

## Estimation du "régime hydrique" des sols au moyen des données climatiques

### La méthode graphique : son utilisation dans le cadre de la Taxonomie américaine des sols\*

Paul BILLAUX

*Pédologue de l'ORSTOM  
ACSAD, B.P. 2440, Damas, Syrie*

#### RÉSUMÉ

Dans la Taxonomie américaine des sols, le « régime hydrique » est un caractère diagnostique important qui peut intervenir dès le niveau le plus élevé. Les régimes hydriques des sols y sont définis par des critères portant sur la durée de périodes « sèches » et « humides » d'une « section de contrôle » et sur certaines données relatives à la température du sol.

Cependant, dans beaucoup de régions du globe, on manque de données sur l'évolution de l'humidité (et de la température) du sol au cours du cycle des saisons. Aussi est-on amené, lorsqu'on doit utiliser le système américain, à se contenter d'une estimation du « régime hydrique », obtenue à partir des données climatologiques.

Les diverses méthodes existantes sont basées sur l'interprétation des bilans hydriques mensuels, évalués à partir de la pluviométrie et de l'évapotranspiration.

Une difficulté notable vient du fait qu'il est malaisé d'obtenir par calcul des valeurs précises de l'évapotranspiration réelle. Les diverses formules théoriques donnent une évapotranspiration potentielle qui ne correspond pas aux conditions naturelles.

*Il existe d'autres causes d'imprécision : passer de données météorologiques moyennes à l'état de l'humidité du sol à une date donnée est une opération soumise à de nombreux facteurs d'incertitude, à cause des conditions particulières de sol, de climat et de végétation.*

*Certaines méthodes d'estimation du « régime hydrique » appliquent à l'ETp des facteurs correctifs basés sur des corrélations trouvées expérimentalement ; les calculs sont alors complexes. La méthode exposée ici s'en tient à des calculs simples, qui sont interprétés graphiquement ; ses résultats sont analogues à ceux de méthodes plus élaborées.*

*Les estimations ainsi obtenues sont utiles : en première approximation elles permettent d'utiliser la Taxonomie américaine. Il faut néanmoins les interpréter avec prudence, sans vouloir en tirer des conclusions précises sur le régime hydrique réel des sols.*

*Les méthodes d'estimation doivent être considérées comme une solution provisoire ; elles ne devraient pas faire oublier l'importance et la nécessité de l'étude directe, sur le terrain, du régime hydrique.*

\* Etude réalisée au Centre arabe pour l'étude des zones arides et des terres sèches.

## ABSTRACT

*In the American Soil Taxonomy, the "soil moisture regime" is an important diagnostic characteristic, used at high levels of classification. The soil moisture regimes are defined by the length of periods during which a "control section" is "moist" or "dry", and by some soil temperature conditions.*

*However, in extensive parts of the world, the lack of data about the annual evolution of soil moisture and temperature is very frequent. It is then necessary, in many countries, to merely use an estimation of the "soil moisture regime" in order to achieve the classification of the soils according to Soil Taxonomy.*

*Such an estimation can be obtained from meteorological data. The few available methods are based on interpretation of the monthly water balance, which is calculated from rainfall and evapotranspiration values.*

*The main difficulty comes from the evapotranspiration, because it is not simple to obtain by calculation reliable values of the actual evapotranspiration. The various formulae give potential evapotranspiration values that does not fit with the natural conditions in the field.*

*Other difficulties are pointed out in this paper. To translate average meteorological data into soil moisture conditions at given dates is a tricky operation, the results of which are made somehow doubtful on account of the actual characteristics of soil, climate and vegetation.*

*Some methods of estimation of the moisture regime apply corrective factors to amend the values of potential evapotranspiration, thus improving the results but multiplying calculations. The method followed in this paper uses only simple calculations and graphic interpretation; nevertheless, it gives results similar to those of more sophisticated methods.*

*Estimations obtained that way are useful; they make possible classification of soils according to the Soil Taxonomy, as a first approximation. However, one must not give them too precise meaning as regards the actual moisture regime of the soil.*

*The estimation methods are only a transitory solution. One ought not to forget, on account of such methods, the importance and the necessity of actual measurements of the soil moisture regimes.*

## SOMMAIRE

Introduction.

- I. Les définitions de Soil Taxonomy.
- II. Estimation des phases annuelles du bilan hydrique du sol.
  1. Les données de base concernant le climat et le sol.
  2. Exemple 1 : (P-ETp) supérieur à AWC.
- III. Estimation des périodes d'humidité et de sécheresse de la section de contrôle.
  1. Principes d'interprétation.
  2. Application à l'exemple 1.
  3. Exemple 2 : (P-ETp) inférieur à AWC mais supérieur à 75 mm.
  4. Exemple 3 : (P-ETp) inférieur à AWC et inférieur à 75 mm. Influence de la répartition des pluies.
  5. Exemple 4 : (P-ETp) inférieur à AWC et très inférieur à 75 mm.
  6. Cas particuliers.
- IV. Méthode graphique d'estimation des « régimes hydriques ».
- V. Observations critiques et conclusions.

Bibliographie.

## INTRODUCTION

Pour utiliser la Taxonomie américaine des sols (1975)\*, il est indispensable de connaître le « régime hydrique » des sols. Cette propriété diagnostique intervient à divers niveaux, de l'ordre au sous-groupe, dans la définition de la majorité des taxons, à l'exception des Vertisols.

Les régimes hydriques, dans le cas de sols sans nappe phréatique, sont définis dans le système américain par la durée des périodes annuelles pendant lesquelles une « section de contrôle » est humide ou sèche, sous certaines conditions de température du sol.

Malheureusement, dans de nombreuses régions, on ne dispose pas des mesures d'humidité du sol qui permettraient de déterminer ces régimes avec précision. Aussi est-on amené à utiliser des méthodes d'estimation basées sur les données climatologiques.

On expose ici, à l'aide d'exemples, une méthode graphique d'estimation, relativement simple, dont les résultats sont analogues à ceux donnés par des méthodes plus complexes utilisant le calcul par ordinateur.

\* L'ouvrage américain sera désigné, dans le texte qui suit, par : « Soil Taxonomy » ou « S.T. ».

## I. LES DÉFINITIONS DE « SOIL TAXONOMY »

### Section de contrôle

La limite supérieure de la « section de contrôle » à l'intérieur du profil est la profondeur à laquelle un sol « sec » (tension supérieure à 15 bars mais dessiccation n'atteignant pas celle d'un sol séché à l'air) est humidifié par un apport de 25 mm d'eau en 24 heures. Sa limite inférieure est la profondeur à laquelle un sol sec (mêmes conditions) est humidifié par un apport de 75 mm d'eau en 48 heures. Les profondeurs atteintes ne tiennent pas compte de l'humidification le long de fentes ou de galeries d'animaux.

La profondeur de ces limites et par conséquent l'épaisseur de la section de contrôle dépendent des caractéristiques hydriques de chaque sol, en particulier de sa capacité de rétention pour l'eau, compte tenu, le cas échéant, de la présence d'éléments grossiers. Elles dépendent aussi des caractères physiques (structure, porosité, ...) qui conditionnent les mouvements de l'eau dans le sol.

Si la pénétration dans un pédon donné est irrégulière, on prend la moyenne des profondeurs atteintes.

### Cas des sols à profondeur limitée

Lorsque l'humidification par 75 mm d'eau atteint une roche ou un horizon induré qui limite la profondeur du sol, la limite inférieure de la section de contrôle est constituée par la limite supérieure de cette roche ou de cet horizon induré.

Si 25 mm d'eau humidifient le sol jusqu'à la roche ou à l'horizon induré, la section de contrôle est constituée par la limite supérieure du matériau dur : elle est « humide » si cette limite supérieure porte une mince pellicule d'eau ; elle est « sèche » si cette limite supérieure est sèche.

### Humidité et sécheresse

Le sol est « humide » s'il contient de l'eau à une tension inférieure à 15 bars (ou  $pF = 4,2$ ), c'est-à-dire de l'eau « utilisable ». Cela implique que la teneur en eau du sol « humide » peut varier largement, entre la saturation et le point de flétrissement permanent (sans atteindre ce dernier).

Le sol est « sec » s'il ne contient que de l'eau à une tension supérieure ou égale à 15 bars.

L'influence de la salinité sur la possibilité d'utilisation de l'eau par les plantes n'est pas prise en considération.

La section de contrôle peut être « humide partout » (c'est-à-dire sur toute son épaisseur) ou « sèche partout » ou partiellement humide. Dans ce dernier cas, Soil Taxonomy utilise des expressions différentes selon que l'accent est mis sur l'humidité ou sur la sécheresse : soit « humide en certaines parties », soit « sèche en certaines parties »\*.

La durée des périodes sèches et humides peut être mesurée en jours consécutifs ou en jours cumulés. Elle peut être en outre évaluée en fonction de certains niveaux (5 °C ; 8 °C) de la température du sol à 50 cm de profondeur.

Par ailleurs, il existe des conditions générales portant sur :

— la proportion des années durant lesquelles les conditions d'humidité et de sécheresse de la section de contrôle doivent être respectées ;

— la température du sol : moyenne annuelle et différence entre les moyennes d'été et d'hiver à 50 cm de profondeur.

Les définitions de certains régimes hydriques (cf. Soil Taxonomy, pages 54 à 57) sont schématisées de façon comparative dans la figure 1.

On se limitera dans cette note à quelques régimes hydriques fréquents dans les régions méditerranéennes et arides, spécialement aux régimes « xérique » et « aridique ».

### Restriction d'application

La définition des régimes hydriques ne s'applique qu'à des sols soumis aux conditions naturelles d'humidification, c'est-à-dire ni irrigués ni traités en jachère cultivée pour augmenter le stock d'eau.

Par ailleurs, le concept de « section de contrôle » ne s'applique pas bien aux sols qui reçoivent des eaux de ruissellement à partir d'un amont, ni aux sols à argile gonflante qui sont fortement fissurés pendant une saison sèche.

\* Leur signification étant identique, nous n'utiliserons dans le texte qui suit que la première de ces deux expressions.

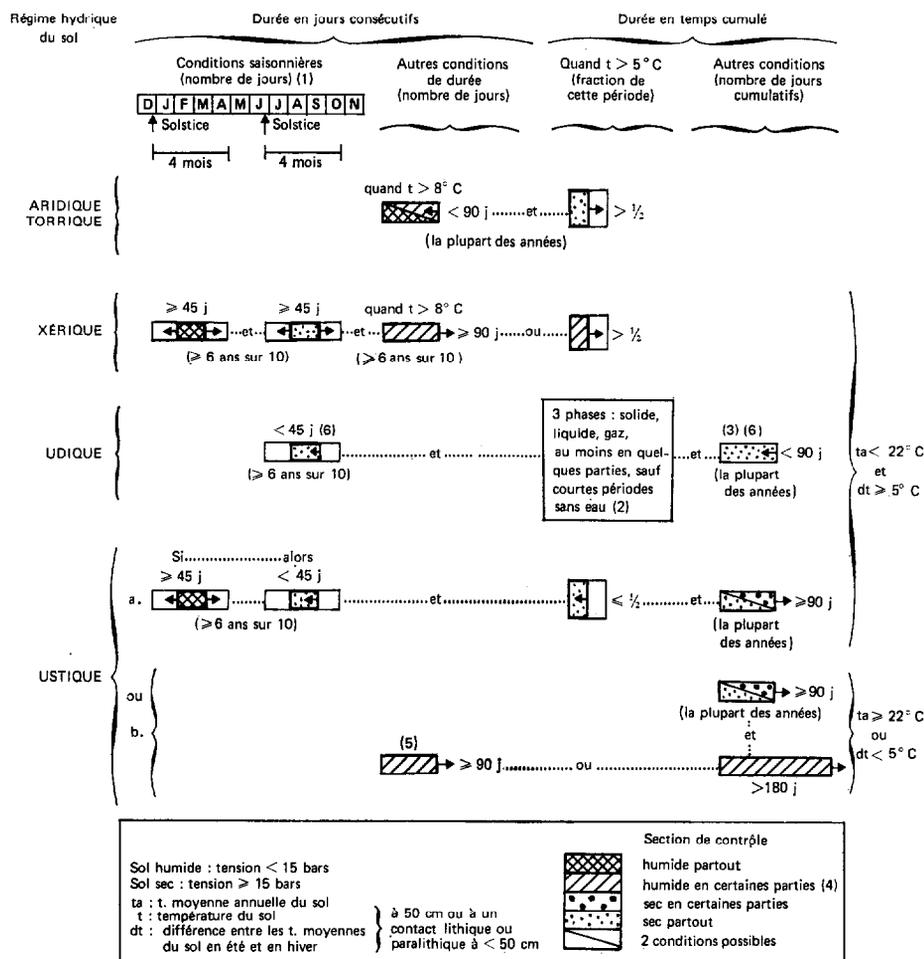


FIG. 1. — Durée des périodes sèches et humides de la section de contrôle pour quelques régimes hydriques (d'après le texte de Soil Taxonomy).

- (1) Les périodes indiquées sont situées dans les 4 mois qui suivent les solstices.
- (2) La condition de temps cumulé ne s'applique pas à ce critère.
- (3) Les conditions pour  $t_a$  et  $dt$  ne s'appliquent pas à ce critère.
- (4) Ce critère signifie, en fait, que la section de contrôle peut être humide partout ou en certaines parties pendant la durée des périodes indiquées.
- (5) Pas de condition de température du sol pour ce critère.
- (6) Le texte anglais est : « ... not dry in any part for as long as 90 days (cumulative). » et : « ... not dry in all parts for as long as 45 consecutive days... ».

N.B. Pour certains critères la proportion des années n'est pas indiquée.

## Mesure et estimation

Les périodes d'humidité et de sécheresse de la section de contrôle devraient normalement être déterminées par des mesures au champ. Les périodes indiquées par Soil Taxonomy correspondent d'ail-

leurs à des observations et mesures faites sur de nombreuses séries de sols des U.S.A. Cependant, la Taxonomie américaine a été et sera encore utilisée dans des pays qui disposent de peu de données mesurées sur les régimes hydriques. A leur intention, Soil Taxonomy (cf. pages 52 et 53 de l'ouvrage

américain) indique deux méthodes d'estimation, basées toutes deux sur les données climatiques et utilisant en partie les principes de la méthode d'évaluation des indices bioclimatiques de Thornthwaite (1948).

La première est une méthode graphique sommaire, dont la représentation figure à côté de la description des pédon dans Soil Taxonomy. La seconde demande un calcul par ordinateur, au moyen d'un programme basé sur un modèle théorique des variations de l'humidité du sol.

C'est la méthode graphique qui est ici décrite et commentée à l'aide de quelques exemples. On essaie en outre de préciser les renseignements qu'elle donne en interprétant ses résultats en fonction des critères particuliers de Soil Taxonomy, c'est-à-dire la « section de contrôle » et ses périodes « humides » et « sèches ».

Les exemples cités sont tirés de données sur les sols et les climats du Maroc (Massoni, 1967 ; Ionesco, 1967).

## II. ESTIMATION DES PHASES ANNUELLES DU BILAN HYDRIQUE DU SOL

### II.1. Les données de base concernant le climat et le sol

La méthode utilise les données suivantes :

- Pluviométrie moyenne mensuelle : P.
- Température moyenne mensuelle de l'air : T.
- Evapotranspiration potentielle moyenne mensuelle : ETp.

Soil Taxonomy utilise l'ETp calculée par la méthode de Thornthwaite (fonction de la température moyenne mensuelle et de la latitude) ; cette méthode sera conservée ici, malgré les critiques dont elle peut être l'objet, pour faciliter la comparaison avec les graphes présentés dans l'ouvrage américain.

— Capacité de rétention en eau « utilisable » du sol : AWC.

Cette donnée est calculée dans Soil Taxonomy à partir des teneurs en eau mesurées au laboratoire aux tensions de 1/3 et 15 bars. Par ailleurs, alors que la méthode de Thornthwaite limite l'AWC à 100 mm, les graphes présentés par Soil Taxonomy tiennent compte de l'AWC réelle des sols profonds. On suivra ici la façon de faire de l'ouvrage américain.

### REMARQUES

— Le symbole AW, « available water », sera employé dans ce texte pour désigner l'« eau utilisable » ; de même le symbole AWC désignera la « capacité en eau utilisable », équivalente à la « réserve utile » des auteurs français. Plus précisément, AWC désignera la capacité en eau utilisable du sol sur toute l'épaisseur de son profil.

— P, ETp et AWC sont exprimées en millimètres d'eau.

### II.2. Exemple I : cas où (P-ETp) cumulé est supérieur à AWC

Les données sont celles de la station climatologique de Beni Mellal et du profil n° 7 (Massoni, 1967). Il s'agit d'un sol profond ayant une AWC de 139 mm (tabl. II).

Le tableau I donne les valeurs mensuelles de P, de l'ETp calculée et de la différence (P-ETp) qui représente l'eau non évapotranspirée à la fin de chaque mois.

Le même tableau donne aussi (ligne 8) l'eau stockée dans le sol à la fin de chaque mois, qui est égale d'abord (à partir de novembre) à la valeur cumulative de (P-ETp), puis limitée dans le cas de cet exemple par la capacité de rétention en eau du sol, et qui diminue lorsque (P-ETp) devient négatif.

Par hypothèse, de même que dans la méthode d'évaluation des indices de Thornthwaite, on suppose que le sol ne se dessèche jamais au-delà du point de flétrissement permanent (tension de 15 bars). L'eau stockée dans le sol après les pluies est, dans cette hypothèse, de l'eau utilisable (AW) et le maximum d'eau stockée est égal à la capacité du sol en eau utilisable (AWC) qui est ici 139 mm. L'excès d'eau par rapport à AWC est supposé être évacué par le drainage.

Sur un graphique (fig. 2), on représente les valeurs mensuelles de P et de ETp ainsi que la courbe de variation de l'eau stockée dans le sol à la fin de chaque mois (courbe A). On en déduit diverses phases d'humidité du sol, correspondant à l'évolution théorique du bilan hydrique, de la façon suivante.

a. Après la saison sèche, lorsque P devient supérieure à ETp, le sol (supposé initialement au point de flétrissement permanent) retient de l'eau jusqu'à concurrence de sa capacité en eau utilisable

TABLEAU I

Données climatiques et calcul de l'eau utilisable  
Station climatologique de Beni Mellal. Profil n° 7. AWC = 139 mm

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1. T air ..... °C	11,5	12,5	14,8	17	21,1	24,8	28,8	29,3	25,5	20,9	15,1	12,0	19,2
2. t sol à 50 cm (estimée) .. °C	←	13,2	→				←	27,2	→				20,2
3. P ..... mm	53	66	89	68	43	16	1	4	18	51	82	76	568
4. P, jours par mois ....	5	6	8	7	4	2	1	1	2	5	6	8	55
5. ETp (Thornthwaite) .. mm	20	23	40	56	95	140	185	180	129	78	35	22	1003
6. (P-ETp) mensuel ..... mm	33	43	49	12	-52	-124	-184	-176	-111	-27	47	54	
7. (P-ETp) cumulé ..... mm	134	177	226	238	186	62	0	0	0	0	47	101	
8. Eau stockée à la fin du mois* ..... mm	134	139	139	139	87	-33	0	0	0	0	47	101	

\* Eau utilisable (AW) selon l'hypothèse de Thornthwaite.

TABLEAU II

Profil n° 7 ; Tadla. Calcul de la capacité en eau utilisable (AWC)

Profondeur (cm)	t. fine < 2 mm (% poids)	D apparente au champ	H <sub>2</sub> O t.f. % poids			AWC du sol		
			1/3 bars	15 bars	AWC	%* volume	mm	mm cumulés
0 - 30 ....	99	1,29	16,6	13,2	3,4	4,3	13	13
30 - 65 ....	98	1,55	23,1	13,8	9,3	14,1	49	62
65 - 85 ....	72	(1,4)	20,2	12,9	7,3	7,3	15	77
85 - 130 ....	72	1,43	19,6	11,4	8,2	8,4	38	115
130 - 155 ....	81	—	—	—	8,2	9,5	24	139

\* AWC sol % volume = AWC t.f. % poids  $\times \frac{\% \text{ t.f.}}{100} \times D$  apparente sol (l'AW des fractions > 2 mm est supposée négligeable).

(AWC = 139 mm). C'est la *phase de recharge* : R. La fin de cette phase est estimée au moyen de la courbe A de variation du stock d'eau utilisable dans le sol : la date à laquelle cette courbe atteint 139 mm indique la fin de la phase R.

b. Après cette date, l'eau en excès par rapport à AWC percole à travers le profil et le stock d'eau utilisable reste constant et à son maximum : c'est la *phase de surplus* : S, qui dure tant que P reste supérieure à ETp.

c. Lorsque P devient inférieure à ETp, l'eau utilisable du sol est évapotranspirée : c'est la *phase d'utilisation* : U, qui dure jusqu'à ce que toute l'eau « utilisable » soit éliminée (les volumes d'eau en R et en U sont les mêmes). La date de la fin de la phase U est indiquée par l'intersection de la courbe A avec la ligne des abscisses.

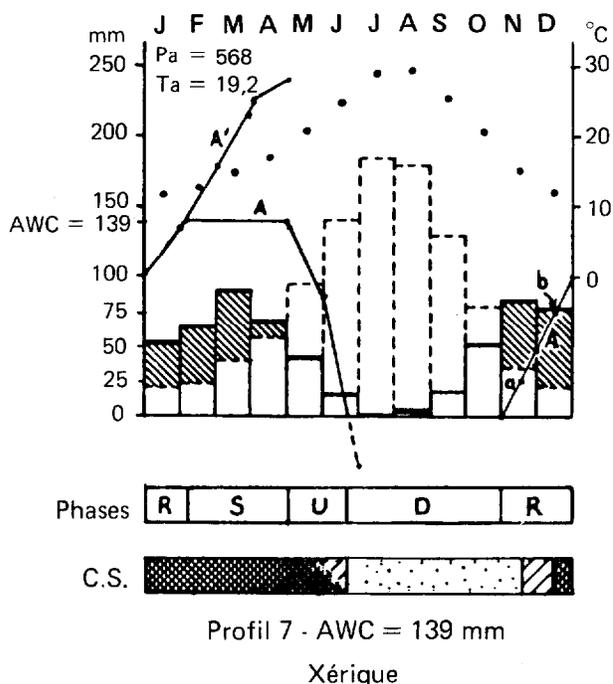
d. Vient ensuite la *phase de déficit* : D, qui se termine quand P devient supérieure à ETp.

Ce sont ces diverses phases R, S, U, D, utilisées dans la méthode des indices de Thornthwaite, qui sont portées sur les graphes joints à la description des pédon dans Soil Taxonomy (Appendice IV).

La phase de surplus S n'existe que si la quantité d'eau disponible, c'est-à-dire (P-ETp) cumulé, devient supérieure à l'AWC du sol (fig. 2 : branche A' de la courbe A), quelle que soit par ailleurs la valeur de cette AWC qui peut être faible ou forte.

Ces phases concernent l'évolution hydrique *du sol dans tout son profil* et non dans la section de contrôle définie par Soil Taxonomy. Il faut donc aller plus loin et essayer d'interpréter les données climatiques en fonction des périodes « humides »

Beni Mellal



LÉGENDE DES FIGURES : 2, 3, 4, 6, 7, 8

- • • Température moyenne mensuelle (T)
- Pa, Ta Pluie et température moyennes annuelles
- ☐ Pluies moyennes mensuelles (P)
- ☐ Évapotranspiration moyenne mensuelle calculée (ETp)
- ▨ P > ETp
- A' / (P - ETp) > AWC
- A / Eau stockée dans le sol à la fin de chaque mois (AW dans l'hypothèse de Thornthwaite)

PHASES DU PROFIL

- R : recharge      U : utilisation
- S : surplus      D : déficit

SECTION DE CONTROLE (C.S.)

- ▨ humide partout
- ▨ humide en certaines parties
- ☐ sec partout

et « sèches » de cette section de contrôle, de façon à estimer les régimes hydriques selon les critères de Soil Taxonomy.

Les paragraphes suivants (III) montreront au moyen d'exemples qu'une telle interprétation est possible dans le cadre de la méthode graphique, malgré des imprécisions inévitables.

III. ESTIMATION DES PÉRIODES D'HUMIDITÉ ET DE SÉCHERESSE DE LA SECTION DE CONTRÔLE

III.1. Principes d'interprétation

Rappelons que, par définition, la section de contrôle est comprise entre deux limites qui correspondent respectivement à la profondeur à laquelle le sol sec (tension supérieure à 15 bars, mais non terre séchée à l'air) est humidifié par 25 mm d'eau en 24 heures et par 75 mm d'eau en 48 heures.

PÉRIODES D'HUMIDIFICATION : P > ETp (PHASES R ET S)

L'humidification du sol par des pluies successives progresse de la surface vers la profondeur sous forme d'un *front d'humidification*, qui se stabilise ou dont la progression devient très lente chaque fois qu'il y a équilibre entre l'action de la gravité et les forces de rétention de l'eau par le sol (Audry, 1973 ; Baver, 1972 ; Boulaine, 1977 ; Henin, 1969). Cet équilibre après ressuyage correspond grosso modo à la capacité de rétention d'eau (« capacité au champ ») de la couche de sol humidifiée ; une fois l'équilibre atteint, la répartition ultérieure de l'eau est très lente.

D'après la définition de la section de contrôle, on peut dire que sa *limite supérieure* sera atteinte par le front d'humidification lorsque le sol aura stocké 25 mm d'eau en plus de son humidité initiale. Dans les conditions naturelles de pluviométrie, et en particulier dans les régions peu arrosées où le volume journalier des pluies est faible, cela correspond à la date à laquelle (P-ETp) cumulé atteint 25 mm.

FIG. 2. — Estimation du « régime hydrique ». Station de Béni Mellal. Légende des figures 2, 3, 4, 6, 7, 8.

De même, la *limite inférieure* sera atteinte lorsque 75 mm d'eau auront été stockés, soit :  $(P-ETp)$  cumulé = 75mm.

Par conséquent, tant que  $(P-ETp)$  cumulé est inférieur à 25 mm, la section de contrôle est « *sèche* » ; entre 25 et 75 mm, pendant la descente du front d'humidification, elle est « *humide en certaines parties* » ; lorsque  $(P-ETp)$  cumulé est supérieur à 75 mm, elle est « *humide partout* » car le front d'humidification a dépassé sa limite inférieure.

PÉRIODES DE DESSICCATION :  $P < ETp$  (PHASES U ET D)

Les phénomènes peuvent être grossièrement schématisés de la façon suivante.

L'eau éliminée par évaporation et par la transpiration des plantes est puisée dans la couche superficielle du sol et dans la couche où se développent les racines (cette dernière coïncidant au moins en partie avec la section de contrôle). Ces couches sont réalimentées lentement en eau par circulation capillaire ou pelliculaire aux dépens des couches plus profondes ; cette réalimentation est toutefois moins forte que le départ d'eau et ne fait qu'atténuer la dessiccation des couches supérieures du sol. C'est donc l'ensemble du profil qui se dessèche progressivement, mais avec une vitesse plus grande vers la surface que vers le bas.

Tant que le sol garde dans toute son épaisseur des teneurs en eau supérieures au point de flétrissement permanent (tension  $< 15$  bars), la section de contrôle reste « *humide partout* ».

Le dessèchement se poursuivant, il arrive un moment où la tension de l'humidité devient supérieure à 15 bars dans la couche superficielle du sol ; il y a rupture de la circulation pelliculaire et la réalimentation par le bas est arrêtée. Cette couche superficielle desséchée s'approfondit progressivement et il est possible que le front de dessiccation atteigne et dépasse la limite supérieure de la section de contrôle qui deviendrait alors « *humide en certaines parties* ». Dans les régions à climat xérotérique, une telle période « *humide en certaines parties* » existe vraisemblablement lorsque la dessiccation du sol atteint un degré suffisant, mais la méthode ne permet pas d'en fixer le début (voir § III.2 : observation a).

Lorsqu'enfin le sol dans toute son épaisseur ne contient plus d'eau utilisable (phase D), la section de contrôle est évidemment « *sèche partout* ». Le

début de cette période est sans doute un peu antérieur à celui de la phase D, car la section de contrôle ne correspond en général qu'à une partie des horizons de profondeur du profil. On peut néanmoins faire coïncider les deux débuts : la vitesse de dessiccation à cette période de l'année (pente de la courbe A) rend l'erreur minime.

### III.2. Application à l'exemple I (fig. 2 : graphe CS)

Pendant la phase de recharge R, la courbe A qui représente  $(P-ETp)$  cumulé permet d'estimer les dates auxquelles :

— 25 mm d'eau sont stockés dans le sol (point a) ; la section de contrôle devient alors « *humide en certaines parties* » ;

— 75 mm d'eau sont stockés (point b) ; la section de contrôle devient « *humide partout* ».

Pendant la phase de surplus S, la section de contrôle est « *humide partout* » puisque l'ensemble du profil est alors humide à la capacité au champ (ou même plus, temporairement).

Pendant la phase d'utilisation U, la section de contrôle reste d'abord « *humide partout* », tout en se desséchant progressivement ; puis elle devient « *humide en certaines parties* » vers la fin de la phase U. La limite entre ces deux périodes humides ne peut pas être fixée avec précision par cette méthode (voir ci-dessous l'observation a).

Pendant la phase de déficit D, la section de contrôle est « *sèche partout* » puisqu'il n'y a plus d'eau « utilisable » dans tout le profil (la tension est  $\geq 15$  bars).

Les périodes ainsi obtenues, comparées aux définitions de Soil Taxonomy (fig. 1), permettent d'estimer le régime hydrique du profil n° 7. Compte tenu de la température du sol (voir § IV.6), ce régime est *xérique*.

### OBSERVATIONS

a. Soil Taxonomy suggère un moyen d'appréciation de la *fin des périodes humides* (S.T. page 54) : « Dans l'état actuel des connaissances, on peut dire que dans un sol à la capacité au champ qui stocke 200 mm d'eau, une certaine partie de sa section de contrôle sera sèche après 75 mm d'évapotranspiration s'il n'y a pas de précipitations additionnelles.

Sa section de contrôle sera entièrement sèche après 175 mm d'évapotranspiration en l'absence de précipitations. »

Il n'est cependant pas possible d'appliquer ce moyen dans les cas très fréquents où le stock d'eau est inférieur à 200 mm et où il y a des précipitations additionnelles. On peut alors s'en tenir aux estimations suivantes :

- fin de la période « humide partout » pendant le mois où  $ET_p$  devient très supérieure à  $P$ , sans préciser la date (limite oblique dans le graphe CS) ;
- fin de la période ultérieure « humide en certaines parties » coïncidant avec la fin de la phase d'utilisation U.

b. Dans une méthode d'estimation des régimes hydriques basée sur les données climatiques, on ne peut pas faire intervenir la profondeur et l'épaisseur réelles de la section de contrôle. En effet, même si on connaît l'AWC du sol (et en supposant connue l'influence des caractères physiques du sol), il reste que la profondeur atteinte par un volume d'eau donné, ici 25 et 75 mm, dépend de l'humidité initiale du sol. Or cette humidité à la fin de la saison sèche n'est pas connue et peut varier, d'après la définition de la section de contrôle, entre le point de flétrissement et des valeurs plus faibles.

En l'absence de mesures de l'humidité au champ, le raisonnement sur la section de contrôle doit donc s'en tenir à la définition théorique des limites de cette dernière, c'est-à-dire à la pénétration de 25 mm et 75 mm d'eau dans le sol.

c. Au début de la période d'humidification, il y a une distortion entre les hypothèses d'humidité initiale du sol faites, d'une part pour évaluer les phases de Thornthwaite, d'autre part pour apprécier le début de l'humidification de la section de contrôle.

Pour évaluer la durée de la phase R on suppose que l'eau pénètre dans un sol qui n'est pas plus sec que le point de flétrissement (tension = 15 bars).

Au contraire, dans la définition des profondeurs limites de la section de contrôle on suppose que l'eau pénètre dans un sol à une tension supérieure à 15 bars ; ceci correspond mieux à la réalité à la fin de la saison sèche, au moins dans les couches proches de la surface dont le taux d'humidité peut être en équilibre hygroscopique avec l'atmosphère.

Dans les conditions naturelles il faudrait en fait, pour amener le sol à la capacité au champ, apporter un volume d'eau plus grand que celui qui corres-

pond à l'AWC. Par conséquent, la phase R devrait être un peu plus longue et le début de la phase de surplus S devrait être un peu plus tardif que ce qui a été indiqué sur le graphe de la figure 2. Les corrections correspondantes ne peuvent pas être faites puisqu'on ne connaît pas le degré réel de sécheresse du sol à la fin de la saison sèche. Cependant, dans le cas de cet exemple où une phase S existe, les corrections ne modifieraient pas les périodes d'humidité de la section de contrôle et le classement du régime hydrique resterait donc inchangé.

#### CONCLUSION POUR L'EXEMPLE 1

La méthode laisse une certaine imprécision pour la fin de la période « humide partout » de la section de contrôle. Il a été cependant possible de classer le régime hydrique sans ambiguïté par rapport aux définitions de Soil Taxonomy.

On verra par ailleurs (§ III.4 : observation b) que le début des périodes humides de la section de contrôle pourrait être quelque peu avancé en fonction de la répartition des pluies dans le mois, mais sans que cela modifie le classement du régime hydrique.

On peut remarquer que lorsque le graphe de Thornthwaite comprend des phases de surplus S et de déficit D d'une certaine longueur (cas de cet exemple), le classement « xérique » peut être obtenu simplement en comparant ces phases à la définition des régimes hydriques. En effet, la section de contrôle est obligatoirement « humide partout » pendant la phase S, « sèche partout » pendant la phase D et « humide partout ou en certaines parties » pendant la phase U. Les périodes ainsi obtenues permettent de classer le régime hydrique sans qu'il soit nécessaire de préciser davantage leur durée.

Les pédons 54, 55, 99, 130 de Soil Taxonomy sont des exemples analogues de sols à régime hydrique « xérique » avec une phase de surplus S.

#### III.3. Exemple 2 : cas où $(P - ET_p)$ cumulé est inférieur à AWC mais supérieur à 75 mm

Les données sont celles de la station climatologique de Kasba Tadla et du profil n° 8 (Massoni, 1967). Il s'agit d'un sol profond ayant une AWC de 172 mm pour une épaisseur de 140 cm.

Les renseignements climatologiques et hydriques sont réunis dans le tableau III et la figure 3.

TABLEAU III

Données climatiques et calcul de l'eau utilisable. Station climatologique de Kasba Tadla.  
Profil n° 8 ; AWC = 172 mm

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1. T air ..... °C	10,9	12,3	14,8	17,3	21	25	29,9	30	26	21,2	15,3	12	19,6
2. t sol à 50 cm (estimée) .. °C	←	13,2	→				←	28,0	→				20,6
3. P ..... mm	46	51	66	54	29	19	4	3	13	38	58	65	446
4. P, jours par mois ....	6	6	7	7	4	3	1	1	3	5	7	7	57
5. ETP Thornthwaite .... mm	18	22	39	60	99	143	194	190	134	82	39	21	1041
6. (P-ETp) mensuel ..... mm	28	29	27	-6	-70	-124	-190	-187	-121	-44	19	44	
7. (P-ETp) cumulé ..... mm	91	120	147	141	71	0	0	0	0	0	19	63	
8. Eau stockée à la fin du du mois* ..... mm	91	120	147	141	71	(-53)	0	0	0	0	19	63	

\* Eau utilisable (AW) selon l'hypothèse de Thornthwaite.

Ici, l'eau stockée dans le sol (eau « utilisable » selon l'hypothèse de Thornthwaite) reste inférieure à l'AWC du sol (fig. 3 : courbe A du profil n° 8). En conséquence, il n'y a pas de phase de surplus S mais seulement les phases R, U et D.

La phase R dure tant que P est supérieure à ETP. La phase U dure jusqu'à ce que le stock d'eau utilisable ait été évapotranspiré (intersection de la courbe A et de la ligne des abscisses).

*Périodes « humides » et « sèches » de la section de contrôle.* Elles peuvent être estimées, comme dans l'exemple I, au moyen de la courbe A qui représente (P-ETp) cumulé, c'est-à-dire l'évolution de l'eau stockée dans le sol.

— Le point a qui correspond à 25 mm donne une estimation du début de la période « humide en certaines parties ».

— Le point b (75 mm) permet d'estimer le début d'une période « humide partout » ; cette période s'étend pendant le reste de la phase R et pendant une partie de la phase U ; sa fin ne peut être précisée, pour les mêmes raisons que celles exposées à propos de l'exemple I.

— Le reste de la phase U correspond à une période « humide en certaines parties ».

— Pendant la phase D et le début de la phase R, la section de contrôle est « sèche partout ».

Les périodes ainsi délimitées (fig. 3 : profil 8, graphe CS) correspondent à un régime hydrique « xérique », les conditions de température étant par ailleurs remplies.

Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVI, n° 3, 1978 : 317-338

#### OBSERVATION

Si l'humidité du sol à la fin de la saison sèche est à une tension supérieure à 15 bars, l'eau stockée à la fin de la phase R n'est pas en totalité de l'eau « utilisable ». La phase U (et donc les périodes humides de la section de contrôle) devraient se terminer un peu plus tôt que ce qui est indiqué sur le graphe du profil 8.

L'erreur ne peut pas être corrigée puisqu'on ne connaît pas l'humidité initiale du sol ; elle reste cependant faible : dans l'hypothèse où l'humidité initiale, sur les 50 cm superficiels, serait égale à la moitié de l'humidité à 15 bars, la correction serait d'environ 15 jours\*.

#### CONCLUSION POUR L'EXEMPLE 2

On ne peut pas éviter une imprécision dans l'estimation de la fin des deux périodes « humides » qui précèdent la période « sèche » de la section de contrôle. Cependant, les erreurs ne portent pas sur des durées importantes et l'estimation du régime hydrique reste valable.

On verra aussi (§ III.4 : observation b) que le début des périodes « humides » pourrait être un peu avancé si l'on tenait compte de la répartition

\* Dans les exemples cités le rapport  $\frac{\text{eau " utilisable "}}{\text{eau mesurée à 15 bars}}$  est en moyenne égal à 1/1,8.

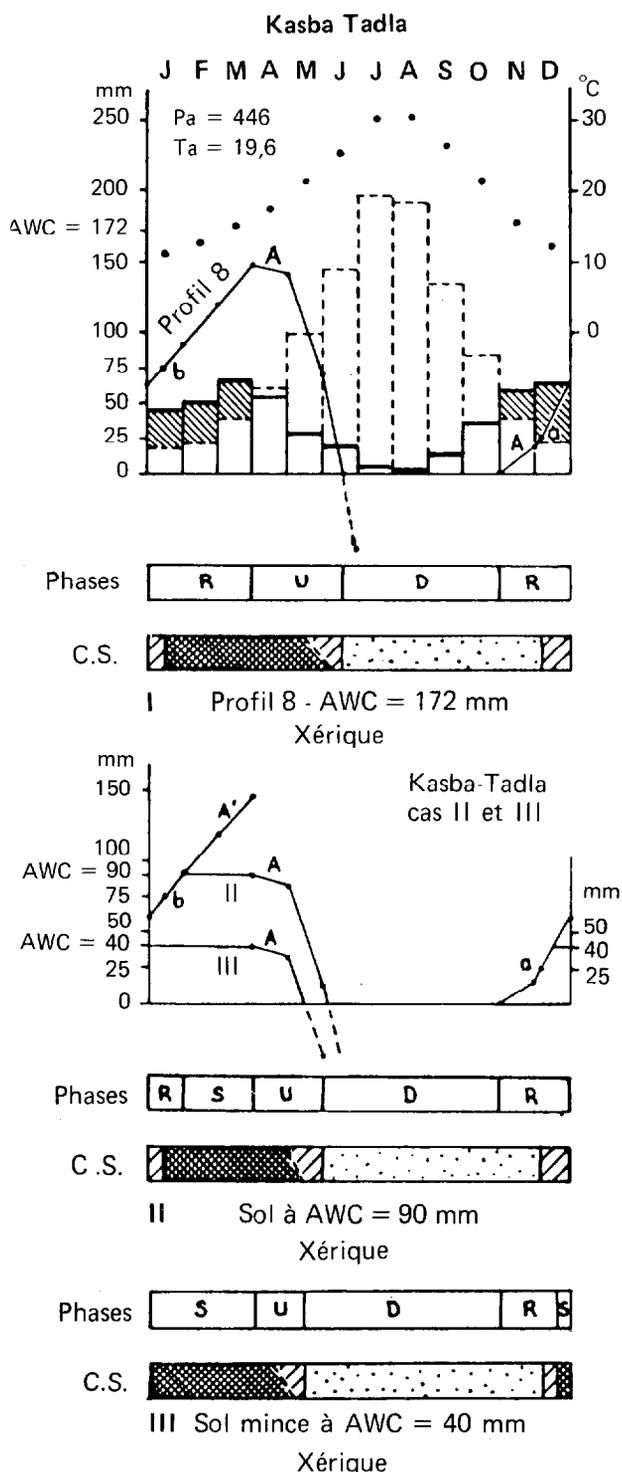


FIG. 3. — Estimation du « régime hydrique » pour des sols à AWC forte ou faible. Station de Kasba Tadla.

des pluies dans le mois, mais le classement du régime hydrique n'en serait pas modifié.

Les pédons 37, 79 et 101 de Soil Taxonomy sont des exemples analogues de sols à régime hydrique « xérique » sans phase de surplus S.

### III.4. Exemple 3 : cas où (P-ETp) cumulé est inférieur à AWC et inférieur à 75 mm

Données de la station climatologique de Kasba Zidania et du profil n° 1 (Massoni, 1967). Il s'agit d'un sol profond ayant une AWC de 106 mm pour une épaisseur de 120 cm.

Les renseignements climatologiques et hydriques sont fournis par le tableau IV et la figure 4.

Comme dans l'exemple 2, l'eau stockée, c'est-à-dire (P-ETp) mensuel cumulé, est inférieure à l'AWC du profil (fig. 4 : courbe A) et il n'y a pas de phase S.

Ici, en outre, le maximum d'eau stockée (68 mm) n'atteint pas le seuil de 75 mm qui correspond à la limite inférieure de la section de contrôle.

Le raisonnement utilisé pour les exemples précédents, au moyen de la courbe A, conduirait ici à attribuer à la section de contrôle une longue période « humide en certaines parties » mais pas de période « humide partout » (fig. 4 : graphe CS/A) : le régime hydrique ne pourrait alors être classé ni « xérique » ni « aridique », compte tenu de la température du sol.

On peut chercher dans ce cas à préciser la méthode en considérant, en plus des bilans d'eau mensuels, l'influence de la répartition des pluies à l'intérieur de chaque mois.

### INFLUENCE DE LA RÉPARTITION DES PLUIES DANS LE MOIS

Le fait dont il faut tenir compte est le suivant : lorsque la pluviosité mensuelle est « concentrée », c'est-à-dire lorsque les pluies tombent en une ou quelques périodes ou bien en quelques averses de forte intensité, la profondeur atteinte par le front d'humidification est plus grande que lorsque la pluviosité est répartie dans tout le mois. Plus les pluies sont concentrées, plus la profondeur atteinte est grande. Cela peut être montré à l'aide de quelques exemples théoriques (fig. 5).

TABLEAU IV

Données climatiques et calcul de l'eau utilisable  
Station climatologique de Kasba Zidania. Profil n° 1 ; AWC = 106 mm

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1. T air ..... °C	12,3	13,6	16,3	18	21,9	26,1	29,2	29,6	25,6	20,6	16,6	12,7	20,2
2. <i>t</i> sol à 50 cm (estimée) .. °C	←	14,9	→				←	27,5	→				21,2
3. P ..... mm	42	38	49	44	23	10	3	4	17	27	34	55	346
4. P, jours par mois .....	7	6	7	6	3	1	1	1	2	5	5	7	51
5. ETp Thornthwaite, .... mm	21	26	47	60	105	155	190	183	129	76	41	22	1055
6. (P-ETp) mensuel ..... mm	21	12	2	-16	-82	-145	-187	-179	-112	-49	-7	33	
7. (P-ETp) cumulé ..... mm													
8. Eau stockée à la fin du mois* ..... mm	54	66	68	52	(-30)	0	0	0	0	0	0	33	

\* Eau utilisable (AW) selon l'hypothèse de Thornthwaite.

Les graphes de la figure 5 correspondent à diverses hypothèses de concentration des jours de pluie dans le cas de la station de Kasba Zidania :

— hypothèse 1 : pluies mensuelles en une seule période au début du mois\* ;

— hypothèse 2 : pluies mensuelles en deux périodes égales en durée et en volume d'eau ;

— hypothèse 3 : pluies mensuelles en trois périodes, dont l'une au milieu du mois correspond à la moitié des jours de pluie et à la moitié du volume des pluies ; les deux périodes restantes sont égales entre elles et situées au début et à la fin du mois ;

— hypothèse 4 : pluies réparties en autant de périodes égales et isolées qu'il y a de jours de pluie dans le mois ;

— hypothèse 5 : pluies supposées réparties uniformément sur toute la durée du mois (hypothèse ne tenant pas compte des jours de pluie).

Ces graphes montrent que les volumes d'eau de pluie stockés temporairement dans le sol au cours de chaque mois sont d'autant plus grands que la concentration des pluies est plus forte (fig. 5 A), alors

\* Le nombre moyen des jours de pluie par mois est indiqué dans le tableau IV (l'intensité journalière des pluies n'est pas connue et n'a pas été prise en compte).

Pour les calculs, l'évapotranspiration journalière a été supposée uniforme pendant un mois donné. L'eau retenue par le sol pendant une période pluvieuse est égale au volume de la pluie diminué de l'ETp correspondant aux jours de pluie de la période.

que l'eau restant dans le sol à la fin de chaque mois est la même pour toutes les hypothèses.

Aux volumes d'eau stockés temporairement correspondent les profondeurs atteintes par le front d'humidification (fig. 5 B). Mais alors qu'après chaque maximum d'eau stockée la teneur en eau du sol diminue par évapotranspiration (fig. 5 A), la profondeur du sol « humide » (tension inférieure à 15 bars) reste la même (fig. 5 B).

Le tracé en escalier 1 (fig. 5 B), qui correspond à une seule période pluvieuse au début de chaque mois, figure des *maximums* mensuels possibles pour l'eau stockée temporairement dans le sol. Il représente une hypothèse optimum à la fois pour la précocité et pour la profondeur de pénétration de l'eau : si les périodes de pluie étaient décalées vers le milieu du mois, les quantités d'eau stockées temporairement seraient plus faibles (courbe 1').

La courbe 5 (fig. 5 B) qui représente les bilans (P-ETp) mensuels cumulés (comme la courbe A de la figure 4) suppose que P et ETp sont réparties uniformément sur tous les jours du mois ; c'est une hypothèse qui n'est jamais réalisée dans les régions à climat méditerranéen ou aride, aussi cette courbe 5 représente-t-elle un *minimum* de pénétration qui reste en dessous de la réalité. La courbe 4, figurant l'hypothèse 4 (fig. 5 B) représente un minimum plus plausible de la pénétration de l'eau ; on peut remarquer cependant qu'elle est assez proche de la courbe 5.

Entre les deux tracés extrêmes 1 et 5 il y a un grand nombre de possibilités selon la date, la

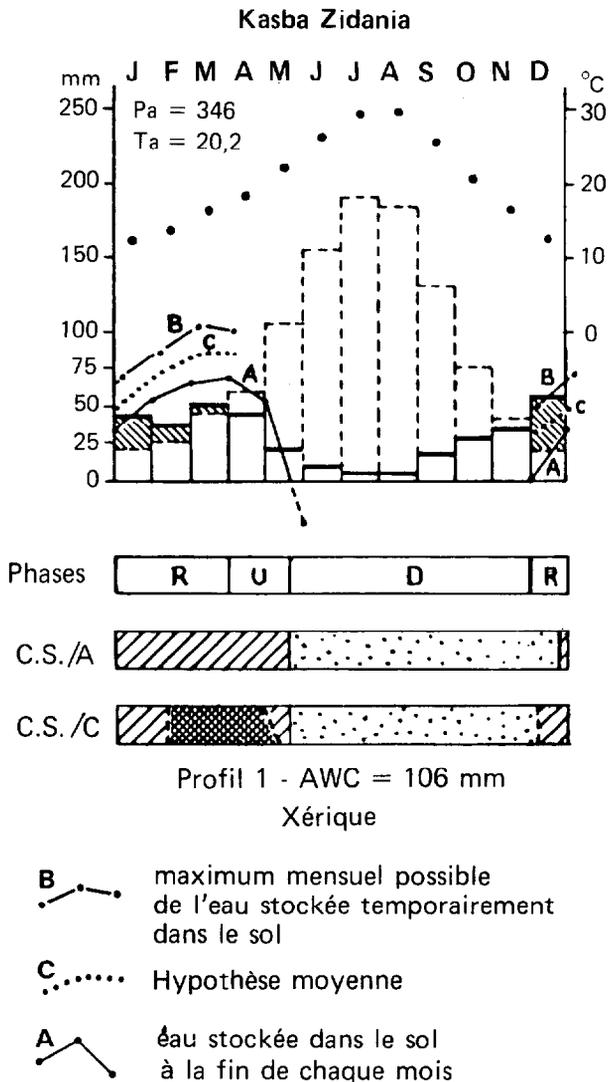


FIG. 4. — Estimation du « régime hydrique ». Station de Kasba Zidania.

répartition des jours de pluie dans le mois et l'intensité journalière des pluies.

Comment tenir compte de la répartition des pluies dans le mois ?

Le programme de calcul par ordinateur indiqué dans Soil Taxonomy tient compte de la concentration des pluies en prenant une hypothèse moyenne :

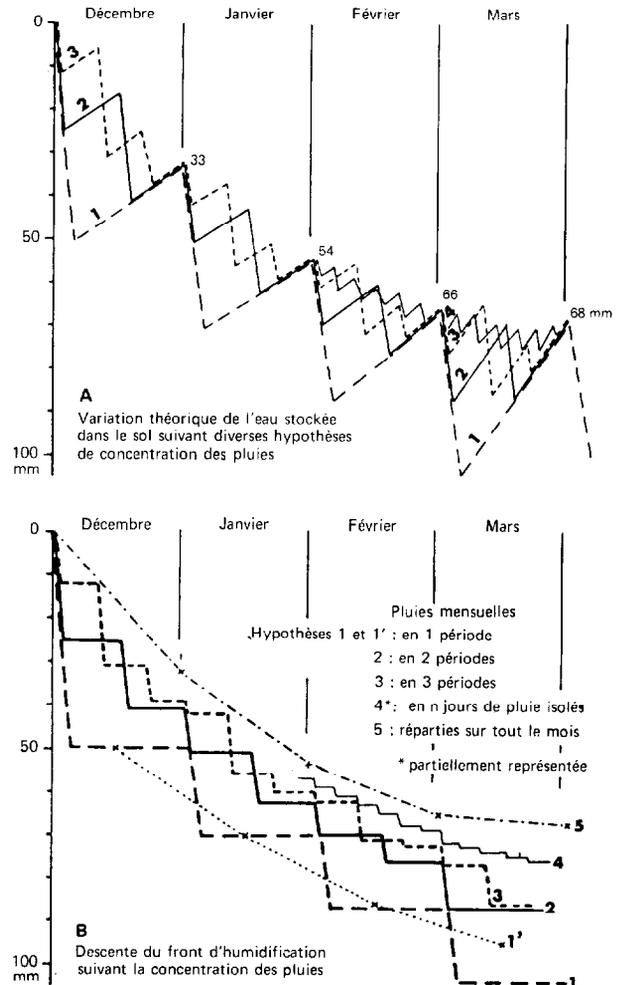


FIG. 5. — Influence de la répartition des pluies au cours de chaque mois. Station de Kasba Zidania ; profil n° I.

la moitié des précipitations mensuelles entrant dans le sol en une seule pluie, le 15 du mois, et l'autre moitié tombant en petites pluies réparties dans tout le mois (ce qui est assez peu différent de l'hypothèse 3 précédente).

Il est également possible d'obtenir graphiquement une indication valable, par la méthode suivante (appliquée ci-dessous au profil n° 1 de Kasba Zidania).

(1) Calculer des maximums mensuels possibles pour l'eau stockée temporairement dans le sol. Le calcul, très simple, est limité aux mois pluvieux (voir le tableau V).

TABLEAU V

Calcul d'un maximum mensuel possible pour l'eau stockée temporairement dans le sol  
(Station climatologique de Kasba Zidania ; profil n° 1)

	J	F	M	A	M	J		O	N	D
1. P mensuelle ..... mm	42	38	49	44	23	10		27	34	55
2. ETp mensuelle ..... mm	21	26	47	60	105	155		76	41	22
3. Jours de pluie .....	7	6	7	6	3	1		5	5	7
4. ETp des jours de pluie.. mm	5	5	11	12	10	5		13	7	5
5. Eau stockée à la fin du mois précédent (cf. tableau IV) ..... mm	33	54	66	68	52	0		0	0	0
Eau stockée, maximum mensuel possible, (1) - (4) + (5) = ..... mm	70	87	104	100	65	15		14	27	50

Eau stockée max. = P du mois - ETp des jours de pluie du mois + eau stockée à la fin du mois précédent.

N.B. — Pour le calcul de l'ETp des jours de pluie, l'ETp journalière est supposée constante au cours du mois.

— Si le nombre des jours de pluie n'est pas connu le calcul est seulement (1) + (5) : le résultat est moins bon mais peut encore être utilisé.

(2) Tracer la courbe correspondante (fig. 4 : courbe B). Les points sont placés après le début de chaque mois pour tenir compte approximativement du nombre mensuel des jours de pluie.

(3) Tracer une courbe équidistante (fig. 4 : courbe C) entre la courbe B précédente (hypothèse de pénétration maximum de l'eau dans le sol) et la courbe A (pénétration minimum).

Cette courbe C correspond à une hypothèse moyenne pour la concentration des pluies et pour la pénétration de l'eau dans le sol.

Elle permet de déduire de façon plausible que dans le courant de février la limite inférieure de la section de contrôle (75 mm) pourra être atteinte par le front d'humidification. Le graphe de la section de contrôle (fig. 4 : CS/C) fait alors apparaître une période « humide partout » suffisante pour que le régime hydrique du sol soit estimé « xérique », les conditions de température étant par ailleurs remplies.

Les pédons 96 et 97 de Soil Taxonomy ont un régime hydrique qui paraît semblable à celui de ce profil de Kasba Zidania.

#### CONCLUSION POUR L'EXEMPLE 3

On a ici le cas d'une région dont la pluviométrie n'est pas très faible (346 mm en moyenne) mais

est insuffisante, compte tenu de sa répartition annuelle et de l'évapotranspiration, pour qu'on puisse estimer le régime hydrique de façon nette en se basant sur les bilans mensuels (P-ETp) cumulés.

L'estimation peut être précisée si l'on tient compte de la concentration des pluies. Cependant, même si le nombre moyen de jours de pluie par mois est connu, on ne peut pas faire mieux que prendre une hypothèse moyenne de concentration, ce qui introduit un facteur d'incertitude.

#### OBSERVATIONS

a. Les causes d'imprécision vues à propos des exemples précédents existent aussi dans le cas de l'exemple 3 :

— Erreur due au taux d'humidité du sol à la fin de la saison sèche, humidité qui n'est pas connue et qui est vraisemblablement inférieure au point de flétrissement dans les couches superficielles du sol. Avec la même hypothèse d'humidité que pour l'exemple 2 (§ III.3 : observation), on serait amené à raccourcir de 10 à 15 jours la phase U et donc à avancer d'autant la fin des périodes humides de la section de contrôle.

— Imprécision pour la fin de la période « humide partout » (§ III.2 : observation a).

b. L'influence du mode de répartition des pluies existe également lorsque la pluviosité est assez forte pour qu'une phase de surplus S apparaisse ou que les bilans mensuels cumulés (P-ETp) dépassent 75 mm. Ainsi pour les exemples 1 et 2, si l'on dressait la courbe C correspondant à l'hypothèse d'une concentration moyenne des pluies, on verrait que le début des périodes « humides » de la section de contrôle pourrait être avancé d'environ 15 jours.

Dans ces cas, cependant, il s'agit d'une correction minime en valeur relative qui ne changerait rien au classement du régime hydrique. Il n'est donc pas indispensable de la faire, car l'objet de la méthode est seulement de situer le régime hydrique dans le cadre des définitions de Soil Taxonomy et non de déterminer de façon précise l'évolution de l'humidité dans le sol.

Le raisonnement basé sur la concentration des pluies est au contraire utile dans les régions à faible pluviosité, ou plus précisément dans celles où P et ETp sont telles que les bilans mensuels cumulés n'atteignent pas 75 mm. Par rapport à l'estimation fondée seulement sur les bilans d'eau mensuels il apporte alors une information complémentaire qui améliore l'estimation des périodes « humides » de la section de contrôle. Dans certains cas, il peut faire apparaître l'existence d'une période « humide partout » (exemple 3) ou d'une période « humide en certaines parties » comme le montrera l'exemple 4 suivant.

**III.5. Exemple 4 où (P-ETp) cumulé est inférieur à AWC et très inférieur à 75 mm**

Les données climatiques sont celles de la station d'El Kelaa des Sraghna (fig. 6).

Il s'agit d'une région à faible pluviosité (264 mm). Le bilan d'eau (P-ETp) mensuel cumulé, représenté par la courbe A atteint juste 25 mm, c'est-à-dire la valeur correspondant à la limite supérieure de la section de contrôle qui pourrait donc ne jamais être « humide », même « en certaines parties ».

Le raisonnement basé sur la concentration des pluies permet alors de voir, dans le cas d'un sol profond :

— que la limite inférieure (75 mm) de la section de contrôle ne sera jamais atteinte, même avec une hypothèse de concentration maximum des pluies (fig. 6 : courbe B),

— mais que la limite supérieure de la section de contrôle (25 mm) pourra être dépassée à partir du début de janvier (courbe C).

Le graphe de la section de contrôle (fig. 6 : cas I) indique alors une période « humide en certaines parties » d'un peu plus de trois mois et demi. La cause d'erreur due à la sécheresse initiale du sol (plus forte que le point de flétrissement) conduirait

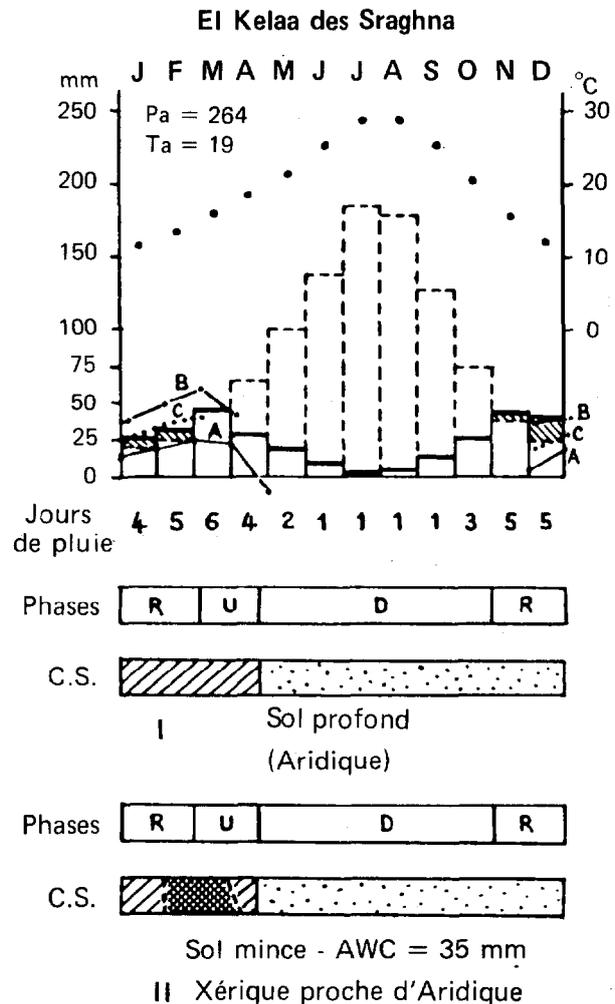


FIG. 6. — Estimation du « régime hydrique ». Station d'El Kelaa des Sraghna.



de contrôle n'est jamais « humide partout ». Les graphes montrent une longue période « humide en certaines parties » qui ne correspond pas aux définitions des régimes « aridique » ou « xérique » mais à un intermédiaire, compte tenu de la température du sol.

Ce cas semble arriver au Maroc lorsqu'une pluviométrie de l'ordre de 300-375 mm est assez bien répartie, une fraction notable tombant au printemps, et que les températures moyennes d'automne et d'hiver restent relativement hautes.

#### IV. MÉTHODE GRAPHIQUE D'ESTIMATION DES « RÉGIMES HYDRIQUES »

Les différentes étapes de la méthode qui a été utilisée à propos des exemples précédents sont regroupées dans les paragraphes qui suivent.

##### IV.1. Données nécessaires

- Température moyenne mensuelle de l'air :  $T$  °C.
- Pluviométrie moyenne mensuelle :  $P$  mm.
- Nombre moyen de jours de pluie par mois, éventuellement.
- Capacité du sol en eau utilisable : AWC mm. Elle est calculée à partir du % d'eau à 1/3 bar (ou autre tension adaptée à la texture, ou « capacité au champ »), du % d'eau à 15 bars, de la densité apparente du sol et éventuellement de sa teneur en cailloux et graviers ; un exemple de calcul est donné dans le tableau II.
- Température du sol : moyenne annuelle et moyennes mensuelles à 50 cm (cf. § IV.6).

##### IV.2. Calculs

- Evapotranspiration potentielle mensuelle : ETp mm, calculée par la méthode de Thornthwaite\* (Joly, 1957).
- Bilan mensuel ( $P-ETp$ ), en mm.
- ( $P-ETp$ ) cumulé, en mm.

\* D'autres méthodes pourraient être utilisées ; cf. § V.1.b.

— Eau stockée dans le sol à la fin de chaque mois, en mm (supposée eau « utilisable », selon l'hypothèse de Thornthwaite) :

a. Si  $AWC > (P-ETp)$  cumulé, l'eau stockée est toujours égale à ( $P-ETp$ ) cumulé (tableau III : ligne 8)\*\*.

b. Si  $AWC < (P-ETp)$  cumulé, l'eau stockée est d'abord égale à ( $P-ETp$ ) cumulé, puis limitée par la valeur de l'AWC, et sa décroissance ultérieure est calculée à partir de l'AWC (tabl. I : ligne 8).

— Si ( $P-ETp$ ) cumulé est inférieur à la fois à l'AWC du sol et à 75 mm, on calcule des maximums mensuels possibles pour l'eau stockée temporairement dans le sol, dans l'hypothèse d'une forte concentration des pluies (tabl. V). Le calcul est le suivant :

Eau stockée maximum (mm) =  $P$  du mois - ETp des jours de pluie du mois (mm) + eau stockée à la fin du mois précédent (mm).

Pour évaluer l'ETp des jours de pluie, on suppose que l'ETp journalière est constante au cours d'un mois donné.

##### IV.3. Représentation graphique des données de base

- Température mensuelle de l'air (ou, si l'on dispose de données, température moyenne mensuelle du sol à 50 cm).
- Pluviométrie mensuelle :  $P$ .
- Evapotranspiration mensuelle : ETp.
- L'eau stockée dans le sol à la fin de chaque mois (courbes A).
- Si ( $P-ETp$ ) cumulé est inférieur à la fois à l'AWC du sol et à 75 mm, on représente aussi les maximums mensuels possibles pour l'eau stockée temporairement (courbes B).

##### IV.4. Evaluation graphique des phases du bilan hydrique selon Thornthwaite (fig. 2, 3, 4, 6, 7 : graphes « phases »)

- Phase de recharge R : elle commence au mois où  $P$  devient supérieure à ETp.
- Phase de surplus S éventuellement : début quand ( $P-ETp$ ) cumulé devient supérieur à l'AWC du sol.

\*\* Les indications entre parenthèses se réfèrent aux exemples étudiés aux paragraphes III.

— Phase d'utilisation U : elle commence avec le mois où P devient inférieure à ETp.

— Phase de déficit D : début quand le stock d'eau « utilisable » (courbe A) devient nul.

#### IV.5. Estimation graphique des périodes « sèches » et « humides » de la section de contrôle (graphes CS)

a. Pendant la phase R la section de contrôle est :

— d'abord « sèche partout » pendant une courte période ;

— puis « humide en certaines parties » à partir de la date à laquelle l'eau stockée dépasse 25 mm (fig. 2 et 3, courbes A : points a) ;

— puis « humide partout » si la courbe A atteint ou dépasse 75 mm (fig. 2 et 3, courbes A : points b) ; ou bien, dans le cas d'un sol dont l'AWC est inférieure à 75 mm, la section de contrôle est « humide partout » lorsque la courbe A atteint ou dépasse la valeur de cette AWC (fig. 3 : cas III).

*N.B.* Si (P-ETp) cumulé est inférieur à la fois à l'AWC du sol et à 75 mm, l'estimation des périodes humides est faite en utilisant, au lieu de la courbe A, une courbe C équidistante entre les courbes A et B (fig. 4, 6, 7). Cette courbe C tient compte de l'influence de la « concentration » des pluies sur la pénétration de l'eau dans le sol (hypothèse d'une concentration moyenne).

b. Pendant une phase S, la section de contrôle est « humide partout ».

c. Pendant la phase U :

— Si la section de contrôle était auparavant « humide partout », elle continue de l'être jusqu'à une date (non précisable) qui se situe pendant le mois où l'ETp devient forte par rapport à P ; puis elle devient « humide en certaines parties » jusqu'à la fin de la phase U (fig. 2, 3, 4).

— Si elle était auparavant « humide en certaines parties », elle continue de l'être jusqu'à la fin de la phase U (fig. 6.I et fig. 7).

d. Pendant la phase D, la section de contrôle est « sèche partout ».

#### IV.6. Température du sol

La définition des régimes hydriques d'après Soil Taxonomy suppose connues certaines données relatives à la température du sol.

a. La température moyenne annuelle du sol ( $t_a$ ) et la différence entre les températures moyennes du sol en été ( $t_e$ ) et en hiver ( $t_h$ ) à la profondeur de 50 cm\*.

Si l'on ne dispose pas de données mesurées, ces températures peuvent être obtenues avec une bonne approximation à partir de la température de l'air. Soil Taxonomy propose la méthode de calcul suivante (S.T. : pages 61-62) qui a été trouvée valable pour la majorité des sols des U.S.A. :

$$t_a \text{ } ^\circ\text{C} = \text{température moyenne annuelle de l'air} + 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_e \text{ } ^\circ\text{C} = \text{température moyenne de l'air pendant les mois d'été} - 0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_h \text{ } ^\circ\text{C} = t_a - (t_e - t_a)$$

Les températures du sol données dans les tableaux I, III, IV ont été estimées par cette méthode\*\*.

b. Les périodes de l'année pendant lesquelles la température du sol à 50 cm est supérieure à 5 °C (seuil de l'activité biologique) ou à 8 °C.

Ces périodes ne semblent pas pouvoir être déduites avec précision des données atmosphériques et il faudrait disposer de mesures de la température du sol, au moins des moyennes mensuelles à 50 cm.

Tout au plus peut-on tenir compte du fait qu'aux latitudes moyennes, la température  $t$  du sol à 50 cm, en hiver, est supérieure de quelques degrés à la température moyenne de l'air  $T$  (voir par exemple : S.T., fig. 17). Cela peut permettre dans certains cas (lorsque  $T$  descend peu en dessous de 5 ou 8 °C) d'estimer que la température du sol reste supérieure à 5° ou 8°C. Mais lorsque  $T$  est nettement plus basse, l'estimation de la température du sol devient aléatoire ; cela peut être gênant pour distinguer entre les régimes hydriques « xérique » et « aridique ».

\* La température à 50 cm donne une estimation de la moyenne des températures du sol entre la surface et un mètre de profondeur.

\*\* Signalons qu'il existe d'autres méthodes de calcul, basées sur des corrélations différentes entre la température de l'air et celle du sol.

### IV.7. Estimation du « régime hydrique »

Les renseignements concernant les phases de Thornthwaite (§ IV.4), les périodes « humides » et « sèches » de la section de contrôle (§ IV.5) et la température du sol à 50 cm (§ IV.6) sont comparés aux définitions de Soil Taxonomy (fig. 1).

L'estimation de la durée des phases et périodes est facilitée par leur présentation sous forme de

graphes annuels, comme dans les exemples étudiés précédemment.

En régions à climat méditerranéen ou aride, il est parfois possible d'estimer les régimes hydriques, sans ambiguïté, en se basant seulement sur les phases R, S, U, D, en particulier dans les cas suivants :

— Si  $D \geq 9$  mois, le régime hydrique est « aridique ».

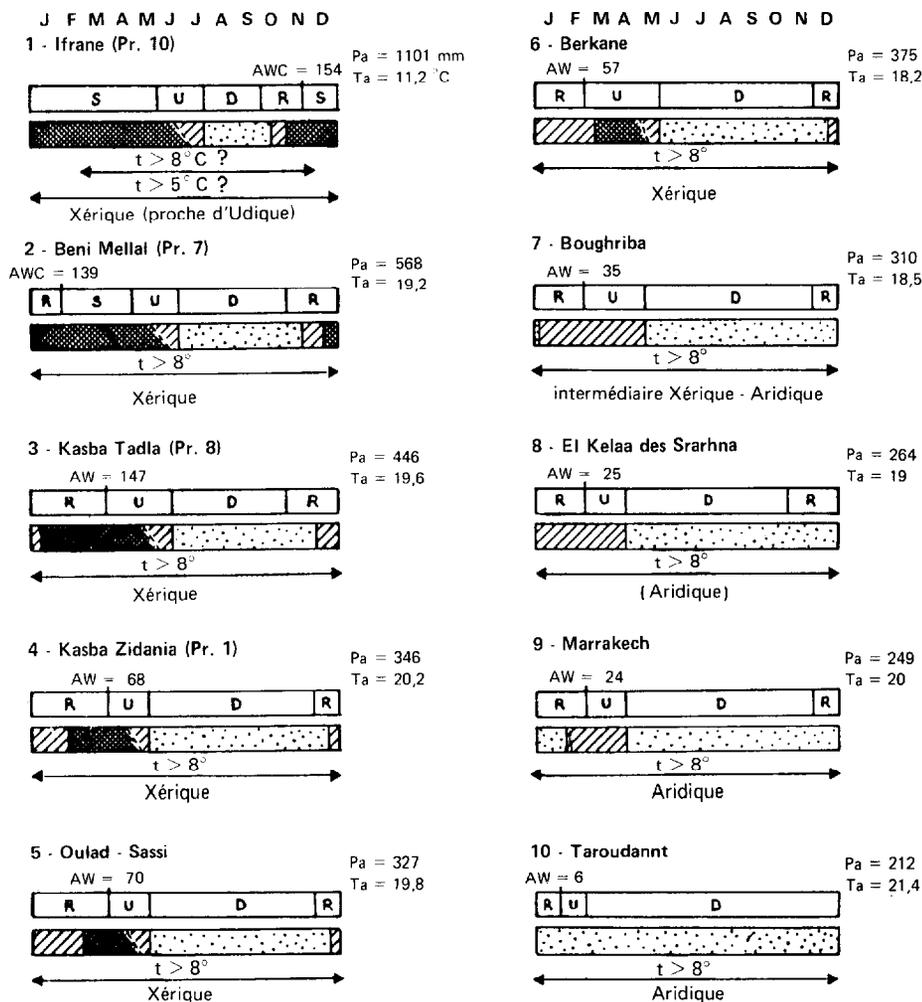


FIG. 8. — Estimation du « régime hydrique » de sols profonds, pour quelques stations climatiques caractéristiques du Maroc.

Légende : voir figure 2.

AW : eau utilisable limitée par (P-ETp).

AWC : eau utilisable limitée par la capacité du profil.

— S'il y a une phase S accompagnée d'une phase D estivale, le régime est en général « xérique », sauf si les températures hivernales sont basses et prolongées (comme en montagne) auquel cas le régime peut être « aridique ». Il faudrait que la phase D soit très brève pour que le régime hydrique soit « udique » (section de contrôle « sèche partout » pendant moins de 45 jours en été), ce qui est un cas peu fréquent.

Par contre, s'il n'y a pas de phase S et si  $D < 9$  mois le régime hydrique peut être de divers types : « xérique », « aridique » ou intermédiaire entre ces deux régimes, selon la pluviosité, la répartition saisonnière des pluies et, dans les régions peu arrosées, selon l'épaisseur du sol.

Il est alors nécessaire de se baser sur les périodes d'« humidité » et de « sécheresse » de la section de contrôle pour estimer le régime hydrique. Ces périodes sont données avec une approximation suffisante par la méthode décrite au § IV.5.

Il est nécessaire aussi de vérifier la durée des périodes où la température du sol à 50 cm est supérieure à 5 ou 8 °C ; ce facteur est parfois déterminant pour le classement du régime hydrique.

En région méditerranéenne, le régime hydrique « ustique » est un cas rare, qui est subordonné à des conditions particulières de la température du sol : soit une moyenne annuelle supérieure à 22 °C, soit une différence entre les moyennes d'été et d'hiver à 50 cm inférieure à 5 °C.

Des exemples d'estimation de régimes hydriques par cette méthode sont données dans la figure 8.

## V. OBSERVATIONS CRITIQUES ET CONCLUSIONS

La méthode décrite précédemment permet d'obtenir une estimation des « régimes hydriques »\* en fonction des critères de Soil Taxonomy. Ses résultats ne sont pas différents de ceux que donnent des méthodes plus élaborées utilisant des programmes traités par ordinateur\*\*.

\* L'expression « régime hydrique » désignera ci-après les régimes définis par les critères particuliers de l'ouvrage américain.

\*\* Sur un échantillon de 25 sites climatiques de Syrie, les périodes « humides » et « sèches » estimées par cette méthode et par le système de computation Franklin Newhall (calculs faits à la Rijksuniversiteit de Gand ; programme FORTRAN VW08 ; 1976) conduisent à la même estimation des « régimes hydriques ».

L'intérêt d'une telle méthode est évident lorsqu'on ne dispose pas de moyens de calcul perfectionnés, ce qui est encore souvent le cas.

Cette méthode permet en outre de comparer aisément, sur le graphique, les « régimes hydriques » de sols situés dans une même région climatique mais ayant des « capacités en eau utilisable » différentes, par exemple un sol profond et un sol mince.

Ceci étant dit, il n'en reste pas moins que les méthodes d'estimation basées sur les données météorologiques, celle-ci comme les autres, ont toutes une valeur limitée. Elles s'appuient sur des hypothèses qui, comme telles, sont parfois plus ou moins conformes aux faits et les facteurs d'imprécision restent assez nombreux.

Les critiques qu'on est en droit de faire, et dont certaines ont été mentionnées dans les pages précédentes, sont récapitulées ci-dessous.

### V.1. Les méthodes d'estimation du « régime hydrique » comparées aux conditions naturelles

a. Les bilans d'eau dans le sol sont calculés au moyen de l'évapotranspiration potentielle. Cela ne correspond pas, pendant les périodes de dessiccation du sol, aux conditions naturelles. Pour que l'évapotranspiration potentielle soit réalisée, il faut qu'il y ait dans le sol de l'eau facilement utilisable ainsi qu'une végétation suffisamment dense pour l'utiliser.

Ces deux conditions ne sont remplies que de façon temporaire et discontinue dans les régions à climat méditerranéen ou aride. Entre deux périodes de pluie, l'évapotranspiration réelle peut devenir plus faible que l'ETp, et pendant la saison sèche elle est toujours inférieure à l'ETp.

En utilisant l'évapotranspiration potentielle pour calculer les bilans hydriques, on sous-estime donc la durée de la phase d'utilisation U et, par conséquent, la durée de la période « humide » de la section de contrôle.

La méthode exposée ici ne corrige pas cette erreur. Par contre, le programme de calcul par ordinateur proposé par Soil Taxonomy tient compte de cela et prévoit une réduction de l'évapotranspiration, proportionnellement au degré de sécheresse du sol.

Ce programme utilise un modèle basé sur des mesures d'humidité du sol effectuées dans les grandes plaines des U.S.A. Il reste à savoir si son application à d'autres conditions de sol, de climat et de végétation est valable.

b. L'évapotranspiration potentielle utilisée ici (comme dans Soil Taxonomy et dans certains programmes de calcul par ordinateur) est calculée par la *méthode de Thornthwaite*. Or, on a souvent constaté qu'en région aride cette méthode donne des valeurs de l'ETp inférieures à la réalité.

Si on utilisait une ETp calculée par d'autres méthodes (Penman, Turc, Blaney-Criddle) ou bien, ce qui serait mieux, une ETp mesurée, on obtiendrait dans certains cas une estimation différente du « régime hydrique », par exemple « aridique » au lieu de « xérique ».

c. L'influence de la *répartition des pluies dans le mois* sur la pénétration de l'eau dans le sol (profondeur atteinte et date) n'est prise en compte que par une hypothèse moyenne, quelle que soit la méthode d'estimation du « régime hydrique » qu'on utilise (cf. § III.4).

Il en résulte que l'appréciation du début des périodes « humides » de la section de contrôle reste imprécise.

d. L'estimation par les données météorologiques suppose qu'il n'y ait *ni perte d'eau de pluie par ruissellement ni apport complémentaire* à partir d'un amont.

Les « régimes hydriques » obtenus par de telles méthodes ne sont donc valables que pour des sols à faible pente et à bonne perméabilité de surface.

## V.2. Les méthodes d'estimation en regard de certains critères propres aux « régimes hydriques » de Soil Taxonomy

a. *La section de contrôle ne correspond qu'à une partie du profil* du sol et commence à une certaine profondeur sous la surface. Or dans un sol, l'état hydrique d'une couche donnée n'évolue pas de façon indépendante mais est lié à l'évolution hydrique de tout le profil.

Pendant la période de dessèchement du sol il est alors difficile de calculer avec précision l'état de dessiccation de la section de contrôle à un moment donné. En particulier, on ne peut déterminer qu'approximativement la date à laquelle la section de contrôle devient « sèche » (tension  $\geq 15$  bars) dans sa partie supérieure, ce qui correspond à la fin d'une période « humide partout » (cf. § III.2 : observation a).

b. La section de contrôle devient « sèche partout » à partir du moment où toute son eau « utilisable » (tension  $< 15$  bars) a été éliminée par l'évapotranspiration.

Pour déterminer ce moment par calcul, on se base sur le *volume d'eau « utilisable »* stocké dans le sol à la fin de la période d'humidification.

Malheureusement, dans le cas où il n'y a pas de phase de surplus S, ce volume *ne peut pas être connu avec précision*.

En effet, à la fin de la saison sèche, le sol est normalement plus sec que le point de flétrissement (la tension est supérieure à 15 bars) et l'eau stockée à la fin de la phase de recharge R n'est donc pas en totalité de l'eau « utilisable ».

Comme le degré exact de dessiccation du sol à la fin de la saison sèche n'est pas connu, on ne sait pas dans quelle proportion l'eau stockée est « utilisable ». D'où une imprécision dans la détermination de la date à laquelle la section de contrôle devient « sèche partout » (cf. § III.3 : observation).

c. Faute de données, *la température du sol* doit souvent être estimée d'après la température de l'air. Selon la méthode qu'on utilise pour cette estimation, le « régime hydrique » du sol pourra, dans certains cas, être classé différemment.

Par exemple, si la température moyenne annuelle du sol est estimée un peu en dessous ou un peu au-dessus de 22 °C, le « régime hydrique » sera « xérique » ou « ustique » ; ou encore, selon la longueur de la période où la température du sol est estimée inférieure à 8 °C, le « régime hydrique » sera « xérique » ou « aridique ».

d. *Les données climatiques utilisées* pour l'estimation des « régimes hydriques » sont généralement des moyennes calculées sur un plus ou moins grand nombre d'années. Cela n'est pas conforme aux définitions de Soil Taxonomy, qui stipulent que les critères d'« humidité » et de « sécheresse » doivent être respectés pendant une proportion minimum d'années.

La variabilité interannuelle de la pluviométrie est bien connue et dans les régions semi-arides elle provoque d'importantes variations dans la durée des périodes « sèches » et « humides » de la section de contrôle. Ces variations sont suffisamment grandes pour que, d'une année sur l'autre, on passe, par exemple, des conditions « xériques » aux conditions « aridiques ».

Il n'est pas certain que l'estimation du « régime hydrique » obtenue par des moyennes rende compte de la proportion des années où ce régime est effectivement réalisé dans le sol.

e. Dans la majorité des cas étudiés ici, les périodes « humides » et « sèches » de la section de contrôle obtenues par ces méthodes climatiques rentrent dans le cadre des définitions de Soil Taxonomy et permettent d'estimer un « régime hydrique ».

Il y a cependant des exceptions et l'exemple de Boughriba (fig. 7) a montré un *cas intermédiaire* où la période « humide » ne correspond ni au régime « xérique » ni au régime « aridique ».

Cela peut provenir d'un défaut de la méthode (évapotranspiration sous-estimée ?) mais il est possible aussi que les définitions de Soil Taxonomy ne s'appliquent pas bien à certaines conditions climatiques. En effet, les « régimes hydriques » définis par l'ouvrage américain sont, avant tout, ceux des séries de sol des U.S.A. et leurs définitions ont été établies de façon à s'adapter aux limites de ces séries. Il est d'ailleurs indiqué que ces définitions pourront être modifiées si le besoin s'en fait sentir (S.T., page 54).

*En conclusion*, il faut insister sur le fait que l'estimation par les données climatiques ne peut donner qu'une approximation, plus ou moins bonne selon les cas, du « régime hydrique » d'un sol. Cela est également bien précisé dans l'ouvrage américain (S.T., page 52).

En l'absence de données mesurées sur l'évolution annuelle de l'humidité du sol, on est contraint d'estimer de cette façon le « régime hydrique » si l'on veut utiliser la Taxonomie américaine, mais il serait regrettable de s'en tenir là. Connaître l'évolution de l'état hydrique d'un sol est un facteur important pour comprendre sa genèse et le développement de ses caractères ; l'emploi des méthodes d'estimation ne doit pas faire oublier qu'il est nécessaire d'obtenir des données réelles sur les régimes hydriques par des mesures au champ, ne serait-ce que pour contrôler en certains points les résultats de l'estimation.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM  
le 27 octobre 1978*

#### BIBLIOGRAPHIE

- AUDRY (P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.X.), ROOSE (E.), VIZIER (J.F.), 1973. — Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols. N° 2. ORSTOM, Paris, 126 p. *multigr.* et annexes.
- BAVER (L.D.), GARDNER (W.H.), GARDNER (W.R.), 1972. — Soil physics. John Wiley and sons. New York, 498 p.
- BOULAIN (J.), 1977. — Le régime hydrique des sols. Institut National Agronomique ; département des sciences de la terre. Paris : 134-155, *multigr.*
- HENIN (S.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1969. — Le profil cultural. Masson. Paris, 332 p.
- IONESCO (T.), MATHEZ (J.), 1967. — Climatologie, bioclimatologie et phytogéographie du Maroc. Les Cahiers de la Recherche Agronomique. N° 24, Rabat : 27-58.
- JOLY (F.), 1957. — Note sur le calcul des indices de Thornthwaite. Institut Scientifique Chérifien. Laboratoire de géographie physique. Rabat. Document I/1957, 16 p.
- MASSONI (C.), MISSANTE (G.), 1967. — La plaine du Tadla. *Les Cahiers de la Recherche Agronomique*, n° 24, Rabat : 163-194.  
Profils de sols présentés dans la plaine du Tadla. *Les Cahiers de la Recherche Agronomique*, n° 25, Rabat : 5-72.
- RUELLAN (A.), 1971. — Les sols à profil calcaire différencié des plaines de la Basse Moulouya (Maroc oriental). ORSTOM, Paris, 302 p.
- Soil Survey Staff, 1975. — Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. United States Department of Agriculture. *Handbook*, n° 436, 754 p.
- THORNTHWAITE (C.W.), 1948. — An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Review.* : 55-94.