

T H E S E S

présentées à

LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

pour l'obtention du titre

de Docteur de l'Université

de PARIS

(mention Sciences)

par Jean-Robert M A R T Y

sujet de la 1ère thèse :

Contribution à l'étude des Boulbènes

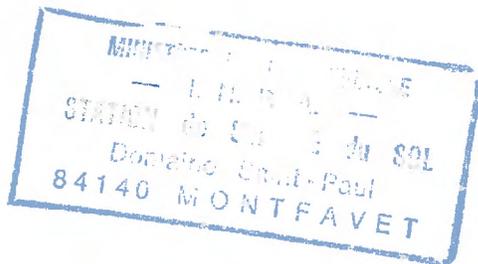
sujet de la 2ème thèse :

LES METHODES D'EVALUATION DU BILAN DE L'EAU EN AGRICULTURE

TH-
KB76

1966 ?

Th I/83
K81b



LES METHODES D'EVALUATION DU BILAN DE L'EAU EN AGRICULTURE

Jean-Robert M A R T Y

TABLE DES MATIERES

LES METHODES D'EVALUATION DU BILAN DE L'EAU EN AGRICULTURE

INTRODUCTION et GENERALITES 1

Le problème de l'augmentation de la consommation en eau
Définition du bilan hydrique

PREMIERE PARTIE

LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE DEPENDANT DU VEGETAL ET DU CLIMAT

I- L'EVAPOTRANSPIRATION 5

- 1)- La notion d'évapotranspiration
 - a)- le point de vue statique
 - b)- le point de vue dynamique
- 2)- Définition de l'E T P
- 3)- L'évapotranspiration réelle - Définition

II - DETERMINATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE..... 9

A/- Les formules d'évapotranspiration

- 1)- Formule basée sur les facteurs climatiques et géographiques - THORNTHWAITE (1948)
- 2)- Formule basée sur des facteurs climatiques et sur des coefficients cultureux - BLANEY et CRIDDLE (1952)
HARGREAVES
- 3)- Formule basée sur la méthode du bilan d'énergie
PENMAN (1950)
- 4)- Formule basée sur les relations existant entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement
TURC (1953)
- 5)- Formule plus globale basée sur l'emploi de l'évaporomètre Piche - BOUCHET (1960)

B/- Détermination expérimentale de l'E T P 13

- 1)- Evapotranspiromètres
- 2)- Détermination approximative de l'E T P par l'évaporomètre à pastille évaporante à l'air libre (Piche)

C/- Discussion..... 14

III - EVALUATION DU DEFICIT CLIMATIQUE..... 15

Exemple de la région Toulousaine

DEUXIEME PARTIE

LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE DEPENDANT DU SOL

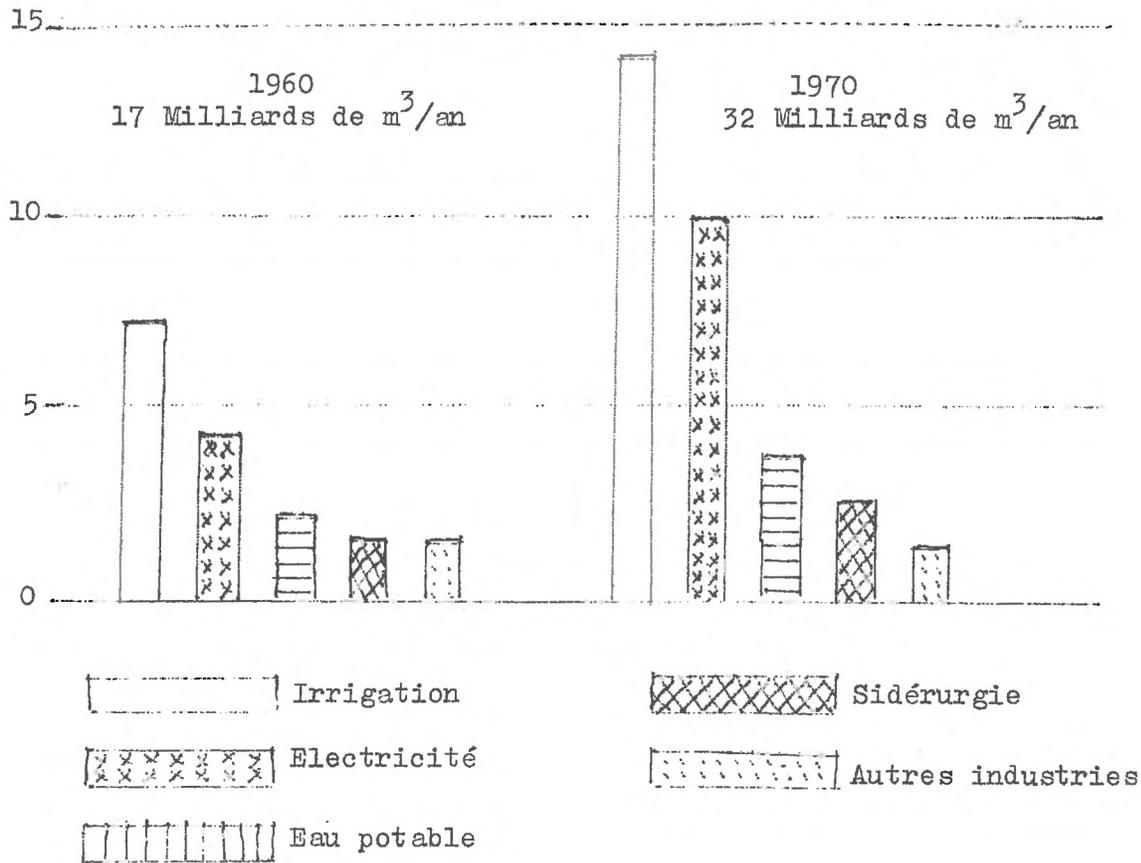
I- <u>DETERMINATION DES RESERVES HYDRIQUES DU SOL</u>	19
A/- <u>La Capacité au champ</u>	
Détermination de la Capacité au champ	
1)- Sur le terrain	
2)- Capacité de rétention déterminée au laboratoire	
a)- historique et signification : la notion de potentiel capillaire	
b)- le potentiel capillaire - Définition du pF	
c)- méthodes de mesure	
3)- Méthode FEODOROFF	
B/- <u>Les Réserves Utiles du Sol</u>	26
1)- Le pF 4,2	
2)- Calcul des Réserves Utiles	
3)- Résultats personnels et discussion	
C/- <u>La notion de réserves facilement utilisables (R F U)</u>	28
"Le potentiel efficace"	
II- <u>METHODES DE DETERMINATION DE L'HUMIDITE DU SOL</u>	29
A/- <u>Méthodes les plus perturbantes</u>	
1)- Méthode gravimétrique	
a)- méthode par dessiccation à l'étuve	
b)- méthode par dessiccation à l'alcool	
2)- Méthode picnométrique	
B/- <u>Méthodes peu perturbantes</u>	
1)- Méthodes électriques	
2)- Méthodes tensiométriques	
3)- Méthode nucléaire	
C/- <u>Comparaison des techniques précédemment décrites</u>	31
Exemple pratique sur quelques sols typiques	
Exemple de profil hydrique	
III - <u>DRAINAGE</u>	34
1/- Indice de drainage calculé de HENIN (1945)	
2/- Excédent climatique	
Exemples et comparaison à partir des sols et des données climatiques de la région Toulousaine	
<u>DISCUSSION</u>	
De la nécessité de préciser certains facteurs permettant le calcul du bilan hydrique.....	37
<u>CONCLUSIONS</u>	40
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	42

LES METHODES D'EVALUATION DU BILAN DE L'EAU EN AGRICULTURE

L'eau devient une denrée de plus en plus précieuse à mesure que les besoins augmentent dans tous les domaines. D'après l'évaluation des quantités d'eau prélevées en France par les différents secteurs de consommation, l'Agriculture venait au premier rang en 1960, il est prévu que la consommation aura presque doublé en 1970 et que près de la moitié du total sera absorbée essentiellement sous forme d'irrigation des cultures. (Graphique 1).

Un des objectifs de notre époque vise la maîtrise de l'eau et parmi les facteurs qui y contribuent dans le domaine agricole, il y a la connaissance des bilans hydriques. S'il est nécessaire d'établir ces bilans pour caractériser les possibilités culturales d'une région et estimer ses besoins globaux en eau en fonction du système de culture possible ou la plus rentable, il est indispensable de les réaliser à plus petite échelle pour une utilisation rationnelle de l'eau lorsque l'irrigation est envisagée. La nécessité d'expérimentation et de recherches en ce domaine se fait de plus en plus ressentir (DARLOT, 1961), cependant des progrès importants ont été réalisés ces dernières années, notamment grâce à une meilleure connaissance des termes du bilan de l'eau.

L'irrigation prend une extension rapide car elle tend à réduire au minimum le caractère aléatoire du niveau des rendements dû aux fluctuations du climat. En effet, pour obtenir une croissance optimum des végétaux, lorsque l'alimentation minérale est assurée, il faut que l'alimentation hydrique soit continue et sans contrainte. Pour satisfaire au mieux les besoins en eau d'une culture, s'imposent donc d'une part, la connaissance des besoins, d'autre part, les possibilités de fourniture, caractéristiques liées à la plante, au sol et au climat, que nous nous proposons de préciser dans ce travail.



GRAPHIQUE 1 : Diagramme des consommations en eau des différents secteurs en 1960 et prévisions établies pour 1970 (d'après GUIBERT, 1968).

En ce qui concerne la partie du cycle de l'eau qui nous intéresse, rappelons que les réserves en eau du sol sont alimentées par les pluies (ou l'irrigation) et que cette eau momentanément stockée est restituée à l'atmosphère par l'évaporation du sol et la transpiration des végétaux. Comme l'ensemble des problèmes posés par les relations sol-plante-climat est loin d'être résolu, et devant les nécessités d'une intervention efficace vis à vis de ces problèmes, l'agronome est amené à considérer des situations bien définies, correspondant à des cas limites susceptibles d'être caractérisés.

....//....

Ainsi, lorsque l'intensité de la pluie est inférieure à la vitesse de pénétration de l'eau dans le sol, on peut considérer que l'eau de pluie est presque totalement infiltrée; par contre, lorsque la pluie est intense et que l'apport dépasse la vitesse d'infiltration, aboutissant à un ruissellement vers les parties basses du terrain, cette eau est en partie perdue pour le sol. Considérons maintenant l'eau qui s'infiltré; elle réhumidifie l'ensemble du profil pour atteindre finalement une teneur caractéristique de la nature du sol, au delà de laquelle il est incapable de retenir davantage d'eau : ce taux d'humidité correspond à la capacité au champ. L'excès d'eau s'écoule vers les parties profondes, c'est le drainage.

La restitution de l'eau à l'atmosphère s'effectue à la fois par le sol, dont une partie de l'eau qu'il renferme peut s'évaporer, et par la plante, qui perd de l'eau essentiellement par ses fonctions de transpiration. Ces conditions, qui aboutissent à une perte d'eau du sol, dépendent des facteurs climatiques : quantités d'énergie reçue, température, vent, degré hygrométrique de l'air.

Toutefois, une fraction de l'eau du sol est trop énergiquement fixée par celui-ci pour être absorbée par la plante, cette limite correspond au point de flétrissement permanent.

En résumé, le bilan hydrique se calcule d'après l'expression suivante qui fait intervenir indirectement les points caractéristiques précédemment cités :

$$\text{Bilan hydrique} = \alpha P - D - \text{ETR}$$

ou α : coefficient d'infiltration variable suivant la nature du sol et sa topographie, le couvert végétal et l'intensité des pluies (varie de 0 à 1). Nous considérons dans cette étude que $\alpha = 1$, c'est le cas d'un terrain plat, couvert de végétation et soumis à des pluies d'intensité moyenne ou faible.

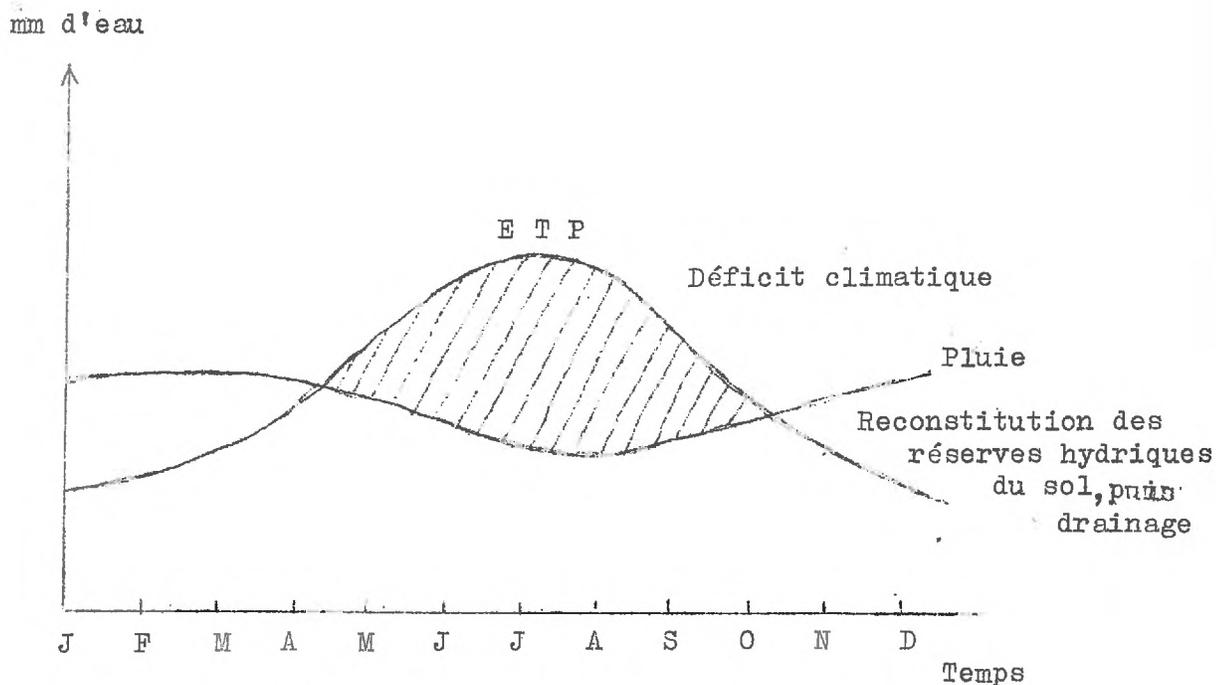
P : pluie en millimètres.

D : drainage éventuel, il correspond théoriquement aux excédents de pluie par rapport aux possibilités de consommation et de mise en réserve par le sol. / ...

E T R : évapotranspiration réelle de la culture, à relier à l'ETP (évapotranspiration potentielle) : $ETR \leq ETP$. L'ETR dépend de la quantité d'eau du sol susceptible d'être utilisée par les végétaux, c'est-à-dire des réserves utiles (R.U) correspondant à l'écart entre les taux d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent.

Pour une période déterminée, si ce bilan est positif le sol s'est réhumidifié; par contre, s'il devient négatif le sol se dessèche et si l'on désire une alimentation hydrique optimum de la culture, le déficit en eau devra être comblé.

Représentation schématique du bilan hydrique :



Dans une première partie, nous envisagerons ce qui concerne le végétal et le phénomène d'évapotranspiration lié aux conditions climatiques, c'est-à-dire les besoins en eau de la plante; ensuite, dans une deuxième partie, les possibilités de fournitures d'eau par le sol, et l'estimation du déficit.

PREMIERE PARTIE

LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE DEPENDANT DU VEGETAL ET DU CLIMAT -

I - L'EVAPOTRANSPIRATION

1)- La notion d'évapotranspiration

Afin de comprendre comment est apparue la notion d'évapotranspiration, nous nous référerons à une synthèse des travaux réalisés sur l'eau et ses rapports avec la plante, effectuée par HENIN en 1936. A cette époque, deux tendances subsistent sur des voies parallèles pour essayer d'analyser les différents mécanismes mis en jeu; l'une aborde le problème d'un point de vue statique, l'autre d'un point de vue dynamique.

a)- Le point de vue statique considère le sol comme un réservoir dans lequel la plante puise l'eau nécessaire à sa croissance. DEHERAIN (1892) puis BRIGGS et SHANTZ (1914) aboutissent à la notion de coefficient de transpiration qui représente la quantité d'eau nécessaire pour élaborer une unité de matière sèche. On se rend compte, cependant, que ce coefficient n'est pas constant pour une culture donnée et dépend notamment du degré d'utilisation de l'eau liée aux différents facteurs limitants (par exemple, il faut 300 m³ d'eau pour 1 quintal de blé sans fumure azotée, alors que 100 m³ d'eau suffisent si l'on apporte 80 unités d'azote). Ainsi, on ne pouvait espérer déduire avec quelques certitudes la consommation d'eau à partir des productions de matière végétale.

GESLIN (1937) trouve une relation entre la totalité des précipitations tombées au cours de la période végétative du blé et le rendement de cette culture, il constate l'influence des facteurs climatiques qui se préciseront avec GODARD (1937). Ce chercheur montre l'influence de la luminosité sur le rendement des betteraves sucrières et définit un "coefficient de croissance" correspondant au gain de matière sèche ramené à l'unité de surface en fonction de l'énergie reçue.

..../...

Cet aspect évolue encore avec REISS (1939) qui essaye de déterminer les quantités d'eau nécessaires aux champs cultivés en se basant sur les données météorologiques. Il constate que la perte en eau d'un champ (sol et végétation) est différente du taux d'évaporation d'une surface libre d'eau. Toutes les autres conditions étant les mêmes, elle dépend du taux d'humidité du sol : plus le sol est humide et plus intense sera l'évaporation. Il propose d'appliquer des quantités d'eau par intervalles réguliers d'après la formule :

$$H = \frac{i}{P}$$

quantité d'eau d'irrigation = facteur dépendant du sol évaporation d'après l'évaporomètre de PICHE

où apparait un facteur variable suivant la nature du sol, $i = 0,54$ pour un sol léger et $0,68$ pour un sol argileux.

b)- Le point de vue dynamique fait intervenir à la fois, l'action de la plante et ses possibilités d'absorption de l'eau, et l'action du sol et des contraintes qu'il oppose à sa libre circulation. Des études sur l'énergie avec laquelle la plante absorbe l'eau, sur le développement du système racinaire, sur la circulation de l'eau dans le sol, permettent d'aborder le mode d'utilisation des réserves hydriques du sol. On constate en même temps une évolution graduelle des connaissances, vers l'importance de la radiation solaire sur le phénomène de transpiration des végétaux et sur la production de matière sèche (MANZONI et PUPPO, 1934). En essayant de calculer le bilan d'énergie reçue par la surface d'un sol nu, on s'aperçoit qu'il est fonction, effectivement, de l'énergie solaire, de la radiation, d'un coefficient de réflexion de la surface du sol.

Par contre, lorsque la surface du sol est couverte par la végétation, celle-ci protège le sol contre le rayonnement, mais aussi absorbe et réfléchit de l'énergie, il faut alors intégrer un nouveau facteur dans ce bilan représentant le taux d'utilisation d'énergie stockée dans le système végétal - atmosphère.

..../...

Après des recherches sur le phénomène physique d'évaporation de l'eau à partir d'une nappe libre ou d'un sol nu et sur le phénomène physiologique de transpiration végétale, les chercheurs ont cessé de distinguer ces deux aspects et ont réalisé des progrès importants en considérant le phénomène global dit de l'évapotranspiration, lié étroitement au rayonnement solaire. C'est notamment PENMAN (BERNARD, 1956), de la Station expérimentale de ROTHAMSTED, qui considère que la méthode du bilan d'énergie offre la solution rationnelle des problèmes de l'évaporation naturelle et du bilan des cultures. La limite supérieure de l'évapotranspiration, dans le cas où l'énergie est l'unique facteur limitant, est appelée l'évapotranspiration potentielle (E T P).

2)- Définition de l'E T P

L'E T P correspond à la perte d'eau globale en phase gazeuse d'un couvert végétal abondant, largement alimenté en eau, et qui comprend les transpirations cuticulaires et stomatiques du végétal et l'évaporation du sol. Ce dernier phénomène est relativement peu important par rapport à la transpiration du végétal (HALLAIRE et HENIN, 1958). Les pertes d'eau dépendent surtout des conditions climatiques. Elles sont pratiquement indépendantes du sol si celui-ci reste à la capacité au champ, et des variétés végétales (TURC, 1961). L'E T P est donc la mesure de l'évapotranspiration maximale, sous un climat donné, d'une culture couvrant abondamment le sol en toute saison et largement alimentée en eau. Elle s'exprime comme les pluies en millimètres de hauteur d'eau.

3)- L'évapotranspiration réelle (E T R)

Tant que l'alimentation hydrique du végétal correspond aux possibilités énergétiques d'évaporation définies par le bilan d'énergie, l'évapotranspiration réelle du végétal (E T R) est sensiblement égale à l'évapotranspiration potentielle (E T P). Lorsque l'énergie disponible pour l'évaporation dépasse les possibilités de transfert d'eau de la plante vers les surfaces évaporantes que constituent les feuilles, celles-ci tendent à perdre leur turgescence. Alors intervient la régulation stomatique et cuticulaire qui freine les pertes d'eau : E T R devient inférieur à E T P. La plante dispose d'un système régulateur de débit qui lui permet de conserver un taux d'humidité compatible avec la vie. Il en est ainsi quand "la demande climatique" imposée à la plante (E T P) dépasse l'"offre" (E T R)

dépendant de l'espèce, de l'état physiologique du végétal et des quantités d'eau disponibles du sol. Or, la régulation stomatique limite l'activité photosynthétique ce qui entraîne une baisse de production de matière sèche. (de PARCEVAUX 1963, DAMAGNEZ 1967).

Définition de l'E T R : L'E T R correspond à l'évaporation du sol et à la transpiration cuticulaire et stomatique d'une culture s'alimentant avec les réserves hydriques du sol et la pluviosité, et dont les besoins en eau ne sont pas forcément couverts en totalité.

Dans le cas où le couvert végétal n'est pas continu, abondant ou en pleine croissance, par exemple une culture saisonnière telle que le maïs semé fin avril et récolté en septembre, on constate que E T R correspond à une évapotranspiration maximale (E T M) si l'approvisionnement en eau est abondant; dans ces mêmes conditions $\frac{E T R}{E T P} = 1$ lorsque la culture atteint son plein développement.

Alors que l'E T P exprime un "potentiel de consommation" basé sur les données climatiques, il faudra adopter, pour définir l'E T R de chaque culture, un coefficient variable avec la nature du végétal et son stade physiologique (ROBELIN, 1962) ainsi qu'avec les propriétés physiques des sols (PUECH, 1968) de façon à réduire les valeurs de l'E T P.

En effet, les besoins en eau d'une plante jeune sont relativement plus faibles que ceux d'une plante en plein développement, d'autre part ces besoins en eau diffèrent suivant la saison et le degré de couverture du sol.

Le rapport $\frac{E T R}{E T P}$ a une très grande importance sur la production végétale (ROBELIN, 1963 - BOUCHET, 1963- PUECH et al, 1968); lorsqu'il devient égal à 1 pendant le plein développement de la culture et que E T R est égal à E T M pour les différents stades végétatifs, les rendements tendent vers un maximum. Toutefois, les plantes subissent un déséquilibre hydrique quotidien, et l'E T P instantané maximum au cours de la journée apparaît comme un facteur limitant de la production agricole lorsque l'intensité de la demande devient trop élevée. De ce fait, il semble que l'on connaît encore mal les rendements énergétiques potentiels des végétaux. La connaissance de l'E T P et de l'E T R joue donc un rôle capital dans l'établissement des bilans hydriques globaux qui permettront de s'affranchir, en partie, de ce déséquilibre entre la "demande" et l'"offre", soit en

agissant sur l'alimentation en eau par l'irrigation de complément, soit en jouant sur la réduction de l'E T P (PUECH, 1965).

II - DETERMINATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

De nombreux chercheurs ont essayé de mettre au point des méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration soit d'après des formules plus ou moins complexes, soit au moyen de mesures expérimentales directes.

A/- Les formules d'évapotranspiration

Celles-ci diffèrent entre elles, bien qu'elles essayent de refléter l'expression d'un même phénomène. Cette diversité est due essentiellement à la complexité de l'évapotranspiration qui doit faire intervenir un nombre important de facteurs, mais aussi aux buts différents visés par les auteurs selon que les formules prétendent à une expression simple et schématique ou au contraire à une forme plus élaborée, s'étendant à des domaines climatiques et géographiques divers.

Les facteurs déterminants sont :

- radiation solaire reçue,
- température,
- humidité relative de l'air,
- vitesse du vent.

En fait, la connaissance du bilan d'énergie pose le problème de la radiation directe et de l'énergie d'advection, données qu'il n'est pas toujours aisé d'obtenir avec certitude. De plus, la difficulté s'accroît si l'on essaye de faire intervenir l'influence de la teneur en eau du sol et la réponse de la plante aux actions du climat. L'agronome devra en outre faire intervenir dans l'établissement du bilan de l'eau, à la fois les facteurs climatiques et ceux provenant du complexe sol - végétation.

...../...

Dans tous les cas, les chercheurs ont essayé de spécifier la limite supérieure de l'évapotranspiration d'un sol cultivé dans des conditions optimum d'alimentation en eau et de couverture végétale (E T P).

1)- Formule basée sur les facteurs climatiques et géographiques : THORNTHWAITE (1948).

$$E \text{ cm d'eau/mois} = A C t^a$$

t = température moyenne mensuelle en degré centigrade
A = coefficient dépendant de la latitude et du mois
C et a = paramètres constants pour un stade donné

E T P mensuelle exprimée en fonction de la température moyenne mensuelle, multipliée par un coefficient tenant compte du nombre de jour du mois et de la durée de l'éclairement journalier (lié à la latitude).

Elle sous-estime les besoins en eau dans les régions méditerranéennes et tropicales sèches et les surestime dans les régions tropicales et équatoriales humides.

THORNTHWAITE a ressenti la nécessité de faire intervenir des coefficients culturaux pour le calcul des besoins en eau d'irrigation.

2)- Formule basée sur des facteurs climatiques et sur des coefficients culturaux : BLANEY et CRIDDLE (1952)

$$E \text{ (en pouces pendant la période considérée)} = \frac{K t p}{100}$$

K = coefficient variable avec les cultures et la région,
t = température moyenne pendant la période considérée (en d° F)
p = somme des heures du jour pendant la période considérée mesurée en centièmes de la somme des heures du jour de l'année entière.

..../...

L'E T P est ainsi fonction de la "force évaporante" et d'un coefficient K résultant de nombreuses expériences au champ. Cette formule donne une bonne évaluation des besoins en eau saisonniers.

HARGREAVES essaye d'obtenir avec plus de précision l'estimation des besoins mensuels et pour cela introduit le facteur humidité de l'air dans la formule de BLANEY et CRIDDLE et un coefficient k variable avec le mois et le lieu. L'application de cette formule nécessite de nombreuses déterminations du coefficient k et l'on s'approche alors des méthodes directes d'évaluation des besoins sur évapotranspiromètre.

3)- Formules fondées sur la méthode du bilan d'énergie :
PENMAN (1950)

$$E \text{ en mm/jour} = \frac{\Delta H + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

Δ = pente de la courbe tension maximum de la vapeur d'eau/température

γ = coefficient égal à 0,49 mm de mercure par degré C

E_a = pouvoir évaporant de l'air faisant intervenir la vitesse du vent et le déficit de saturation de l'air

H = énergie de radiation reçue par unité de surface et transformée en mm d'eau évaporable (590 calories par gramme d'eau, soit 1 mm pour 59 cal/cm²). Ce facteur inclue la radiation solaire reçue réellement, la tension moyenne de la vapeur d'eau et l'albedo de la surface réceptrice (rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente).

La formule est complexe et conduit à des calculs longs. Le coefficient propre à la couverture végétale a été encore peu souvent déterminé. Cette formule s'adapte mal au calcul de l'E T P d'un couvert végétal.

4)- Formule basée sur les relations existant entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement : TURC (1954)

Cet auteur a d'abord établi une formule générale (1954) faisant intervenir les facteurs principaux de l'évapotranspiration et de l'évapo-

ration à partir des bilans hydrologiques observés de 254 bassins versants répartis dans le monde entier et sur données de cases lysimétriques diverses.

En 1958, TURC a simplifié et amélioré sa formule par le calcul de la seule évapotranspiration potentielle.

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

P = précipitations décadaires en mm

a = hauteur d'eau supplémentaire susceptible d'être évaporée par le sol aux dépens de ses réserves (par décade)

l = facteur héliothermique

Vmm= représente la quantité d'eau supplémentaire exportée par la végétation. Il n'intervient qu'entre le vingtième jour suivant la date des semailles et la récolte. Il diffère suivant que le sol est ou n'est pas largement approvisionné en eau.

Enfin en 1961, TURC simplifie et met à jour une nouvelle formule.

$$E T P \text{ mm/mois} = 0,40 \frac{t}{t + 15} (\lg + 50)$$

0,40 = doit être remplacé par 0,37 pour février

t = température moyenne de l'air, sous abri pendant le mois

$\lg = \lg A \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right)$

lg = radiation globale d'origine solaire, directe et diffusée (petite calorie/cm²/jour)

lgA = énergie de la radiation qui atteindrait le sol, si l'atmosphère n'existait pas (petites calories/cm²/jour)

h = durée moyenne d'insolation en heures

H = durée astronomique du jour en heures

Dans cette formule, l'humidité relative n'intervient pas.

.../...

L'utilisation d'un abaque permet un emploi rapide de cette formule qui s'est généralisée en France.

5)- Formules plus globales basées sur l'emploi de l'évaporomètre PICHE : BOUCHET, 1960.

BOUCHET fait appel à une mesure expérimentale intégrant le maximum de facteurs climatiques et prend les données de l'évaporomètre PICHE. Il analyse le fonctionnement de cet appareil et applique la méthode du bilan d'énergie.

$$E T P \text{ mm/jour} = 0,37 E_p (1 + \lambda t)$$

E_p = évaporation en mm (évaporomètre "PICHE" sous abri)

t = température moyenne entre la température moyenne de l'air et la température du point de rosée. La température du point de rosée varie peu à l'échelle de la journée, elle est souvent voisine de la température minimale. On pourra en première approximation confondre cette température du point de rosée et le minimum T_m .

Si T_M représente le maximum, la valeur de $t = \frac{\frac{T_m + T_M}{2} + T_m}{2}$

$(1 + \lambda t)$ est donné dans les tables.

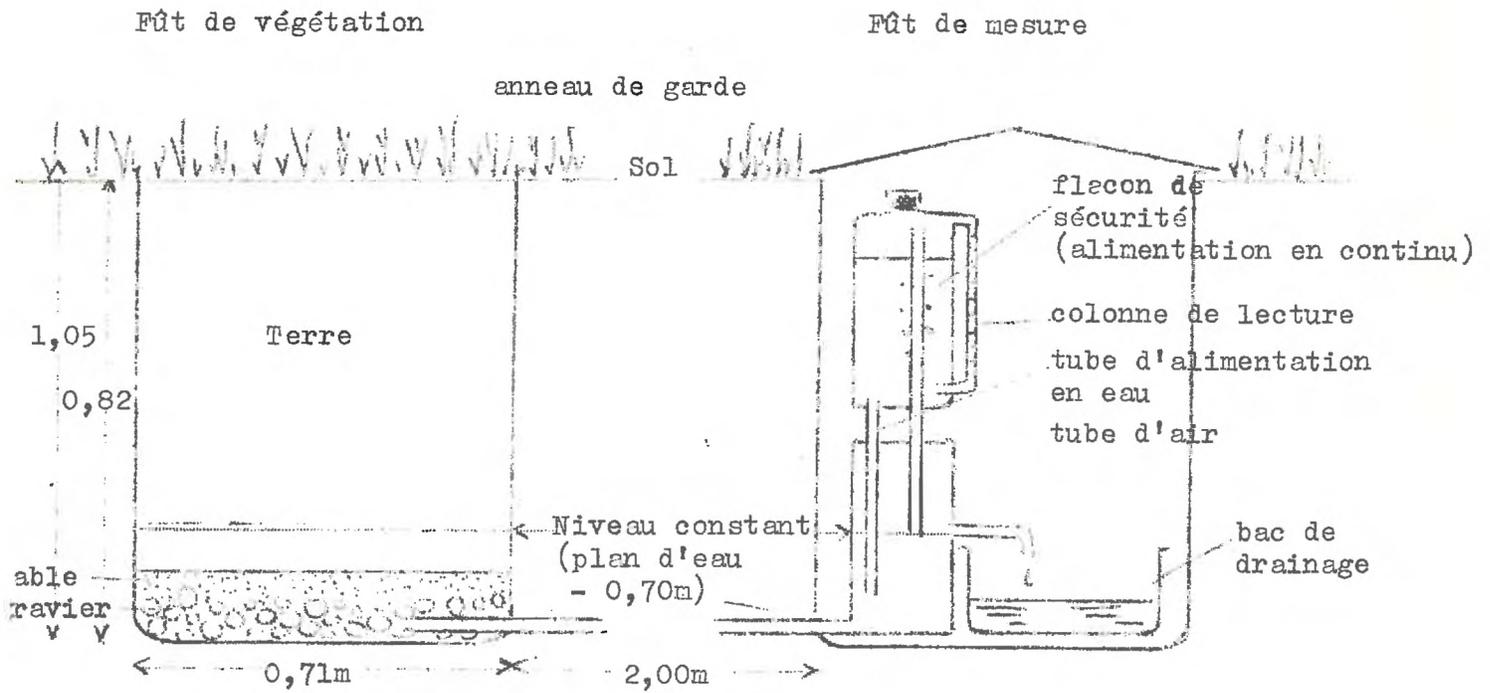
Afin de préciser à l'échelle régionale la valeur de l' $E T P$, on est conduit à une détermination expérimentale de l' $E T P$ permettant d'étalonner les différentes formules ou techniques appelées à être utilisées.

B/- Détermination expérimentale de l'évapotranspiration potentielle

1)- Evapotranspiromètres

Ce dispositif de type classique (THORNTHWAITE) est constitué de deux fûts enterrés. L'un rempli de terre est cultivé en gazon et se trouve relié au 2ème fût vide par un système de canalisation qui permet de maintenir un plan d'eau à une profondeur donnée au moyen d'un système de vases communicants alimentant automatiquement la nappe. Par ailleurs, le drainage est assuré et contrôlé en permanence. (voir croquis) .../...

Dispositif schématique des évapotranspiromètres de Toulouse
(Plaisance - Haut)



La terre du 1er fût est presque toujours maintenue à la capacité au champ. La fétuque semée à forte densité recouvre parfaitement le sol et un anneau de garde de 700 m² planté également en fétuque entoure l'évapotranspiromètre de façon à réduire les effets d'oasis. L'anneau de garde est arrosé tous les jours en saison sèche. La fétuque est coupée régulièrement.

Les mesures de l'E T P sont journalières et sont calculées à partir des données suivantes :

$$E T P \text{ mm} = I \text{ mm} + F \text{ mm} + P \text{ mm} - D \text{ mm}$$

I = irrigation

F = irrigation souterraine par le dispositif de sécurité

P = pluie

D = drainage

2)- Détermination approximative de l'E T P par l'évaporomètre à pastille évaporante à l'air libre

PUECH (1967) montre qu'en utilisant un évaporomètre dans des conditions d'environnement correctes, on peut avoir une approximation facile de l'E T P. Toutefois, l'évaporomètre à pastille évaporante à l'air libre est très sensible au vent et dans le cas où les vents sont forts et desséchants, l'évaporation devient importante et l'E T P peut être surestimée. Il convient donc de déterminer, suivant de petites zones climatiques, le coefficient de correction qu'il est nécessaire d'appliquer aux données de l'évaporomètre afin d'obtenir des valeurs voisines de l'E T P.

C/- Discussion

Parmi ces différentes formules, celle de TURC s'applique à la France entière, sauf pour les régions où le vent est fréquent. La formule BLANEY-CRIDDLE convient en région méditerranéenne. La formule de BOUCHET peut-être aussi utilisée partout dans la mesure où le coefficient lié à l'appareillage et au climat local est déterminé.

..../...

Pour la région Toulousaine, la formule de TURC indique pendant les périodes chaudes des résultats inférieurs à celle de BOUCHET et lorsque souffle un vent sec et chaud, les différences sont encore plus nettes (PUECH, 1967).

En ce qui concerne l'appréciation de l'évapotranspiration potentielle, nous constatons un désaccord entre les différentes formules permettant de calculer cette donnée d'où la nécessité d'effectuer des mesures expérimentales directes. La comparaison de ces méthodes à l'échelon régional fait ressortir que parmi les différentes formules proposées, celles de TURC et de BOUCHET s'approchent le plus des données expérimentales, bien que toutes deux sous-estiment cette valeur.

Ainsi, PUECH (1967) montre que le coefficient $\alpha = 0,37$ de la formule de BOUCHET ne convient pas à la région Toulousaine, il peut varier entre avril et octobre entre 0,3 et 0,6.

D'autre part, lorsque une région possède certains caractères géographiques (relief, exposition, orientation) ou climatiques (vent) nettement spécifiques, on observe l'établissement de micro-climats qui imposent une diversification à très petite échelle des coefficients utilisés.

On est donc amené à multiplier les données climatiques, telles que celles fournies par l'évaporomètre PICHE, à condition de vérifier la relation existant entre les résultats de PICHE et l'E T P mesurée. Ainsi, on peut estimer une E T P localisée à une petite région bien définie en établissant le rapport $\frac{E T P \text{ mesurée}}{\text{Evaporation PICHE}}$. Par exemple, pour la région Toulousaine, ce rapport oscille entre 0,8 et 0,9, sauf en période de fort vent (PUECH et al, 1968).

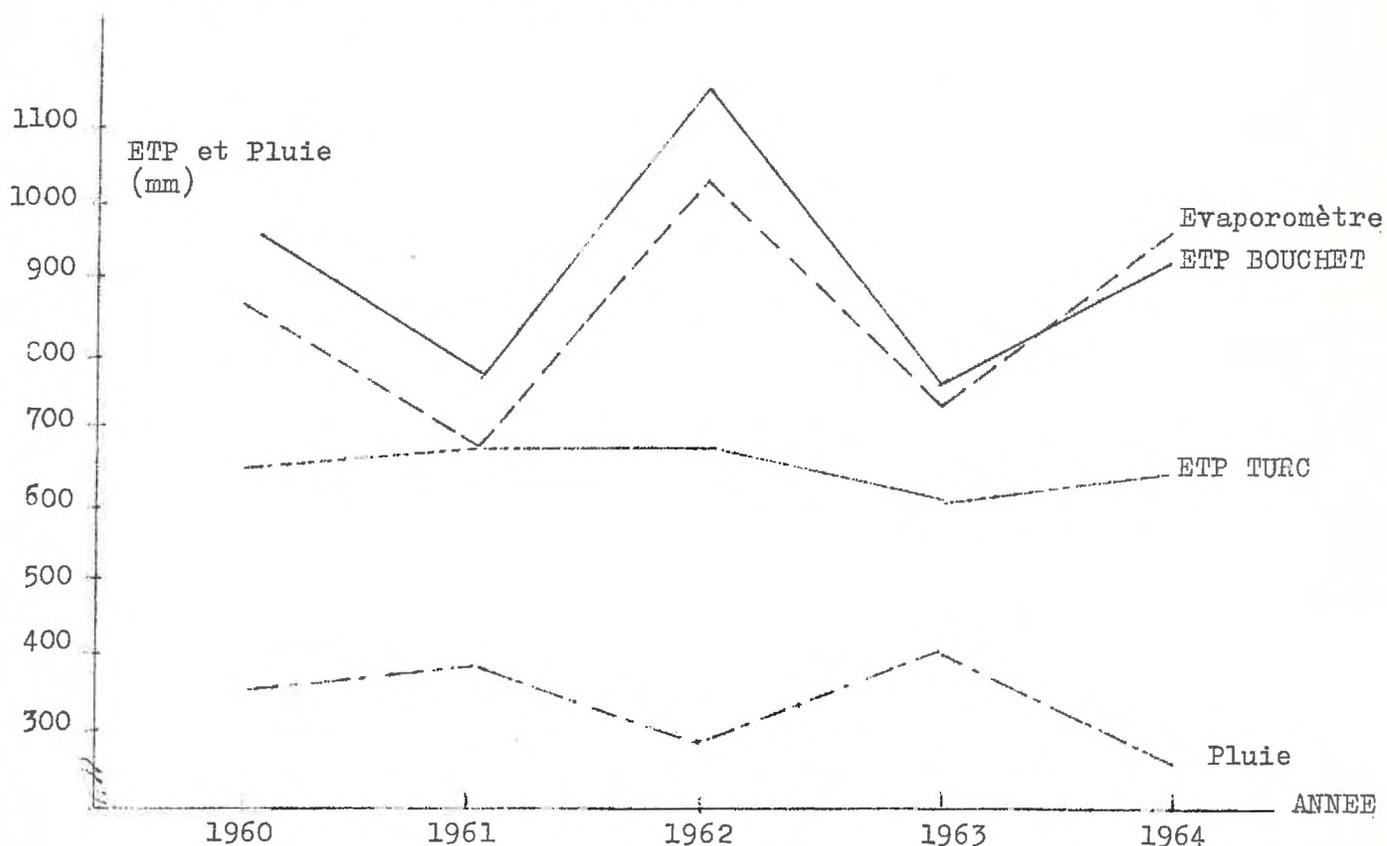
III - EVALUATION DU DEFICIT CLIMATIQUE

La connaissance du déficit climatique (E T P - pluie) au niveau d'une région permet de réaliser des bilans hydriques globaux et d'estimer les besoins en eau de la région, au niveau de l'exploitation ou d'une

.../...

toute petite zone elle est indispensable pour évaluer les quantités d'eau nécessaires pour l'irrigation. Si ces bilans sont effectués à l'échelle de la journée ou de la semaine, ils permettront de fixer les doses d'eau à apporter, ainsi que les rythmes d'arrosage, compte tenu par ailleurs des réserves hydriques du sol.

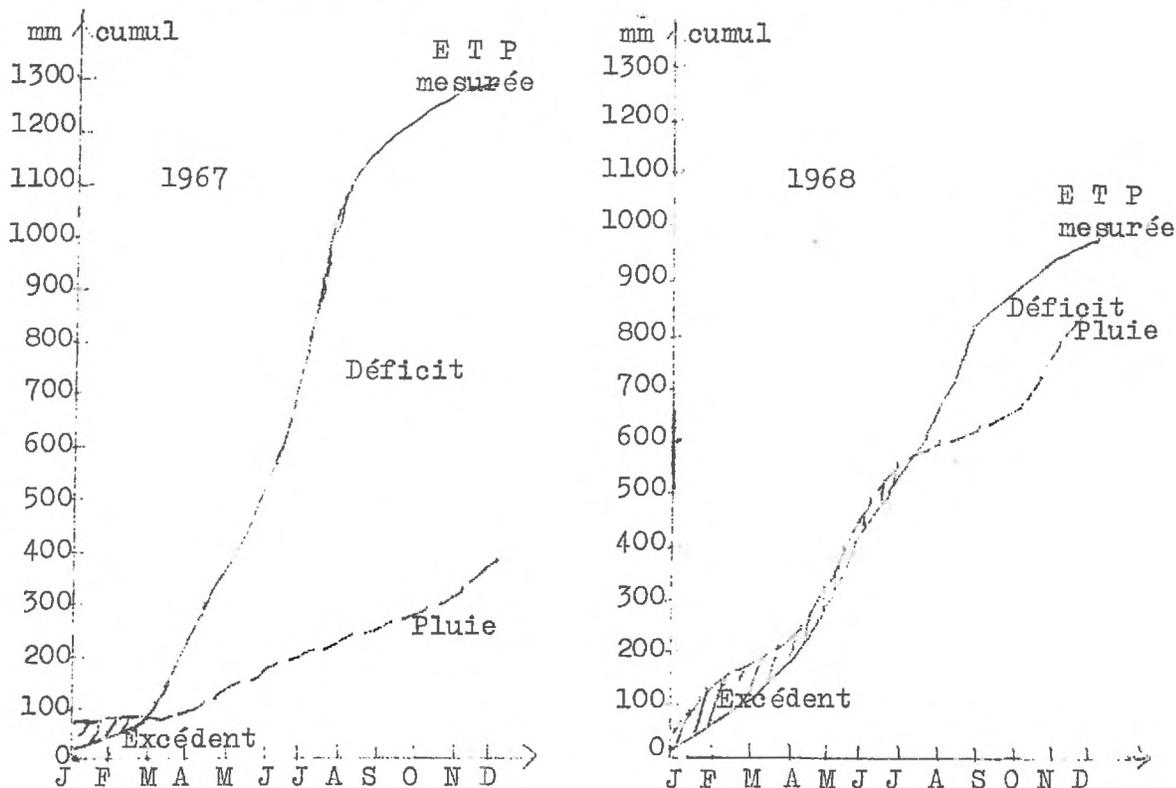
Le déficit climatique varie pour une même région d'une année à l'autre, mais aussi suivant les méthodes de détermination adoptées ainsi que nous le montre le graphique suivant établi pour la région Toulousaine, entre 1960 et 1964.



Ce graphique permet de se rendre compte des difficultés rencontrées lors de l'établissement du déficit climatique d'une zone assez restreinte possédant certains caractères spécifiques (influence du vent notamment). Il était donc indispensable de relier ces données à celles d'évapotranspiromètres.

....//...

En partant des données des évapotranspiromètres concernant la région Toulousaine, on constate des variations importantes suivant les années qualifiées de "sèches" (1967) ou d'"humides" (1968)



Ces graphiques mettent en évidence la variabilité importante du déficit climatique entre 2 années successives, Les réserves du sol et l'irrigation doivent combler ce déficit, afin de satisfaire les besoins maxima en eau de cultures dont la végétation est active tout au long de l'année (comme les prairies par exemple).

Il s'ensuit que les prévisions à long terme des besoins en eau globaux ne peuvent être pensées en moyenne qu'à l'échelle d'une petite région, compte tenu de la nature des sols (R U) et du système de culture (besoins en eau) surtout si l'on se situe dans une région au climat "capricieux" tel que peut l'être celui de la région Toulousaine.(SOUBIES et al, 1960).

..../...

L'ensemble de ces données nous permet d'estimer l'importance de la "demande" en eau qui est un des facteurs essentiels du déficit climatique. Pour établir un bilan hydrique, il nous faut aussi connaître les possibilités de l'"offre", c'est-à-dire la quantité d'eau susceptible de cheminer du sol jusqu'à la surface foliaire évaporante. Cette donnée dépend des réserves hydriques du sol susceptibles d'être utilisées par la plante. Cette notion de réserves en eau du sol utile aux végétaux fait intervenir de nombreux facteurs que nous nous proposons d'examiner dans la deuxième partie.

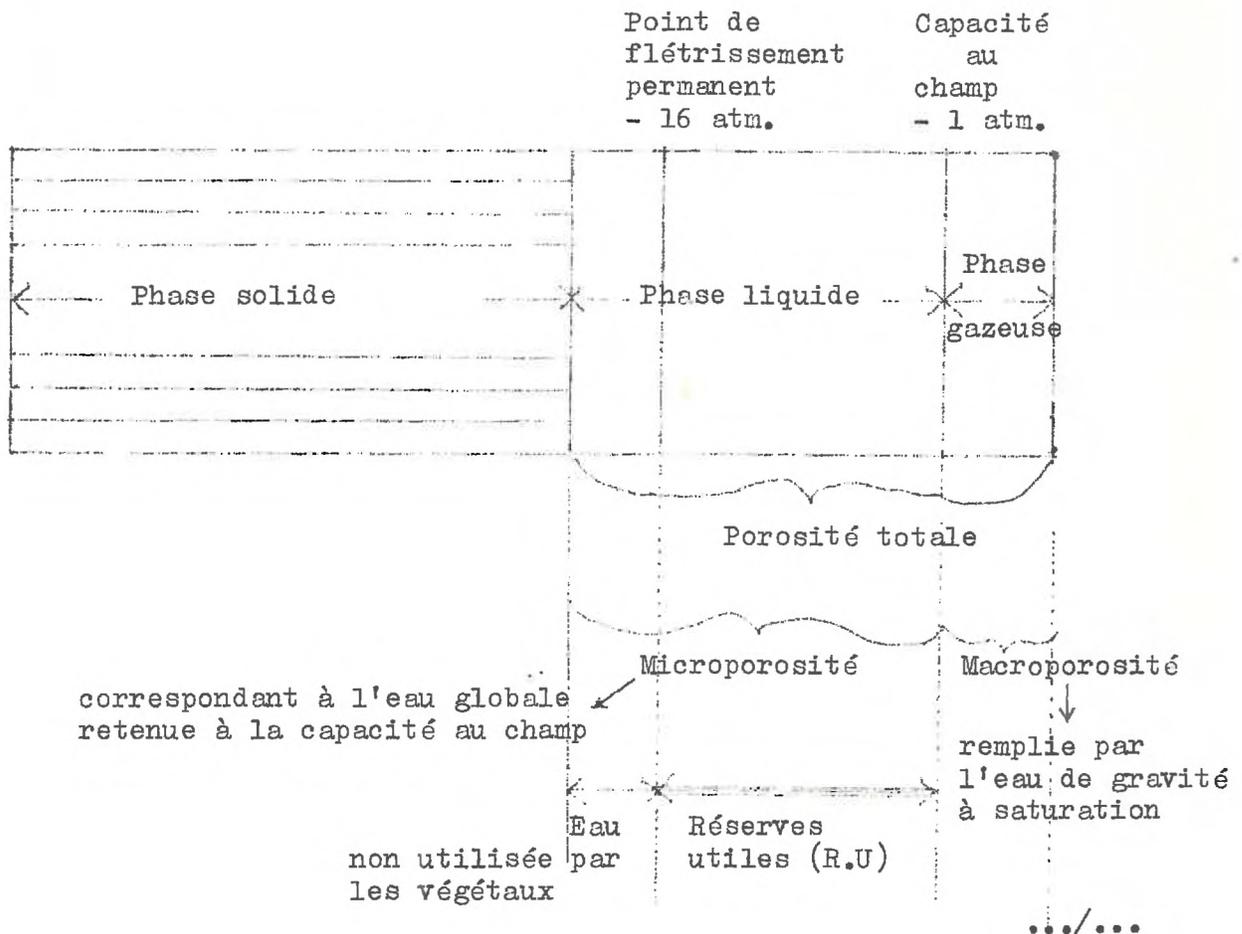
DEUXIEME PARTIE

LES TERMES DU BILAN HYDRIQUE DEPENDANT DU SOL

I - DETERMINATION DES RESERVES HYDRIQUES DU SOL

La "Réserve Utile" (R.U), doit tenir compte à la fois des caractéristiques hydriques du sol et de la profondeur de l'enracinement, c'est-à-dire de la somme des quantités d'eau disponibles à chaque niveau du profil exploité par les racines.

Le schéma suivant situe la R.U parmi les autres caractéristiques du sol :



La détermination de la Réserve Utile implique donc la connaissance de deux limites, l'une maxima qui est le taux d'humidité à la capacité au champ, l'autre minima correspondant au point de flétrissement permanent. Nous considérerons la R U comme une caractéristique spécifique du sol, compte tenu par ailleurs qu'elle ne peut être prise uniquement sous un angle statique mais dynamique, variable avec les possibilités d'enracinement de la culture (MAERTENS, 1966), mais aussi avec la vitesse de dessèchement imposée par le climat (HALLAIRE, 1963).

A/- La Capacité au champ

La capacité au champ correspond à la capacité de rétention pour l'eau du sol en place, bien réhumecté et ressuyé; c'est la plus forte humidité du sol pour laquelle les transferts d'eau sont lents après que l'eau excédentaire se soit écoulée par gravité (FEODOROFF, 1962).

La capacité au champ indique donc la limite supérieure de l'eau mise en réserve par le sol.

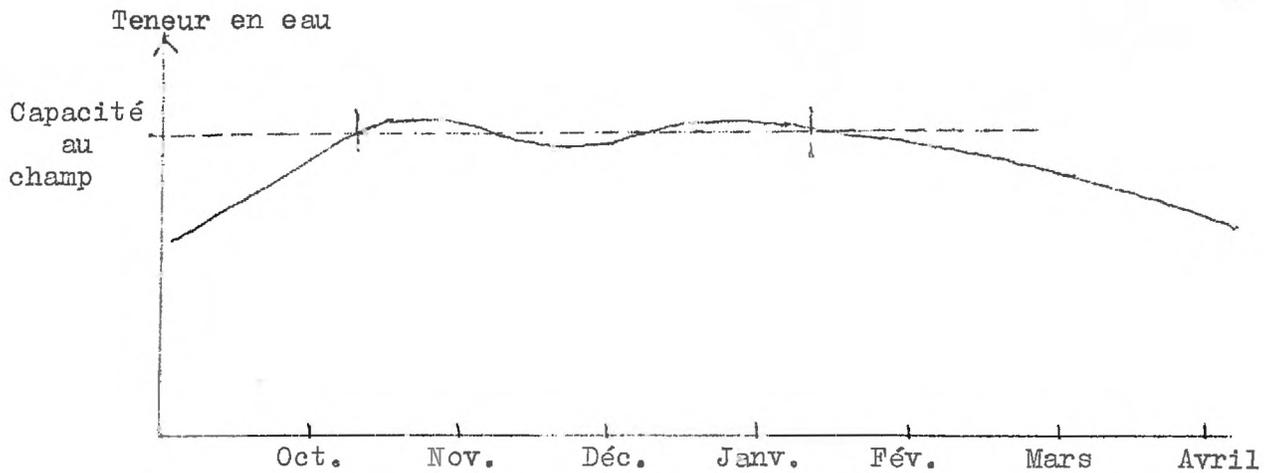
Détermination de la Capacité au champ :

1°- sur le terrain

Par définition, cette détermination doit en principe s'opérer sur le sol en place, en lui faisant subir le moins de modification possible, de manière à obtenir des données expérimentales se rapportant à la structure réelle du sol, et à éviter ainsi le caractère parfois artificiel des mesures de laboratoire (MATHIEU, 1932).

La méthode préconisée par RODE (1960) couramment utilisée, consiste à déterminer l'humidité du sol à différentes périodes échelonnées dans le temps, en commençant au moment de la réhumectation automnale et en poursuivant ces mesures jusqu'au printemps suivant. En période de faibles évapotranspirations hivernales et en l'absence de précipitations importantes, on constate que l'humidité s'établit à une valeur pratiquement constante matérialisée par un palier sur le graphique suivant :

.../...



La teneur en eau moyenne correspondant à ce palier est par définition la capacité au champ.

Cette détermination fait appel à des méthodes de mesures de l'humidité du sol que nous examinerons plus loin.

2°- Capacité de rétention déterminée au laboratoire

a)- historique et signification : La notion de potentiel capillaire

La difficulté de posséder des mesures de capacité au champ, notamment à une époque où n'existaient pas de méthodes directes de mesure de l'humidité du sol en place, a conduit de nombreux chercheurs à essayer de remplacer ces mesures par des déterminations au laboratoire. Pour cela on a voulu établir des relations entre la capacité de rétention du sol (constante hydrique) et le potentiel capillaire. Dans une étude récente à laquelle nous nous référons largement, FEODOROFF (1968) signale que la notion de capacité de rétention est ancienne et fut définie pour la première fois en 1880 par MAYER.

BUCKINGHAM (1907) étudiant les forces de rétention et de mouvement de l'eau, tente une approche thermodynamique et par analogie électrique de ces problèmes, et propose le terme de "potentiel capillaire" pour exprimer la valeur de l'attraction que le sol exerce en chaque point de l'eau (cité par BAVER, 1956).

.../...

S'appuyant sur ces données, GARDNER (1920) essaye d'associer la capacité de rétention à une valeur du potentiel capillaire. Apparaît alors la notion d'"humidité équivalente" (moisture équivalente) correspondant à l'eau retenue dans un échantillon de terre après centrifugation à 1000 g.

A la suite d'étude sur des sols à texture fine de Californie, VEIHMEYER et HENDRICKSON (1931) définissent la "field capacity" (capacité au champ) et constatent qu'il y a correspondance avec l'humidité équivalente, tout en précisant d'ailleurs que cette correspondance ne se retrouve pas dans des sols sableux. Mais cette restriction reste dans l'ombre et après que SCHOFIELD (1935) ait tenté de montrer que la centrifugation à 1000 g correspondant à un potentiel capillaire de - 1000 cm d'eau, on assimile rapidement la "capacité au champ" à un potentiel capillaire de - 1000 cm d'eau. Ces données sont cependant contestées par quelques chercheurs : défaut de plan d'eau libre à la base de l'échantillon centrifugé (HENIN), épaisseur de la colonne de sol qui doit être prise en compte dans le calcul (DOLGOV). Néanmoins, les conceptions de SCHOFIELD prévalent et cet auteur introduit la notation logarithmique pour désigner le potentiel capillaire : le pF (potentiel of Free Energy). RICHARDS et WEAVER (1944) proposent à la place de la centrifugation, d'extraire l'eau par une pression d'air constante et continue, exercée sur un échantillon de terre placé dans une enceinte fermée et sur plaque poreuse permettant l'écoulement de l'eau. Ce dispositif constitue l'appareil de RICHARDS. Ces auteurs admettent que la teneur en eau du sol soumis à une pression d'environ 1/3 d'atmosphère correspond sensiblement à la capacité au champ. Des considérations précédentes, il semble que la capacité de rétention, ou capacité au champ, corresponde à des potentiels capillaires variables suivant la nature du sol.

Compte tenu de ces restrictions, et afin d'établir rapidement au laboratoire la valeur d'une capacité de rétention correspondant éventuellement à une capacité au champ, longue à déterminer, il est pratique de situer cette constante hydrique du sol par la relation

..../...

existant entre la teneur en eau et le potentiel capillaire correspondant. Evidemment, les bases de telles relations devront être assurées par des mesures de capacité au champ "in situ". On constate alors que le potentiel capillaire, est lié au type granulométrique et à la présence de matière organique (PERIGAUD, 1963 - BONNEAU, 1961).

b)- Le potentiel capillaire - Définition du pF

Rappelons que "le potentiel capillaire" peut être défini comme l'énergie nécessaire pour extraire du matériau l'unité de masse de liquide et la porter à l'état d'eau libre, à la même hauteur, la même température et sans modification saline ni par conséquent de pression osmotique (HALLAIRE, 1953).

La notation pF est le logarithme du potentiel capillaire exprimée en cm d'eau $pF = \log \Psi$

Les principaux facteurs du potentiel capillaire sont :

- les forces capillaires,
- les phénomènes de pression,
- les forces d'adhésion ou d'adsorption.

Ainsi, pour ramener à l'état libre de l'eau liée au sol, il faudra vaincre plusieurs forces d'importance variable suivant l'agencement entre l'eau et les particules solides. HALLAIRE (1963) a confirmé que l'abaissement d'énergie libre de l'eau est imputable à 2 phénomènes physiques différents, "l'un concernant l'eau pelliculaire, apparaît indépendant de la tension superficielle A, tandis que l'autre se situe au niveau des ménisques et est étroitement lié à la tension A".

..../...

c)- Méthodes de mesure

On opère sur des échantillons de terre tamisés et préalablement réhumectés (STUDER, 1961), soit par centrifugation ou par pression (appareil de RICHARDS) en choisissant un pF correspondant à la texture, soit suivant la méthode FEODOROFF (1964).

Cette dernière technique, qui ne fait pas appel à la notion de pF, présente certaines particularités qu'il est nécessaire de préciser.

3°- Méthode FEODOROFF

Elle consiste à faire ressuyer sur de la terre sèche une petite masse de sol initialement humecté en excès. La colonne de terre ainsi humidifiée perd progressivement son humidité au bénéfice de la terre sèche sous l'effet des forces de gravité et de succion, mais absolument à l'abri de l'évaporation.

Pour chaque sol étudié on pèse les tubes à différents temps et après passage à l'étude à 105°, on calcule l'humidité à ces différents temps.

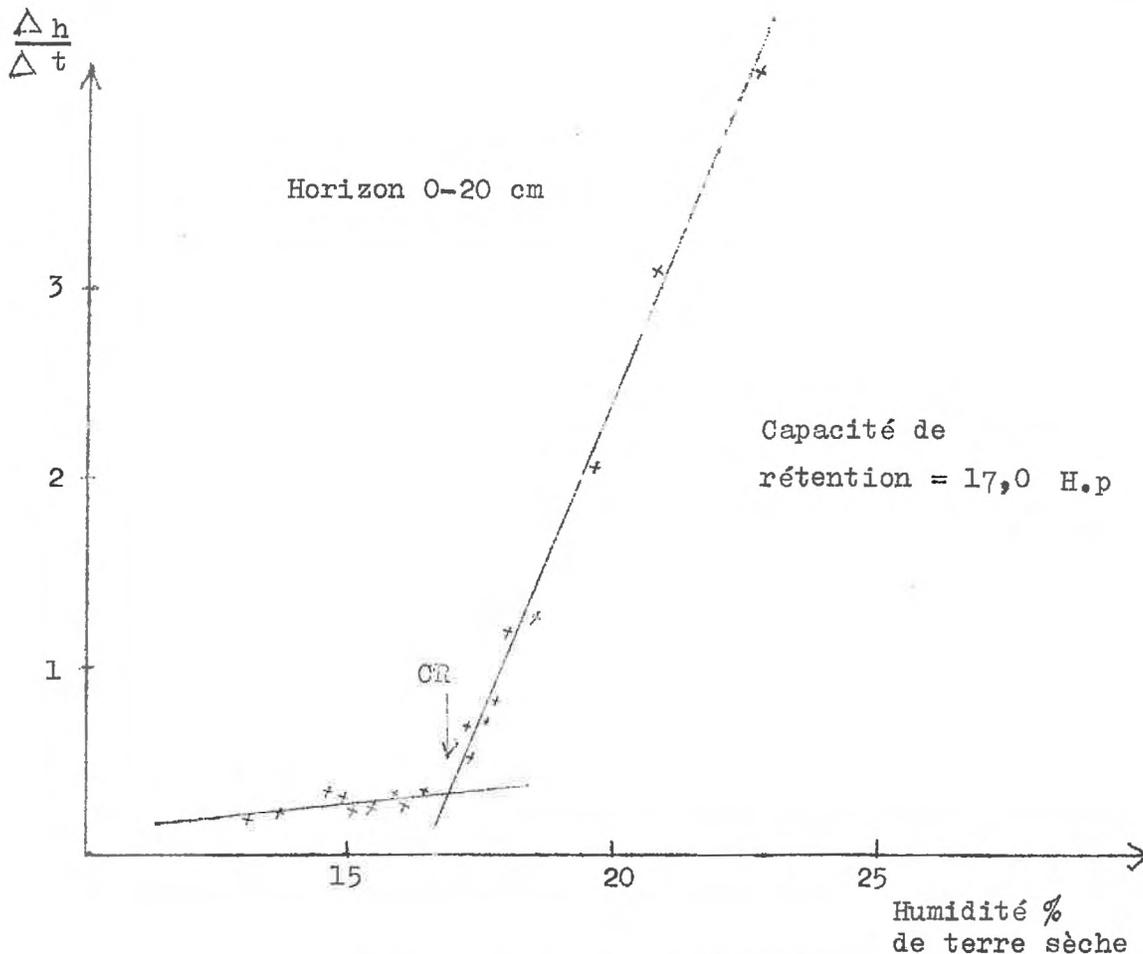
Les résultats obtenus montrent que l'humidité de la colonne de terre décroît rapidement dans la phase initiale du ressuyage, puis la décroissance est de plus en plus lente pour atteindre des humidités très faibles, proches du point de flétrissement.

Si l'on représente graphiquement la vitesse de ressuyage, en fonction de l'humidité du sol, on constate une cassure brusque correspondant au palier de ressuyage. Il faut donc déterminer la relation entre la "vitesse de ressuyage" $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ et l'humidité du sol. A cet effet, pour chaque intervalle de temps, on calcule l'humidité moyenne du sol en faisant la moyenne arithmétique des valeurs de l'humidité aux bornes de cet intervalle.

..../...

On porte sur un graphique les valeurs de $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ en ordonnée, les valeurs d'humidité en abscisse, on constate que ces deux grandeurs sont liées par une double relation linéaire : une droite à pente positive faible pour les basses humidités, puis une droite à pente positive forte pour les humidités élevées. On suppose que le point d'intersection de ces droites correspond à la capacité de rétention pour l'eau portée en abscisse.

L'exemple suivant est choisi dans une terre de boulbène limoneuse sur alluvions fluviatiles anciennes de la Garonne. (Plaisance Haut).



Les valeurs de la capacité de rétention ainsi obtenues, comparées aux valeurs de la capacité au champ déterminées sur le sol en place, sont concordantes.

Seule, l'application uniforme de pF 3, sans distinction du type de sol, donne des résultats divergents et, si l'on veut utiliser les techniques de pression ou de centrifugation en raison de leur commodité pratique, il convient donc d'appliquer un pF variable suivant la texture, de façon à s'approcher le plus possible du pF réel correspondant à la capacité au champ.

FEODOROFF a établi une autre méthode, analogue à celle décrite ci-dessus, mais pratiquée sur échantillons non remaniés. Il semble que cette méthode présente moins d'avantages en ce qui concerne la rapidité et la répétition des mesures.

B/- Les Réserves Utiles du sol

1°- Le pF 4,2

On a constaté expérimentalement que la plupart des végétaux ne pouvaient survivre au-dessous d'un dessèchement critique qu'on a appelé point de flétrissement permanent, et qui représente un potentiel capillaire d'environ 16.000 g correspondant au pF 4,2. Pour des humidités inférieures au pF 4,2 l'eau est énergiquement retenue par le sol et ne peut guère être utilisée par la plante; le pF 7,0 correspond à une humidité nulle obtenue après passage à l'étuve à 105° (exception faite évidemment de l'équivalence eau des H et OH de constitution). La détermination du pF 4,2 s'effectue au moyen de l'appareil de RICHARDS.

2°- Calcul des Réserves Utiles

Nous venons donc de définir les termes qui limitent la disponibilité de l'eau pour les plantes. Ils aboutissent à la connaissance des réserves utilisables du sol qu'il est intéressant de calculer en mm d'eau par cm de sol susceptible d'être exploité par les racines. Cette quantité est donnée par la formule :

$$\text{R.U} \\ \text{mm d'eau par} \\ \text{cm de hauteur} \\ \text{de terre} = \frac{1}{10} \left(\begin{array}{l} \text{(1)} \\ \text{humidité \% de} \\ \text{terre sèche à la} \\ \text{capacité au champ} \end{array} - \begin{array}{l} \text{(1)} \\ \text{humidité \% de} \\ \text{terre sèche} \\ \text{à pF 4,2} \end{array} \right) \times \begin{array}{l} \text{densité appa-} \\ \text{rente de la} \\ \text{terre en} \\ \text{place} \end{array}$$

(1)- Humidité exprimée en poids

3°- Résultats personnels et discussion

Les résultats suivants ont été obtenus dans quelques terres typiques du Sud-Ouest de la France. (renfermant moins de 5 % de cailloux et graviers).

Caractéristique texturale	Origine	pF à la capacité au champ	Humidité volumique moyenne %		R.U. moyenne en mm d'eau par cm de hauteur de sol
			à la capacité au champ	au pF 4,2	
> 40 % d'argile	Colluvions argileuses	3,4	46	29	1,7
35 % d'argile	Terreforts	3,2	38	17	1,9
20 % d'argile	Terres franches d'alluvions	3,0	33	13	2,0
10-15 % d'argile avec limons	Boulbènes sur alluvions anciennes	2,7	29	8	2,1
< 10 % d'argile avec sables fins	Sables fauves	2,0	24	6	1,8
< 5 % d'argile avec sables grossiers	Alluvions récentes sableuses	1,3	16	3	1,3

Le pF correspondant à la capacité au champ varie avec la texture de la terre, mais aussi, pour une texture donnée, peut varier dans une proportion moindre avec les qualités structurales dépendant pour une large part du système de culture (travail du sol, influence des prairies dans l'assolement). En effet, KUIPERS (1961) a montré que les mesures de pF en laboratoire ne pouvaient être transposables au terrain que si le sol n'est pas trop compacté et si les agrégats ont une dimension supérieure à 2-3 mm. FEODOROFF (1961) montre, par ailleurs, que le concept théorique de capacité au champ n'est plus valable dans les sols de structure instable à l'eau. Cependant, la possibilité de relier des mesures au champ à des déterminations de pF effectuées au laboratoire, permet dans

de nombreux cas et sans risque d'erreur grossière, d'extrapoler ces données à de nombreux sols comparables à un type bien étudié, et de connaître ainsi les valeurs approchées de l'humidité à la capacité au champ.

Les R.U totales ainsi calculées pour différentes terres, ne renfermant ni cailloux ni graviers, varient avec la nature texturale du sol. Les R.U sont élevées dans les sols limoneux, elles sont moins importantes dans les sols argileux, les plus faibles en sols sableux. Ces résultats paraissent, à priori, peu compatibles avec les phénomènes observés, notamment en ce qui concerne les terres limoneuses et argileuses. En effet, pour une même profondeur prospectée par les racines, les cultures résistent davantage sur les sols argileux que sur les sols limoneux, lorsqu'elles sont soumises à des conditions identiques de sécheresse. Ceci est dû à la plus grande facilité avec laquelle les sols limoneux cèdent leur eau et par conséquent épuisent rapidement leur réserve. Ce phénomène de plus ou moins grande cessibilité de l'eau, qui fait intervenir la taille des pores et l'intensité de la demande, modifie donc la notion statique des réserves facilement utilisables (PUECH et al, 1969).

C/- Les Réserves Facilement Utilisables (R.F.U.)

Des expériences nombreuses montrèrent que la totalité des réserves utiles du sol ne sont pas absorbées par la plante avec la même facilité. En général, il est admis que la moitié (ou les deux tiers) de R.U est facilement utilisable et que le mécanisme de défense de la plante contre la sécheresse n'intervient qu'à partir de cette limite, c'est-à-dire lorsque R.F.U est épuisée. R.F.U doit donc en principe assurer l'E.T.M. On constate, au premier abord, que la R.F.U. présente, sous des conditions de climat et de sol données, une fraction de R.U d'autant plus grande que le système racinaire est plus profond.

D'autre part, HALLAIRE (1960, 1963) a montré que l'eau ne circule pas dans le sol uniquement en fonction d'un potentiel capillaire dépendant de son humidité H, mais que le véritable potentiel de l'eau

.../...

(potentiel efficace) est essentiellement lié à la grandeur $\left| \frac{\Delta H}{\Delta t} \right|$, variation de l'humidité du sol par unité de temps. Cette grandeur, représentant le potentiel réel de l'eau est responsable des déplacements de l'eau dans les conditions de régime variable. La circulation s'effectue des zones à $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ faibles vers celles où $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ est plus élevée et cela indépendamment de la valeur globale H de l'humidité en ces différents points.

Ainsi, pour une même évaporation, la variation d'humidité à chaque niveau colonisée par les racines sera d'autant plus faible que R.U sera plus grande, et dans ce cas la R.F.U. sera plus importante. Il s'ensuit que pour une même R.U, une évaporation élevée diminuera R.F.U.

En fait, R.F.U représente une fraction très variable de R.U augmentant avec celle-ci et d'autant plus faible que l'évapotranspiration potentielle est élevée. L'obligation d'introduire la vitesse de dessèchement dans l'appréciation de la réserve facilement utilisable, nous amène donc à nuancer cette notion qui cesse de pouvoir être considérée comme une caractéristique hydrique constante du sol. Du point de vue agronomique, le réservoir est d'autant plus faible qu'il se vide rapidement, et ce phénomène explique parfaitement les réactions de sols de types différents, mais de R.U comparables, vis à vis de la plus ou moins grande résistance à la sécheresse des cultures qu'ils portent (BOUCHET, 1965).

II - METHODES DE DETERMINATION DE L'HUMIDITE DU SOL

Il existe de nombreuses méthodes de détermination de l'humidité du sol, certaines anciennes et encore utilisées, d'autres récentes faisant appel à des techniques modernes. Nous décrirons les principales d'entre elles en considérant que les unes perturbent davantage le sol que d'autres sachant que dans tous les cas il faut atteindre le point du profil ou de l'horizon pour lequel on désire mesurer l'humidité. Cependant des méthodes sont plus perturbantes que d'autres, c'est le cas notamment de celles exigeant à chaque mesure une extraction de l'échantillon de terre, par rapport à d'autres où le sol n'est plus modifié lorsque l'installation servant aux mesures a été mise en place.

.../...

A/- Méthodes les plus perturbantes

1°- Méthode gravimétrique

- méthode par dessiccation à l'étuve.

Elle est souvent utilisée comme méthode de référence. Elle consiste à peser un échantillon de terre humide, prélevé au lieu et à la profondeur convenables, à effectuer sa dessiccation à l'étuve à 105° et à déterminer la perte de poids correspondant à la valeur de l'humidité. Celle-ci est exprimée en grammes d'eau pour 100 grammes de terre séchée à 105°.

- méthode par dessiccation à l'alcool (HENIN et al, 1945).

Elle consiste à mélanger un poids déterminé de terre humide avec une certaine proportion d'alcool, et après combustion, à peser l'échantillon de terre séchée. Si le taux d'humidité est important, l'opération devra être renouvelée afin d'atteindre une dessiccation complète.

2°- Méthode picnométrique (complexe, rarement utilisée)

Elle consiste à placer un poids m de terre humide dans un picnomètre de poids p et de volume V que l'on achève de remplir avec de l'eau. Le poids total de l'ensemble P est fonction du taux d'humidité h de l'échantillon. Si D_r désigne la densité réelle du sol, h est donné par la formule :

$$h = 100 \left[m \frac{D_r (p-1)}{V - P} - 1 \right]$$

B/- Méthodes peu perturbantes

1°- Méthodes électriques

Elles consistent à mesurer la résistivité du sol en place au moyen d'électrodes préalablement placées, sachant que cette résistivité varie avec la teneur en eau.

Cette méthode présente l'inconvénient dû au fait que la résistivité du sol varie également avec la teneur en sels solubles. On peut aussi mesurer la différence du potentiel qui s'établit entre 2 électrodes mises en contact avec un sol humide.

2°- Méthodes tensionométriques

Elle est basée sur la mesure de la tension sous laquelle l'eau est retenue dans le sol. La tension augmente quand le taux d'humidité décroît et si un corps poreux est en contact intime avec le sol, il

.../...

acquiert un taux d'humidité lié au précédent. On peut donc, à l'aide d'un tensionnètre, mesurer la pression de succion du sol en place grâce à la réduction du volume d'air dû à l'eau absorbée par le corps poreux, placé dans le sol. On espère ainsi mesurer la pression de succion du sol lorsqu'il est à la capacité au champ et se libérer de la notion de pF variable (FEODOROFF, 1968 - déjà cité).

3°- Méthode nucléaire

On utilise le ralentissement des neutrons rapides émis par une source de Radium-Beryllium, ou actuellement d'Américium-Beryllium, placée dans le sol, par les noyaux d'hydrogène entrant dans la constitution de l'eau du sol. Cette méthode originale, récemment mise au point, prend de plus en plus d'extension dans les organismes s'occupant des problèmes de l'eau.

L'humidimètre à neutrons, actuellement mis au point (ANDRIEUX et al 1962, MAERTENS, 1965) est d'un coût relativement élevé, demande à être manipulé avec soin et exige un étalonnage minutieux. Cependant, une fois les tubes de mesure mis en place, il permet des mesures rapides et fréquentes de profils hydriques sans perturbation du sol.

C/- Comparaison des techniques précédemment décrites

Les méthodes que nous venons d'examiner présentent toutes des avantages et des inconvénients, les uns ou les autres devenant prépondérants selon la destination des résultats qu'elles fournissent. Dans le cas des bilans hydriques en agriculture, dont le but final est de guider les irrigations, il est nécessaire, à partir de sols typiques et pour des petites régions, de suivre rapidement et avec suffisamment de précision les mouvements d'eau dans le sol, soit les consommations par les cultures, soit les processus de réhumidification.

La connaissance de la valeur de l'humidité à la capacité au champ exige des mesures répétées dans le temps, à un même lieu, or dans certains sols du type boulbène où cette valeur de l'humidité est proche de la limite de liquidité, les prélèvements par carottage sont techniquement impraticables. Il faut alors procéder, soit au laboratoire sur échantillon remanié, soit au champ par une méthode non perturbante. Nous donnons comme exemple les résultats obtenus dans trois types de sols de la région Toulousaine.

.../...

Nature	Origine	Argile %	Humidité pondérale % de terre sèche			
			Capacité de rétention		Capacité au champ	
			Méthode FEODOROFF	à pF 3,0	Humidimètre à neutrons	pF cor- respondant
Alluvions profondes (argilo-limoneuse)	Villemur	26	21,0	22,2	23,0	≠ 3,0
Colluvions sur bouldiers (limono-argileuse)	Plaisance	18	19,4	15,3	18,2	2,8
Bouldier blanche (limoneuse)	Plaisance	2	17,0	14,7	17,5	2,7

Ces résultats montrent pour ces sols la concordance entre la méthode FEODOROFF et la capacité au champ mesurée sur le terrain par l'humidimètre à neutrons, par contre il est indispensable d'appliquer un pF variable suivant la texture si l'on veut s'approcher de cette valeur. (cf. résultats du graphique précédent p. 27).

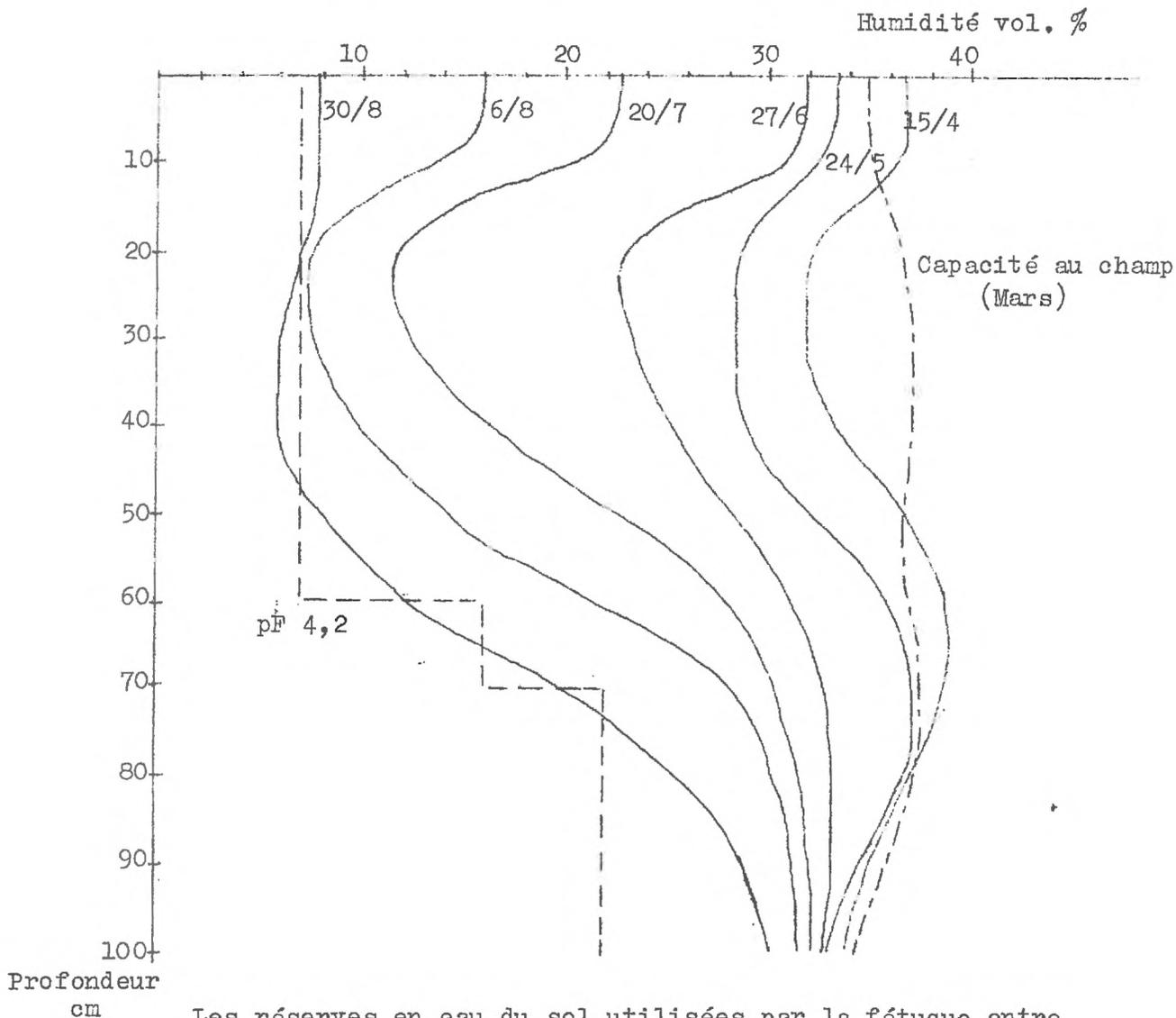
La technique nucléaire présente de nombreux avantages par rapport aux autres : possibilités de répétitions des mesures en un même lieu sans atteindre à l'intégrité du sol, manipulation rapide; de plus, le volume de sol intéressé par la sphère d'influence réduit les manifestations de micro-hétérogénéité du milieu et permet d'établir des profils hydriques continus.

Néanmoins, quelques difficultés sont liées à l'utilisation de l'humidimètre à neutrons : l'impossibilité de réaliser une mesure à un endroit précis (sphère d'influence), et de localiser la séparation entre deux milieux d'humidité différente, l'influence de l'eau libre (au-dessus de la capacité au champ) qui surestime la valeur de l'humidité. Enfin, son étalonnage nécessite la détermination de la densité apparente afin de transformer les humidités pondérales en humidités volumiques ou réciproquement.

..../...

Compte tenu de ces inconvénients, dont certains peuvent être corrigés, et qui sont largement compensés par l'obtention directe de l'humidité volumique, la précision de l'humidimètre à neutrons ($\pm 2\%$ d'erreur relative) est suffisante pour son utilisation agronomique.

Exemple de profils hydriques successifs obtenus à l'humidimètre à neutrons, montrant bien l'allure de la dessiccation du sol, sous une prairie de 3 ans non irriguée, entre le mois de mars et le mois d'août (boulbène profonde, année 1966). La capacité au champ a été déterminée expérimentalement in situ, le pF 4,2 a été estimé au laboratoire sur des prélèvements de terre en provenance des différents horizons du profil.-



Les réserves en eau du sol utilisées par la fétuque entre le mois de Mars et le mois d'août s'élèvent à 215 mm.

III - LE DRAINAGE

Le drainage est l'évacuation naturelle ou artificielle de l'eau en excès dans un sol. Le drainage naturel correspond à l'écoulement de l'eau occupant la macroporosité vers les parties profondes du sol. L'eau qui filtre ainsi à plus ou moins grande profondeur ne peut être utilisée par les végétaux, elle peut être considérée comme perdue à court terme pour une surface donnée, tout comme celle ayant ruisselé à la surface du sol. Toutefois, elle est qualifiée d'utile par l'hydrogéologue puisqu'elle contribue à alimenter les réservoirs naturels, dont la nappe phréatique. L'évaluation du drainage met en jeu différents facteurs qui sont parfois difficiles à préciser, ainsi il faut tenir compte de la pluviosité, de la perméabilité du sol, de la reconstitution des réserves hydriques du profil, de la consommation d'eau par évapotranspiration. Parmi les méthodes proposées dans le but d'estimer l'intensité du drainage, nous décrirons et comparerons la méthode par calcul de HENIN, et la méthode expérimentale directe de mesure de l'excédent climatique sur évapotranspiromètre.

1°- Indice de drainage calculé de HENIN

AUBERT et HENIN (1945) ont proposé une formule permettant de calculer la hauteur d'eau D (en mètres) qui s'infiltré en un an dans un sol donné, à partir des données climatiques et de la nature du sol:

$$D \text{ en mètres} = \frac{\gamma P^3}{1 + \gamma P^2}$$

ou P est la pluviométrie moyenne en mètres

γ un coefficient de continentalité dépendant de la température et donné par la formule

$$\gamma = \frac{1}{0,15 T - 0,13}$$

ou T est la température centigrade moyenne annuelle.

Pour tenir compte de la perméabilité du sol, il faut multiplier γ par un coefficient α dépendant de la nature du profil :

$\alpha = 0,5$ argile compacte

$\alpha = 1,0$ limons

$\alpha = 2,0$ sables

.../...

Dans la région Toulousaine l'indice de drainage varie dans des limites très larges, de 0,030 m pour les années à faible pluviosité (ex : 420 mm) à 0,250 m pour les années à forte pluviosité (ex : 977 mm). En moyenne, il se situe aux environs de 0,135 m en considérant $\alpha = 0,9$ pour l'ensemble des sols régionaux. Le choix de la valeur 0,9 pour α peut être considéré comme arbitraire, compte tenu des 2 grands types de sols de la région Toulousaine : boubènes limoneuses et terreforts argileux. Toutefois, bien que cet indice soit davantage adapté à l'étude des sols et à leur tendance évolutive (dans l'exemple choisi il démontre la possibilité d'un faible lessivage), il permet cependant d'avoir une estimation relativement correcte du drainage, ainsi qu'en témoigne la comparaison avec l'excédent climatique mesuré.

2°- Excédent climatique

A l'inverse du déficit climatique, l'excédent climatique correspond à la différence entre la pluviosité et l'E T P lorsque la pluie est supérieure à l'E T P.

Il est mesuré sur évapotranspiromètre , par période considérée :

$$\text{Excédent climatique mensuel (en mm)} = P \text{ mensuel (en mm)} - E T P \text{ mensuel (en mm)}$$

Pour la région Toulousaine si nous cumulons l'excédent climatique mensuel pour chaque cycle climatique, c'est-à-dire à partir du mois où la pluviosité devient supérieure à l'E T P, nous obtenons les résultats suivants (1)

..../...

(1)- PUECH, communication personnelle

Mois	Excédent climatique mensuel (mm)	Mois	Excédent climatique mensuel (mm)	Mois	Excédent climatique mensuel (mm)
Novembre 65	26	Octobre 66	86	Novembre 67	14
Décembre 65	176	Novembre 66	24	Décembre 67	36
Janvier 66	91	Décembre 66	105	Janvier 68	59
Février 66	18	Janvier 67	40	Février 68	95
				Mars 68	69
Excédent climatique par cycle (en mm)	311		255		273

Or, l'excédent climatique correspond à la quantité d'eau nécessaire pour assurer la reconstitution des réserves hydriques et à celles en excès constituant le drainage. Il faut donc retrancher à ces valeurs l'eau nécessaire pour reconstituer ces réserves, et d'après les résultats expérimentaux obtenus en culture sèche, on peut estimer en moyenne à 150 mm le déficit en eau des sols profonds à l'entrée de l'hiver (donnée variable en fonction de la demande climatique et du type de culture). Le drainage estimé d'après l'excédent climatique mesuré se situe alors aux environs de 160 mm pour 1965-66, de 105 mm pour 1966-67, de 123 mm pour 1967-68. Ces valeurs concordent en moyenne avec celles de l'indice de drainage calculé aux approximations près nécessitées par le choix du coefficient, des variations des températures moyennes annuelles, ou de l'estimation des réserves du sol à reconstituer.

DISCUSSION

Nous avons tenté de définir chacun des termes composant le bilan hydrique,

$$\text{Bilan hydrique} = P - D - E T R$$

et de décrire les différentes méthodes et techniques permettant de les mesurer.

Parmi celles-ci, il en est qui ne présentent pas de difficultés à leur détermination et la précision des résultats n'est limitée que par celle des instruments utilisés.

Ainsi, la pluviométrie P peut être connue facilement dans autant de points précis possédant un pluviomètre.

Par contre, la perméabilité α est fonction de nombreux facteurs liés au profil, à sa nature, aux qualités de la terre (défaut de mouillabilité ou de structure construite et stable (MONNIER 1965)), dans une certaine mesure aussi elle peut dépendre de la topographie.

L'estimation réelle du drainage D est difficilement accessible à l'échelle d'une petite surface, car il est souvent délicat de contrôler les quantités d'eau qui s'infiltrent et qui sont ensuite susceptibles de filtrer par rapport aux quantités de pluie reçues. Ces difficultés sont liées aux problèmes précédents et on peut y ajouter l'incidence de la couverture par la végétation, ainsi que les phénomènes météorologiques (pluies d'orage augmentant le ruissellement selon la topographie, vent, etc....).

Quant à la connaissance de l'E T P, si les formules en donnent une approximation suffisante à grande échelle pour caractériser la demande climatique d'une région, il n'en est pas de même lorsqu'on désire une estimation plus précise à plus petite échelle. En effet, l'obligation d'introduire dans ces formules les nombreux facteurs concernant la plante, le sol ou les caractères du micro-climat, nécessitent une augmentation

.../...

des expérimentations locales et compliquent les calculs. Il s'ensuit que la détermination expérimentale directe à partir d'évapotranspiromètres présente alors des avantages réels de précision et de commodité. Il faut aussi mesurer la valeur d'E T R des différentes cultures, celle-ci étant liée aux réserves utiles du sol et à l'intensité de la demande climatique.

Parmi les différentes méthodes de mesure de l'humidité du sol, nous avons montré que certaines étaient bien adaptées pour suivre l'évolution de l'humidité en profondeur sans modification importante du profil en place (tensiomètre, humidimètre à neutrons). Par contre, les techniques les plus simples et les moins coûteuses (carottage à la tarière) présentent généralement des insuffisances dans le cas des recherches plus précises sur les mouvements de l'eau.

Donc, certains facteurs restent encore indéterminés, soit par le défaut de précision des techniques utilisées, soit par un manque de connaissance des mécanismes particuliers mis en jeu, notamment dans les cas considérés à échelle réduite. C'est pourquoi dans un but de caractérisation globale du bilan, la détermination de certains des termes suppose, pour une première approche, un milieu bien défini présentant des qualités optimales; ceci nous a conduit à caractériser du point de vue statique quelques données climatiques et propriétés hydrodynamique des sols.

Pour lever l'indétermination qui pèse encore parmi les éléments dynamiques du bilan, de nombreux phénomènes doivent encore être analysés concernant les mouvements d'eau dans le sol et la plante.

Par exemple, il a pu être observé qu'une partie de la pluie peut être perdue par drainage avant que la capacité au champ de la totalité du profil soit atteinte. En effet, l'eau utilise les voies de circulation préférentielles créées par les racines et peut atteindre rapidement les horizons profonds avant que la totalité du sol soit réhumectée. Ce phénomène est très net dans le cas du maïs où la circulation et les consommations d'eau entre la ligne et l'interligne sont nettement différentes (COURAU et al, 1966). Cette observation soulève des problèmes de mesure de consommation de l'eau du sol, qui ont pu être éludés en semant le maïs en carré, mais qui seront plus difficiles à résoudre dans le cas des vergers. Par ailleurs,

.../...

sous prairie, la filtration de l'eau vers la profondeur peut s'établir avant la réhumectation totale des horizons superficiels (MARTY et COURAU, 1969), phénomène qui peut aussi se produire dans des sols argileux abondamment fissurés.

Si l'on considère l'utilisation des réserves hydriques du sol, des expériences ont prouvé qu'elles varient avec le développement des racines, en relation avec les techniques culturales (peuplement - répartitions) ou les façons culturales (semelles de labours) (HENIN et al, 1960-MERIAUX, 1963), ou encore avec les propriétés physiques plus ou moins favorables (instabilité de la structure, asphyxie des racines) (MARTY et MAERTENS, 1966), toutes ces conditions restant soumises à l'intensité de la demande climatique et à la valeur du "potentiel efficace" (HALLAIRE, BOUCHET, déjà cités).

Nous avons ainsi voulu montrer quelques aspects des difficultés rencontrées lorsqu'on désire cerner de plus près la valeur du bilan hydrique, notamment en ce qui concerne son interprétation et son utilisation à l'échelle de la petite région agricole.

Néanmoins, les différentes méthodes ou techniques employées pour caractériser ce bilan, du moins globalement, ont le mérite d'avoir prouvé leur efficacité vers une meilleure utilisation de l'eau, en dépit de quelques défauts ou incertitudes que la Recherche doit s'efforcer d'atténuer, notamment en ce qui concerne l'influence des micro-climats, des types de sols, de la nature des végétaux et des systèmes de cultures.

CONCLUSIONS

Dans les sols cultivés, une meilleure connaissance du régime d'approvisionnement en eau des plantes, des quantités d'eau exportées par évapotranspiration, ou perdues par drainage, nous permet donc de caractériser les périodes de déficit ou d'excédent hydrique. Dans la mesure où la rentabilité de la culture souffre du déséquilibre entre l'offre et la "demande", les agriculteurs doivent, soit assurer l'assainissement de leurs terres dans les périodes excédentaires, soit combler le déficit par des apports complémentaires ou tenter de réduire l'intensité de l'E T P (brise-vents) ou encore éviter les pertes d'eau par évaporation (DAMAGNEZ, 1959).

D'autre part, la possibilité d'effectuer le bilan hydrique de zones relativement restreintes, implique la caractérisation de quelques éléments importants du milieu naturel et permet ainsi d'estimer les vocations de petites régions agricoles ainsi que leur potentialité probable (LANGLET et VIARD, 1969). Ces données se révèlent indispensables lorsque se pose le choix des zones à aménager en vue de l'irrigation (DARVES-BORNOZ, et al, 1964).

Les études sur l'évapotranspiration maximale de quelques cultures, liées à l'E T P déterminée expérimentalement et pour de petites zones climatiques, compte tenu par ailleurs de la nature et du type de sol, fixent et règlent les modalités d'irrigation et permettent ainsi une progression vers une certaine maîtrise de l'eau.

Cependant, comme nous avons pu le constater au cours de ce travail, si de nombreux points sont actuellement acquis, il se révèle que de nombreuses imprécisions apparaissent au fur et à mesure que des travaux plus approfondis explorent le domaine de l'utilisation de l'eau par les plantes.

.../...

Par exemple, afin de résoudre au mieux les nombreux problèmes agronomiques soulevés par l'irrigation de sols différents, soumis à des micro-climats variés, il est nécessaire entre autre choses, de caractériser les valeurs d'E T M pour de nombreuses cultures annuelles. Ceci, aussi bien parmi les cultures d'été (maïs, sorgho), que pour les cultures d'hiver (blé, orge), qui risquent d'être soumises à des sécheresses précoces de printemps.

Il faudra enfin préciser le degré de dessèchement que l'on se fixe d'atteindre dans les différents sols avant de décider de combler le déficit et sans qu'il y ait de répercussion sur le rendement ou la qualité des récoltes (MAERTENS et al, 1967).

Actuellement, les possibilités d'irrigation sont offertes à des zones plus étendues grâce à des investissements parfois très lourds, par conséquent l'empirisme et l'improvisation ne sont plus possible en ce domaine si l'on désire rentabiliser au mieux cette technique par une augmentation du niveau des rendements, de la qualité des récoltes ou de l'échelonnement rationnel des productions. La détermination de bilans hydriques de plus en plus précis, nécessaires pour atteindre ces objectifs, exige donc des recherches sur le sol, sur les micro-climats, sur les conditions d'évapotranspiration (E T P, E T M, E T R).

Pour que les résultats issus des travaux récents concernant l'eau mais aussi les autres facteurs de production, fertilisation, variétés les mieux adaptées, travail du sol, etc.... débouchent rapidement sur une amélioration de la productivité agricole, il faut intensifier l'information rapide de l'agriculteur afin de lui permettre de bénéficier au maximum des données nouvelles.

En ce qui concerne l'eau, un système d'avertissement pour l'irrigation (PUECH et COMBRET, 1969), basé sur les bilans hydriques des différentes cultures pour les principaux types de sol et les climats locaux, compte tenu des incidences économiques, offre aux agriculteurs la possibilité d'utiliser au mieux des ressources en eau qui sont loin d'être illimitées.

- ANDRIEUX G., BUSCARLET L., GUITTON J., MERITE B., 1962 - Mesure en profondeur de la teneur en eau des sols par ralentissement des neutrons rapides. Radioisotopes soil. plant. Nutr. Stud. Inter. Atomic. Energy Agency - Vienne, 1962
- AUBERT G. et HENIN S., 1945 - Relation entre le drainage, la température et l'évolution des sols. C.R. Acad. Sciences - 220 - p. 230-2
- BALLIF J-L., FEODOROFF A., HENIN S., 1966 - Distribution des transferts d'eau à l'état liquide ou vapeur au cours du dessèchement d'un sol nu. C.R. Acad. Sciences - t 263 - p. 1958-1960
- BAVER L.D., 1956 - Soil Physics - 1 vol. 3 d - Edition John WILEY
New York
- BERNARD E.A., 1956 - Le déterminisme de l'évaporation dans la nature. Etude des aspects géophysique et écologique du problème dans le cadre du bilan énergétique - Série scientifique n° 68 - Publications de l'I.N.E.A.C. (1 volume 162 pages - 80 références bibliographiques).
- BONNEAU, 1961 - Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture - n° spécial - Bull. de l'A.F.E.S.
p. 16-26
- BOUCHET R.J., 1960 - Evapotranspiration potentielle d'un couvert : sa signification et sa mesure à partir de l'évaporation sous abri. C.R. Acad. Sciences, 12 p. 1231
- BOUCHET R.J., 1961 - Signification et portée agronomique de l'évapotranspiration potentielle - Ann. Agr. 12 (1) - p. 51-63
- BOUCHET R.J., 1963 - Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole - Ann. Agron., 1963 - 14 (5) - p. 443-824
- BOUCHET R.J., 1965 - Rendement des cultures et déficit en eau
B.T.I., n° 201 - p.539-551
- BOURRIER J., 1963 - Considérations sur la mesure de l'humidité du sol pour la conduite des irrigations - Bulletin Techn. du Génie Rural - n° 63, Edité par le C.R.E.G.R. en Oct. 1963 - 24 pages
- BRIGGS et SHANTZ - Journr. of Agric. Res. - 1914-1915 - T. III - p.1
(cité par HENIN, 1936)
- BUCKINGHAM E., 1907 - Studies on the movement of soil moisture - U.S.
Dept of Agr. Bur. of soils - Bull 38.
- CHAPTAL L., 1944 - Sur un mode de détermination des périodes de sécheresse et des périodes d'humidité - Ann. Agron. p.443-453

- COLLIS-GEORGE N., HENIN S., KELLY J.A., 1963 - Etude du mécanisme de la dessiccation des sols par évaporation - C.R. Acad. Sci. t 273, p.242-244
- COURAU M., PUECH J., FIORAMONTI S., MAERTENS C., 1966 - Observations sur la consommation de l'eau et la production du maïs en culture sèche et irriguée- Bull. A.F.E.S., février - p. 44-59
- DAMAGNEZ J., 1959 - Rôle du mulch naturel ou artificiel sur la dynamique et l'économie de l'eau dans le Languedoc Méditerranéen - C.R. Acad. Agric. 11/2
- DAMAGNEZ J., 1967 - Quelques aspects de la production de matière sèche des cultures irriguées en zone méditerranéenne aride - A.I.E.A. Symposium on the use of radioisotopes and radiation. Techniques in soil physics and irrigation studies. Istanbul - 12-16 Juin 1967
- DARLOT A., 1961 - Le problème des irrigations de complément, perspectives de développement, incidence sur l'aménagement des eaux, nécessité et objectifs d'une expérimentation. Ann. Agr. 1961 - 12 (1) - p. 5-11
- DARVES-BORNOZ, LECARPENTIER, BESANVAL, 1964 - Etude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation du Bassin Aquitain - Génie Rural Services de l'Hydraulique - Paris
- DEHERAIN, 1892 - Chimie Agricole - Editeur Masson, Paris (cité par HENIN, 1936)
- L'Eau et la Production Végétale, 1964 - I.N.R.A. Paris, 1 volume 455 pages - 16 articles.
- FEODOROFF A., 1961 - Capacité de rétention pour l'eau et structure du sol - C.R. Acad. Sc. 252, 4 p. 591-595
- FEODOROFF A., 1962 - Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau Ann. Agr. 1962 - 13 (6) - 523-547
- FEODOROFF A. et BETREMIEUX R., 1964 - Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ - C.R. 8ème Congrès Int. Ac. Sol. Vol II, p.387-396
- FEODOROFF A., 1965 - Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante - Thèse Paris.
- FEODOROFF A., et J-L.BALLIEF -(avec la collaboration de P.GAY, J-P. TOURNIER et P. MANTION) 1968 - La tension de l'eau à la capacité de rétention - Note provisoire à diffusion restreinte - Laboratoire des sols - I.N.R.A. Versailles.

- GARDNER R., 1955 - Relation of temperature to moisture tension of soil
Soil Ac. T. 79, n° 4, p. 257-265
- GARDNER W., 1920 - The capillary potential and its relation to soil
moisture constant - Soil Sc. 10, p. 103-126
- GESLIN H., 1937 - Climat et rendement du blé dans la région parisienne -
C.R. Acad. Agr. 23, 1937 - p. 146-152
- GODARD M., 1937 - Influences des facteurs climatiques sur la croissance de
la betterave sucrière - Ann. Agro., p. 696-727
- GODARD M., 1944 - Le climat de la plante- Ann. Agr. p. 200-211.
- GODARD M., 1944 - Densité de peuplement et radiation solaire dans la
culture de la betterave sucrière - C.R. Acad. Agric. p.155-159
- GUIBERT M., 1968 - Le Nord a soif ("2000" - Revue de l'aménagement du
territoire et du développement régional - n° 7- Mars, 1968
- HALLAIRE M., 1953 - Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et réparti-
tion de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés -
Ann. Agr. Mars-Avril 1953 - p. 143-244
- HALLAIRE M., 1956 - Les réserves en eau du sol et leur utilisation -
Bull. Tech. Inf. Ing. Serv. Agr. 113 - p. 545-556
- HALLAIRE M., HENIN S., 1958 - Dessèchement du sol et évolution des
profils hydriques - C.R. Acad. Sci. t 246 - p. 2151-2153
- HALLAIRE M., 1960 - Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de
la disponibilité de l'eau pour la végétation - Ann. Physiologie
Vég. (2); p. 119-130
- HALLAIRE M., 1963 - Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime
de dessèchement - L'eau et la production végétale - p. 27-62
- HALLAIRE M. et BOUCHET R.J., 1965 - La recherche des techniques nouvelles
pour la mesure des évapotranspirations potentielle et réelle.
C.R. Acad. Agric. - p. 1023-1026
- HENIN S., 1936 - Idées actuelles sur l'eau du sol et ses rapports avec
la plante - Ann. Agron. n° 5, p. 723-741
- HENIN S., BANCAL A., GLAISSE G. et RIQUIER J., 1945 - Méthode simple
pour la détermination de l'humidité du sol - C.R. Acad.
Agr. N° 8, p. 412
- HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960 - Le profil cultural-
Principes de physique du sol - Editions S.E.I.A. Paris- 320 p.
- HENIN S., MONNIER G., 1961 - Mécanisme de l'action d'une couverture sur
le bilan de l'eau du sol - C.R. Acad. Sciences 252- p.939-941

- HENIN S., 1965 - Le cycle de l'eau et l'irrigation - B.T.I. n° 20I - p. 535-538
- HUGUET C., 1961 - Essais d'évaluation des besoins en eau des cultures maraîchères sous climat méditerranéen - Ann. Agr. 1961 - 12 (1) - p. 99-107
- KUIPERS H., 1961 - Water contact at pF 2 as a characteristic in soil cultivation research in the Netherland. Neth. J. Agric. Sci. 9, 27-35
- LANGLET A. et VIARD R., 1968 - Caractères du milieu naturel et vocations des principales zones agricoles de la région Midi-Pyrénées. I.N.R.A. Station d'Agronomie de Toulouse.
- MAERTENS C., 1964 - Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. Sc. du Sol. n° 2
- MAERTENS C., MORIZET J. et STUDER R., 1965 - Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons - Ann. Agr. 1965 - 16 (1) - p.5-23
- MAERTENS C., FIORAMONTI S., COURAU M., PUECH J. - 1966 - Modalités d'utilisation de l'eau du sol par le maïs. Examen de la notion de réserve utilisable - C.R. Acad. Agr. p. 1538-1348
- MANZONI et PUPPO, 1934 - Sur la transpiration du blé en fonction des facteurs du climat - C.R. Acad. Sc. 198, p.1066
- MARTY J-R., MAERTENS C., 1966 - Répercussions du tassement excessif d'un sol mal structuré sur la croissance et la production d'une culture irriguée de maïs - C.R. Ac. Agr. Fr. - p. 1348-1356
- MARTY J-R. et COURAU M., 1969 - Influence du système de culture sur l'écoulement de l'eau dans un sol mal structuré - en cours de publication.
- MATHIEU G., 1932 - Contribution à l'étude de quelques rapports entre l'eau, le sol et la plante - Thèse Clermont-Ferrand.
- MERIAUX S., et PERREY C., 1961 - Observations sur l'irrigation du dactyle en sol de réserves hydriques moyennes - Ann. Agr. 1961 - 12 (1) - p.81-86
- MERIAUX S., 1963 - Données sur l'irrigation des prairies temporaires sub-humide. C.R. Acad. Agr. p. 124-131
- MOREL R. et RICHER A., 1953 - Etude des profils hydriques sous différentes cultures dans un sol de limon - Ann. Agr. 1953 - p.687-715
- PARCEVAUX S. de, 1963 - Transpiration végétale et production de matière sèche - Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu- "L'eau et la production végétale" - I.N.R.A.

- PERIGAUD S., 1961 - Problèmes posés par le drainage et l'irrigation des sols de Brenne - Ann. Agr. 1961, 12 (1) - 145-155
- PERIGAUD S., 1963 - Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne - Thèse
- PUECH J., 1967 - Estimation de l'E.T.P. dans des micro-climats provoqués par diverses expositions au vent - C.R. Acad. Agr. T.53, p.134-141
- PUECH J., 1968 - Premiers résultats concernant une étude expérimentale de l'évapotranspiration potentielle dans la région toulousaine et le rôle des brise-vents - Plante - Sol - Climat et Irrigation I.N.R.A., 1968 -(1-22)
- PUECH J., MAERTENS C., FIORAMONTI S., MARTY J-R. et COURAU M., 1968 - Comparaison des consommations d'eau et des productions de matière sèche de quelques cultures irriguées - Ann. Agro.19 (3) p.365-377
- PUECH J., COMBRET M., 1969 - Contraintes du milieu et besoins en eau des cultures - Application à des avertissements "Irrigation". En cours de publication au B.T.I.
- PUECH J., HERNANDEZ M., 1969 - Capacité de cession de l'eau des sols et essai d'interprétation des débits par les lois capillaires - En cours de publication aux Ann. Agron.
- ROBELIN M., 1960 - La transpiration des plantes - Bull. de l'A.F.E.S. p.320-326
- ROBELIN M., 1960 - Le bilan de l'eau sous climat Limagnais et ses répercussions agronomiques -Bull.A.F.E.S., n° 8- p.393-401
- ROBELIN M., 1962 - Evapotranspiration réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évaporation potentielle - Détermination expérimentale - Ann. Agro. 1962, 13(6)- p.493-522
- ROBELIN M., 1963 - Contribution à l'étude du comportement du maïs grain vis à vis de la sécheresse - Irrigation - Journées Internationales 1963 - p.69-76 - A.G.P.M. Pau
- RODE A.A., 1960 - Méthodes d'études du régime hydrique des sols Ed. Ac. Sc. U.R.S.S. - M.C.
- RODE A.A., 1965 - Les fondements de la connaissance sur l'eau du sol - 1 vol. Leningrad.
- REISS L.A., 1939 - Essai de détermination des quantités d'eau nécessaires aux champs cultivés en se basant sur les données météorologiques- Ann. Agro. Tome IX - p. 810-816
- SOUBIES L., GADET R., et MAURY P., 1960 - Le climat de la région toulousaine et son influence sur les récoltes de blé et de maïs - C.R. Acad. Agr. 1960 - p. 185-195
- STUDER R., 1961 - Méthodes de détermination des réserves hydriques des sols. Ann. Agr. 1961 - 12 (6) - p. 599-608
- TURC L., 1954 - Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agr. IV 1954 - p. 491-595 Partie 1.

- TURC L., 1955 - Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement - Ann. Agr. 1 - 1955 - p. 5- 131 - Partie 2
- TURC L., 1961 - Evaluation des besoins en eau d'irrigation - Evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise au jour -- Ann. Agr. 1961 - 12 (1) - p. 13-49
- VIEHMEYER F.O. and HENDRICKSON A.H., 1931 - The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. Soil Sc. 32 p. 181-193
- WARING R.H, HERMANN R.K., 1966 - L'évaporomètre modifié du type PICHE Ecology - vol. 47 - n° 2 - p. 308-310