10 »
Pommier	8 »	Riz	11,5 »
Poirier	8 »	Carthame	14,5 »
Vigne	12 »	Sorgho	18 »
Figuier	14 »	Blé	20 »
Grenadier	14 »	Betterave à sucre	24 »
Olivier	14 »	Coton	27 »
Palmier-Dattier	32 »	Orge	28 »

On remarque que les cultures maraîchères sont généralement les plus sensibles. Le haricot, qui est une de celles dont le seuil de tolérance est le plus bas, est souvent utilisé comme plante-test pour détecter la salure d'un sol. Les céréales d'hiver, orge surtout, sont au contraire parmi les plus résistantes. Dans les graminées fourragères, on trouve également des espèces hautement résistantes à la salure.

Il ne faut pas oublier que si les seuils donnés ci-dessus représentent pratiquement les maxima tolérés par les diverses espèces, on observe cependant des baisses de rendement de 20 à 40 % pour des salures 2 fois moins élevées (pour plus de précision voir biblio 3).

4.4. – ÉTUDE QUALITATIVE

La salinité du sol agit de différentes façons sur le développement de la plante :

- D'une part, elle entraîne *l'augmentation de la pression osmotique* qui joue à contresens par rapport au flux d'eau dû à l'évapotranspiration en provoquant une élévation du potentiel hydrique d'autant plus importante que la salinité est plus grande :

Exemple :

Avec 4 mmhos/cm :

Le potentiel augmente de 1,5 atm (on passe, par exemple de pF3 à pF3,4).

Avec 8 mmhos/cm :

Le potentiel augmente de 3 atm (on passe, par exemple de pF3 à pF3,6).

Avec 16 mmhos/cm :

Le potentiel augmente de 6,5 atm (on passe, par exemple de pF3 à pF3,9).

C'est pourquoi l'on observe dans les terrains salés, des symptômes analogues à ceux que cause la sécheresse (flétrissement, brûlures, coloration bleu-vert).

- D'autre part *la toxicité particulière de certains ions* fait que le même niveau de salinité n'est pas suivi des mêmes effets sur la plante selon la composition de l'eau d'irrigation ; par exemple, l'ion Chlore Cl^- commence à poser des problèmes à partir de 4 meq/l, et peu de plantes résistent à des concentrations supérieures à 10 meq/l ; l'ion sulfate SO_4^{--} , par contre ne pose de problèmes qu'à des concentrations 2 fois plus fortes. L'ion bore est également à surveiller de près, car s'il est un oligo-élément indispensable à la croissance, il devient très rapidement toxique au-delà de quelques ppm, au moins pour certaines cultures.

- Enfin, un point très important est *l'action de la salinité sur le sol*.

En effet, le sol ne doit pas être considéré comme un simple support physique pour le transfert de l'eau, car :

- une partie des sels de l'eau d'irrigation peut précipiter dans le sol,
- inversement, le sol peut fournir des sels à partir de réactions de dissolution ou d'altération,
- enfin, il peut y avoir des échanges ioniques entre le complexe absorbant du sol, et la solution du sol.

En outre, l'ion sodium Na^+ a des effets néfastes sur les propriétés physiques du sol : l'alcalinisation du sol par une eau sodique favorise la dispersion des argiles, et la structure se dégrade, le milieu devenant imperméable et asphyxiant. L'importance de ce phénomène a poussé les expérimentateurs à caractériser le pouvoir alcalinisant de l'eau par un coefficient, le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) :

$$S.A.R. = \frac{Na}{\sqrt{1/2 (Ca + Mg)}}$$

Na, Ca et Mg étant les concentrations en sodium, calcium et magnésium, exprimées en meq/l.

Pour les eaux bicarbonatées, le calcium précipite en partie dans le sol sous forme de carbonate, donc le S.A.R. réel de l'eau d'irrigation est plus élevé ; pour en tenir compte, on calcule un S.A.R. ajusté :

$$S.A.R. \text{ aj.} = \frac{Na}{\sqrt{1/2 (Ca + Mg)}} [1 + (8,4 - pHc)]$$

pHc étant le pH qu'aurait l'eau d'irrigation si elle était en équilibre avec $CaCO_3$, c'est-à-dire à pH 8,4 :

- Si $pHc > 8,4$: l'eau a tendance à dissoudre le $CaCO_3$ du sol.
- Si $pHc < 8,4$: l'eau a tendance à précipiter du $CaCO_3$ dans le sol.

Exemple :

Pour une eau d'irrigation, on a :

$$Na = 3,5 \text{ meq/l}$$

$$Ca = 6,5 \text{ meq/l}$$

$$Mg = 3,5 \text{ meq/l}$$

Les tables donnent $pHc = 8,01$

$$S.A.R. = 4,95$$

$$S.A.R. \text{ aj.} = 6,88$$

On a un risque d'alcalinisation élevé.

On adopte généralement, pour la classification des eaux d'irrigation le diagramme de Riverside, de l'U.S. Department of Agriculture, qui tient compte des 2 critères principaux : conductivité et S.A.R. (voir figure 63).

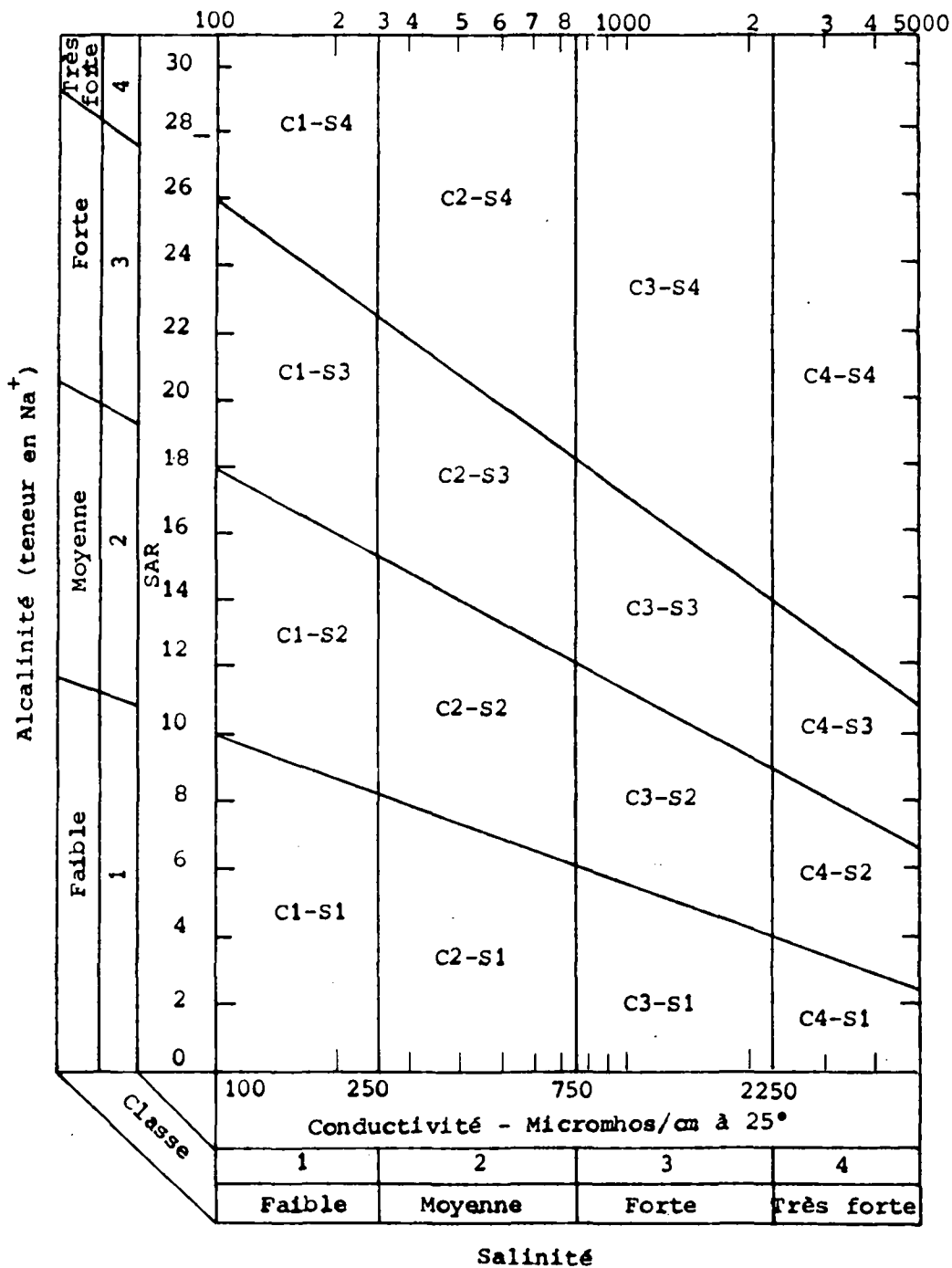


FIGURE 63. - Diagramme de Riverside.

4.5. – MISE EN VALEUR DES TERRAINS SALÉS

La connaissance des phénomènes liés à la salinité permet de prévoir les travaux à réaliser pour la restauration et l'aménagement des sols salins.

4.5.1. – Origine de la salinisation des sols.

La salinisation des sols peut avoir plusieurs origines :

- proximité de la mer,
- augmentation de la concentration en sels liée à une forte évaporation,
- utilisation d'eau d'irrigation de mauvaise qualité,
- engorgement temporaire ou permanent du sol. La salure de l'eau reste fixée au sol après ressuyage.

4.5.2. – Buts et techniques de la restauration des sols.

Les buts recherchés dans le cas d'une restauration des sols sont :

- l'abaissement de la concentration des sels jusqu'à un niveau acceptable par les plantes,
- la pérennité des résultats obtenus,
- l'abaissement de la concentration en sodium en vue d'une amélioration de la structure.

Les techniques à mettre en œuvre pour restaurer des sols salés dépendent de *plusieurs facteurs* :

- *le type de salinité* (nature des sels), *et son importance* (concentration totale),
- *la structure et la perméabilité du sol*, qui rendront les opérations de lessivage plus ou moins faciles,
- *la présence ou l'absence d'une nappe phréatique*, sa profondeur et sa concentration en sels, qui détermineront l'importance des *travaux de drainage* à réaliser pour en abaisser éventuellement le niveau,
- *la nature de l'eau d'irrigation, et sa disponibilité* au cours de l'année,
- *la topographie*, qui conditionne l'importance du nivellement nécessaire pour les travaux de drainage,
- *le régime climatique*, et particulièrement le bilan hydrique, puisque c'est souvent l'importance de l'évapotranspiration par rapport aux pluies qui est à l'origine de la concentration des sels.

Les opérations de restauration sont généralement progressives une fois réalisées les opérations de nivellement et les travaux de drainage, on procède à un lessivage jusqu'à ce que la salure permette des cultures tolérantes à une certaine concentration en sels; puis progressivement on continue le lessivage et l'on diversifie les cultures.

Les drains peuvent être soit des tranchées découvertes, soit des drains enterrés, qui ne diminuent pas la surface agricole productive (souvent il sera nécessaire de mettre en place un double réseau de drainage : d'une part des drains peu profonds (de l'ordre de 1 m) et assez rapprochés (moins de 100 m) pour obtenir un lessivage rapide ; d'autre part des collecteurs de 2,50 m à 3,00 m de profondeur espacés de 300 m à 1 000 m, pour abaisser le niveau de la nappe phréatique.

Le lessivage doit s'effectuer de manière à éliminer les sels le plus parfaitement possible et à prévenir une resalinisation éventuelle. On pratiquera de préférence un lessivage intermittent, qui permet d'utiliser des quantités d'eau plus faibles, mais qui demande plus de temps. Le lessivage continu restera cependant à conseiller lorsque l'on a une nappe phréatique saumâtre proche de la surface, ou bien lorsque l'on a un taux d'évaporation élevé, à condition toutefois que la perméabilité du sol soit bonne. La différence d'efficacité des 2 méthodes est cependant considérable : en Égypte, dans la région d'Abis, des expérimentations ont montré que pour arriver à un même niveau de désalinisation, il fallait :

- 1 100 mm dans le cas d'un lessivage intermittent,
- 2 000 mm dans le cas d'un lessivage permanent.

Une évaluation de l'ordre de grandeur de la quantité d'eau nécessaire pour lessiver les sels peut être faite en considérant *qu'une unité de hauteur d'eau entraîne 80 % environ des sels sur une unité de hauteur de sol* mais bien entendu, l'efficacité du lessivage dépend aussi de la vitesse à laquelle on applique l'eau : un apport lent pénètre mieux dans les pores les plus fins du sol, et permet donc une meilleure dissolution des sels. De même le lessivage sera d'autant plus efficace que la nappe sera plus profonde et le sol plus sec. Enfin, le lessivage avec une eau de mauvaise qualité exigera des quantités d'eau plus importantes.

La durée de l'opération de lessivage dépend de la quantité d'eau utilisée. Dans le cas cité plus haut, à Abis, en Égypte, le dessalement était obtenu en 1 an sur 90 cm d'épaisseur, avec un sol bien perméable. Dans des cas moins favorables, plusieurs années sont nécessaires et l'épaisseur de sol dessalé est plus faible.

Aussi est-il intéressant, pour hâter la désalinisation, de pratiquer en même temps des techniques permettant d'améliorer la perméabilité.

C'est surtout dans les sols sodiques, à forte conductivité électrique, que l'on peut pratiquer des amendements au sulfate de calcium (gypse), qui permet une certaine restructuration du sol.

Enfin, la profondeur à dessaler sera fonction des cultures que l'on souhaite implanter. La mise en culture sera de toutes façons progressive, en pratiquant d'abord des cultures peu sensibles ou à enracinement peu profond ; on aura également intérêt à pratiquer des cultures à forts besoins en eau pour permettre des mouvements d'eau rapides dans le sol.

En définitive, la restauration des sols salés demande toujours une réflexion préalable sur les moyens à mettre en œuvre, et le temps est le plus souvent un facteur indispensable, par ailleurs on doit se préoccuper aussi des mesures à prendre après restauration (contrôle de la nappe, lessivage périodique et modéré, entretien du réseau de drainage).

Les situations les plus difficiles sont généralement dues aux causes suivantes :

- Eau d'irrigation de mauvaise qualité (il est indispensable que la salinité et le SAR de l'eau soient inférieurs à celui du sol).
- Sols imperméables ou mal structurés (les labours profonds sont alors indispensables; le lessivage doit être lent et intermittent; le sodium doit être éliminé).
- Sols engorgés ou dont le niveau phréatique est trop élevé.

4.5.3. – Exemple de restauration des sols.

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus en Irak sur un périmètre de 600 ha restauré pour des plantations de canne à sucre. Les sols y sont peu perméables (argiles limoneuses ou limons argileux fins). Le réseau de drainage est constitué de canalisations à 2 m de profondeur tous les 100 m.

Programme de lessivage	Sols moyennement salés (moins de 40 t/ha de sels)		Sols fortement salés (plus de 40 t/ha de sels)	
	Salinité en t/ha avant lessivage	Salinité en t/ha après lessivage	Salinité en t/ha avant lessivage	Salinité en t/ha après lessivage
60 jours	25,2	10,4	49,6	14,8
60 jours + sous-solage	25,6	10,4	51,6	14,4
20 jours	25,6	14,0	60,0	18,0
2 fois 20 jours	33,2	10,8	78,8	23,2

On remarque que le lessivage fractionné en 2 fois 20 jours est plus efficace qu'un lessivage en 60 jours, du moins lorsque la salinité initiale n'est pas trop forte. Avec une forte salinité initiale, un fort lessivage continu est préférable. Par contre, l'efficacité du sous-solage, dans le cas présent est minime. À noter que dans ce périmètre, la salure de l'eau d'irrigation variait entre 0,5 et 1 mmho/cm selon les saisons.

CHAPITRE V

APPLICATION À LA CONDUITE PRATIQUE DES ARROSAGES ET À LA DÉTERMINATION DES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION D'UN PÉRIMÈTRE

La connaissance des phénomènes d'interaction entre l'eau, le sol et la plante, est utile pour deux grandes catégories d'utilisateurs :

- le praticien, c'est-à-dire l'agriculteur irrigant, veut savoir comment optimiser la conduite de l'irrigation. Il veut également prévoir un ordre de grandeur de ses besoins en eau, pour pouvoir dimensionner son équipement en matériel d'irrigation ;
- le projeteur, ou le planificateur, veut pouvoir déterminer les quantités d'eau nécessaires aux irrigations, au niveau d'un périmètre ou au niveau d'une région, également connaître leurs variations interannuelles, ainsi que la plus-value que peut apporter l'irrigation sur le plan économique.

Nous examinerons d'abord, tant pour le praticien que pour le technicien de l'irrigation, ce que l'on peut déduire du bilan hydrique d'une culture. Puis nous verrons comment le technicien de l'irrigation doit s'y prendre pour calculer les besoins en eau d'un périmètre.

I. – CONNAISSANCE DES ÉLÉMENTS DU BILAN HYDRIQUE

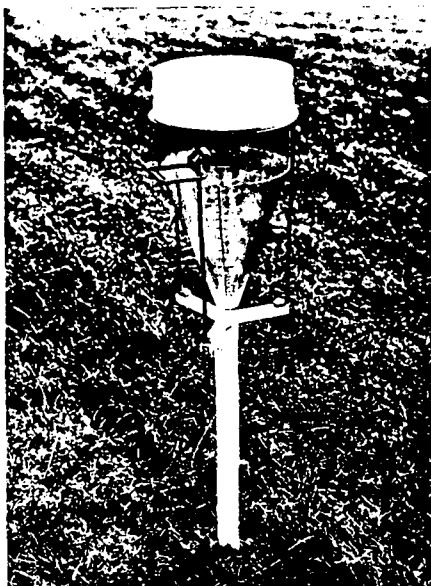
Établir un bilan hydrique consiste à déterminer, au niveau d'une parcelle ou d'un périmètre :

- d'une part la quantité totale d'eau reçue,
- et d'autre part la quantité totale d'eau perdue.

Les quantités reçues proviennent :

- de la pluie,
- de l'irrigation,
- de la contribution du sol à l'alimentation hydrique.

S.G.A.C. Météorologie Nationale Centre Technique et du Matériel	PLUVIOMETRE S.P.I.E.A. MODIFIE M.N.	R 0 1 - 2 0 5 0
---	-------------------------------------	-----------------



BUT ET UTILISATION

Mesure des hauteurs de pluie intéressant la climatologie, l'hydrologie (crues, E.D.F.), l'agriculture (irrigations), etc...

MESURE EFFECTUEE

Hauteur des précipitations, sous forme liquide, depuis l'observation précédente.

Hauteur d'eau équivalente pour neige, grêle . . . etc, après fusion.

Précision de lecture dans l'éprouvette : 0,05 mm de hauteur d'eau.

PRINCIPE

Mesure volumétrique de l'eau recueillie sur une surface horizontale bien déterminée.

ELEMENTS CONSTITUTIFS

L'ensemble comprend :

- Une *bague réceptrice de 400cm²* avec entonnoir, en plastique.
- Une *entretoise support d'éprouvette*, en plastique.
- Un *seau collecteur conique de 7,5 litres* (4 litres utiles) en plastique transparent.
- Un *pied métallique R01-2050-1700* avec collerette entretoisée servant de support au pluviomètre.
- Une *éprouvette R03-2040* en plastique transparent, graduée en 0,1 mm de 0,05 à 8 mm, de forme conique : \varnothing : 45 environ; h : 300 mm; masse : 100 g.

Encombrement du pluviomètre (récepteur et collecteur) \varnothing : 250; h : 437 mm;
Masse : 1 kg environ.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Matériau assurant stabilité dimensionnelle, inaltérabilité et inertie thermique.

Seau conique gradué.

Bague de 400 cm² à arête tranchante liée à un entonnoir conique de pente suffisante pour limiter les rejaillissements.

Eprouvette plastique moulée, de grande précision pour les faibles volumes, installée directement sous l'entonnoir de façon à éviter les transvasements pour des quantités d'eau < 8 mm.

Pour des quantités d'eau > 8 mm un orifice permet le débordement de l'éprouvette dans le seau.

IMPLANTATION

Surface bien dégagée de tout obstacle trop élevé.

Eviter sols en pente, terrasses ou toitures.

La distance minimale du pluviomètre aux objets environnants ne devrait pas être inférieure à quatre fois la hauteur de ces derniers.

INSTALLATION ET SERVITUDES

Enfoncer le pied verticalement jusqu'au trait repère. La bague doit être rigoureusement horizontale; parfaire éventuellement cette horizontalité par calage du pied.

Hauteur de la bague au-dessus du sol : 1 m environ.

En cas de débordement dans le seau :

- Installer l'éprouvette sur le support extérieur pour effectuer les transvasements et les lectures.
- Par vent fort, retirer l'éprouvette, verser son contenu dans le seau, faire la lecture sur la règle graduée du seau, puis appliquer la correction figurant dans la notice de l'appareil.

MAINTENANCE

- Entretien courant : éviter les chocs contre la bague; vérifier que les trous de l'entonnoir ne sont pas obstrués.
- Contrôles : portent exclusivement sur le bon état et l'horizontalité de la bague (niveau).
- Remplacer l'éprouvette en cas de jaunissement du matériau ou de craquellement.

FOURNISSEUR

Pluviomètre : BENOIT Frères, 15, rue Marcelin Berthelot
94140 ALFORTVILLE .

Pied support: KUNTZ · 91, rue du Capitaine Guynemer
92400 COURBEVOIE .

FIGURE 64. — Pluviomètre. Fiche technique de la Météorologie Nationale.

Les pertes en eau sont dues :

- à l'action des processus énergétiques au niveau de la plante et du sol (ETP, ETM),
- au ruissellement,
- au drainage.

1.1. – PLUVIOMÉTRIE

1.1.1. – Mesure de la pluviométrie (figure 64).

La pluviométrie est l'élément le plus variable du bilan, aussi bien dans le temps que dans l'espace ; il est donc indispensable pour l'irrigant de la mesurer sur place.

La précision des mesures de précipitations dépend du vent, de la hauteur à laquelle est installé le pluviomètre (hauteur normalisée 1,5 m), de son exposition et d'une manière générale du site dans lequel il se trouve : on évitera les situations proches de bâtiments ou d'arbres, sur des sommets de collines, ou dans des zones trop encaissées, où l'écoulement du vent est perturbé. Enfin, l'horizontalité du support doit être vérifiée. Il est bon de rappeler que de mauvaises conditions d'implantation peuvent entraîner des erreurs de mesure allant jusqu'à 50 %.

La pluviométrie doit être mesurée quotidiennement, même si dans la pratique le bilan hydrique s'effectue à l'échelle hebdomadaire ou décadaire.

Du fait de sa variabilité temporelle, il est nécessaire pour effectuer des études fréquentielles sérieuses, de travailler sur des séries assez longues : on considère généralement qu'une trentaine d'années de relevés pluviométriques constitue le minimum indispensable.

Lorsque l'on dispose d'une série suffisamment importante pour que l'on puisse tester une loi statistique de la distribution des pluies dans le temps, on peut alors constituer des séries artificielles par tirage au hasard. Ce tirage au hasard doit tenir compte du fait que les hauteurs de pluie ne sont pas des événements indépendants : il existe un phénomène de persistance qui se traduit par le fait qu'après une période pluvieuse, on a plus de chance d'observer une pluviométrie supérieure à la normale ; de même, après une période sèche, on a plus de chance de voir la sécheresse se maintenir.

La série de données pluviométriques peut être générée par une formule du type suivant :

$$P_i = Z_i + A.P_{i-1}$$

avec :

- P_i = hauteur pluviométrique de l'année i ;
- Z_i = variable aléatoire ;
- A = coefficient de persistance.

Les séries ainsi constituées peuvent alors servir de base à une étude fréquentielle du bilan hydrique sur des périodes plus longues que la période pour laquelle on dispose de données réelles.

En réalité une fraction seulement de la pluie tombée (et mesurée au pluviomètre), est réellement utilisable par la plante. Il est donc indispensable de connaître cette fraction, d'où la notion de *pluviométrie efficace*.

1.1.2. – Pluviométrie efficace.

La part de pluie non utilisée peut être :

- soit de la pluie qui tombe sur un sol déjà à la capacité de rétention ; cette eau en excès est de l'eau gravitaire, qui est évacuée rapidement par percolation (ou par ruissellement si le sol est proche de la saturation) ;

- soit de la pluie qui ne peut pénétrer que partiellement dans le sol pour des raisons indépendantes de l'état d'humidité de ce dernier et se trouve évacuée par ruissellement.

Lorsque l'on parle de pluviométrie efficace, c'est uniquement du 2^e point qu'il s'agit (l'eau perdue par excès est en effet calculée directement par le bilan hydrique pas à pas).

L'importance de l'eau perdue par ruissellement est variable selon :

- l'intensité des pluies ;
- la pente du terrain ;
- la perméabilité du terrain.

Il est très difficile d'apprécier de façon correcte l'efficacité des pluies qui est liée aux conditions locales. Le plus souvent, les formules d'estimation proposées sont des relations linéaires dont les coefficients varient avec les hauteurs d'eau.

En pratique, on pourra utiliser par exemple le modèle suivant proposé par le service agricole de l'IRAT.

$$\begin{array}{ll} \text{Si } P < 20 \text{ mm} & \text{RUISS} = 0 \\ & P \text{ eff} = P \\ \text{Si } P > 20 \text{ mm} & \text{RUISS} = 0,15 (P - 20) \\ & P \text{ eff} = P - \text{RUISS} \end{array}$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} P = \text{Pluie journalière en mm ;} \\ \text{RUISS} = \text{Ruissellement en mm ;} \\ P \text{ eff} = \text{Pluie efficace en mm.} \end{array} \right.$

Sur des sols bien aménagés, on peut prendre une formule plus simple :

$$\begin{array}{l} \text{RUISS} = 0,1 P ; \\ P \text{ eff} = 0,9 P. \end{array}$$

En fait, il est toujours bon de pouvoir procéder à des mesures sur le terrain. Pour plus de détails, consulter « Précipitations efficaces en agriculture irriguée », N. G. DASTANE, *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*, n° 25, 1977.

1.2. – ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Les méthodes d'estimation de l'ETP ont été exposées dans la première partie de cet ouvrage. Les principaux points à retenir lorsqu'il s'agit d'évaluer cette donnée sont les suivants :

- la mesure de l'ETP est très délicate : l'utilisation de données mesurées ne devra donc être faite qu'après critique des conditions d'obtention ;
- une bonne estimation par une formule appropriée est préférable à une mesure douteuse ;
- les mesures sur nappe d'eau libre sont facilement utilisables pour la conduite de l'irrigation, puisqu'elles fournissent directement des valeurs en mm. Mais il ne faut pas oublier que l'évaporation bac est légèrement supérieure à l'ETP, et qu'un facteur correctif est à utiliser ;
- la variabilité interannuelle de l'ETP est beaucoup plus faible que celle de la pluviométrie. On pourra donc souvent se contenter de valeurs moyennes de l'ETP sans grosses erreurs. Cela ne signifie pas que l'ETP a moins de poids que la pluviométrie : au contraire, leur importance respective dans le bilan est à peu près équivalente.

1.3. – ÉVAPOTRANSPIRATION MAXIMALE – COEFFICIENTS CULTURAUX

Pour l'agriculteur irrigant, la connaissance de l'ETM peut être acquise au cours de la campagne d'irrigation grâce à des *réseaux d'avertissement*, comme il en existe dans certains pays où l'irrigation par aspersion a pris une grande extension : une station météorologique représentative de l'ensemble du périmètre diffuse périodiquement – toutes les semaines par exemple – les valeurs de l'ETM de différentes cultures pour la période écoulée ; quelquefois, on diffuse l'ensemble des éléments du bilan et parfois même la date de déclenchement des irrigations.

Au niveau de la parcelle, il existe également des dispositifs de mesure des besoins en eau (bac évaporomètre, détecteur de rayonnement solaire global, etc.), qui peuvent commander un dispositif de pilotage automatique de l'irrigation : le bilan hydrique est, dans ce cas effectué par le mécanisme de pilotage qui intègre l'ensemble des éléments du bilan.

Les coefficients cultureux corrigent les valeurs de l'ETP. Leur estimation doit donc également être faite correctement. Ils dépendent :

- de la nature des cultures ;
- de leur stade végétatif ;
- des climats particuliers à chaque région.

Lorsqu'un certain rationnement est souhaitable pour la culture, soit sur le plan qualitatif, soit sur le plan économique, on appliquera un coefficient K_{opt} , de façon à permettre une évapotranspiration optimale :

$$ETR_{opt} = K_{opt} ETP$$

1.4. – RÉSERVE UTILE – RÉSERVE FACILEMENT UTILISABLE

La connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du sol est très importante pour l'irrigant, puisque ces caractéristiques déterminent l'importance des doses, donc l'espacement des arrosages. Par contre, elles interviennent moins directement pour le projeteur qui désire connaître surtout les besoins en eau. Si l'on se trouve dans une zone d'irrigation de complément, où les réserves du sol fournissent une part non négligeable des besoins en eau annuels, il sera nécessaire d'apprécier cette part avec la meilleure précision possible; au contraire, sous des climats à longue saison sèche, les quantités d'eau nécessaires aux irrigations varieront peu, que le sol ait de bonnes réserves ou non.

En fin de compte, les caractéristiques hydrodynamiques du sol ont moins de poids dans le bilan que les facteurs climatiques, mais il est plus difficile d'en avoir une estimation précise :

– parce que, à l'échelle d'un périmètre de quelques centaines d'hectares, on peut avoir une grande hétérogénéité pédologique, alors que climatiquement, la zone peut être très homogène. Une estimation correcte de la réserve en eau du sol exigera souvent une connaissance pédologique approfondie. L'hétérogénéité apparaît même souvent au niveau de la parcelle, et le praticien sera contraint de tabler sur les valeurs minimales de RU et RFU, donc d'augmenter la fréquence des arrosages. On voit alors tout l'intérêt, lors de l'aménagement d'un périmètre, de constituer des unités d'exploitation qui soient pédologiquement aussi homogènes que possible;

– parce que certains paramètres qui permettent d'estimer les réserves en eau du sol sont très difficiles à apprécier correctement : en particulier, la profondeur du sol exploitée par les racines, qui dépend non seulement du type de sol, mais aussi des techniques culturales, des conditions de travail du sol, des espèces et même des variétés, etc.

1.5. – ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE

Appelons R la réserve en eau du sol, c'est-à-dire la quantité d'eau disponible dans le sol à un moment donné pour une profondeur de sol donnée ($R < RU$).

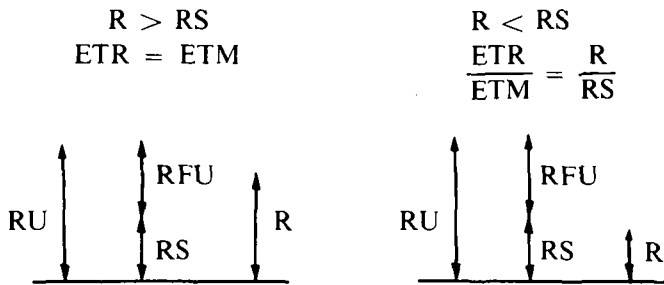
Pour calculer le bilan hydrique dans le sol, il faut connaître les lois qui relient ETR à R.

En effet, on a, de toute évidence, $ETR = ETM$ tant que R est proche de RU , mais le rationnement intervient dès que R diminue nettement, et il est d'autant plus accusé que le rapport R/RU est plus bas.

Voici par exemple deux méthodes utilisables pour estimer ETR à partir de l'humidité du sol :

– La première s'appuie sur les résultats de mesures réalisées en laboratoire par HALLAIRE, sur des échantillons de sol soumis à divers régimes de dessèchement (voir ci-dessus : « notions liées au sol ») :

Si l'on appelle RS la réserve dite « de survie » ($RS = RU - RFU$), on a :



Cette méthode se prête bien à un calcul à la main, en raison de sa simplicité. Elle présente quelques difficultés en ce qui concerne l'estimation de la RFU ; en effet, la RFU est variable suivant le niveau d'évapotranspiration, ce qui fausse légèrement les calculs.

– La deuxième méthode est celle qu'utilise le programme de simulation du Service d'Hydraulique Agricole de l'IRAT. Elle fait appel à une fonction polynomiale qui exprime ETR en fonction de l'humidité relative du sol, et de l'évapotranspiration maximale (en valeurs journalières).

Elle est de la forme :

$$ETR = a + b(HR) + c(HR)^2 + d(HR)^3$$

Avec : $HR = \frac{\text{Humidité du sol au jour considéré}}{\text{Humidité à la capacité de rétention}}$

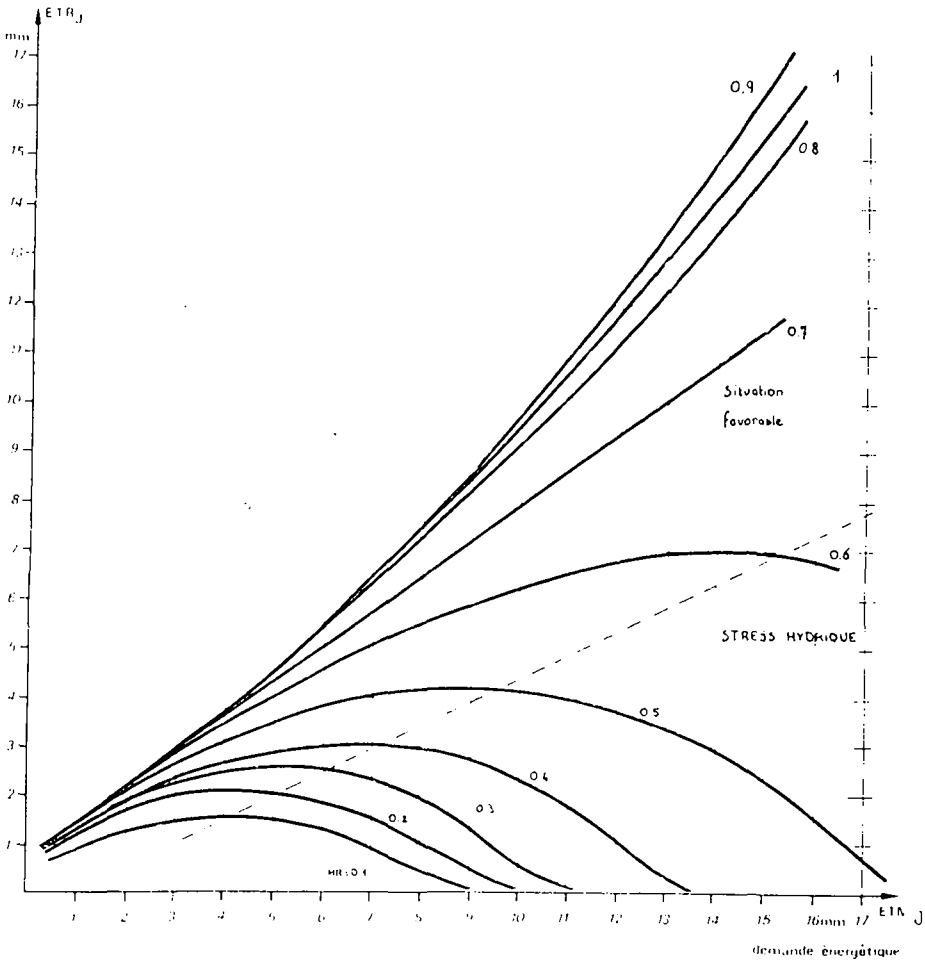
$$a = 0,732 - 0,050 ETM ;$$

$$b = 4,97 ETM - 0,661 (ETM)^2$$

$$c = - 8,57 ETM + 1,56 (ETM)^2$$

$$d = 4,34 ETM - 0,88 (ETM)^2$$

Les valeurs de a , b , c et d ont été déterminées à partir de modèles expérimentaux de régression (voir figure 65).



Fonction de EAGLEMAN

$$\underline{ETR}_j = 0.732 - 0.050 ETM_j + \left[4.97 ETM_j - 0.661 ETM_j^2 \right] HR$$

$$- \left[8.57 ETM_j - 1.56 ETM_j^2 \right] HR^2 + \left[4.35 ETM_j - 0.880 ETM_j^2 \right] HR^3$$

FIGURE 65. — Relation entre l'évapotranspiration réelle journalière ETR_j et la demande ETM_j en fonction de l'humidité disponible HR.

Cette loi permet une bonne simulation de la réalité comme l'ont montré des comparaisons entre valeurs calculées de la réserve en eau du sol, et valeurs mesurées à la sonde à neutrons. Le calcul est plus complexe que pour la méthode précédente, mais il est facile à mettre en œuvre quand on dispose d'un ordinateur.

II. – TENUE DU BILAN HYDRIQUE

2.1. – EXPRESSION DU BILAN HYDRIQUE

– D'après ce qui a été dit précédemment, l'expression du *bilan hydrique* est :

$$P + I \pm S \pm D \pm \Delta R - ETR = 0$$

avec :

- P = Précipitations ;
- I = Irrigation ;
- S = Ruissellement de surface ;
- D = Drainage ou apport d'eau par remontée de nappe ;
- ΔR = Variation de la réserve en eau du sol ;
- ETR = Évapotranspiration réelle.

– Lorsque l'on désire une approche plus sommaire, on se contentera de déterminer le *bilan climatique* qui permet d'exprimer le déficit climatique d'alimentation en eau d'une culture. Il ne fait pas intervenir les notions liées au sol. Il est représenté par la relation :

$$P + I_c = ETM = Q$$

avec :

- P = Précipitations ;
- ETM = Évapotranspiration maximale de la culture ;
- I_c = Déficit climatique (irrigation permettant de satisfaire ETM).

Entre ces deux extrêmes, selon le but recherché et en fonction des informations disponibles, diverses possibilités sont imaginables.

Le bilan s'effectue généralement de proche en proche, avec un pas de temps d'autant plus court que l'on dispose d'informations précises sur les différents termes : le bilan climatique tel qu'il est énoncé ci-dessus peut s'appliquer à des pas de temps mensuels. Par contre, si l'on veut prendre en compte de manière précise les termes tels que S, D, ΔR , un bilan journalier sera nécessaire.

Dans tous les cas, étant donné la variabilité des phénomènes climatiques, et particulièrement de la pluviométrie, sous tous les climats, il est indispensable que le calcul prévisionnel des besoins en eau débouche sur une *étude fréquentielle*.

Le calcul du bilan hydrique est également nécessaire pour l'agriculteur irrigant afin de décider de la date de déclenchement des irrigations. Ce calcul peut être effectué arithmétiquement par semaine ou par jour ; il est cependant plus simple de l'effectuer graphiquement en suivant la méthode ci-après.

2.2. – CALCUL DU BILAN HYDRIQUE (MÉTHODE GRAPHIQUE)

2.2.1. – Conduite pratique des arrosages.

On établit à l'avance un graphique représentant le niveau d'évapotranspiration que l'on veut imposer à la culture (voir figure 66).

On porte les jours en abscisses et, en ordonnées, les valeurs cumulées de l'ETM ou de l'ETR opt en fonction du temps. On obtient ainsi une droite ou une courbe (A).

On choisit la dose d'irrigation « d » en fonction des caractéristiques du sol et de l'enracinement de la plante; on trace alors la droite ou la courbe (B) obtenue en déplaçant (A) vers le bas, de la distance « d ».

L'état de la réserve du sol sera représenté par un point situé entre (A) et (B) : lorsque ce point se trouve sur la courbe (A), le sol est à la capacité de rétention; lorsqu'il se trouve sur la courbe (B), la réserve facilement utilisable est épuisée, et l'on doit déclencher l'irrigation.

Le bilan est effectué en déplaçant le point représentatif de la réserve du sol vers le haut à chaque pluie ou irrigation, et en le déplaçant chaque jour d'une unité vers la droite.

Exemple : Culture de tomates en pleine végétation au mois d'avril :

Besoins journaliers	7 mm/jour
Dose pratique maximale d'irrigation	25 mm

15 avril	16 avril	17 avril	18 avril	19 avril	20 avril
le sol est à saturation	pluie : 0	pluie : 8 mm	pluie : 0	pluie : 0	pluie : 0

Le déficit dépasse alors 25 mm. On donne alors un arrosage de 25 mm.

Cette méthode est suffisante pour la conduite des arrosages au jour le jour par l'irrigant.

On peut également, pour la conduite des irrigations à la parcelle, effectuer le bilan hydrique sur des fiches préparées spécialement pour chaque culture. Le pas de temps décadaire (ou hebdomadaire) est alors préférable.

Les valeurs décadaires (ou hebdomadaires) des termes du bilan hydrique sont mesurées ou estimées, et portées sur chaque fiche; on peut donc suivre, période par période, les variations de la réserve en eau du sol :

$$\Delta R = P + I \pm S \pm D - ETR$$

On décide en général d'irriguer lorsque la réserve du sol atteint l'humidité critique H_c (RFU = 0).

Une méthode analogue pour les cultures en sec existe également

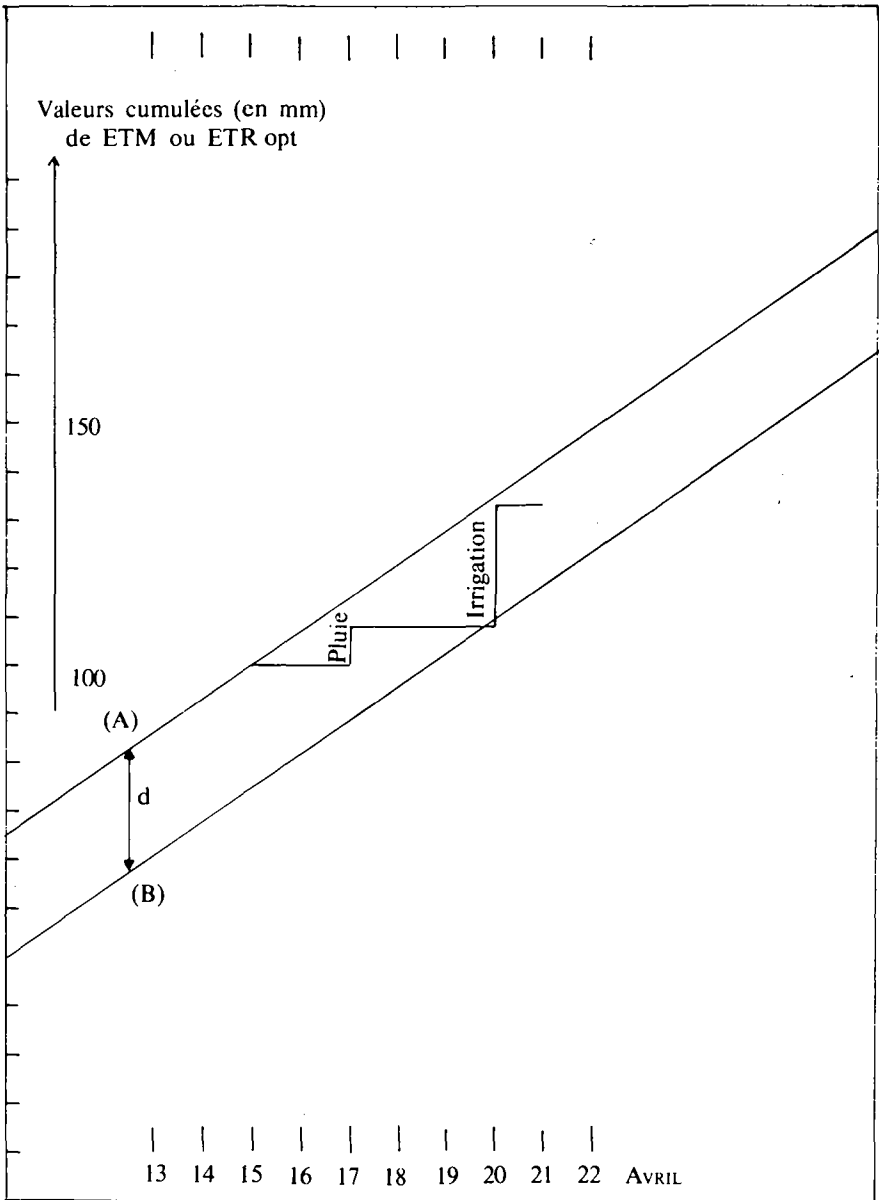


FIGURE 66. – Graphique de bilan hydrique (exemple), culture de tomates en pleine végétation au mois d'avril.

(F. FOREST « Bilan hydrique efficace et prospective décadaire des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne », Cahier pédagogique – Ministère de la Coopération). L'intérêt d'une telle méthode en culture sèche est de prévoir les conditions de réussite d'une culture.

2.2.2. – Détermination du bilan hydrique au niveau d'un projet.

Au stade du projet, si l'on désire une étude précise des potentialités agronomiques d'une région, avec ou sans irrigation, un calcul complet du bilan hydrique est nécessaire pour prendre en compte les interactions entre les différents termes. Un tel calcul ne peut dans la pratique être effectué que sur ordinateur.

Nous présentons, ci-après, deux exemples de calcul effectués avec le modèle de simulation du bilan hydrique du Service d'Hydraulique Agricole de l'IRAT.

2.2.2.1. – 1^{er} exemple : culture pluviale en zone sahélienne (culture de mil à Tillabery, Niger).

L'étude fréquentielle du bilan hydrique dans le sol pour une culture non irriguée permet de mettre en évidence certaines contraintes agronomiques qui peuvent guider le projeteur dans le choix des conditions d'implantation d'une culture :

Les conditions d'humectation du profil.

Le modèle calcule jour après jour la position du front d'humectation, laquelle conditionne la profondeur d'enracinement ; un tel calcul effectué pour un semis précoce de mil à Tillabery montre qu'au moment de la floraison, soit vers le 1-10 août, l'espérance d'enracinement n'est que de 30 cm une année sur deux, alors que la profondeur du sol est de 50 cm (figure 67). (Sol brun argilo-sableux).

Le modèle met donc en évidence l'intérêt d'une irrigation de complément en début de cycle.

Les pertes par ruissellement.

La simulation montre que la période de forte agressivité des pluies à Tillabery se situe à partir de la mi-août. Dans la mesure où la préparation du sol aura été correcte, le ruissellement ne devrait pas être très important en juin-juillet, pendant la période de culture (figure 68).

Les pertes par percolation ou drainage.

L'analyse fréquentielle montre que le drainage est relativement rare, dans la mesure où le sol est fortement cultivé (c'est-à-dire si l'ETR est élevée).

Le calage du cycle végétatif (10 000 poquets/ha).

Le problème est d'ajuster au mieux le cycle végétatif de la culture de mil par rapport à la saison des pluies de façon à ce que la plante assure au mieux son alimentation hydrique.

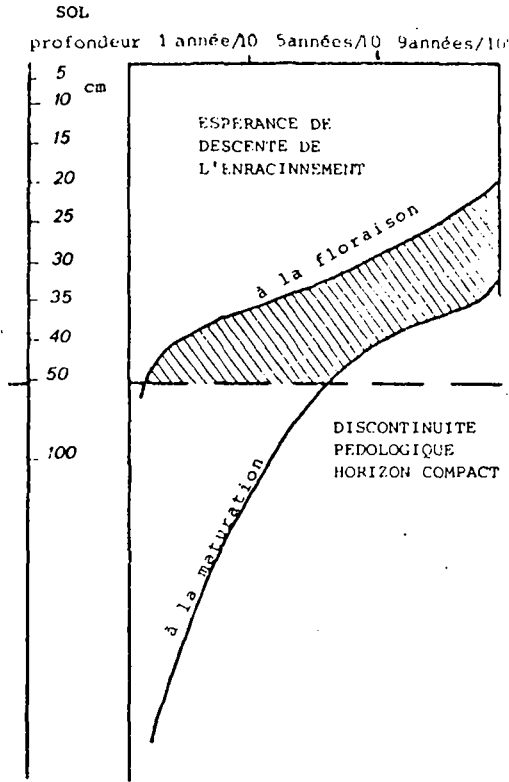
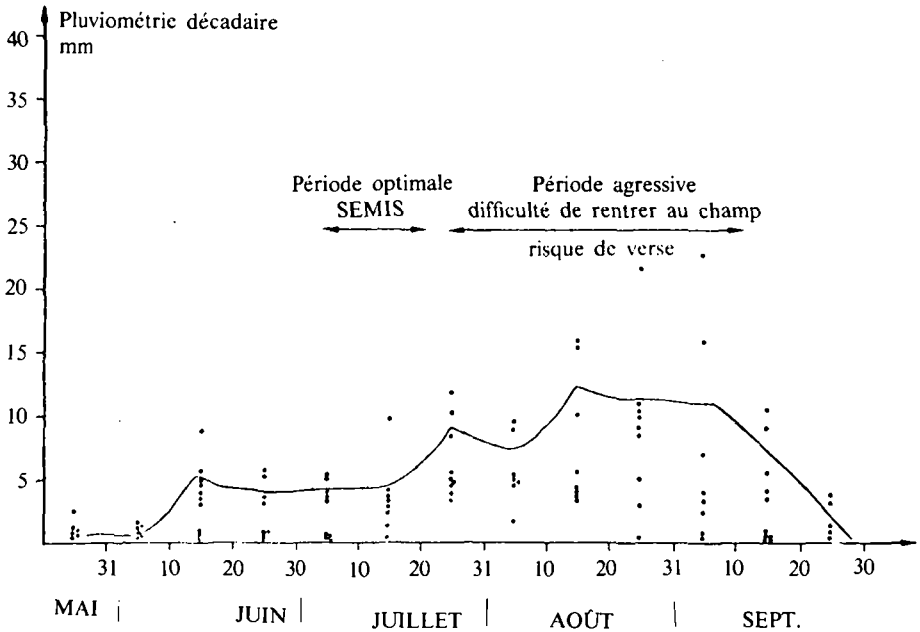


FIGURE 67. — Calcul fréquentiel du front d'humectation au moment de la floraison et de la maturation du mil à Tillabery (Niger).



Ruissellement potentiel prévisible huit années sur 10.
Sol brun subaride, coefficient de ruissellement = 15%.

FIGURE 68. — Détermination de la période optimale de semis du mil à Tillabery (Niger).

Selon la période à laquelle le semis est effectué, les besoins en eau pourront être plus ou moins importants; de même, le déficit hydrique pourra être plus ou moins accusé : on attachera en particulier une grande importance à la satisfaction des besoins en eau à la phase critique, qui correspond au stade « épiaison – floraison ».

L'analyse effectuée pour différentes dates de semis et avec une réserve utile de 80 mm, montre (figure 69) que :

– Pour des semis précoces (le 10 juin ou le 20 juin), on atteint, un mois après le semis, un déficit d'alimentation hydrique moyen de 30 à 40 mm par décade, soit plus de 50 % de l'ETM. Le potentiel de production se trouve donc nettement amoindri dès le départ.

– L'analyse des reports de réserve d'une année à l'autre n'autorise le semis précoce que 2 années sur 10, et à condition que la maîtrise des adventices soit parfaite. Traditionnellement le paysannat pallie ce risque d'arrêt des semis précoces en pratiquant des densités faibles (4 000 poquets/ha).

Avec un semis aux environs du 1^{er} juillet, le déficit d'alimentation hydrique n'excède alors jamais 20 mm par décade, sauf en phase de maturation, ce qui est moins grave. Le déficit quinquennal (atteint ou dépassé 1 année sur 5), est de l'ordre de 35 mm par décade. Avec un semis au 10 juillet, l'espérance de l'alimentation hydrique est un peu moins bonne, mais encore satisfaisante.

– Par contre un semis tardif laisse prévoir en fin de cycle un déficit important : plus de 50 mm par décade une année sur 5, ce qui constitue un risque non négligeable; de plus il ne permet pas la pratique efficace de la culture décalée ou dérobée (association).

En fin de compte, la période optimale du semis se situe dans un créneau relativement court (1 au 10 juillet). Cette situation a des conséquences évidentes au niveau de la gestion et de l'organisation des travaux agricoles.

L'estimation fréquentielle de la réserve en eau en fonction de la date de semis.

Le problème du calage optimal du cycle végétatif, au lieu d'être apprécié par le biais du déficit d'alimentation hydrique peut être étudié par l'évolution du niveau de la réserve en eau du sol. Les conclusions tirées de l'exemple de la culture du mil à Tillabery peuvent se retrouver en abordant le problème de cette façon (voir figure 70).

Semis précoce au 10 juin.

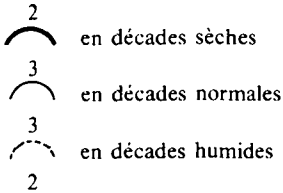
En période normale, ou même favorable, le niveau de la réserve en eau R devient très faible (< 8 mm), vers le 40^e jour du cycle. La culture est alors au point de flétrissement pendant plusieurs jours consécutifs. Le ressemis apparaît inévitable vers le 20 juillet, sauf si la culture bénéficie du report de réserve interannuel (2 années sur 10).

FIGURE 69. — Courbes fréquentielles traduisant l'espérance d'ajustement du cycle végétatif du mil cultivé en sec à Tillabery (Niger) en fonction de la date du semis (d'après document IRAT).

Sol subaride RU = 80 mm.

Légende

Limite supérieure du déficit d'alimentation en eau.



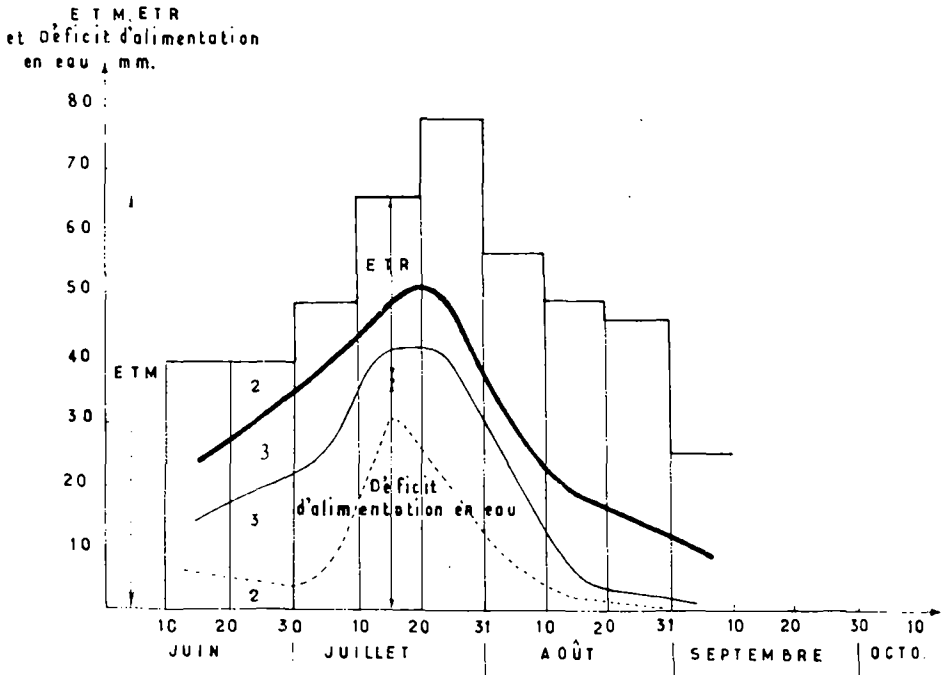
ETM : besoin en eau de la culture.

ETR : consommation en eau estimée.

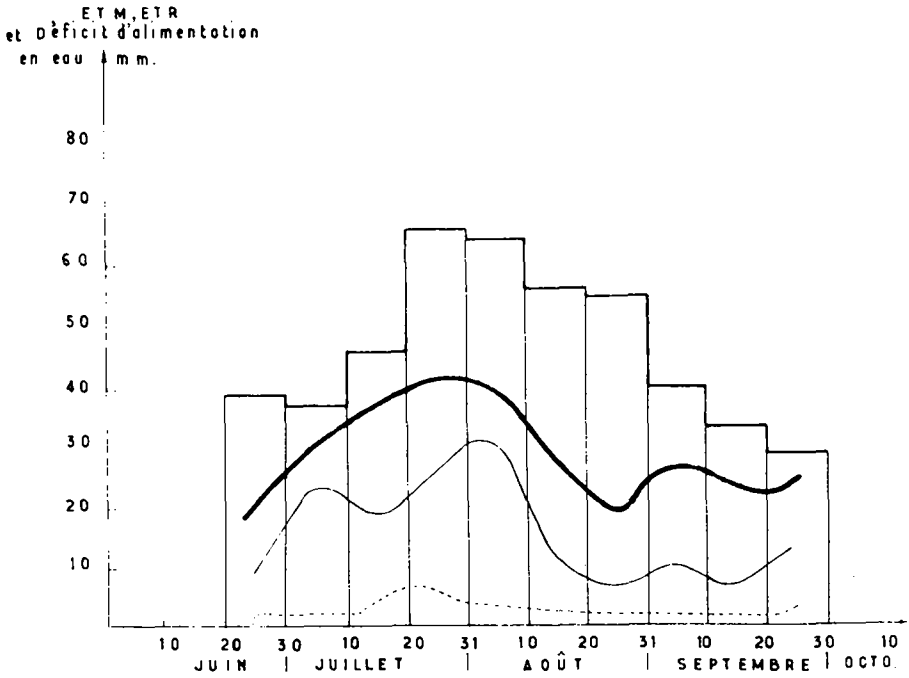
Déficit d'alimentation en eau = ETM - ETR.

2-3-3-2 : nombre d'années sur 10 où le déficit d'alimentation en eau peut être attendu dans chacune des 4 classes.

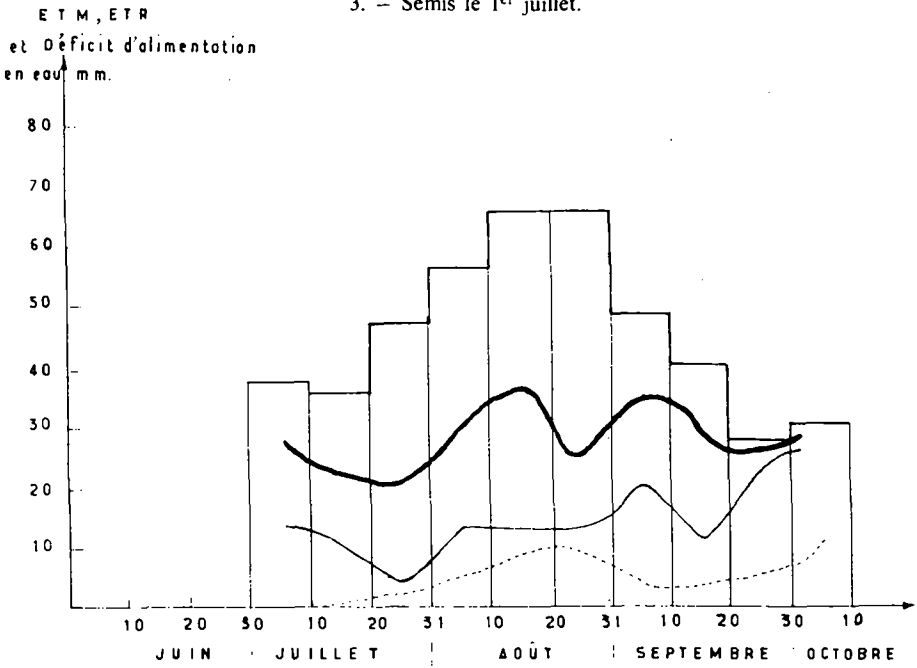
1. — Semis le 10 juin.



2. - Semis le 20 juin.

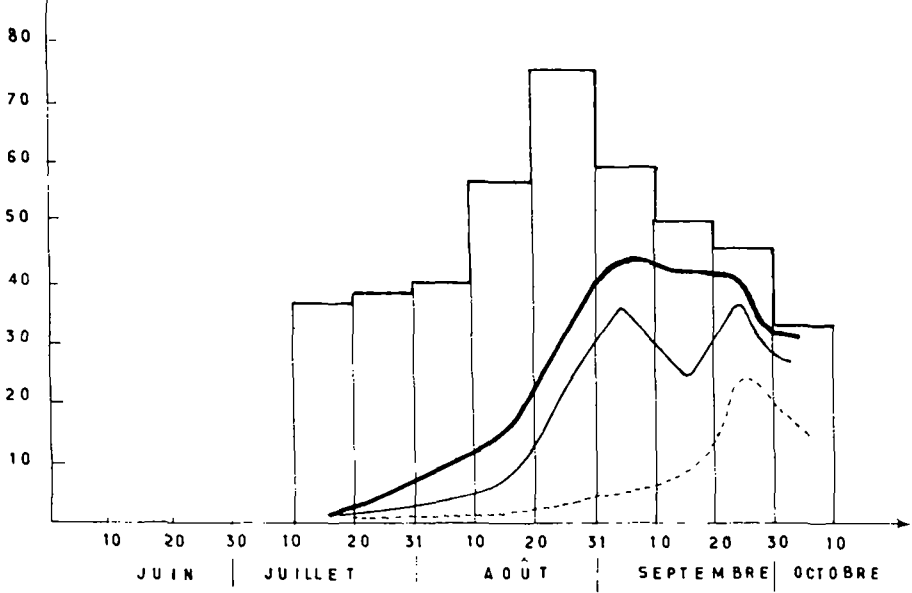


3. - Semis le 1^{er} juillet.



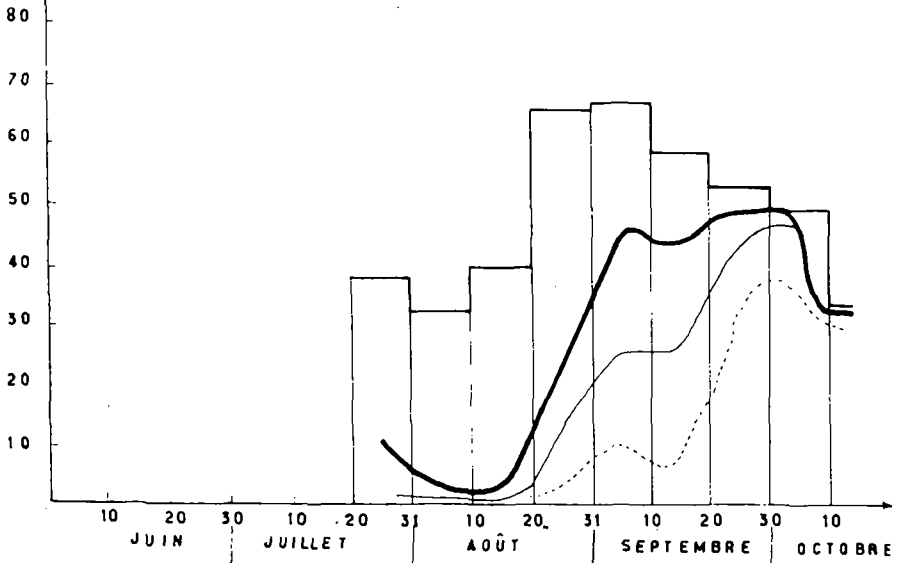
4. - Semis le 10 juillet.

ETM, ETR
et Déficit d'alimentation
en eau mm.

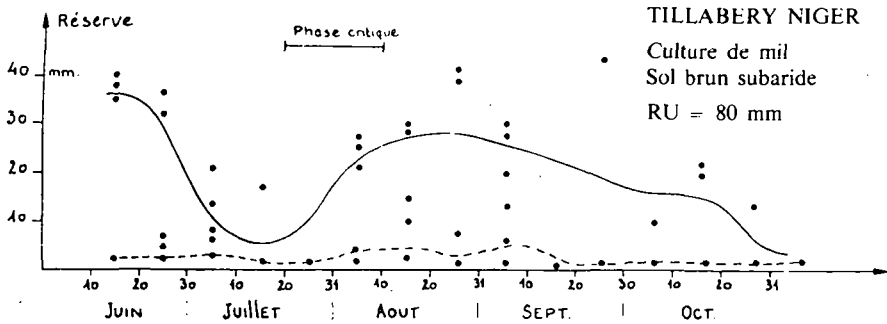


5. - Semis le 20 juillet.

ETM, ETR
et Déficit d'alimentation
en eau mm.



CULTURE SEMÉE LE 10 JUIN



CULTURE SEMÉE LE 10 JUILLET

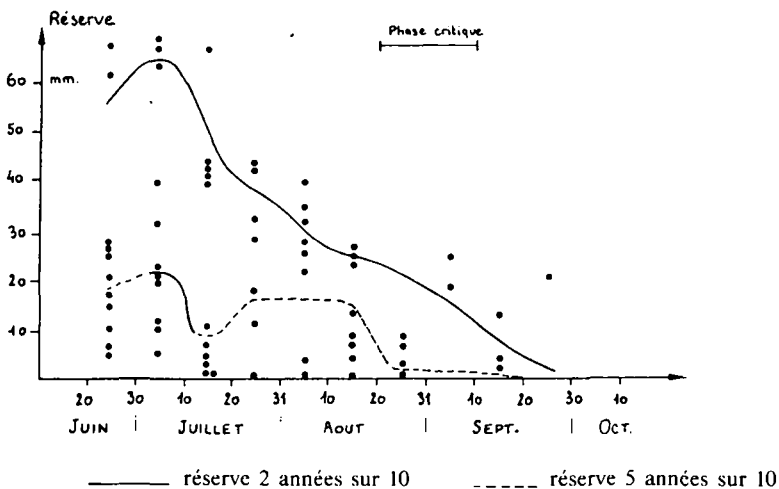


FIGURE 70. — Estimation fréquentielle de la réserve en eau.

Semis optimal au 10 juillet.

L'humectation du sol est suffisante pour permettre un bon enracinement en période humide (2 années sur 10). Par contre, 1 année sur 2, il y aura risque de flétrissement temporaire au moment de la floraison.

En conclusion, cette simulation du bilan hydrique dans le sol permet d'évaluer les risques encourus en culture sèche; elle permet de dégager des indications utiles pour l'organisation de la campagne agricole; enfin, elle met dans certains cas en évidence l'intérêt d'une irrigation de complément aux stades où l'insuffisance de l'alimentation en eau peut compromettre la production finale, et elle souligne l'avantage de la pratique extensive des cultures en l'absence de moyens d'irrigation.

2.2.2.2. – 2^e exemple : culture irriguée en zone tropicale (canne à sucre à Sokode, Togo).

En culture irriguée, le modèle de simulation du bilan hydrique a plutôt pour objet de déterminer les besoins en eau d'un périmètre d'irrigation.

Dans l'exemple choisi, d'un périmètre de canne à sucre à Sokode (Togo), les sols sont argilo-sableux, avec 2 profondeurs utilisables (RU = 160 mm et RU = 40 mm). Les résultats sont les suivants :

Dimensionnement du réseau.

Pour les parcelles dont la coupe est effectuée au 10 novembre, les besoins de pointe sont (figure 71) :

	RU = 160 mm	RU = 40 mm
Besoins de pointe	65 m ³ /ha/jour	70 m ³ /ha/jour
Période de pointe	10-20 mars	10-20 mars

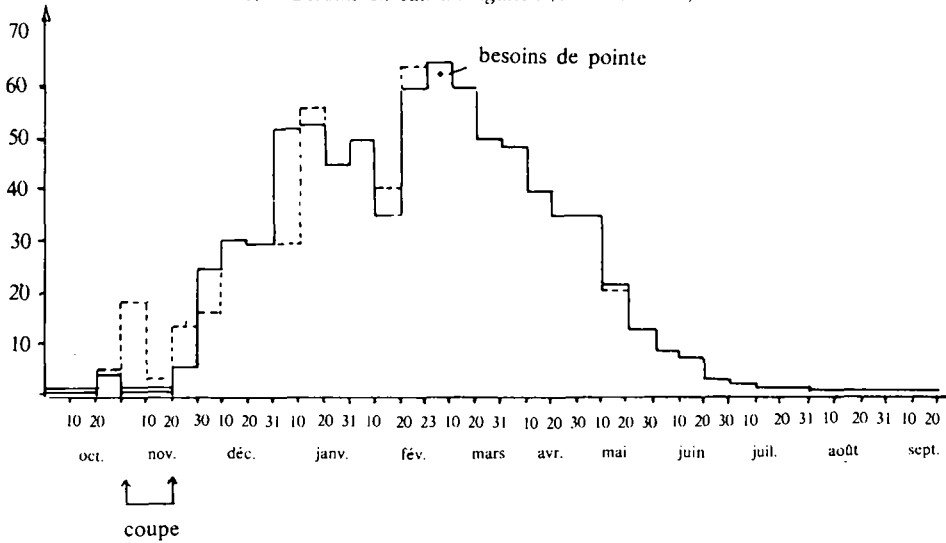
Besoins annuels.

Pour les mêmes parcelles, dont la coupe est effectuée au 10 novembre, les besoins annuels sont :

	RU = 160 mm	RU = 40 mm
<i>Besoins quinquennaux</i> (dépassés 1 an sur 5)		
Campagne (10 nov.-10 avril)	5 923 m ³	6 241 m ³
Hors campagne	2 826 m ³	3 957 m ³
Total	8 749 m ³	10 198 m ³
<i>Besoins biennaux</i> (dépassés 1 an sur 2)		
Campagne (10 nov.-10 avril)	5 762 m ³	6 193 m ³
Hors campagne	2 720 m ³	3 779 m ³
Total	8 446 m ³	9 972 m ³

Canne à sucre à Sokodé-Togo.
 RU = 160 mm.

1. - Besoins en eau d'irrigation (en mm/décade).



2. - Drainage pluvial (en mm/décade).

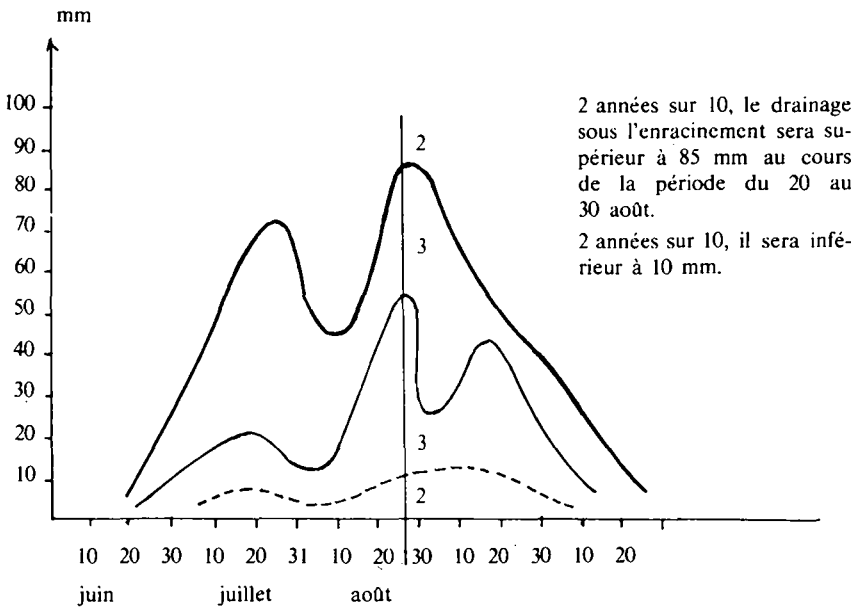


FIGURE 71. - Simulation d'irrigation sur la coupe du 10 nov., 20 nov.

Percolation en profondeur.

Les pertes par percolation en-dessous de l'horizon utilisable peuvent également être calculées par le modèle de simulation :

	RU = 160 mm	RU = 40 mm
<i>Pertes quinquennales</i> (dépassées 1 an sur 5)		
Période de pointe	10-20 août	1-31 août
Volume maximal	85 m ³ /ha/jour	120 m ³ /ha/jour
Volume annuel	4 500 m ³ /ha	5 500 m ³ /ha
<i>Pertes biennales</i> (dépassées 1 an sur 2)		
Périodes de pointe	10-20 août	1-31 août
Volume maximal	55 m ³ /ha/jour	90 m ³ /ha/jour
Volume annuel	3 000 m ³ /ha	4 500 m ³ /ha

III. – CALCUL DES BESOINS EN EAU D'UN PÉRIMÈTRE D'IRRIGATION

La méthodologie exposée ci-dessus permet de définir dans chaque cas précis les besoins en eau ainsi que l'évolution du bilan hydrique au niveau d'une parcelle.

En fait, pour aboutir à une évaluation correcte des besoins en eau d'un périmètre d'irrigation, il est indispensable de situer le problème dans un contexte plus général.

En effet, le choix du niveau d'intensification dépend de paramètres économiques; les systèmes de culture envisageables dépendent aussi de l'environnement socio-économique de la région, de la technicité des agriculteurs; la consommation en eau dépend également beaucoup de la conception du réseau : canaux non revêtus, revêtus, ou conduites, irrigation à la demande ou tour d'eau.

Tous ces points doivent être examinés dans chaque cas particulier, et l'on sera quelquefois conduit à effectuer plusieurs fois le calcul des besoins en eau, avec différentes hypothèses concernant le niveau d'irrigation des cultures, l'assolement, etc.

3.1. – CHOIX DU NIVEAU D'INTENSIFICATION

Pour une culture donnée, les quantités d'eau permettant les rendements maximaux ne sont pas toujours les plus intéressantes. Le choix du niveau d'irrigation optimal est en effet soumis à bien d'autres cri-

tères que les seuls facteurs climatiques et culturaux : les critères de rentabilité, de marché, de disponibilité en eau, d'équipement en matériel ou d'organisation des chantiers sont souvent primordiaux. Les critères économiques, qui pèsent souvent d'un poids plus lourd que les autres, peuvent être examinés de manière rationnelle, si l'on connaît la fonction de réponse à l'irrigation : en effet, l'expérimentation permet souvent de fournir, dans des conditions de culture données, la *fonction de production* $R = f(V)$.

avec : $\begin{cases} R = \text{rendement de la culture (q}^x/\text{ha)}; \\ V = \text{volume d'eau apporté (m}^3/\text{ha)}. \end{cases}$

Les autres données à prendre en compte sont :

$c = \text{charges fixes d'exploitation (en F/ha)};$
 $r = \text{prix de vente de la production agricole (en F/q}^x\text{)};$
 $p = \text{prix de revient du mètre cube d'eau (en F/m}^3\text{)}.$

La validité des calculs est évidemment conditionnée par une bonne estimation des différents paramètres. Par exemple, il importe de ne pas oublier que le prix de revient du m^3 d'eau comprend :

- le prix d'achat de l'eau (cas d'un réseau collectif) ou le coût du pompage (cas d'une installation individuelle);
- l'amortissement du matériel;
- le coût de fonctionnement de l'irrigation (main-d'œuvre, fournitures);
- les frais d'entretien.

Deux cas principaux sont à considérer pour un périmètre d'irrigation :

1^{er} cas : la surface irrigable est limitée (S en ha = surface équipée) mais les ressources en eau sont illimitées.

La culture retenue obéit à la loi des rendements moins que proportionnels en fonction des apports d'eau.

Le calcul doit déterminer pour quel volume d'eau le bénéfice B du périmètre est maximal :

$$B = S.R.r - S.c - S.V.p \text{ et, comme } R = f(V) :$$

$$B/S = f(V)r - c - Vp.$$

Le bénéfice sera maximal lorsque la dérivée de cette fonction par rapport à V sera nulle :

$$f'(V)r - p = 0$$

$$f'(V) = \frac{p}{r}$$

$f'(V)$ est appelée *productivité marginale de l'irrigation*.

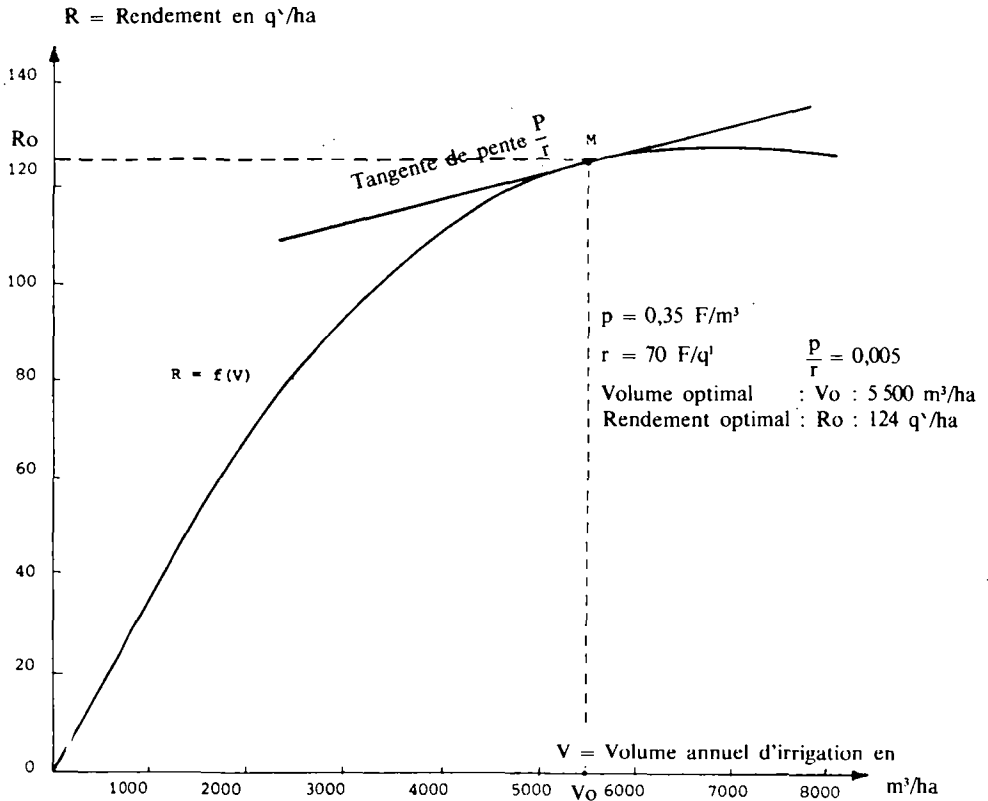


FIGURE 72. — Détermination du volume d'irrigation optimal dans le cas où la surface à irriguer est déterminée, et la quantité d'eau disponible illimitée. (Courbe de réponse à l'irrigation établie sur maïs-grain, à la station expérimentale de VILLA LITERNO, Italie).

Ce qui détermine le volume V_0 optimal.

La résolution se fera par le calcul si l'on a pu déterminer un ajustement de la fonction $f(V)$. Elle peut se faire graphiquement en traçant la tangente de pente $\frac{P}{r}$ à la courbe de réponse : le point de contact a pour coordonnées V_0 et P_0 (volume optimal et rendement optimal correspondant) (voir figure 72).

2^e cas : La surface irrigable est illimitée, mais les ressources en eau sont limitées.

Soit Q (en m³) le volume d'eau disponible pour l'ensemble du périmètre :

$$\text{On a donc : } S = \frac{Q}{V}$$

$$B = \frac{Q}{V} [f(V)r - c - Vp]$$

Comme ci-dessus, on cherche la valeur de V pour laquelle la dérivée de B par rapport à V est nulle :

$$\frac{Q}{V^2} [f(V)r - c - Vp] - \frac{Q}{V} [f'(V)r - p] = 0$$

$$f(V) \frac{r}{V} - \frac{c}{V} - f'(V)r = 0$$

$$f(V) - \frac{c}{r} - Vf'(V) = 0$$

$$f(V) - Vf'(V) = \frac{c}{r}$$

$\frac{c}{r}$ en q^x/ha étant le nombre de quantaux qui couvre les charges fixes d'exploitation.

Là encore, si l'on a pu déterminer un ajustement, la résolution par le calcul, quoique un peu plus complexe, peut être envisagée. Sinon, la méthode graphique sera utilisée, en traçant point par point la courbe représentant la fonction $g(V) = f(V) - Vf'(V)$, puis en faisant :

$$g(V) = \frac{c}{r} \text{ (voir figure 73).}$$

On obtient alors :

– le volume optimal à l'ha V_0 et le rendement optimal à l'ha :
 $R_0 = f(V_0)$;

– la surface optimale à irriguer $S_0 = \frac{Q}{V_0}$;

– la production correspondante : $S_0 \times R_0$

3.2. – CHOIX DU SYSTÈME DE CULTURE ET DE L'ASSOLEMENT

L'introduction de l'irrigation dans une région agricole modifie en général le système de culture.

On peut se trouver dans le cas d'un projet de mise en valeur d'une zone vierge ou d'exploitation très extensive; le choix des spéculations se fera essentiellement sur une étude des potentialités du milieu naturel et des débouchés possibles. On peut au contraire avoir affaire à une région déjà développée sur le plan agricole, où l'irrigation peut exister ponctuellement; dans ce cas, l'intensification peut entraîner une modification de l'assolement.

Le système de culture dépendra également du niveau d'intensification du futur périmètre : les cultures les plus extensives disparaîtront au profit de cultures à hauts revenus; une certaine diversification de la pro-

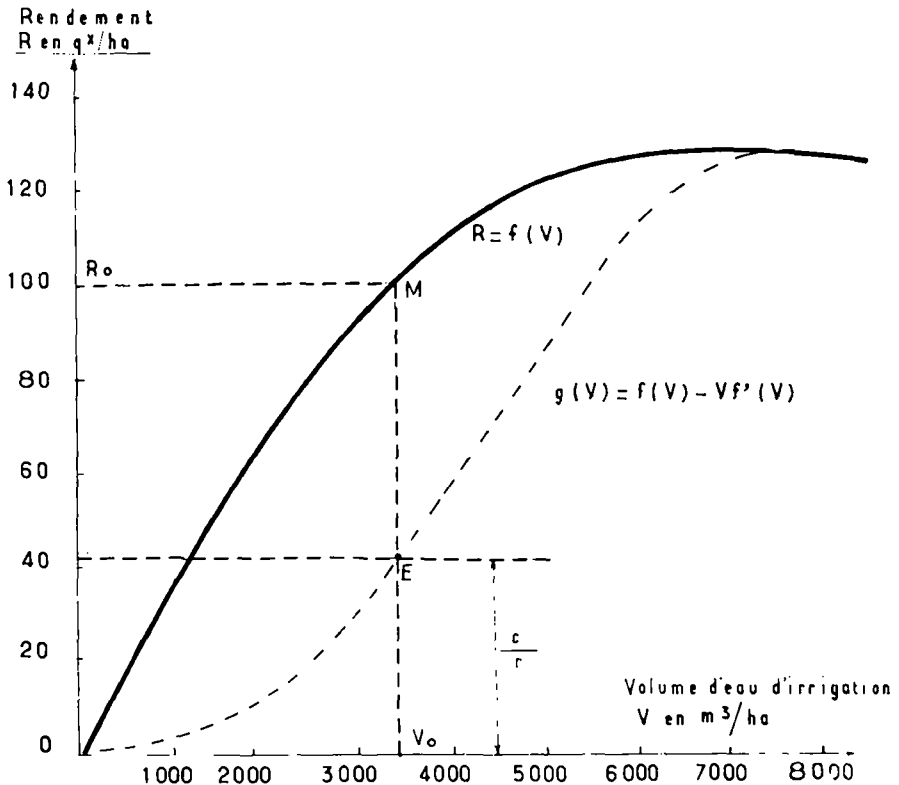


FIGURE 73. — Détermination du volume optimal d'eau d'irrigation dans le cas où le volume d'eau total disponible est limité. (Courbe de réponse à l'irrigation établie sur maïs-grain, à la station expérimentale de VILLA LITERNO, Italie).

duction devient possible par l'introduction de cultures exigeantes en eau, par contre certaines cultures dont le marché est limité ou contingenté pourront diminuer en surface pour compenser l'augmentation des rendements. Quelquefois, la création d'un périmètre irrigué permettra la mise en valeur de zones sèches avoisinantes : c'est le cas par exemple, en matière d'élevage : la production de fourrage en saison sèche dans la zone irriguée permet une meilleure utilisation de l'excédent de production en saison humide dans les zones sèches. Enfin, il ne faut pas perdre de vue que des problèmes techniques peuvent se poser à long terme : la fatigue des sols peut apparaître au bout de quelques années de culture intensive (apparition de parasites du sol, de maladies, diminution du taux de matière organique, carences en certains oligo-éléments...). Ces problèmes qui ne sont en général pas décelés pendant les premières années de mise en valeur, font que les prévisions agronomiques, élaborées à partir d'expérimentations grossières, peuvent quelquefois être trop optimistes par rapport à la réalité.

3.3. – BESOINS NETS EN EAU D'IRRIGATION

Les calculs effectués jusqu'ici donnent généralement les *besoins nets en eau d'irrigation*, c'est-à-dire la quantité d'eau qui doit être effectivement consommée par la plante.

On attachera de l'importance plus particulièrement aux deux valeurs suivantes :

- *le besoin en eau annuel*, qui est le volume annuel nécessaire, soit par ha, soit pour l'ensemble du périmètre ;
- *le débit fictif continu en période de pointe* qui exprime le débit continu (24 h/jour) qui serait nécessaire à l'ha pendant la période de pointe des arrosages.

3.4. – BESOINS BRUTS EN EAU D'IRRIGATION

On doit majorer les besoins nets pour obtenir les *besoins bruts*.

Le rendement hydraulique de l'irrigation R, qui est le rapport $\frac{\text{besoins nets}}{\text{besoins bruts}}$ représente le rapport du volume effectivement disponible pour la plante au volume qui doit pour cela être délivré par le réseau ou prélevé sur la ressource en eau. L'excédent de volume, nécessaire pour passer des besoins nets aux besoins bruts, représente :

- *les pertes pendant la distribution de l'eau à l'aval de la prise de l'irrigant*, par ruissellement (colature) ou par percolation profonde. Il faut, dans le cas de sols à dessaler, *y ajouter les besoins de lessivage* ;
- *les pertes pendant le transport de l'eau à l'amont de la prise de l'irrigant* par évaporation dans les canaux à ciel ouvert, par infiltration, ainsi que par déversement ou rejet (dans le cas d'une régulation imparfaite) ;
- *les pertes pendant le stockage de l'eau*, si l'eau est prélevée dans un barrage réservoir. Ces pertes proviennent, soit d'infiltrations dans la cuvette du réservoir ou à travers la digue du barrage, soit de l'évaporation en surface. On peut réduire les infiltrations par la pose d'une couche d'étanchéité (film plastique ou écran bitumineux), et l'évaporation par un film monomoléculaire constitué d'un alcool à longue chaîne.

Le rendement de l'irrigation dépend donc essentiellement de la méthode d'irrigation, de la nature du réseau et du type de régulation utilisé.

On peut le considérer à divers niveaux du circuit de l'eau, allant de la ressource à la plante.

Aussi peut-on distinguer :

- *le rendement à la parcelle R_p*, pour lequel on peut admettre, dans des conditions de fonctionnement relativement favorables, les valeurs ci-après :

<i>Modes d'irrigation</i>	<i>Valeurs de Rp</i>
raie	de 0,5 à 0,6
bassin	0,6 à 0,8
aspersion	0,8 à 0,9
goutte à goutte	0,9 à 1,00

– le rendement du réseau de transport R_t , qui est beaucoup plus variable selon la nature et l'état du réseau. Il est pratiquement égal à 1 dans un réseau sous-pression, surtout si le périmètre est petit. Il peut atteindre 0,5 à 0,7 pour des réseaux gravitaires avec canaux non revêtus ;

– le rendement du stockage R_s éventuellement.

En tête du réseau, le rendement global de l'irrigation est :

$$R_g = R_p \times R_t \times R_s \quad R_g < 1$$

Une fois les rendements estimés, on déduit les besoins bruts des besoins nets en appliquant la formule :

$$\text{Besoins bruts} = \frac{\text{Besoins nets}}{R_g}$$

De même que pour les besoins nets, on calcule en particulier :

– le besoin annuel qui conditionne le volume de la réserve qui doit éventuellement être constituée ;

– le débit fictif continu en période de pointe qui conditionne le dimensionnement du réseau (diamètre des conduites, débit des stations de pompage). Toutefois étant donné que les ouvrages se trouvent à l'aval de la réserve, le rendement R_s n'est pas à prendre en compte et R_g sera égal à $R_p \times R_t$, R_t étant d'ailleurs déterminé compte tenu de la place de chaque ouvrage dans le circuit de l'eau.

3.5. – CHOIX DU TAUX DE PÉNURIE ACCEPTABLE

Lorsque les ressources en eau sont abondantes et le coût des équipements nécessaires à la mise en œuvre de l'irrigation peu élevés, on peut réaliser des périmètres où les besoins à la parcelle peuvent être satisfaits correctement toute l'année (à l'ETM).

Mais ce n'est pas toujours le cas : bien souvent, on est contraint de réaliser des équipements qui ne peuvent pas fournir la totalité de la demande potentielle ; en effet, entre deux options possibles pour équiper un réseau, le gain de production agricole peut être insuffisant pour justifier le supplément d'investissement. Le problème peut se poser en particulier lorsque l'on a affaire à des cultures dont la pointe de consommation est nettement marquée comme le maïs.

L'évaluation de l'intérêt économique de la réalisation d'équipements plus ou moins importants peut s'étudier à l'aide de programmes de

simulation de la gestion au niveau des périmètres. On peut ainsi calculer pour chaque type d'équipement envisagé un *taux de pénurie* moyen, défini comme étant le rapport exprimé en pourcentage entre le déficit de fourniture d'eau, et la demande potentielle : ce taux de pénurie, que nous appellerons TP, s'exprime ainsi :

$$TP = \frac{B_p - B_s}{B_p} \times 100$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} TP = \text{taux de pénurie en \% ;} \\ B_p = \text{besoins potentiels en eau d'irrigation ;} \\ B_s = \text{besoins satisfaits.} \end{array} \right.$

À moins que l'on ait les moyens de faire une étude plus fine, on admet généralement que la réduction relative de la production agricole est proportionnelle au taux de pénurie. Cette hypothèse est généralement suffisante pour permettre un choix rationnel parmi les divers types d'équipement envisagés.

3.6. – EXEMPLE D'APPLICATION POUR LA PLANIFICATION

Une fois faites les évaluations ci-dessus, il est intéressant de comparer les besoins en eau d'irrigation aux ressources en eau disponibles, qui sont souvent elles-mêmes variables en fonction des éléments climatiques, mais difficiles à calculer de façon précise.

Nous avons pris ci-dessus l'exemple d'une culture irriguée en zone tropicale (canne à sucre à Sokodé, au Togo).

Les résultats peuvent se résumer dans le tableau suivant :

Ressources en eau disponibles	Volumes disponibles		Demande	Surface minimale irrigable
	Minimaux	Maximaux		
Barrage	5 000 000 m ³ /an	10 000 000 m ³ /an	13 500 m ³ /ha/an	370 ha
Nappe (par forage)	100 m ³ /jour	200 m ³ /jour	100 m ³ /ha/jour	1 ha/forage
Fleuve	50 000 m ³ /jour	600 000 m ³ /jour	100 m ³ /ha/jour	500 ha

Enfin, le dimensionnement d'un projet d'irrigation doit être calculé en tenant compte de l'ensemble des autres besoins qui dépendent de la même ressource hydrique : besoins des hommes, besoins des animaux, besoins industriels éventuellement. Car la mise en valeur d'un périmètre doit être réalisée avec le souci de la conservation et du développement de l'ensemble des activités de la région.

ANNEXE

VALEURS NORMALES DE QUELQUES FACTEURS CLIMATIQUES POUR DIVERSES STATIONS AFRICAINES

(Source : Comité Interafricain d'Études Hydrauliques).

Les tableaux suivants présentent, pour 20 stations météorologiques d'Afrique francophone, les valeurs normales mensuelles de pluviométrie et d'ETP, l'écart-type de la pluviométrie et le bilan climatique P - ETP.

Les ETP ont été calculées par la formule de PENMAN pour les stations qui fournissent les données nécessaires pour cette formule (durée d'insolation, température, humidité de l'air et vitesse du vent); elles ont été estimées par interpolations spatiales pour les stations qui ne fournissent pas toutes ces données.

La formule de PENMAN a été calculée avec une valeur de l'albedo $a = 0,20$.

Le rayonnement global a été estimé à partir de la durée d'insolation grâce à la formule d'ANGSTROM :

$$RG = RGo (0,18 + 0,62 h/H).$$

STATION : Parakou (Bénin). - 2°40' Long. Est - 9°20' Lat. Nord.

NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 43 (1922-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	3,3	12,6	40,3	82,1	130,4	168,7	180,1	209,9	241,7	119,3	11,4	2,8	1202,6
• Écart-type	11,3	18,9	26,4	36,9	61,4	59,1	89,8	87,3	88,4	60,2	16,8	8,7	221,4
ETP (mm)	157,1	149,7	180,8	153,0	157,8	127,0	112,5	100,2	103,0	136,6	143,0	146,8	1667,5
P - ETP (mm)	-153,8	-137,1	-140,5	-70,9	-27,4	41,7	67,6	109,7	138,7	-17,3	-131,6	-144,0	-464,9

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 822,6 mm.

STATION : Bouaké (Côte d'Ivoire). — 5°5' Long. Ouest — 7°45' Lat. Nord.
 NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 41 (1923-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	14,6	44,3	90,9	140,8	145,3	138,1	101,1	104,9	212,3	141,4	36,5	17,6	1187,8
• Écart-type	20,3	38,2	46,0	63,5	60,4	55,2	77,4	54,3	88,6	85,2	31,7	22,5	225,5
ETP (mm)	166,5	157,5	173,5	157,0	149,6	121,0	109,4	101,3	107,0	131,4	139,0	151,8	1665,0
P — ETP (mm)	-151,9	-113,2	-82,6	-16,2	-4,3	17,1	-8,3	3,6	105,3	10,0	-102,5	-134,2	-477,2

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 613,2 mm.

STATION : Bouna (Côte d'Ivoire). — 2°55' Long. Ouest — 9°15' Lat. Nord.
 NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 46 (1920-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	4,9	19,5	55,1	100,5	131,7	150,8	126,1	139,5	246,7	104,7	36,4	7,6	1123,5
• Écart-type	11,1	29,8	34,1	51,3	64,4	66,8	66,8	79,1	89,6	61,5	34,4	16,0	290,2
ETP (mm)	170,6	161,3	188,0	172,0	168,2	137,0	129,0	116,7	117,0	145,8	147,0	152,1	1804,7
P — ETP (mm)	-165,7	-141,8	-132,9	-71,5	-36,5	13,8	-2,9	22,8	129,7	-41,1	-110,6	-144,5	-681,2

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 847,5 mm.

STATION : Man (Côte d'Ivoire). — 7°35' Long. Ouest — 7°25' Lat. Nord.
 NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 43 (1923-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	15,6	61,0	117,6	157,2	158,5	213,5	220,5	258,3	333,4	191,2	63,5	22,6	1812,9
• Écart-type	19,8	48,6	57,8	60,0	53,0	74,3	114,0	117,9	121,5	162,7	73,0	24,2	435,6
ETP (mm)	130,3	123,6	141,5	127,0	121,7	95,0	86,7	83,8	93,0	109,6	105,0	108,7	1215,4
P — ETP (mm)	-4,2	-62,6	-23,9	30,2	36,8	118,5	133,8	174,5	240,4	81,6	-41,5	-86,1	579,5

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 218,3 mm.

STATION : Bobo-Dioulasso (Haute-Volta). – 4°15' Long. Ouest – 11°10' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 50 (1909-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,8	3,4	20,5	48,6	111,0	134,5	223,1	314,4	206,5	75,4	12,7	2,1	1153,0
• Écart-type	3,6	7,0	35,3	33,3	49,7	41,4	93,2	98,1	71,3	44,5	19,5	6,5	200,0
ETP (mm)	191,2	182,51	219,1	208,0	210,6	178,0	164,1	145,7	147,0	178,9	177,0	180,9	2183,0
P – ETP (mm)	-190,4	-179,1	-198,6	-159,4	-99,6	-43,5	59,0	168,7	59,5	-103,5	-164,3	-178,8	-1030,0

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1317,2 mm.

STATION : Ouagadougou (Haute-Volta). – 1°40' Long. Ouest – 12°10' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 53 (1922-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,2	1,2	3,9	22,3	71,2	105,5	174,5	250,9	131,3	29,2	3,2	0,4	793,8
• Écart-type	1,1	4,3	8,4	24,6	55,7	41,5	50,8	76,2	59,7	26,8	8,4	2,4	144,9
ETP (mm)	168,5	164,9	217,2	221,0	234,3	195,0	179,6	160,1	155,0	175,6	154,0	155,1	2180,3
P – ETP (mm)	-168,3	-163,7	-213,3	-198,7	-163,1	-89,5	-5,1	90,8	-23,7	-146,4	-150,8	-154,7	-1386,5

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1477,3 mm.

STATION : Ouahigouya (Haute-Volta). – 2°35' Long. Ouest – 13°25' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 41 (1902-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,2	0,1	2,3	12,1	40,0	101,6	176,3	235,6	124,0	25,1	1,5	0,5	719,3
• Écart-type	0,7	0,3	6,5	18,7	32,3	37,9	60,2	83,9	49,1	21,7	3,9	2,1	124,5
ETP (mm)	136,4	131,1	181,1	190,0	215,9	190,0	178,6	162,1	147,0	157,9	127,0	126,2	1943,3
P – ETP (mm)	-136,2	-131,0	-178,8	-177,9	-175,9	-88,4	-2,3	73,5	-23,0	-132,8	-125,5	-125,7	-1224,0

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1297,5 mm.

STATION : Bamako (Mali). – 8°0' Long. Ouest – 12°35' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 39 (1926-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,6	0,2	2,8	16,5	64,9	145,4	241,2	329,7	217,1	55,6	10,1	0,8	1084,9
• Écart-type	2,2	0,6	6,2	21,8	39,1	43,8	67,9	91,3	71,7	49,1	19,1	4,0	174,3
ETP (mm)	161,3	160,1	206,7	196,0	206,5	174,0	156,9	145,6	138,0	153,0	147,0	149,9	1995,0
P – ETP (mm)	-160,7	-159,9	-203,9	-179,5	-141,6	-28,6	84,3	184,1	79,1	-97,4	-136,9	-149,1	-910,1

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1257,6 mm.

STATION : Gao (Mali). – 0°5' Long. Ouest – 16°15' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 41 (1921-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,7	0,1	0,6	1,3	6,8	26,1	75,4	117,4	37,7	5,9	0,2	0,2	272,4
• Écart-type	2,7	0,6	2,0	4,2	13,3	20,5	35,3	51,4	26,3	8,1	1,1	0,8	81,2
ETP (mm)	178,9	177,5	230,7	240,0	277,0	263,0	259,0	220,9	206,0	214,7	176,0	162,3	2606,0
P – ETP (mm)	-178,2	-177,4	-230,1	-238,7	-270,2	-236,9	-183,6	-103,5	-168,3	-208,8	-175,8	-162,1	-2333,6

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 2333,6 mm.

STATION : Mopti (Mali). – 4°10' Long. Ouest – 14°25' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 38 (1922-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,4	0,0	0,6	5,6	20,4	64,9	143,5	199,4	96,5	19,7	0,5	0,7	522,2
• Écart-type	1,6	0,0	2,0	8,9	24,5	34,3	56,4	77,3	45,0	18,7	1,1	3,3	131,4
ETP (mm)	158,2	163,0	215,2	218,0	228,3	208,0	186,8	164,2	154,0	163,4	156,0	150,9	2166,0
P – ETP (mm)	-157,8	-163,0	-214,6	-212,4	-207,9	-143,1	-43,3	35,2	-57,5	-143,7	-155,5	-150,2	-1613,8

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1649,0 mm.

STATION : Sikasso (Mali). – 5°40' Long. Ouest – 10°50' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 45 (1909-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,5	7,8	13,7	47,7	108,8	169,1	273,3	335,0	254,6	97,6	15,4	2,4	1325,9
• Écart-type	2,1	24,3	16,8	35,4	62,9	47,1	82,8	87,8	92,8	54,3	16,7	8,3	232,7
ETP (mm)	136,5	134,2	164,4	162,0	168,3	148,0	139,4	128,1	129,0	156,9	133,0	126,1	1725,9
P – ETP (mm)	-136,0	-126,4	-150,7	-114,3	-59,5	21,1	133,9	206,9	125,6	-59,3	-117,6	-123,7	-400,0

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 887,5 mm.

STATION : Maradi (Niger). – 7°5' Long. Est – 13°30' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 34 (1932-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,0	0,0	0,1	3,3	31,1	64,5	164,4	253,1	103,6	12,5	0,0	0,0	632,6
• Écart-type	0,1	0,1	0,5	8,2	30,5	37,6	54,6	90,8	54,1	19,3	0,2	0,0	122,7
ETP (mm)	160,3	164,1	201,6	203,0	225,2	203,0	180,6	163,2	158,0	171,4	149,0	148,9	2128,3
P – ETP (mm)	-160,3	-164,1	-201,5	-199,7	-194,1	-138,5	-16,2	89,9	-54,4	-158,9	-149,0	-148,9	-1495,7

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1585,6 mm.

STATION : Niamey (Niger). – 2°30' Long. Est – 13°30' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 53 (1905-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,4	0,1	2,6	7,3	37,0	79,3	147,4	211,3	91,4	15,8	0,8	0,0	593,4
• Écart-type	2,5	0,5	8,5	13,1	35,3	36,3	54,9	79,4	44,9	23,0	3,3	0,0	133,7
ETP (mm)	179,9	182,4	226,5	231,0	266,3	214,0	172,6	156,0	158,0	190,1	175,0	169,5	2321,3
P – ETP (mm)	-179,5	-182,3	-223,9	-223,7	-229,3	-134,7	-25,2	55,3	-66,6	174,3	-174,2	-169,5	-1727,9

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1783,2 mm.

STATION : Tillabery (Niger). – 1°40' Long. Est – 14°10' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 42 (1923-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,0	0,8	2,3	3,5	22,1	57,9	130,9	200,3	78,0	11,6	0,4	0,1	507,9
• Écart-type	0,2	4,8	7,5	10,8	23,3	33,5	51,5	76,6	43,7	13,9	1,7	0,7	101,6
ETP (mm)	183,0	182,4	127,5	124,0	242,7	216,0	199,2	178,7	177,0	201,4	178,0	175,7	2185,6
P – ETP (mm)	-183,0	-181,6	-125,2	-120,5	-220,6	-158,1	-68,3	21,6	-99,0	-189,8	-177,6	-175,6	-1677,7

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1699,3 mm.

STATION : Dakar (Sénégal). – 17°25' Long. Ouest – 14°40' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 47 (1898-1944).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,5	1,3	0,2	0,2	0,9	17,9	79,8	248,2	142,1	43,6	3,0	6,2	543,9
• Écart-type	1,6	3,3	0,9	1,0	3,7	20,9	58,4	112,9	55,8	47,8	9,1	22,1	171,9
ETP (mm)	159,0	146,7	183,1	188,0	197,3	187,0	193,1	175,6	166,0	175,7	169,0	176,6	2117,1
P – ETP (mm)	-158,5	-145,4	-182,9	-187,8	-196,4	-169,1	-113,3	72,6	-23,9	-132,1	-166,0	-170,4	-1573,2

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1645,8 mm.

STATION : Matam (Sénégal). – 13°15' Long. Ouest – 15°40' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 39 (1922-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,4	0,6	0,2	1,0	2,7	50,1	129,1	198,5	117,6	25,6	2,0	1,7	529,5
• Écart-type	2,0	3,2	1,1	5,8	9,0	41,4	53,9	82,7	61,8	27,9	6,8	7,3	149,7
ETP (mm)	132,5	144,7	181,0	191,0	238,7	217,0	203,3	175,5	158,0	165,1	133,0	120,9	2060,7
P – ETP (mm)	-132,1	-144,1	-180,8	-190,0	-236,0	-166,9	-74,2	23,0	-40,4	-139,5	-131,0	-119,2	-1531,2

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1554,2 mm.

STATION : Ziguinchor (Sénégal). – 16°10' Long. Ouest – 12°15' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 43 (1921-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
HYDROMÉTÉRIE P													
Moyenne (mm)	0,9	0,6	0,0	0,0	8,2	129,0	360,8	538,0	352,0	146,4	7,4	0,6	1543,9
Écart-type	5,5	2,5	0,0	0,2	11,3	63,3	104,9	117,9	104,6	74,1	10,7	3,2	271,8
P (mm)	144,7	143,7	194,6	205,0	211,5	164,0	141,4	128,1	127,0	141,6	140,0	141,6	1883,2
- ETP (mm)	-143,8	-143,1	-194,6	-205,0	-203,3	-35,0	219,4	409,9	225,0	4,8	-132,6	-141,0	-339,3

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1198,4 mm.

STATION : Aïn Timain (Tchad). – 20°10' Long. Est – 11°5' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 18 (1946-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
HYDROMÉTÉRIE P													
Moyenne (mm)	0,0	2,3	6,3	16,3	66,4	126,6	190,8	302,0	146,5	38,2	0,0	0,0	895,4
Écart-type	0,0	9,6	14,6	19,6	42,6	48,1	54,9	79,1	58,3	26,8	0,0	0,0	138,7
P (mm)	155,1	156,3	198,6	201,0	210,5	169,0	142,4	133,4	141,0	161,2	150,0	150,9	1969,4
- ETP (mm)	-155,1	-154,0	-192,3	-184,7	-144,1	-42,4	48,4	168,6	5,5	-123,0	-150,0	-150,9	-1074,0

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1296,5 mm.

STATION : N'Djamena (Tchad). – 15°5' Long. Est – 12°5' Lat. Nord.
NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 34 (1931-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
HYDROMÉTÉRIE P													
Moyenne (mm)	0,0	0,0	0,2	5,9	32,5	65,2	153,7	251,9	105,7	20,6	0,5	0,0	636,2
Écart-type	0,0	0,1	0,7	10,4	31,8	33,4	61,6	104,3	49,4	23,3	2,7	0,0	158,2
P (mm)	183,0	188,1	239,9	241,0	248,8	210,0	181,5	151,9	158,0	173,3	186,0	185,9	2347,4
- ETP (mm)	-183,0	-188,1	-239,7	-235,1	-216,3	-144,8	-27,8	100,0	-52,3	-152,7	-185,5	-185,9	-1711,2

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1811,2 mm.

STATION : Sarh (Tchad). — 18°25' Long. Est — 9°5' Lat. Nord.
 NOMBRE D'ANNÉES D'OBSERVATION : 29 (1932-1965).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
PLUVIOMÉTRIE P													
• Moyenne (mm)	0,0	1,1	9,0	44,7	102,1	143,0	228,4	289,3	237,3	79,1	2,1	0,0	1136,1
• Écart-type	0,0	3,1	15,2	35,1	59,2	45,9	78,8	54,0	110,0	51,4	4,1	0,1	161,0
ETP (mm)	162,3	158,2	200,6	194,0	185,7	149,0	132,2	127,1	129,0	153,0	147,0	151,0	1889,1
P - ETP (mm)	-162,3	-157,1	-191,6	-149,3	-83,6	-6,0	96,2	162,2	108,3	-73,9	-144,9	-151,0	-753,0

DÉFICIT HYDRIQUE TOTAL EN ANNÉE NORMALE : 1119,7 mm.

BIBLIOGRAPHIE

1. ARRIGHI DE CASANOVA (J.). – Note sur le rendement économique de l'eau d'irrigation, Colloque CENECA, 1976.
2. AYERS (R. S.), WESTCOT (D. W.). – La qualité de l'eau en agriculture, F.A.O. 1976.
3. AYERS (R. S.). – Quality of water for irrigation, *Journal of Irrigation and Drainage Division*, juin 1977.
4. BARAN (R.). – Étude pour l'irrigation de la canne à sucre en Côte d'Ivoire, *L'Agronomie Tropicale*, 1973, vol. XXVIII, n° 1, pp. 34-53.
5. BLANCHET (R.), BOSCH (M.), MAERTENS (C.), MARTY (J. R.). – Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. Alimentation minérale des plantes en culture irriguée ou non, et répercussion sur la fertilisation. *Ann. Agron.* 1974, 25 (6), pp. 821-836.
6. BOOHER (L.). – L'irrigation de surface, F.A.O. Rome, 1974.
7. BOUCHET (R. J.). – Rendements des cultures et déficit en eau. B.T.I. n° 201, 1965, pp. 539-551.
8. BOUCHET (R. J.), FORTIN (J. P.), SEGUIN (B.). – Modification des facteurs climatiques et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par l'irrigation. C. R. XIII Journées de l'hydraulique SHF Paris : Influence des activités de l'homme sur le cycle hydrométéo, III, 4 (1969).
9. BOUCHET (R. J.), ROBELIN (M.). – Évapotranspiration potentielle et réelle. Domaine d'utilisation, portée pratique. B.T.I. 238, pp. 215-225 (1969).
10. BOUCHY (C.). – Données climatiques et évaporation dans la région de Bonaké en Côte d'Ivoire.
11. BOYER (Y.), PARCEVAUX (S. DE). – Study of conditions leading to a stimulant effect of water stress on plant growth and development. Abstracts du Congrès « Heat and Mass Transfer in the environment of Vegetation », Dubrovnik, p. 11 (1974).
12. BROCHET (P.) et GERBIER (N.). – L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique. Évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie n° 65 de la Météorologie Nationale, mars 1974.
13. BROCHET (P.), GERBIER (N.), BEDEL (J.). – Contribution à l'étude agrométéorologique du maïs. Application à la prévision des phases phénologiques et du rendement. Monographie n° 95 de la Météorologie Nationale, juin 1975.
14. CHAROY (J.), GILLET (N.). – Rapports annuels de la SEHA de Tana, de 1963 à 1970. Doc IRAT, Niger, 1970.
15. CHAROY (J.). – Dynamique de l'eau dans les sols ferrugineux tropicaux d'origine dunaire de Tarna et application au mil, à l'arachide et au sol nu. *L'agronomie tropicale*, 1974, vol. XXIX, n° 8, pp. 821-830.

16. CHAROY (J.). – Dynamique de l'eau dans un type de sol du Goulbi de Maradi au Niger. Application à l'irrigation du blé et d'une culture de saison des pluies de coton avec complément d'irrigation. *L'agronomie tropicale*, 1974, vol. XXIX, n° 10, pp. 983-94.
17. CHAROY (J.). – Les cultures irriguées au Niger. Résultats de sept années de mesures et d'expérimentations (1963-1970). SEHA de Tarna (Goulbi de Maradi). *L'agronomie tropicale*, 1971, vol. XXVI, n° 9, pp. 979-1002.
18. CHARREAU (C.). – Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *L'agronomie tropicale*, 1963, vol. XVI, n° 5, pp. 504-561.
19. CHAROY (J.), FOREST (F.), LEGOUPIL (J. C.). – Évapotranspiration. Besoins en eau des cultures. Relations eau-sol. Estimation fréquentielle des conditions d'alimentation hydrique. Avril 1978.
20. CLAU (R.), LANGELLIER-BELLEVUE (P.). – Expérimentation sur la canne à sucre en Côte d'Ivoire. Point d'essai de Ferkessedougou. Rapport d'activités 1973-1974.
21. COUCHAT (P.). – Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols. *Ann. agron.*, 1977, 27 (5), pp. 477-488.
22. CRUIZIAT (P.). – Détermination des pertes en eau subies par les différents organes d'une plante soumise au dessèchement. *Ann. agron.*, 1974, 25 (4), pp. 539-554.
- 22 bis. COUCHAT (Ph.), MOUTONNET (P.). – L'incidence de l'absorption par les sols de neutrons thermiques sur la mesure neutronique de l'humidité volumique. L'énergie nucléaire et ses applications biologiques à Madagascar. Colloque de Mai 1971. ENSA – Université de Madagascar.
23. DANCETTE (C.). – Comment adapter les cultures à l'aridité du milieu et améliorer ce milieu? ISRA, novembre 1974.
24. DANCETTE (C.). – Principales études de l'IRAT au Sénégal portant sur les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols et sur leur aptitude à l'irrigation. *L'Agronomie Tropicale*, 1973. Vol. XXVIII, n° 9, pp. 887-893.
25. DANCETTE (C.). – Travaux réalisés par l'IRAT, et principales orientations dans le domaine des relations eau-sol-plante. *L'Agronomie Tropicale*, 1973. Vol. XXVIII, n° 9, pp. 881-886.
26. DANCETTE (C.). – Les besoins hydriques des cultures et l'économie agricole de l'eau dans les zones Centre et Nord du Sénégal, ISRA, Bambey, juillet 1976.
27. DANCETTE (C.). – Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal. *L'agronomie tropicale*, vol. XXV, n° 3, mars 1970.
28. DANCETTE (C.). – Pour une meilleure rentabilisation agricole des ressources pluviales dans les sols sableux d'Afrique tropicale sèche, IRAT, Bambey, septembre 1974.
29. DASTANE (N. G.). – Précipitations efficaces en agriculture irriguée. *Bull. F.A.O. d'irrigation et de drainage*, n° 25, 1977.
30. DAUDET (F. A.), VALANCOGNE (Ch.). – Mesure de flux profonds de drainage ou de remontées capillaires. Leur importance dans le bilan hydrique. *Ann. agron.* 1976, 27 (2), pp. 165-182.
31. DAUDET (F. A.), VACHAUD (G.). – La mesure neutronique du stock d'eau du sol et de ses variations. Application à la détermination du bilan hydrique. *Ann. agron.*, 1977, 27 (5), pp. 503-520.

32. DOORENBOS (J.), PRUITT (W. O.). – Les besoins en eau des cultures. F.A.O., 1975.
- 32bis. DUCLOS (G.). – Le sol et l'eau. Revue Eau et Aménagement de la région provençale. N° spécial de mars 1977.
- 32ter. DUTHIL. – Éléments d'écologie et d'agronomie, tomes I, II, III. Édition J. B. Baillière et fils.
33. DUTHION (C.), MINGEAU (M.). – Les réactions des plantes aux excès d'eau et leurs conséquences. *Ann. Agron.*, 1976, 27 (2), pp. 221-246.
34. FAUCONNIER (R.), BASSEREAU (D.). – La canne à sucre. Paris-Maisonneuve et Larose, 1970.
- 34bis. FRANQUIN-FOREST. – Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. Ext. *Agronomie tropicale*, XXXII-1.
35. FOREST (F.). – Bilan hydrique efficace et prospective décadaire des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. Cahier opérationnel, Kaedi, République Islamique de Mauritanie. Ministère de la Coopération, Paris, 1974.
36. G.E.R.S.A.R. – Exposé sur les problèmes posés par l'utilisation d'eaux légèrement salées pour l'irrigation, avril 1978.
37. GILLET (N.). – Les problèmes d'utilisation de l'eau. *L'agronomie tropicale*, vol. XXV, n° 10-11, oct.-nov. 1970.
38. GLEIZES (C.). – Évaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. Ministère de la Coopération. Techniques rurales en Afrique, octobre 1964.
39. GOSSE (G.). – Évapotranspiration et caractéristiques d'échange d'un gazon en climat équatorial humide. *Ann. agron.* 1976, 27 (2), pp. 141-164.
40. GRANIER (J.), DALY (P.), PARFAIT (F.). – Rendements de quelques cultures maraichères en fonction des apports d'eau et du mode d'irrigation dans le sud de la Martinique.
41. GUENNELON (R.), CABIBEL (B.). – Applications diverses de la méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols. *Ann. agron.* 1977, 27 (5), pp. 489-502.
42. GUYON (G.). – La méthode de Penman pour le calcul de l'évapotranspiration. *Bulletin CREGR*, n° 40, 1 (1958).
43. HILLEL (D.). – L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Vanver, Leuven-Paris-Bruxelles, 1974.
44. HLAVEK (R.), BAKALOWICZ (M.), OBERLIN (G.), GALEA (G.), ANDRE (R.), NORMAND (M.), OBERLIN (S.). – Essai d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant : considérations théoriques et applications pratiques, 12/1974. *Bulletin des Sciences Hydrologiques*, XIX-4.
45. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). – L'eau et la production végétale. (Publication collective : Ch. BALDY, R. J. BOUCHET, J. DAMAGNEZ, A. FEDOROFF, M. GIRARD, M. GODARD, G. GUYOT, M. HALLAIRE, E. LOCOSTE, S. DE PARCEVAUX, A. VERNET...), 1964.
46. INRA (Institut National de la Recherche Agronomique). – Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère. Publication collective : M. CHARTIER, F. A. DAUDET, R. DURAND, G. GOSSE, G. GUYOT, G. LAMBOLEY, S. DE PARCEVAUX, A. PERRIER, C. SAMIE, O. DE VILLÉLÉ, P. VITONZ.), 1970.
47. ISBERIE (C.). – Problèmes de la mise en pratique des connaissances relatives à l'évapotranspiration. Rapport C.I.I.D., 1977.

48. ITHIER (B.), FERRIER (A.). – Présentation d'une étude analytique de l'advection.
I. Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température. *Ann. agron.* 27 (2), 1976, pp. 111-140.
II. Application à la mesure et à l'estimation de l'évapotranspiration. *Ann. agron.* 27 (4), 1976, pp. 417-433.
49. JOURMARD (Ph.). – Méthode des gestions fictives. Application à la conception de réserves d'eau dans les pays du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest. Mémoire de 3^e année E.N.I.T.R.T.S., SCET.
50. KAISER (R.). – Contribution à l'étude des besoins en eau du cotonnier à l'Office du Niger (Mali). *Coton et Fibres tropicales*, pp. 437-445 (décembre 1968).
- 50 bis. KELLER et KARMELI. – Manuel de calcul d'un réseau d'irrigation goutte à goutte.
- 50 ter. LEGOUPIL-CHAROY-FOREST. – Évaluation fréquentielle des besoins d'irrigation pour l'optimisation d'un projet d'aménagement hydroagricole. (Périmètre de Sona, Niger). IRAT-GERDAT-INRAN, 1978).
51. LOYNET (G.). – Détermination de l'évapotranspiration potentielle et du besoin en eau d'irrigation d'une graminée fourragère (*chloris Gayana*), dans les conditions climatiques du Bras de la Plaine. Doc. IRAT, Réunion 1974.
52. LOYNET (G.). – Les besoins en eau des cultures du périmètre irrigué du Bras de la Plaine. Doc. IRAT, Réunion 1974.
53. MALET (Ph.). – Sensibilité des cultures aux variations du niveau d'alimentation hydrique selon leur stade de développement.
54. LANGE (O. L.), DAPPEN (L.), SCHULZE (E. O.). – Water and Plant Life. Problems and modern Approaches. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg New-York, 1976.
55. LECARPENTIER (C.). – L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques, mai-juin 1975. *Ann. de Géographie*, n° 463 (84^e année), juillet-août 1975. *Ann. de Géographie*, n° 464 (84^e année).
56. LEGOUPIL (J. C.). – Évolution de la salure du sol sous irrigation. Résultats expérimentaux. INRAA, Khémis Miliana (1974).
57. MALET (Ph.). – Sensibilité des cultures aux variations du niveau d'alimentation hydrique selon leur stade de développement.
58. MANICHON (M.). – Méthodes de mesures des caractéristiques du sol liées à la supplémentation en eau. Cycle supérieur d'agronomie, INA Paris, 17-21 février 1969.
59. MANICHON (M.). – Problèmes posés par le choix de l'intensité et de la dose d'irrigation. Cycle supérieur d'agronomie, INA Paris, 17-21 février 1969.
60. MARTY (J. R.), PUECH (J.). – Efficience de l'eau en production fourragère. C. R. des séances de l'Académie d'Agriculture, n° 11, 2-9 juillet (1971), pp. 938-949.
61. MARTY (J. R.). – Quelques aspects agronomiques de l'irrigation. Ministère de l'Agriculture. E.N.S.S.A.A. Département des productions végétales, 1972.
62. MESSIAEN (C. M.). – Influence du mode d'irrigation sur les maladies des cultures maraîchères en climat méditerranéen. *L'irrigant*, n° 48, décembre 1969, pp. 15-17.

63. MESSIAEN (C. H.), BEYRIES (A.) et LEROUX (J. P.). – Influence du mode d'irrigation sur les maladies des plantes maraîchères dans le Sud-Est de la France. C. R. 11^e Congrès de l'Union Phytopathologique méditerranéenne. Avignon, Antibes, septembre 1969, pp. 41-46.
- 63 bis. Météorologie Nationale. – Recueil de fiches instrumentales, juillet 1974. Secrétariat d'État aux transports, SGAC – 78190 Trappes.
64. MEYER (J. P.) et SCHOCH (P. G.). – Besoins en eau du bananier aux Antilles. Mesure de l'évapotranspiration maximale. *Fruits*, vol. 31, n° 1, pp. 3-19 (1976).
65. MEYER (J. P.). – Premières indications sur l'irrigation localisée en culture bananière en Martinique. *Fruits*, vol. 31, n° 6, pp. 349-352 (1976).
66. MEYER (J. P.). – Note préliminaire sur le comportement des racines de bananier en condition d'irrigation localisée.
67. MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION. – Étude préliminaire sur le bilan des ressources en eau des pays sahéliens et sur leurs possibilités d'utilisation. Ministère de la Coopération. SCET International, mars 1976.
68. MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION. – Mémento de l'Agronome, 1974
69. MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION. – Manuel de l'adjoint technique du Génie Rural. SOGREAH, 1974.
70. MONIOD (F.) et al. – Irrigation du Sud-Est de la Martinique. Simulation de la gestion des retenues de stockage, ORSTOM.
71. NORMAND (M.). – La mesure de l'humidité des sols. Application aux problèmes d'hydraulique agricole, 1970. *Bulletin Technique du Génie Rural*, n° 103.
72. PENMAN (H. L.). – Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Royal Society, Londres, Proc. Ser. 1, 193, p. 120-140.
73. PERRIER (A.), ARCHER (P.), BLANCO DE PABLOS. – Étude de l'évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures. *Annales agron.*, 25 (5), pp. 697-731, 1974.
74. PEYREMORTE (P.). – Besoin en eau des cultures. Études réalisées en Provence par l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages. *L'irrigant*, n° 56-57, mars et juillet 1972.
75. PEYREMORTE (P.), PLANCKAERT (Ph.), CHAMBON (J.). – Détermination des besoins en eau d'une culture de luzerne destinée à la production de graines, juin 1971, *Fourrages*, n° 46.
76. PEYREMORTE (P.). – Relation entre la plante, le sol, le climat et les besoins en eau des cultures. *Eau et Aménagement de la Région Provençale*, mars 1977.
77. PEYREMORTE (P.), CHAMBON (J.) et al. – Évaluation des besoins en eau des cultures de céréales et de fourrages. Estimation et mesure de l'évapotranspiration. I.T.C.F., Paris, décembre 1971.
78. PEYREMORTE (P.), CHAMBON (J.). – Relations entre le déficit d'alimentation et les pertes de rendement du maïs. Peut-on simplifier la technique d'irrigation du maïs ? Irrigation du maïs, Table ronde des 22-23 janvier 1976, Val Thorens, pp. 39-48.
79. PILLSBURY (A. F.). – La pratique de l'irrigation par aspersion. F.A.O., 1968.
80. POURRUT (P.). – Relation directe entre l'évapotranspiration réelle et la hauteur des précipitations. Calcul établi pour de courtes périodes en saison pluvieuse. ORSTOM, Centre de Tananarive; section hydrologie, mars 1971.

81. PUECH (J.), HERNANDEZ (M.). – Évapotranspiration comparée de différentes cultures et étude de quelques facteurs influençant les rythmes de consommation. *Ann. Agron.* 1973, 24 (4), pp. 437-455.
82. PUECH (J.) et COMBRET (M.). – Contraintes du milieu et besoins en eau des cultures. Application à des avertissements « irrigation ». B.T.I., n° 238, mars-avril 1969, pp. 231-237.
83. PUECH (J.), MAERTENS (C.), FIORAMONTI (S.), MARTY (J. R.), COURAU (M.). – Comparaison des consommations d'eau et des productions de matière sèche de quelques cultures irriguées, 1968, *Ann. agron.*, vol. 19, numéro 3.
84. PY (C.). – L'irrigation sur ananas. IRFA-GERDAT, 1978.
85. RICHARD (L.). – Besoins en eau du cotonnier. Conduite des irrigations. IRCT, 1978.
86. RIOU (Ch.). – Le bac d'eau libre et l'évaluation des consommations d'eau des couverts végétaux. *L'agronomie tropicale*, 1973, vol. XXVIII, n° 9, pp. 855-857.
87. RIOU (Ch.). – La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Mémoire ORSTOM, n° 80, 1975.
88. RIOU (Ch.). – Étude de l'évaporation en Afrique Centrale. *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, vol. IX, n° 2, 1972.
89. RIOU (Ch.). – Évaporation en bac et évapotranspiration potentielle. Expression de l'évaporation d'une petite nappe d'eau en fonction des données sous abri. *Cahiers ORSTOM*, Série hydrologie, vol. VII, n° 7, 1970.
90. RIOU (Ch.) et DUBOIS (G. J.). – L'utilisation des bacs d'évaporation sous climat sahélien. *Cahiers ORSTOM*, série hydrologie, n° 5, décembre 1966.
91. ROBELIN (M.). – Relation entre l'eau et la plante. Application aux arbres fruitiers, 100^e Congrès de la Société pomologique de France. Valence sur Rhône, 2-4 avril 1970.
92. ROBELIN (M.). – Eau et nutrition minérale. B.T.I., n° 231, pp. 541-547.
93. ROBELIN (M.). – Alimentation en eau des plantes fourragères. *Fourrages*, n° 38, juin 1969.
94. ROBELIN (M.). – Contribution à l'étude du maïs grain vis-à-vis de la sécheresse. Journées internationales des irrigations à Pau. AGPM 1963, pp. 69-76.
95. SEBILLOTTE (M.). – Bilans hydriques réels et prévisionnels. Intérêt des études fréquentielles. Cycle supérieur d'agronomie. INA Paris, 17-21 février 1969.
96. SEBILLOTTE. – Irrigation et densité de peuplement. Cycle supérieur d'agronomie. INA Paris, 17-21 février 1969.
97. SARRAF (S.) et BOVÉE (A. C. J.). – Évapotranspiration du bananier. Institut de Recherche Agronomique Tal-Amara. Liban. Magon, Série Techn. 20.
98. SEMENT (G.). – Économie de l'eau du cotonnier et irrigations à l'Office du Niger (Mali). *Coton et fibres tropicales*, déc. 1965, pp. 481-516.
99. ROYER (J. M.) et VACHAUD (G.). – Détermination directe de l'évapotranspiration et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des succions, sept. 1974. *Bulletin des Sciences hydrologiques*, n° 3, vol. 19.
100. TURC (L.). – Incidence des facteurs macroclimatiques sur les productions végétales, 1967, *Fourrages*, 31, pp. 10-35.
101. TURC (L.). – Le bilan d'eau des sols. Relation entre les précipitations, l'éva-

- poration et l'écoulement. Paris, INRA 1955. Thèse de Sciences Physiques, Paris 1953.
102. TURC (L.). – Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle (Formule climatique simplifiée et mise à jour). *Annales agronomiques*, 1961, vol. 12, n° 1.
103. VACHAUD (G.), DANCETTE (C.), SONKO (S.), THONY (J. L.). – Méthode de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, 1978, 29 (1), pp. 1 à 36.
104. VALANCOGNE (Ch.) et DAUDET (F. A.). – Étude *in situ* du potentiel hydrique sous une culture de maïs à l'aide d'un système automatique de mesure à micropsychromètre à effet Peltier, *Ann. Agron.*, 1977, 28 (2), pp. 137-158.
105. VALANCOGNE (Ch.) et DAUDET (F. A.). – Adaptation de la technique micropsychrométrique.
106. VALET (S.). – Détermination *in situ* des propriétés physiques, hydriques et hydrodynamiques des principaux sols des terrasses de Tillabery (note de synthèse). Doc. IRAT, Niger 1974.

GLOSSAIRE

ADHÉRENCE d'un sol : Propriété d'un sol d'adhérer aux outils. Un sol adhérent demande plus d'énergie pour être travaillé mécaniquement.

L'adhérence d'un sol riche en argile est d'autant plus forte qu'il est plus humide.

ADHÉSION SUPERFICIELLE de l'eau du sol : Phénomène d'attraction de l'eau sur les particules colloïdales du sol et au voisinage des surfaces solides.

ADVECTION : Transfert horizontal d'énergie sous forme de chaleur sensible, par mouvement des masses d'air. Par exemple, déplacement d'un air sec d'une zone non irriguée vers une zone irriguée. (Le phénomène a alors pour conséquence une augmentation de l'ETP dans la zone irriguée).

ALBEDO d'une surface (a) : Rapport du rayonnement réfléchi par une surface au rayonnement total reçu par cette même surface.

BESOINS EN EAU d'une culture : Quantité d'eau totale utilisée par cette culture depuis sa mise en place jusqu'à la récolte. Cette quantité comprend aussi bien les apports naturels (réserve du sol, pluies, éventuellement remontées capillaires à partir de la nappe phréatique) que les apports d'eau d'irrigation effectués par l'homme.

BESOINS BRUTS en eau d'irrigation d'une culture : Quantité d'eau qu'il est nécessaire de prélever dans la ressource afin de satisfaire les besoins en eau de cette culture, définis pour un certain niveau de production. Cette quantité comprend donc les diverses pertes subies pendant le transport et la distribution et éventuellement pendant le stockage, ainsi que les besoins de lessivage s'il y a lieu.

BESOINS NETS en eau d'irrigation d'une culture : Quantité d'eau qu'il est nécessaire de fournir à une culture afin de satisfaire ses besoins en eau, définis pour un certain niveau de production. Cette quantité ne comprend ni les apports naturels, ni les diverses pertes subies pendant le stockage, le transport et la distribution jusqu'aux plantes.

BILAN D'ÉNERGIE : Bilan, effectué au niveau d'une surface, des apports et pertes d'énergie, essentiellement sous forme de rayonnement et de chaleur sensible (par conduction ou par transfert de masses d'air), ou latente (par évaporation ou condensation).

Le bilan d'énergie exprime que la somme des apports est égale à la somme des pertes, soit algébriquement $\Sigma Q = 0$.

BILAN HYDRIQUE à la parcelle : Bilan, effectué par rapport au sol, des apports d'eau (pluie, irrigation, ruissellement, remontées capillaires à partir de la nappe), et des pertes d'eau (évapotranspiration, ruissellement, drainage).

Le bilan hydrique exprime que la différence entre les apports et les pertes d'eau dans le sol est égale à la variation de la réserve d'eau du sol :

$$\Sigma A - \Sigma P = \Delta R$$

BILAN CLIMATIQUE de l'eau : Différence, pour une période donnée, entre la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle (P - ETP).

Le bilan climatique peut également se faire pour une culture déterminée. C'est alors la différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration maximale de la culture (P - ETM).

BORDURE (Effet de bordure) : En irrigation, hétérogénéité se manifestant à la limite d'une parcelle irriguée, et due à un phénomène d'advection : la végétation de la zone de bordure subit un effet de sécheresse lié à un transfert horizontal d'énergie en provenance des parcelles voisines, moins irriguées.

CAPACITÉ DE RÉTENTION (HCR) : Quantité totale d'eau retenue par un sol après saturation, puis ressuyage (élimination de l'eau). Elle s'exprime en pourcentage, pondéral ou volumique.

La capacité au champ (HCC) est la capacité de rétention d'un sol en place.

CAPILLARITÉ : Ensemble des phénomènes d'attraction qui se manifestent au niveau des molécules liquides au contact d'autres corps. Les phénomènes de capillarité sont dus aux forces de tension superficielle.

La capillarité explique des phénomènes tels que la remontée de l'eau à partir d'une nappe, l'imbibition du sol, la diffusion de l'eau dans le sol et dans les végétaux.

CASE LYSIMÉTRIQUE (ou LYSIMÈTRE) : Dispositif permettant d'effectuer dans les conditions naturelles une mesure de drainage, et par conséquent, une analyse complète du bilan hydrique à la parcelle ; une case lysimétrique peut être utilisée pour étudier des problèmes de drainage ou pour mesurer indirectement l'évapotranspiration.

CHALEUR LATENTE de vaporisation : Énergie nécessaire au passage de l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur.

CHALEUR SENSIBLE : Énergie transmise d'un milieu à un autre par conduction ou convection.

CLIMAT ÉQUATORIAL : Climat chaud et humide caractérisé par la permanence de l'humidité tout au long de l'année.

En Afrique Centrale, il n'y a pratiquement pas de saison sèche. La température est peu variable autour de 25°C toute l'année et l'ETP,

de 1 000 mm environ par an. La pluviométrie varie entre 1 500 et 3 000 mm par an.

Ailleurs (Soudan, plateaux du Katanga), les saisons sont plus marquées : on a deux petites saisons sèches en janvier et en juillet.

CLIMAT TROPICAL : Climat chaud et humide, mais à saison sèche marquée, qui correspond à la saison fraîche. La saison des pluies est d'autant plus brève que l'on s'éloigne de l'équateur. La pluviométrie annuelle varie entre 1 500 et 800 mm, l'ETP annuelle entre 1 200 et 1 600 mm.

C'est le climat des pays situés au sud du Sahel (Sud du Sénégal, Côte d'Ivoire, etc.).

CLIMAT SAHÉLIEN : Climat des régions de la bordure méridionale du Sahara (Nord du Sénégal, Mali, Niger, Tchad, Haute-Volta...).

Précipitations faibles mais relativement régulières (au Nord 200 à 300 mm par an; au Sud 300 à 500 mm par an). Amplitude thermique forte.

L'ETP est supérieure à 2 000 mm par an.

CLIMAT DÉSERTIQUE : Climat caractérisé par la rareté des précipitations (la plus grande partie du Sahara reçoit entre 20 et 100 mm par an). Les amplitudes thermiques sont très fortes. L'ETP dépasse 2 500 mm par an.

COEFFICIENT CULTURAL : Rapport de l'évapotranspiration maximale d'une culture (ETM), à l'évapotranspiration potentielle de référence (ETP).

$$K = ETM/ETP$$

COEFFICIENT DE RATIONNEMENT : Rapport de l'évapotranspiration réelle d'une culture (ETR) à l'évapotranspiration maximale de cette culture (ETM).

$$K_r = ETR/ETM$$

COHÉSION d'un sol : Aptitude d'un sol à résister à l'action des instruments aratoires. Elle résulte des forces de liaison qui unissent les constituants du sol en agrégats et en mottes.

La cohésion d'un sol riche en argile est d'autant plus forte qu'il est plus sec.

CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE (de l'eau, ou du sol) : Mesure qui caractérise la teneur en sels de l'eau (eau d'irrigation, eau de drainage, ou eau extraite du sol) exprimée en mmhos/cm.

En agronomie, on appelle conductivité électrique d'un sol la conductibilité électrique de l'eau extraite du sol après saturation. Elle caractérise l'état de salinité de ce sol.

CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE du sol : Rapport de la vitesse d'écoulement de l'eau dans le sol, au gradient hydraèlique (différence de potentiel) qui provoque cet écoulement.

CONSTANTE SOLAIRE : Intensité du rayonnement solaire reçu par la terre, à l'extérieur de l'atmosphère, c'est-à-dire sans tenir compte des phénomènes de diffraction, réflexion, ou absorption par l'atmosphère.

La constante solaire est voisine de 2 cal/cm²/mn.

DÉBIT FICTIF CONTINU (DFC) : Débit qu'il serait nécessaire de fournir en continu à une surface déterminée pour satisfaire ses besoins en eau d'irrigation pendant une période donnée. Ce débit est souvent ramené à l'unité de surface et on le calcule en divisant le volume d'eau consommé à l'unité de surface d'un périmètre pendant une période donnée, par la durée de cette période.

Exemple : V m³ sont consommés sur un périmètre de S ha pendant une décade :

$$DFC = \frac{V}{S} \cdot \frac{1}{10 \times 24 \times 3600} \text{ en m}^3/\text{s/ha}$$

$$DFC = \frac{V}{864 \times S} \text{ en l/s/ha}$$

Le débit fictif continu en période de pointe détermine le dimensionnement des ouvrages de distribution.

DENSITÉ APPARENTE de la terre sèche : Rapport du poids d'un échantillon de sol après séchage à l'étuve, au volume de cet échantillon en place.

DRAINAGE : Évacuation des eaux superficielles et souterraines en excédent.

EAU DE GRAVITÉ du sol : Eau qui n'est pas retenue dans le sol par les forces capillaires ou les forces d'adhésion superficielle, et qui peut s'écouler librement sous l'action de la pesanteur.

EAU PELLICULAIRE : Eau retenue autour des particules élémentaires du sol par les forces d'adsorption superficielle.

EFFET D'OASIS : Transfert horizontal d'énergie important sous forme de chaleur sensible, dû à la juxtaposition d'une zone sèche et d'une zone irriguée, et ayant pour effet de provoquer de fortes valeurs d'ETP, d'autant plus fortes que le rapport entre surface irriguée et surface sèche reste faible.

EFFICIENCE de l'évapotranspiration : Quantité de produit agricole récolté (poids de matière sèche ou de production commercialisable, etc...) par unité de quantité d'eau évapotranspirée. Exprimée en kg de produit par kg d'eau évapotranspirée.

EFFICIENCE de l'irrigation :

– *L'efficacité agronomique* de l'irrigation est le rapport du supplément de production obtenu grâce à l'irrigation au volume d'eau d'irrigation fourni. Elle s'exprime pratiquement en kg par m³.

– *L'efficacité économique* de l'irrigation est le même rapport mais en termes monétaires (valeur du supplément de production/coût de l'eau utilisée). Elle s'exprime en F par F ou en pourcentage.

– *L'efficacité marginale* (agronomique ou économique) de l'eau

d'irrigation est, à un niveau d'irrigation donné, le supplément de production obtenu par unité supplémentaire d'eau utilisée. C'est donc la dérivée de la fonction $p = f(V)$ exprimant la production en fonction de la quantité d'eau apportée.

ÉVAPOTRANSPIRATION (ET) : Ensemble de 2 phénomènes, l'un physique (évaporation de l'eau à partir du sol), l'autre physiologique (transpiration de la plante).

Quantité d'eau concernée par ce phénomène (en mm de hauteur d'eau) pendant une période déterminée.

ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP) : Quantité d'eau évapotranspirée par un couvert végétal bas, continu et homogène, dont l'alimentation en eau n'est pas limitante, et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.

On désigne également par ce terme une estimation de cette quantité obtenue par le calcul à partir de paramètres climatiques.

ÉVAPOTRANSPIRATION MAXIMALE (ETM) : Quantité d'eau maximale évapotranspirée par une culture donnée, à un stade végétatif donné, et dans des conditions climatiques données.

ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE (ETR) : Quantité d'eau évapotranspirée par un couvert végétal dans des conditions données, où l'eau peut, éventuellement, être un facteur limitant.

ÉVAPOTRANSPIRATION OPTIMALE (ETR opt) : Niveau d'ETR correspondant à un optimum économique.

ÉVAPOTRANSPIROMÈTRE : Dispositif permettant d'effectuer dans les conditions naturelles une mesure des pertes d'eau d'un couvert végétal par évapotranspiration.

Le calcul du bilan hydrique dans un évapotranspiromètre se fait soit par mesure des apports et des pertes, soit par pesée de l'appareil.

HÉLIOGRAPHE (ou solarimètre) : Appareil destiné à mesurer la durée d'insolation journalière (nombre d'heures ensoleillées). On utilise le plus souvent une boule de verre qui provoque la convergence du rayonnement solaire sur une bande de papier sensible. Il permet une mesure indirecte du rayonnement global RG.

HUMIDITÉ CRITIQUE d'un sol (humidité de rupture du lien capillaire) (HC) : Humidité en-dessous de laquelle la plante commence à souffrir d'un déficit hydrique. (La réserve facilement utilisable RFU est comprise entre l'humidité à la capacité de rétention HCR et l'humidité critique HC).

HUMIDITÉ ÉQUIVALENTE d'un sol (HE) : Humidité d'un échantillon de sol préalablement porté à saturation, et soumis, au moyen d'une centrifugeuse, à une accélération de 1 000 fois l'accélération de la pesanteur pendant 30 mn.

L'humidité équivalente est généralement voisine de l'humidité à la capacité de rétention.

HUMIDITÉ HYGROSCOPIQUE : Humidité d'un sol séché à l'air.

HUMIDITÉ PONDÉRALE d'un sol : Rapport, exprimé en pourcentage, du poids de l'eau contenue dans un échantillon de sol au poids du même échantillon après dessiccation.

HUMIDITÉ À LA SATURATION d'un sol : Humidité d'un sol dont l'eau occupe toute la porosité.

HUMIDITÉ VOLUMIQUE d'un sol : Rapport, exprimé en pourcentage, du volume de l'eau contenue dans un échantillon de sol en place au volume de cet échantillon.

L'humidité volumique est égale au produit de l'humidité pondérale par la densité apparente.

LESSIVAGE : Élimination des sels solubles d'une tranche de sol par percolation d'eau.

PERCOLATION de l'eau en profondeur : Mouvement descendant de l'eau du sol sous la zone racinaire après une pluie ou une irrigation abondante.

PÉRIODE CRITIQUE par rapport à l'irrigation : Période du cycle végétatif d'une culture au cours de laquelle un rationnement en eau a des effets défavorables particulièrement marqués sur la production finale.

PERMÉABILITÉ d'un sol : Voir vitesse de filtration.

PICHE (Évaporomètre de Piche) : Dispositif de mesure de l'évaporation sous abri, constitué par un tube cylindrique en verre de 20 à 30 cm de long et 1 à 2 cm de diamètre, fermé hermétiquement à sa partie supérieure et obturé à sa partie inférieure par un disque de papier filtre de 30 mm de diamètre. La quantité d'eau évaporée par la feuille de papier filtre est calculée par lecture du niveau de l'eau dans le tube.

POINT DE FLÉTRISSEMENT PERMANENT d'un sol (HPF) : Humidité d'un sol en-dessous de laquelle la plante subit des dommages irréversibles par déficit d'alimentation hydrique.

Dans la pratique, on adopte comme valeur de l'humidité au point de flétrissement permanent, l'humidité du sol à pF 4,2, correspondant à une tension de 15 atmosphères.

POROSITÉ d'un sol : Rapport du volume des vides (occupés par l'air ou par l'eau), au volume total.

POTENTIEL HYDRIQUE : Énergie qu'il est nécessaire de fournir à l'unité de masse d'eau pour la faire passer, au cours d'une transformation réversible, de l'état d'eau pure à la pression atmosphérique, à l'état qu'elle a dans le système considéré.

Le potentiel hydrique s'exprime généralement par rapport à l'unité de volume d'eau et il a alors les dimensions d'une pression : en kg/cm², en bar, en atmosphères, en mètres de colonne d'eau ou en pF (logarithme décimal de la charge en centimètres de hauteur d'eau).

Dans le sol, on parle généralement de « tension de l'eau » exprimée en valeur absolue.

POUVOIR ÉVAPORANT DE L'AIR : Évaporation qui se produirait à partir d'une surface d'eau libre dont la température serait égale à la température de l'air.

Le pouvoir évaporant de l'air exprime la part advective de l'ETP.

PRESSION OSMOTIQUE de l'eau : Pression à laquelle doit être soumise une eau chargée en sels pour que son potentiel se trouve en équilibre avec une eau pure au même niveau et dans les mêmes conditions.

PYRANOMÈTRE : Appareil de mesure directe du rayonnement global RG.

PYRRADIOMÈTRE : Appareil de mesure du rayonnement (entre 0,2 et 100 μ). Le pyrradiomètre différentiel ou bilanmètre permet la mesure de l'albedo a .

RAYONNEMENT ATMOSPHÉRIQUE (RA) : Rayonnement émis par l'atmosphère vers le sol. Il est d'autant plus important que le ciel est couvert ou que l'air est humide. Il est constitué de radiations de grandes longueurs d'onde.

RAYONNEMENT GLOBAL (RG) : Rayonnement d'origine solaire, somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

Il est constitué en presque totalité d'émissions de courtes longueurs d'onde (entre 0,15 et 4 microns de longueur d'onde).

RAYONNEMENT NET (RN) : Bilan de l'ensemble des transferts d'énergie sous forme radiative, c'est-à-dire : rayonnement global + rayonnement atmosphérique – rayonnement réfléchi – rayonnement terrestre.

RAYONNEMENT TERRESTRE (RT) : Rayonnement émis par la surface de la terre. Il dépend de la température et de l'émissivité de la surface. Il est constitué en presque totalité d'émissions infra-rouge (entre 4 et 120 microns de longueur d'onde).

RENDEMENT HYDRAULIQUE de l'irrigation : Rapport de la quantité d'eau délivrée à l'aval, à la quantité d'eau fournie à l'amont, à un niveau donné du système d'irrigation.

On peut distinguer dans un périmètre, en remontant de l'aval vers l'amont :

- le *rendement à la parcelle* R_p (sur l'îlot d'exploitation);
- le *rendement des ouvrages de transport* R_t (réseau de distribution);
- le *rendement des ouvrages de stockage* R_s (réserve).

Le *rendement hydraulique global* est $R_g = R_p \times R_t \times R_s$.

RESSUYAGE d'un sol : Écoulement de l'eau du sol sous l'action des forces gravitaires. Un sol est ressuyé lorsque l'eau qu'il contient n'est plus retenue que par les forces capillaires.

RUGOSITÉ D'UN COUVERT VÉGÉTAL : État d'un couvert végétal dont les composants ont des hauteurs variables.

La rugosité modifie les effets du vent sur la végétation, et en particulier la part advective de l'ETP.

Elle est représentée par un paramètre z_0 qui est égal à la hauteur à laquelle la vitesse du vent serait nulle si le profil de vitesse conservait la même forme pour les hauteurs voisines de la surface que pour les hauteurs plus grandes.

STRUCTURE d'un sol : État physique du sol résultant de la façon dont sont associés les constituants élémentaires, qui peuvent être les particules primaires telles qu'on les sépare à l'analyse granulométrique, ou bien des éléments complexes ou agrégats, résultant de l'agglomération de particules primaires.

TENSION DE L'EAU du sol : Voir potentiel hydrique.

TEXTURE d'un sol : Caractérise la nature et la taille des particules solides élémentaires qui constituent le sol et notamment la partie fine de celui-ci.

S'exprime quantitativement par l'analyse granulométrique (argile, limon, sable, graviers, cailloux).

VALEUR NORMALE : Se dit de la valeur moyenne d'un élément météorologique (température, pluviométrie, etc...) établie sur une période au moins égale à 30 ans.

VITESSE D'INFILTRATION d'un sol : Hauteur d'eau maximale qui peut traverser le sol pendant l'unité de temps.

La vitesse d'infiltration par unité de pente (coefficient de Darcy) est la valeur de la vitesse de filtration dans le cas où le rapport de la charge à la longueur de l'écoulement est égal à 1.