

**BILAN DE L'EAU**  
**ET CONDITIONS D'EXISTENCE DE LA CEDRAIE**  
**DANS LE MOYEN ATLAS BASALTIQUE (MAROC)**

**UTILISATION**  
**D'UNE « ANALYSE D'INFORMATION MUTUELLE »**  
**ENTRE LES ESPECES ET LES VARIABLES DU MILIEU**

**PAR**

**M. LECOMPTE**

Faculté des Sciences  
Rabat

**B. LEPOUTRE**

Station de recherches forestières  
Rabat

Avec la collaboration de **A. SAUVAGEOT**

Laboratoire de pédologie  
de la Station de recherches forestières - Rabat

## SOMMAIRE

### PREMIER CHAPITRE

#### INTRODUCTION

(1., 2., 3.)

1. Origine des études	
1.1. Vocation des espaces asylvatiques .....	153
1.2. Les climax de végétation du Moyen-Atlas .....	154
1.3. Conditions de régénération du cèdre .....	154
1.4. Les cédraies sur basaltes .....	154
2. Le cadre de l'étude	
2.1. Présentation géomorphologique .....	157
2.2. Climat général .....	158
2.3. Physionomie botanique .....	158
3. Méthodologie de l'étude	
3.1. Relevé de la végétation et du milieu .....	160
3.1.1. Organisation de l'échantillonnage .....	160
3.1.2. Technique du relevé .....	161
3.2. Pédologie .....	162
3.2.1. Etude des profils-types .....	163
3.2.2. Caractérisation de l'ensemble des profils .....	164
3.3. Climatologie - Dendrométrie .....	164
3.4. Mécanographie .....	166

### DEUXIEME CHAPITRE

#### RECHERCHE DES VARIABLES ACTIVES

(4)

4.1. Variables climatiques .....	171
4.1.1. Variable mésoclimatique .....	171
4.1.2. Variable microclimatique : rayonnement près du sol .....	172
4.1.3. Vigueur de la végétation .....	173

4.2. Variables édaphiques .....	174
4.2.1. Les problèmes et la méthode de recherche .....	174
4.2.2. Evolution du régime hydrique annuel dans quelques sols hors forêt et sous forêt .....	175
4.2.2.1. Les sols étudiés .....	175
4.2.2.2. Propriétés hydriques des sols andiques et andosols .....	175
4.2.2.3. Etude du régime hydrique des sols développés sur collu- vium fin profond .....	178
4.2.2.4. Etude du régime hydrique des sols développés sur couverte limoneuse, reposant sur colluvium argileux à blo- caille basaltique .....	185
4.2.2.5. Etude du régime hydrique d'un sol sur colluvium hétéro- gène limono-caillouteux, reposant sur cendres profondes altérées .....	189
4.2.2.6. Etude du régime hydrique de deux sols peu épais déve- loppés sur coulée basaltique .....	192
4.2.3. Importance du régime hydrique à l'égard de la végétation .....	196
4.2.3.1. Reconstitution des réserves hydriques .....	196
4.2.3.2. Epuisement des réserves hydriques .....	196
4.2.3.3. Comparaison des bilans d'eau libre et leurs conséquences écologiques .....	197
4.2.3.4. Conclusions .....	202
4.2.4. Les variables édaphiques responsables des réserves en eau facile- ment utilisables .....	203
4.2.4.1. Généralités .....	203
4.2.4.2. Les variables édaphiques responsables du point de flétris- sissement .....	204
4.2.4.3. Les variables édaphiques responsables de la capacité de rétention .....	206
4.2.4.4. Les variables édaphiques responsables des réserves d'eau facilement utilisables .....	209
4.2.4.5. Influence de la texture sur les propriétés chimiques des sols 4.2.4.6. Caractérisation des pseudo-limons .....	211 212
4.2.5. Conclusions .....	213
4.2.6. Classification des sols d'après leur composition granulométrique naturelle .....	216
4.3. Variables biotiques : la végétation .....	217
4.3.1. Végétation et échantillonnage .....	217
4.3.2. Dynamique de la végétation - climax .....	218
4.4. Conclusion .....	225

TROISIEME CHAPITRE

RELATIONS SOL-CLIMAT-VEGETATION

(5)

5.1. Principes du traitement mécanographique .....	226
5.1.1. Notions d'indétermination et d'information .....	226
5.1.2. Entropie des variables écologiques .....	227
5.1.3. Information mutuelle espèce-variable .....	228
5.1.4. « Equitabilité » de l'échantillonnage .....	228
5.1.5. « Activité » et « rendement » d'une variable .....	229
5.2. Résultats du traitement .....	229
5.2.1. Rendement comparé des variables élémentaires et élaborées ....	229
5.2.2. Interprétation des informations mutuelles entre les espèces et le milieu .....	232
5.2.2.1. Choix des variables étudiées .....	232
5.2.2.2. Classement des espèces indicatrices .....	233
5.2.2.3. Analyse des relations sol-végétation .....	234
5.2.2.4. Analyse des relations climat-végétation .....	237
5.2.2.5. Informations liées à la végétation .....	241
5.2.2.6. Dynamique de la végétation : climax .....	244
5.2.3. Interaction entre variables .....	246

CONCLUSION GENERALE

(6)

6.1. Résultats analytiques .....	248
6.2. Synthèse .....	249
Summary .....	251
Résumé .....	252
Bibliographie .....	253

ANNEXES. — Etude des spectres de rayons X des courbes thermiques différentielles et des éléments amorphes dans les sols formés sur matériaux volcaniques du Moyen-Atlas :

I. Analyse de quelques profils types .....	257
II. Interprétation générale .....	265

CARTE  
DE SITUATION

Echelle au 1 : 100 000

par M. Lecompte  
d'après les documents de  
J. Martin (1973),  
A. Pujos (1965)  
et M. Lecompte (1969)

LEGENDE

relief

-  escarpement concave > 100m. de dénivellé
-  talus à profil adouci
-  abrupt sur front de coulées
-  escarpement concave < 100m de dénivellé ; édifices volcaniques

végétation sur lave basaltique

-  cédraie
-  formations ligneuses basses-herbacées:  
1. adénocarpe ou *Genista quadriflora*  
2. *Genista pseudopilosa*
-  formations ligneuses basses-herbacées,  
ouvertes, à *Helianthemum croceum*
-  formations ligneuses basses-herbacées,  
très ouvertes, à thymus ou armoises
-  formations herbacées  
(prairies-pelouses)

végétation sur projections volcaniques

-  1. cédraie ou 2. chénaie (J. Hebril)
-  formations ligneuses basses-herbacées:  
1. adénocarpe ou *Genista quadriflora*  
2. *Genista pseudopilosa*
-  formations ligneuses basses-herbacées,  
ouvertes, à *Helianthemum croceum*
-  formations ligneuses basses-herbacées  
très ouvertes, à thymus ou armoises
-  formations herbacées  
(prairies, pelouses)

végétation sur roche sédimentaire

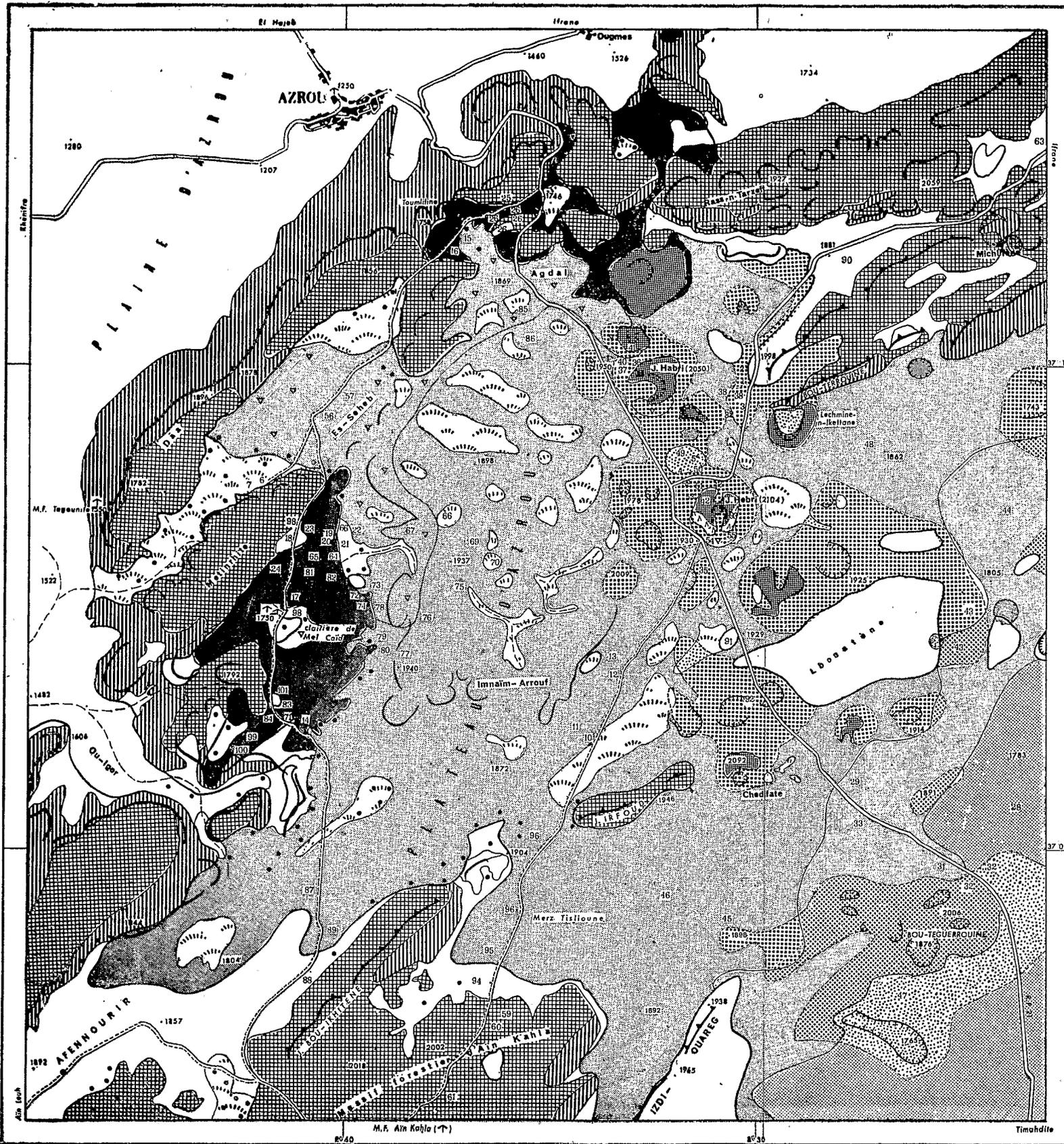
-  cédraie
-  chénaie
-  formations ligneuses, basses, pelouses,  
cultures (ces dernières sur le piedmont  
d'Azrou)

• Prés-bois d'aulépine

↑ Poste climatique

1 à 101 Emplacements des stations écologiques

dessin A. EL HAIMEUR



## AVANT - PROPOS

L'Université Mohammed V (Institut scientifique chérifien, Rabat),  
L'Administration des Eaux et Forêts (Station de recherches forestières, Rabat),  
Le C.N.R.S. (Centre d'études phyto-écologiques Louis EMBERGER, Montpellier),  
ont apporté leur concours technique et financier à la réalisation de ce travail.

Les questions soulevées par cette étude font appel à des disciplines diverses. Les auteurs remercient les chercheurs qui leur ont apporté leur collaboration et en particulier, Ch. SAUVAGE, qui est en outre à l'origine de ce travail, J. MARTIN, qui nous a aidé par sa connaissance du terrain, M. GODRON et ses collaborateurs du C.E.P.E. grâce à qui nous avons réalisé le traitement mécanographique.

## PREMIER CHAPITRE

## INTRODUCTION

## 1. ORIGINE DES ETUDES

## 1.1. Vocation des espaces asylvatiques

En décembre 1966, Ch. SAUVAGE est invité par les responsables du « Projet d'aménagement du bassin versant du Sebou » (F.A.O.) ; cartographie et vocation de la végétation naturelle, qui doivent présider au choix des interventions projetées, constituent le thème central de sa consultation. Ce choix s'avère particulièrement ardu en ce qui concerne d'immenses surfaces de végétation de type maquis, garrigue ou matorral (T. IONESCO et Ch. SAUVAGE, 1962).

Dans le Moyen-Atlas humide et sub-humide (Ch. SAUVAGE, 1963) les forêts de cèdre et de chêne vert contrastent avec des formations variées dominées par des chaméphytes et nanophanérophytes, souvent parsemées d'arbustes comme les aubépines (*Crataegus laciniata*), le frêne dimorphe (*Fraxinus xanthoxyloides*), les genévriers oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*) et thurifère (*Juniperus thurifera*). La répartition des espaces asylvatiques, souvent imbriqués avec les couverts forestiers, suggère une filiation entre ces formations ligneuses basses et la forêt. Cependant, des documents déjà anciens, cartes et photos (L. EMBERGER et R. MAIRE, 1934) attestent leur grande stabilité. Par ailleurs, les espaces découverts, traditionnellement parcourus par les ovins, souffrent manifestement de surpâturage. La question de leur vocation naturelle mérite par conséquent quelque réflexion.

## 1.2. Les climax de végétation du Moyen-Atlas

La carte de la végétation du Moyen-Atlas (M. LECOMPTE, 1969) propose au titre d'*hypothèses* un ensemble de climax de végétation (1) auxquels sont rattachées les formations ligneuses basses (matorrals). Le problème de l'asylvatisme est ainsi posé en terme de dynamique de la végétation.

Cependant, chacune des hypothèses qui conduit à proposer un climax requiert une vérification. Nous avons choisi d'étudier le plus représentatif de ces climax : la cédraie, dont l'écologie est de loin la mieux connue, et dont le devenir est une préoccupation majeure pour les forestiers de ce pays.

## 1.3. Conditions de régénération du cèdre

Cèdre et cédraie ont été étudiés de longue date (P. BOUDY, 1958 et J. MARION, 1955). Cependant, l'écologie de cette essence a connu des progrès décisifs avec les travaux de B. LEPOUTRE et A. PUJOS.

La régénération du cèdre est soumise à des contraintes climatiques étroites, déterminées par les exigences de la plante vis-à-vis de l'eau du sol et du froid : il lui faut un maximum d'eau en période végétative (chaude) laquelle doit être la plus précoce possible.

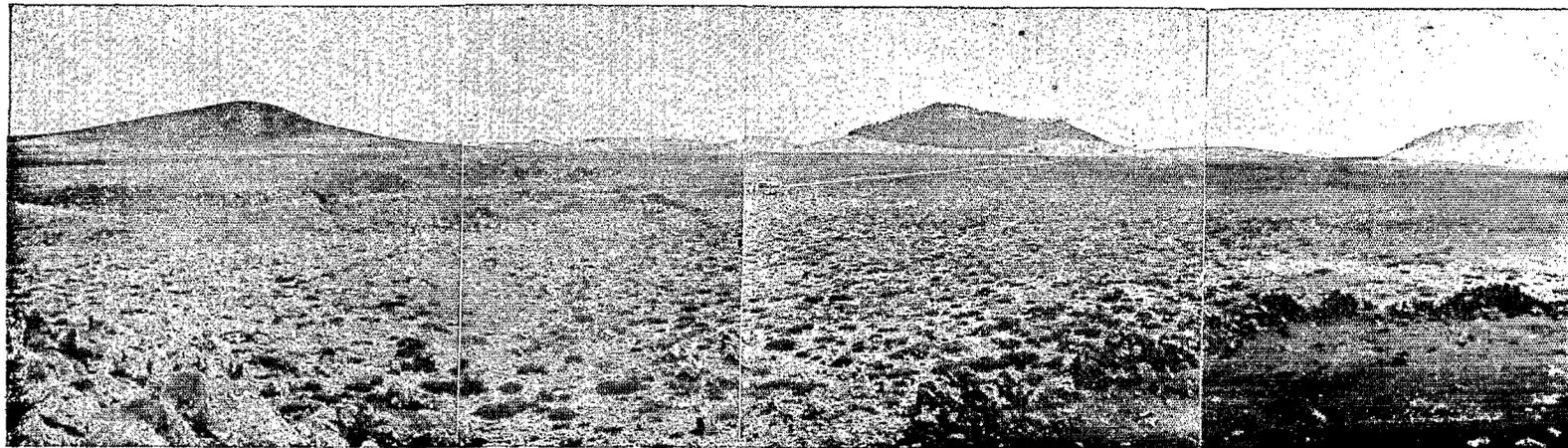
En climat méditerranéen montagnard, le surcroît de précipitations est malheureusement corrélatif d'une rigueur accrue de l'hiver sans disparition de la saison sèche estivale. Aussi les probabilités climatiques de régénération du cèdre (son *espérance pluviothermique* - B. LEPOUTRE, 1964) sont-elles souvent faibles, même dans les montagnes les mieux arrosées en saison froide, sauf si le sol est capable de constituer des réserves d'eau pour l'été.

A climat donné, les qualités hydriques du substrat sont par conséquent déterminantes pour la réussite de l'espèce. Et sans doute l'hétérogénéité du substrat explique-t-elle pour une grande part la diversité écologique des cédraies marocaines dans le domaine bioclimatique du cèdre (A. PUJOS, 1966).

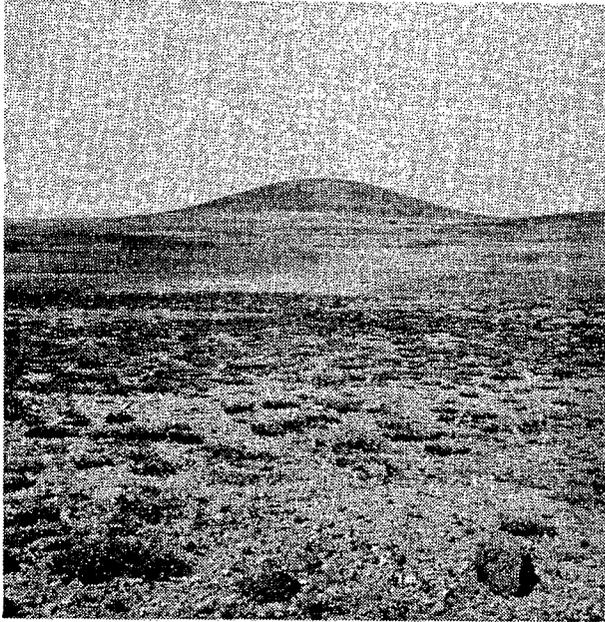
## 1.4. Les cédraies sur basaltes (carte de situation - fig. 1)

Cependant, certains cas remarquables d'asylvatisme ne semblent répondre ni à l'hétérogénéité du climat, ni à celle du substrat, comme les vastes espaces découverts qui correspondent aux basaltes quaternaires du plateau d'Azrou (cliché n° 1).

(1) Improprement dénommés séries dans la légende de la carte.



Cliché 1. — Vue d'ensemble du plateau d'Azrou.  
Au premier plan, matorral ouvert à *Genista pseudopilosa*.  
Au dernier plan, les appareils volcaniques.



Cliché 2. — Du premier au second plan,  
matorral à genêt, puis pelouse à fétuques.

L'absence du cèdre sur la majeure partie du plateau, à l'exception de certains édifices volcaniques (cliché 1), est d'autant plus surprenante que les basaltes constituent d'ailleurs un substrat d'élection pour cette essence, qui s'y régénère mieux que partout : ainsi les cédraies qui bordent le plateau sur sa retombée occidentale sont parmi les plus denses que l'on connaisse ; de même, le Seheb porte de magnifiques cédraies, jeunes et vigoureuses.

Il nous a paru intéressant d'aborder le problème de l'asylvatisme sur ces terrains, sous son aspect le plus singulier.

## 2. LE CADRE DE L'ETUDE

### 2.1. Présentation géomorphologique, par J. Martin

La région étudiée fait partie de ce qu'on peut appeler le « plateau d'Azrou », élément occidental des causses moyen-atlasiques. Il s'agit en effet d'un causse sous-tendu par les assises dolomitiques et calcaires du *Lias* reposant sur les séries tendres du *Trias* (argilites rouges et basaltes altérés). Ces formations dessinent un grand escarpement au-dessus de la plaine d'Azrou (1 100-1 200 m) dont le relief appalachien est à rattacher aux paysages du plateau central marocain.

Les inégalités du causse, dues à des cassures et à des flexures, ont été masquées au *quaternaire moyen* par d'énormes épanchements de laves basaltiques (1) très fluides dont les émissaires dévalent en coulées chaotiques vers la plaine d'Azrou. Chapeautant les nappes de laves, de petits édifices volcaniques accidentent le plateau et lui donnent une allure de « petite Auvergne » : ce sont le J. Hebri, le J. Habri, le Chedifate, etc. L'épaisseur de la dalle basaltique paraît être très variable mais dépasse en plusieurs points la centaine de mètres, notamment entre l'Afen-nourir et le J. Hebri, c'est-à-dire dans l'axe d'un synclinal affectant les séries du *Lias*.

L'âge des émissions volcaniques peut être précisé par des arguments morphologiques. Les coulées s'inscrivent en effet sous une terrasse 4 (dite *amirienne*) alors qu'elles sont recouvertes par des colluvions et des cônes du niveau 3 (dit *tensiftien*, équivalent probable du Riss européen). En réalité, l'épisode volcanique a eu une durée plus grande. On reconnaît en effet une première phase, avec la construction de vieux volcans (Lechmine-n-Ikettane) une seconde phase anté-tensiftienne correspondant aux grands épanchements d'origine fissurale, et une troisième phase tensiftienne caractérisée par des explosions et un saupoudrage de produits pyro-

(1) La composition minéralogique et chimique des roches volcaniques est celle d'un classique basalte à olivine — analyses du service des Mines de Rabat.

clastiques. Les tranchées dans les petites dépressions du plateau prouvent que loin de l'uniformité actuelle, les coulées basaltiques, surtout à proximité des volcans, étaient extrêmement chaotiques. L'adoucissement du modelé de surface est dû à deux facteurs essentiels : un *colluvionnement notable à partir du front des coulées* au cours des deux derniers pluviaux (tensiftien et soltanien) et un feutrage de cendres piégées dans les creux.

Les coulées prédominent dans la partie W de la région. Compacte ou bulleuse, la lave est disjointe en blocs de taille et de forme variables. En conséquence, la perméabilité est grande ; elle interdit toute circulation superficielle des eaux, lesquelles alimentent une circulation karstique dans les calcaires et dolomies sous-jacents ; les dayas sont temporaires et restent sèches par années de faible pluviométrie. Les sols constituent donc le seul obstacle à l'infiltration des eaux de pluies.

A l'est de la route d'Azrou à Timahdite, les projections volcaniques dominent : cendres et tufs cendreux, lapilli parfois soudés en un solide conglomérat, s'imbriquent selon une mosaïque compliquée. L'altération souvent poussée de ces matériaux, génératrice de sols profonds, contraste avec la relative pérennité des laves ; mais ils ne s'opposent pas davantage que ces dernières à l'infiltration des pluies.

## 2.2. Climat général

Le climat du plateau d'Azrou est froid et humide. Les précipitations moyennes annuelles (P) y varient de 1 000 à 700 mm du N.-W. vers le S.-E., la moyenne des températures minimales de janvier avoisine  $-5^{\circ}$ . Ces valeurs situent l'ensemble de la région étudiée dans les étages humide et sub-humide froids de la classification d'EMBERGER.

Toutefois, le caractère méditerranéen du climat reste fortement marqué par la *sécheresse* d'été : juillet et août reçoivent ensemble 25 mm de pluie à Ifrane, juin et septembre en reçoivent chacun 30 mm. La saison sèche au sens de GAUSSEN excède légèrement trois mois et demi (fig. 2). Sec en été, froid en hiver, le climat de ce plateau est donc doublement difficile.

## 2.3. Physionomie botanique

La physionomie de la végétation du plateau d'Azrou est assez uniforme, et dans un premier aperçu l'hétérogénéité des matériaux volcaniques, coulées et projections, ne semble pas s'y refléter toujours. La carte de situation distingue trois types de formations : forêts, matorrals et pelouses.

La *forêt*, limitée à la bordure occidentale du plateau (forêt du Seheb) et aux volcans, est une cédraie abondamment régénérée, souvent jardinée et dense. Le sous-bois ligneux (chêne vert, houx, aubépine...) s'y développe difficilement, sauf dans les boisements en marge de l'iliciaie, où la régénération du cèdre est inégale.

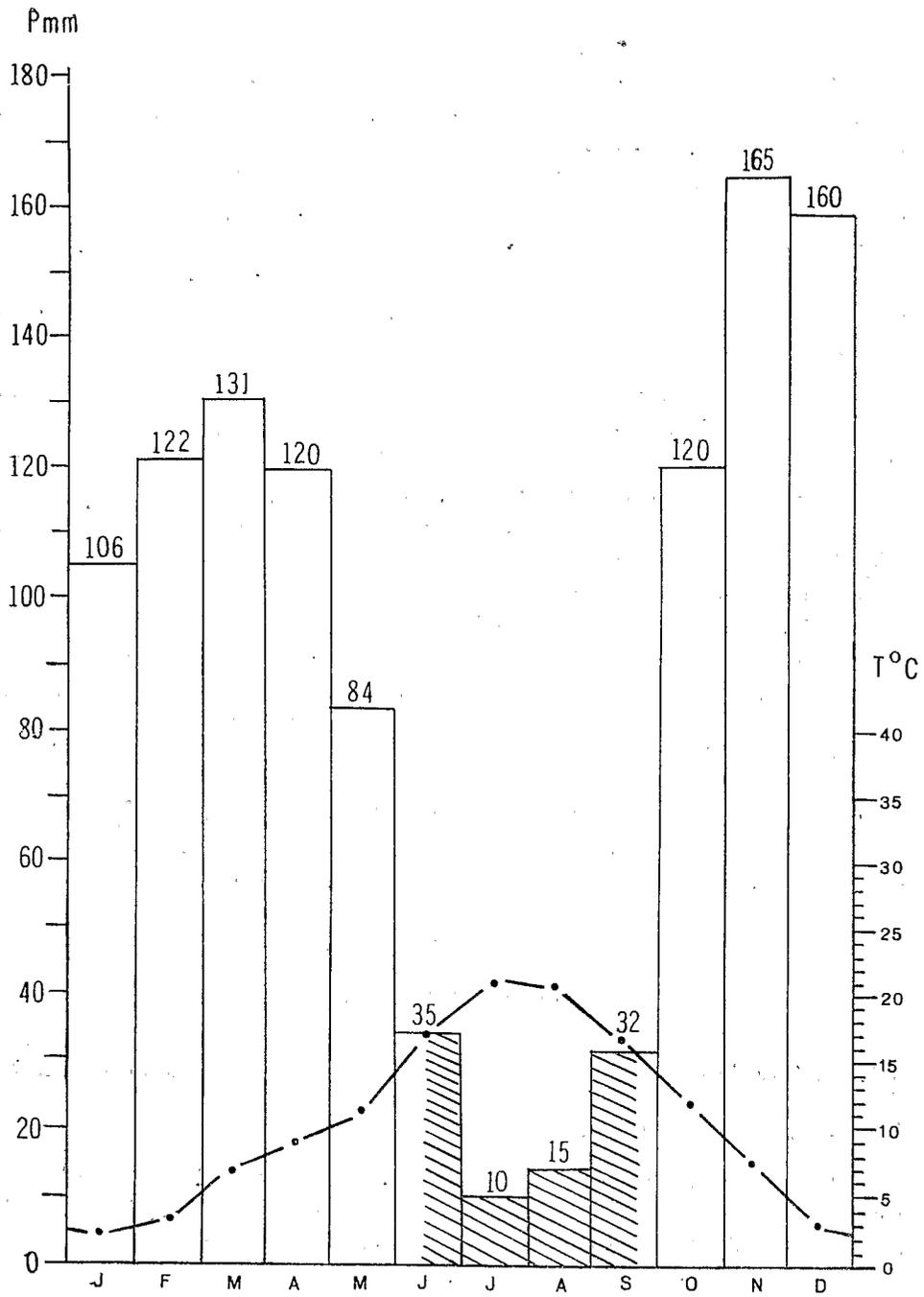


Fig. 2 Diagramme ombrothermique de la station d'Ifrane - aviation

Les *matorrals* <sup>(1)</sup> couvrent la plus grande partie du plateau, sauf les surfaces moins drainées latéralement. Les espèces principales sont des genêts : *Genista pseudopilosa* et *Adenocarpus boudii*, le premier dominant en altitude. L'hélianthème jaune (*Helianthemum croceum*) et les thyms (*Thymus zygis* et *Th. algeriensis*) sont de fidèles compagnes, ainsi qu'une herbe vernale, *Poa bulbosa*, qui dès la fin de l'hiver colore en vert tendre les pâturages. Les fétuques (*Festuca ovina* s.l. et *F. rubra* s.l.) relaient le pâturin au printemps, dans des tonalités jaunissantes ; elles préfèrent cependant les sols de texture moins grossière sur matériaux détritiques, où le matorral est d'ailleurs plus serré, comme sur les versants des volcans (A. PIQUÉ, 1966).

Lorsque sur ces mêmes matériaux le drainage latéral diminue, ou que la couverture terreuse s'épaissit, comme dans les bas de versants, les chaméphytes laissent la place aux herbes : *pelouses* denses, où les fétuques dominent (cliché n° 2). Des pelouses occupent également les colluvions terreux, au pied des coulées, et plus généralement en topographie déprimée. Mais ces pelouses sont d'apparence variée. Ainsi les clairières du Seheb sont-elles occupées par des formations hautes et denses qui évoquent la prairie, et contrastent avec des pelouses apparemment sèches dans la zone découverte, sauf dans les mouillères. Enfin des formations rases, très pauvres, recouvrent les coulées squelettiques au sol le plus mince ; *Poa bulbosa* et *Carex divisa*, tôt desséchés, leur donnent précocement l'aspect d'un paillason.

Matorrals et pelouses dessinent sur le plateau une mosaïque complexe, qui contraste avec l'apparente uniformité des surfaces boisées. *Les espaces découverts n'opposent donc pas à la forêt un milieu uniforme.* Par conséquent il faudra comparer les rapports de la forêt avec les diverses pièces de la mosaïque, les choses se compliquant encore du fait d'une certaine diversité forestière.

### 3. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

#### 3.1. Relevé de la végétation et du milieu (voir carte de situation - fig. 1)

##### 3.1.1. Organisation de l'échantillonnage

Milieu et végétation doivent être observés simultanément, de manière à établir leurs relations de dépendance. La première tâche consiste en l'inventaire des milieux, identifiables le plus souvent d'après la seule physionomie de la végétation :

(1) Ce terme est pris ici dans sa double acception physionomique et dynamique (T. IONESCO et Ch. SAUVAGE, 1962) puisque nous avons supposé (M. LECOMPTE, 1969) que les formations « herbacées-ligneuses basses » (M. GODRON, 1968) correspondantes se rattachent à des climax forestiers.

les variations du couvert végétal fournissent par conséquent la base essentielle de l'échantillonnage, outre les éléments de la topographie, la nature de la roche, et les « secteurs climatiques » (voir ci-dessous, 4.1.).

Le milieu est stratifié en unités homogènes vis-à-vis de l'ensemble de ces critères : un type de végétation, pour une situation topographique, sur un type de roche, dans un climat donné. Chaque unité figure à l'inventaire sous la forme de *relevés stationnels* floristiques et écologiques, pris au hasard. Nous avons en outre élargi l'échantillonnage aux milieux limitrophes du domaine d'étude, lorsque ceux-ci fournissent des valeurs intéressantes pour les variables écologiques observées. Par exemple : les valeurs limites des gradients climatiques, vers l'W et vers l'E — les roches calcaires ou dolomitiques affleurant parmi les basaltes — les milieux édaphiques les plus humides sur matériaux d'altération des calcaires. Ces observations complètent l'étalement écologique des espèces, soit que celles-ci éprouvent leurs limites dans les milieux marginaux, soit qu'elles s'y maintiennent au contraire. Nous avons par contre exclu de l'inventaire des milieux très particuliers, comme les nombreux gouffres qui grèlent les coulées basaltiques, et abritent une végétation ligneuse originale.

Les stations hétérogènes « dans le détail » sont relevées par éléments séparés, comme le recommande M. GOUNOD (1969). C'est notamment le cas pour une majorité de stations forestières, dont la flore varie beaucoup selon la répartition de l'ombre : il faut y séparer les situations d'éclairement contrasté, faute de quoi l'analyse des relations végétation-lumière se trouverait faussée. Le découvert présente également des situations hétérogènes dans le détail, par exemple des « micro-mosaïques » de matorrals et de pelouses (1).

Ainsi organisé, l'échantillonnage comporte 187 relevés répartis sur 104 stations. Il a porté sur deux années (1969-1970), réduites à une courte période de végétation active : les mois de mai et de juin pour le secteur découvert, ceux de juin et de juillet pour la forêt.

### 3.1.2. *Technique du relevé*

Ces techniques sont résumées sur un ensemble de formulaires-types (M. GODRON, 1968) :

1. Environnement climatique et description de la végétation.
2. Caractères externes du substrat de la végétation.
3. Inventaire floristique.
4. Description d'un profil du sol.

(1) Comme pour la distribution des arbres en forêt, ces situations semblent liées à la dynamique interne des formations, souvent initiée par l'action de l'homme, et non à l'hétérogénéité intrinsèque du terrain. Les *éléments* seraient donc ici d'origine *endogène*, selon la terminologie proposée par M. GOUNOD (1969).

Ces formulaires sont très complets, et nous en avons parfois simplifié l'emploi compte tenu des réalités du terrain et des finalités et moyens de notre étude :

— Les renseignements floristiques devant être exploités en terme de présence-absence des espèces, nous avons en partie négligé les autres indications.

— Nous avons mesuré notre effort sur la partie pédologique en limitant les descriptions complètes de profils à une vingtaine de tranchées profondes, choisies en des situations caractéristiques ; mais ce sondage de base (1969) est complété par un échantillonnage plus dense, réalisé à l'aide de la tarière pédologique (1970). En effet, celle-ci s'est avérée utilisable sur l'ensemble du terrain, car les sols comportent toujours des horizons meubles ; et elle permet de recueillir des informations essentielles, à l'exception des caractères du sol en place tels que la structure, les enracinements, et de ceux de la roche dure.

### 3.2. Pédologie

L'uniformité relative de la géographie et du climat conduit à s'interroger sur le rôle du substrat et à rechercher des coïncidences entre sols et végétation, l'hypothèse la plus simple étant que chaque type de végétation reflète un substrat original. Nos premières observations (1969) ne confirment pas cette hypothèse ; en particulier les profils décrits sous forêt ne diffèrent pas significativement (aux horizons de surface près) de certains profils du secteur découvert. Par conséquent, les sols ne peuvent agir seuls, mais conjointement avec d'autres variables, par l'intermédiaire de *facteurs* à déterminisme complexe. Quels sont ces facteurs ? Ils sont indépendants du chimisme de la roche-mère, puisque celle-ci paraît chimiquement constante en forêt et hors forêt (cf. 2.1.). Ils ne peuvent donc mettre en jeu que des variables physiques du substrat.

On connaît par ailleurs les conditions essentielles de l'installation du cèdre. Certaines, liées à la préexistence même de la forêt ne nous concernent pas *a priori* : par exemple, la mycorrhization des semis suppose la proximité des adultes (B. LEPOUTRE, 1963). Les autres ont trait à la *vocation* forestière du milieu initial. Sous un climat convenable, celle-ci dépend d'abord (cf. *supra*) de la capacité des sols à conserver, puis restituer les pluies surabondantes de l'hiver. En outre, le climat du sol en hiver conditionne la santé des racines et par conséquent l'efficacité de l'absorption racinaire en période active : A. PUJOS (1966) a insisté sur le caractère défavorable à cet égard des sols compacts et mal aérés, développés sur matériaux d'altération des calcaires, dont l'excès d'eau retarde l'implantation des semis au printemps, les exposant ainsi au dessèchement précoce des horizons superficiels en été.

Ainsi le *régime hydrique édaphique*, très dépendant des caractères physiques du sol, pourrait-il constituer le premier facteur recherché. L'étude des sols est orientée en ce sens, selon une stratégie analogue à celle de l'échantillonnage phyto-écologi-

que : un nombre limité de profils-types font l'objet d'études approfondies, permettant d'étalonner l'ensemble, la majorité des profils pouvant alors être caractérisée de manière plus simple, par un ou quelques paramètres facilement mesurables.

### 3.2.1. Etude des profils-types

Parmi les vingt-sept profils ayant fait l'objet d'une description détaillée on a sélectionné un ensemble de sept. Six d'entre eux constituent des binômes entre forêt et découvert, pour trois types de textures contrastées. Le dernier est un cas complexe.

Texture :	Découvert	Forêt
Argiles profondes	5 Pel. sèche	17
Limons profonds	7 Prairie	14
Sol complexe sur tuf cendreuse	3 Mattoral dense	
Sables et limons superficiels	15 Prés - Bois d'aubépines	16

Ces sept profils critiques ont été soumis à un ensemble d'analyses classiques, complétées par des mesures particulières destinées à préciser leur comportement hydrique et les conditions de leur genèse.

#### a) Composition minéralogique des échantillons (annexe pédologique)

Ces mesures sont partiellement reprises, outre les profils-types, sur les profils 8, 9, 10 et 19. On s'est efforcé de préciser la composition des échantillons par l'étude des *éléments amorphes* et des *argiles*, dérivés notamment des allophanes constitutifs de la pâte basaltique. Les amorphes et les divers minéraux argileux manifestent en effet des propriétés différentes vis-à-vis de l'eau.

Les premiers sont à cet égard remarquables. Ils peuvent s'imbiber d'eau en grande quantité et retenir celle-ci énergiquement. Leurs propriétés colloïdales marquées influent par ailleurs sur la structure du sol, par la cimentation des particules les plus fines.

Ce dernier caractère modifie les analyses granulométriques en renforçant la pondération des limons au détriment des argiles (1). Enfin, il est possible que les changements d'état saisonniers des éléments amorphes modifient corrélativement

(1) Les échantillons doivent être traités par les ultrasons préalablement à l'analyse granulométrique pour obtenir des suspensions correctes.

certaines constantes hydriques, comme le pF. Les éléments amorphes sont abondants dans les sols qui reposent sur les projections volcaniques. Le profil 3. est à cet égard caractéristique.

#### b) Régime hydrique des sols en place

L'étude de l'évolution cyclique de l'eau dans les sols en place s'est avérée particulièrement intéressante. On a pu préciser les variations saisonnières de l'eau libre (teneur en eau — pF) selon la texture et les conditions micro-climatiques des sept profils témoins. Les observations, qui portent sur 2 années (octobre 1969 à octobre 1971) peuvent être comparées aux mesures climatiques et dendrométriques poursuivies durant la même période (voir ci-après, 4.2.).

Des mesures de perméabilité *in situ* complètent ces observations sur le terrain.

#### 3.2.2. Caractérisation de l'ensemble des profils

La texture et la profondeur du sol meuble permettent une estimation de la réserve d'eau libre, facilement mobilisable, par comparaison avec les profils-types sur lesquels on a étudié le régime hydrique. On a établi en conséquence les profils granulométriques d'un deuxième ensemble de sols, qui recouvre à peu près la diversité des stations échantillonnées, soit 56 profils.

### 3.3. Climatologie - Dendrométrie

Les mesures climatiques de la Station régionale d'Ifrane ne peuvent être extrapolées sans contrôle au secteur du plateau d'Azrou. Par ailleurs, il est nécessaire de préciser les nuances induites localement par l'orographie, car s'il paraît exclu que des variations *purement* climatiques suffisent à expliquer les variations de la végétation, cela reste possible par l'effet conjugué du climat et de l'édaphisme.

Les principaux secteurs orographiques sont indiqués sur les deux coupes de la fig. 3.

1. Le brusque dénivelé de l'escarpement d'Azrou.
2. Après une rupture de pente marquée, l'accès occidental, faiblement incliné vers l'W., du plateau.
3. La surface sommitale, très plate sur les coulées, limitée par des lignes hautes sur tout son pourtour.
4. La retombée très douce du plateau vers le N.-E. (haute plaine du Guigou).

La cédraie couvre les sommets de l'escarpement, et, en partie, l'accès occidental du plateau (massif forestier du Seheb).

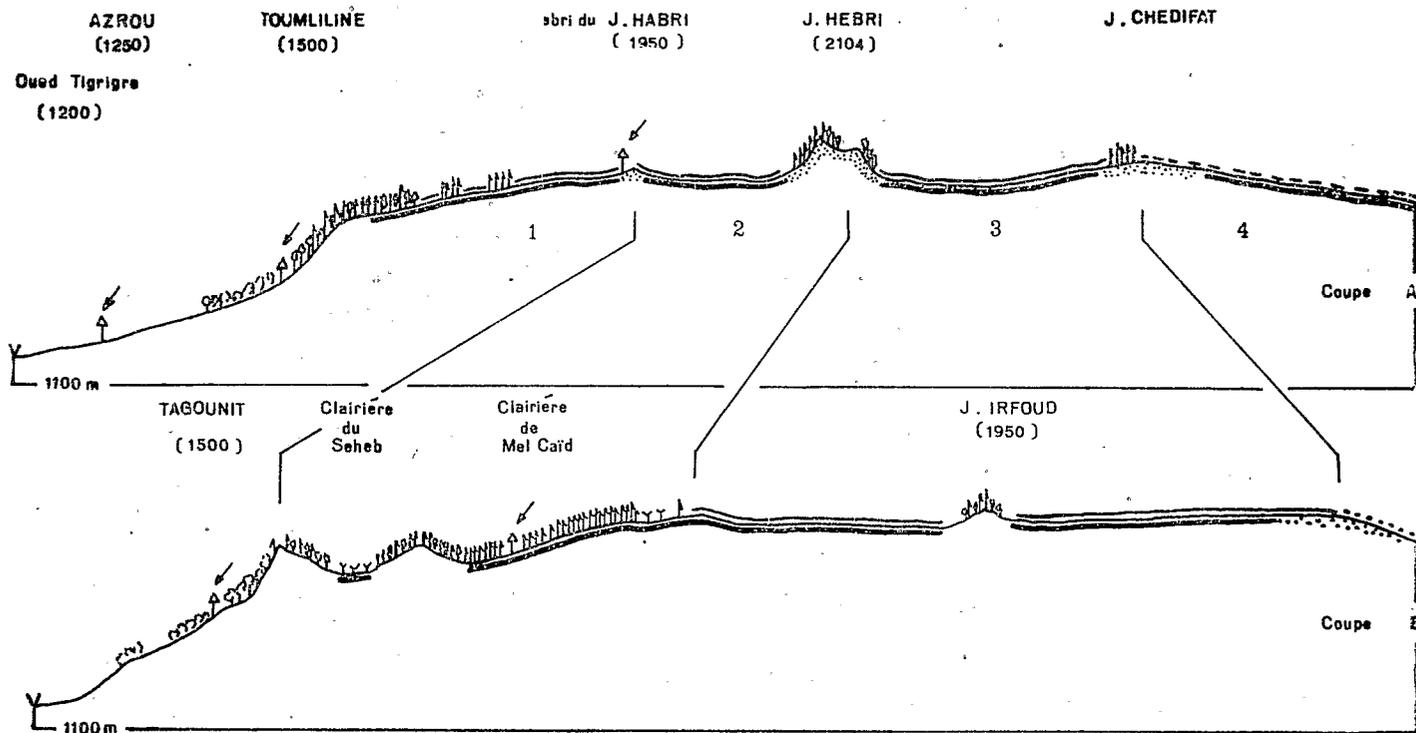


Fig. 3 SECTEURS OROGRAPHIQUES DU PLATEAU D'AZROU. ↑ = postes climatiques

végétation: taillis bas de chêne vert taillis élevé de chêne vert cèdre et chêne cédraie dense aubépines matorrals à adénocarpe ou genêt matorral à hélianthème erme à thyms

Roche: coulées basaltiques projections volcaniques

Deux stations climatiques nouvelles, à Mel-Caïd et au J. Habri (voir carte de situation) et trois plus anciennes rééquipées pour la circonstance (Azrou, Tagounit et Aïn-Kahla) précisent inégalement ces diverses situations, à commencer par la dualité forêt-déouvert. Nous avons tenté de suppléer aux lacunes de ce réseau, notamment dans les secteurs 3 et 4, par des mesures instantanées. Afin d'éliminer l'influence microclimatique du couvert les postes du domaine forestier sont placés au centre de vastes clairières ; et afin de préciser cette influence, celui de Mel-Caïd est doublé d'un abri sous forêt.

Les postes sont équipés pour les mesures de température et d'hygrométrie, sous abri à 1,50 m du sol, et pour celle de la pluviométrie. En fait, seules les premières mesures, réalisées par enregistrement, se sont avérées sûres ; les mesures de pluviométrie sont incomplètes ou douteuses, et nous avons préféré nous référer aux mesures d'Ifrane, dont le régime des précipitations s'est avéré représentatif de l'ensemble de la région.

Les mesures *microdendrométriques* entreprises par D.X. DESTREMAU au voisinage de Mel-Caïd précisent les rythmes saisonniers de croissance radiale du cèdre pour les années 1970 et 1971. Ces rythmes constituent un excellent critère de l'efficacité biologique des phénomènes édaphiques et climatiques étudiés.

### 3.4. Mécanographie

Les observations réalisées sur les profils-témoins, ainsi que les mesures climatiques peuvent être extrapolées grâce aux indications des plantes, à condition de connaître les liaisons des espèces avec le milieu : ceci est l'objet de l'échantillonnage phyto-écologique et de son traitement.

La méthode choisie, due à Michel GODRON (1968), est résumée ci-dessous (5.1.). Elle repose sur le calcul de l'information apportée par diverses variables du milieu (1) sur la distribution des espèces. Cette information croît avec l'influence écologique des variables ; la méthode permet donc aussi de mesurer cette influence. Enfin, la méthode permet d'évaluer « l'équitabilité » de l'échantillonnage (représentativité de l'échantillon).

(1) Nous avons distingué les variables du milieu, dont l'influence n'est pas connue *a priori*, d'une part, des facteurs écologiques qui synthétisent l'action de ces variables d'autre part ; notre but est justement de montrer comment s'opère cette synthèse.

Cependant, l'action du milieu est analysée ici par *variables séparées*, sans qu'apparaissent leurs interactions (redondances). Le traitement n'a pas en soi le pouvoir inductif des « *analyses multivariées* » (ROMANE F., 1972), qui permettent de détecter les groupes de liaisons indépendants entre variables élémentaires, ces groupes étant assimilables aux facteurs écologiques. L'avantage de ces analyses est donc de démêler les interactions inconnues *a priori* d'une multiplicité de variables élémentaires considérées *simultanément*. Au contraire, la méthode utilisée ici suppose un choix et une élaboration préalable des données, puisque celles-ci vont être analysées séparément; c'est-à-dire qu'il convient de présenter à l'analyse les combinaisons de variables dont les incidences écologiques sont probables. Sinon, l'interprétation des données se heurte à l'imbroglio des compensations entre variables. Le chapitre 4 expose les regroupements de variables recherchés dans ce but.

Les données recueillies ont été traitées au C.E.P.E. Louis EMBERGER au printemps 1971, selon un programme mis au point par P. DAVID, V. GERARDIN et M. GODRON (1).

(1) Mécanographie réalisée sur l'ordinateur IBM 360, de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, à Montpellier.

## DEUXIEME CHAPITRE

## RECHERCHE DES VARIABLES ACTIVES

## 4. RECHERCHE DES VARIABLES ACTIVES

Le code du C.N.R.S. pour le « relevé méthodique de la végétation et du milieu » (M. GODRON, 1968) fournit un inventaire relativement exhaustif des *variables élémentaires* du milieu. Nous ne les avons pas toutes observées et moins encore analysées, mais nous avons retenu celles présentant un minimum d'hétérogénéité apparente. Leur liste suit, numérotée selon l'ordre de leur traitement mécanographique.

A cette liste s'ajoutent les *variables élaborées*, conçues par combinaison de certaines variables précédentes en vue d'une meilleure efficacité écologique (cf. 3.4.). L'élaboration de ces dernières est exposée dans le présent chapitre.

La liste totale comportait à l'origine 67 variables, dont 30 seulement sont complètement analysées ; ce sont celles qui figurent sur le diagramme du « rendement des variables » de la fig. 18 (5.2.1.). Les variables élaborées sont soulignées.

- |   |  |
|---|--|
| 1. <u>Climax</u>                          | 43. % en surface de la terre fine                |
| 14. Couvert angul./strate 1               | 44. % recouvrement basal de la végétation        |
| 15. Couvert angul./strate 2               | 45. % en surface de la litière                   |
| 16. Couvert angul./strate 3               | 47. Vigueur de la végétation                     |
| 24. % d'ouverture ligneux bas             | 52. Nature de la format. superf. (sol mble)      |
| 25. % d'ouverture herbacés                | 53. Nature de l'assise                           |
| 26. Régularité struct. végétat.           | 58. <u>Mésoclimat</u>                            |
| 27. Formation                             | 61. Texture des fractions fines                  |
| 28. Artificialisation                     | 62. Profondeur de la format. superf.             |
| 29. Première espèce dominante             | 63. <u>Estimation de la réserve hydrique sol</u> |
| 30. Première espèce discriminante         | 65. <u>Unité d'occupation du sol</u>             |
| 31. Altitude                              | 66. <u>Variable édaphique approchée</u>          |
| 32. Exposition                            | 67. Rayonnement au sol.                          |
| 33. Position topographique                |  |
| 34. Pente                                 |  |
| 38. Nature de la roche                    |  |
| 41. % en surface de la roche et des blocs |  |

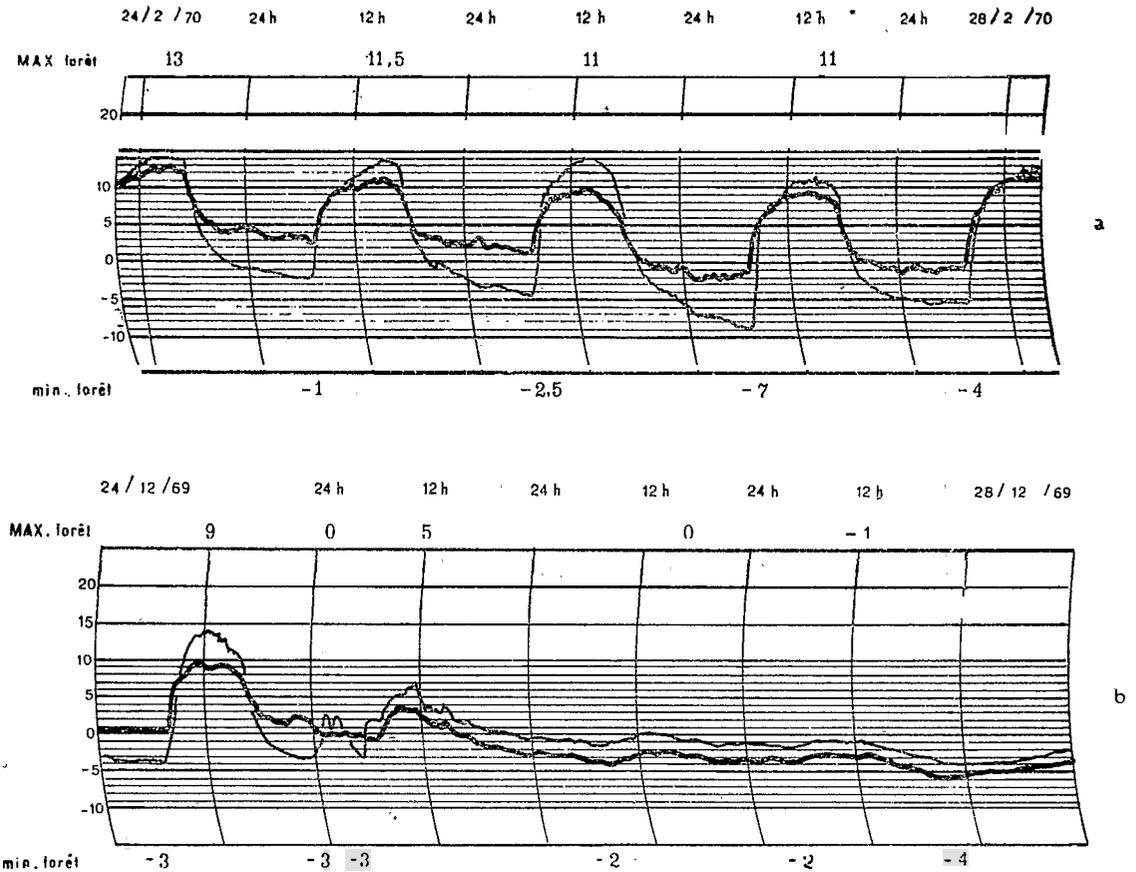


Fig 4 courbes d'enregistrements thermiques comparées des stations de Mel Caïd <sup>clairière</sup> et de J Habri  
 a par beau temps hivernal  
 b: par temps perturbé succédant a un beau temps hivernal  
 les minima et maxima du poste de Mel Caïd forêt sont portés en regard des extrêmes quotidiens des courbes

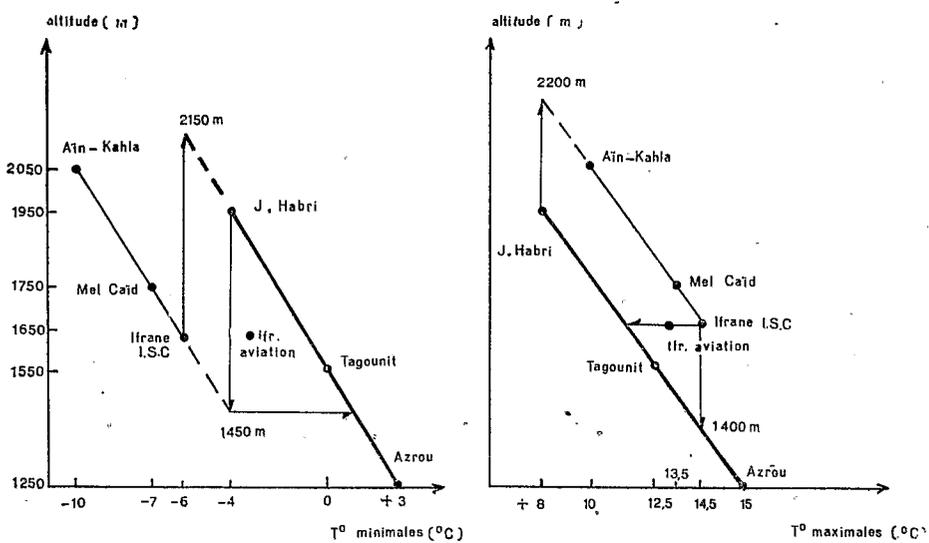


Fig: 5 Gradients thermiques comparés des stations de l'escarpement et du plateau d'Azrou.

## 4.1. Variables climatiques

### 4.1.1. Variable mésoclimatique

— La pluviométrie moyenne marque un accroissement notable sur la face W. des reliefs (secteur topographique 1) : déjà forte à Azrou (850 mm), elle avoisine la valeur d'Ifrane (1 100 mm) au sommet de l'escarpement, et elle atteint 950 mm dès son milieu, à Toumliline.

La pluviométrie reste probablement élevée jusqu'à la surface du plateau, puis elle décroît vers l'E. : il pleut 750 mm à Aïn-Kahla, et seulement 450 mm à Timahdite.

On distingue en conséquence deux secteurs pluviométriques : *humide*, correspondant aux secteurs 1, 2 et 3, et *sec* (secteur 4).

— Les *secteurs thermiques* ne coïncident pas avec les précédents, car les régimes thermiques manifestent des singularités remarquables, liées à l'orographie, qui modifient profondément les gradients altitudinaux (H. DELANNOY et M. LECOMPTE, 1974).

Si l'on compare, par régime anticyclonique, les stations du plateau d'Azrou et des causses adjacents à celles des escarpements de bordure, on est surpris des résultats non conformes aux règles classiques de variation altitudinale des températures. Ainsi, la Station de Jbel Habri (1 950 m) située dans un ensellement au sommet de l'escarpement d'Azrou se refroidit sensiblement moins la nuit que celle de Mel-Caïd (1 750 m) située en léger retrait de cet escarpement : la différence est couramment de 5°C et parfois du double ! (fig. 4 a). Mais à l'inverse, la première se réchauffe parfois moins que ne le laisse prévoir la différence d'altitude (fig. 4 b, maximum du 24/12/69). Ces anomalies disparaissent par temps perturbé, où la station la plus élevée est souvent un peu plus froide que l'autre, de l'ordre de 2°C (fig. 4 b).

Ces observations sont vérifiées, à des nuances près, pour toutes les stations correspondant à l'ensemble topographique considéré ; elles sont valables en toute saison, quoique les chiffres puissent varier comme cela restera à préciser. Les moyennes des minimales  $\bar{m}$  et maximales  $\bar{M}$  de *beau temps* s'ordonnent par conséquent sur des couples de gradients altitudinaux parallèles, décalés de plusieurs degrés, schématisés sur la figure 5 pour les temps hivernaux : les  $\bar{m}$  des stations de l'escarpement sont décalées en hausse, de l'ordre de 5°C à altitude égale de celles du plateau ; cet écart équivaut à un dénivelé de 500 m pour le gradient altitudinal généralement observé (1°C/100 m). Pour les  $\bar{M}$ , les stations de l'escarpement restent, à altitude égale, plus fraîches que celles du plateau, de l'ordre de 3°C, mais ce chiffre demande à être précisé.

Si l'on prolongeait vers le bas le gradient des stations du plateau, les valeurs relevées dans le Saïs de Fès-Meknès et sur les causses moyen-atlasiques inférieurs viendraient s'y inscrire. Les stations de l'escarpement présentent donc un profil

thermique particulier, par une double atténuation des températures minimales et maximales. Celle-ci résulte de l'influence de brises qui s'établissent par temps calme au niveau des fortes discontinuités orographiques ; leur régime alterné, analogue à celui des brises marines, tempère les écarts quotidiens du bilan radiatif comme par l'effet d'une *ceinture thermique* — « thermic belt » dans les publications en anglais (R. GEIGER, 1965).

La fréquence élevée des temps anticycloniques confère une grande importance au phénomène, qui se répercute largement sur les moyennes ; ainsi s'expliqueraient notamment les valeurs anormalement élevées des minima moyens hivernaux dans les stations de l'escarpement (Azrou, Tagounit, Toumliline, J. Habri).

On distingue par conséquent trois secteurs thermiques. Le premier, à caractère *tempéré*, coïncide avec le haut de l'escarpement, qui bénéficie de l'influence de la ceinture thermique (premier secteur orographique) — le second, à caractère *froid*, coïncide avec l'accès occidental du plateau qui, situé, en retrait de l'escarpement, ne bénéficie plus de l'influence de la ceinture thermique (deuxième secteur orographique) — le troisième, à caractère *très froid*, correspond au plateau proprement dit et à l'amorce de sa retombée orientale (troisième et quatrième secteurs orographiques).

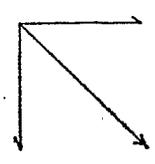
La combinaison des données thermiques et pluviométriques, dont on sait l'importance pour la régénération du cèdre (cf. *supra*, 1.3.), définit une *variable mésoclimatique* à 5 classes. Sauf dans la classe 3, le mésoclimat semble *a priori* compatible avec l'existence de la cédraie.

P \ t°	t°		
	Très froid	Froid	Tempéré
Humide	0	1	2
Sec		3	4

#### 4.1.2. Variable microclimatique : rayonnement près du sol

Les climats connaissent évidemment de multiples nuances selon le détail des variations topographiques et du couvert végétal (GEIGER, 1965, et F.A.O., 1962). Sous le climat très lumineux de nos montagnes, ces variables agissent principalement sur la distribution au sol du *rayonnement*, qui régit à son tour les bilans hydrique et thermique de la station ; la comparaison des postes « clairière » et « forêt » de la station de MelCaïd (fig. 4) mesure l'influence du couvert forestier ; lequel réduit *en moyenne* de 2°C les extrêmes de température.

Faute de pouvoir enregistrer le rayonnement sous forêt, nous l'estimons par l'*ouverture angulaire* des strates élevées (Ch. SAUVAGE, 1961). Mais il est certain que l'influence d'un même couvert dépend de l'orientation des trouées d'où parvient la lumière ; en conséquence, nous pondérons les valeurs de couvert par un chiffre relatif à l'*exposition*. Le rayonnement au sol est donc estimé par la composition de ces deux variables, selon le tableau suivant :

	1 (N-NE)	2 (W/NW)	3 (E-SE)	4 (S-SW)	o (Ss. expositions)
1					
2					
.					
.					
.					
.					
8					

Les plats et les pentes inférieures à 10 % sont classés « sans exposition ».

#### 4.1.3. *Vigueur de la végétation*

Selon le code écologique du C.N.R.S., « l'humidité apparente de la station » peut être estimée de façon globale... « en considérant simultanément les caractères de la surface du sol, du profil édaphique, de la *végétation* et du microclimat » (M. GODRON, 1968).

Mais il est difficile de départager ce que la végétation doit à l'humidité de ce qu'elle doit à d'autres facteurs stationnels. Par suite, il nous paraît délicat d'associer le critère végétation, en vue d'un jugement synthétique, à un ensemble de variables dont l'influence écologique n'est pas immédiatement perceptible.

En fait, une appréciation correcte de l'humidité du milieu suppose beaucoup de problèmes résolus. Et pourtant, il est très commode de pouvoir caractériser globalement a priori la « qualité écologique » du milieu, fût-ce de manière subjective, notamment pour recouper les interprétations ultérieures (M. GOUNOD, 1969). Pour lever toute ambiguïté, nous avons préféré isoler le critère végétation, en substituant à la notion d'humidité apparente de la station celle de *vigueur de la végétation* (biomasse et productivité apparentes), dont on suppose qu'elle synthétise les diverses influences écologiques. Nous avons conservé la codification des formules écologiques.

## 4.2. Variables édaphiques

### 4.2.1. Les problèmes et la méthode de recherche

Pour répondre au problème de l'asylvatisme du plateau (voir 1) les investigations sont conduites dans le sens d'une recherche des facteurs édaphiques pouvant différencier le comportement et la répartition des espèces botaniques, dont le cèdre.

En l'absence de connaissance précise sur le comportement de l'essence forestière, c'est une étude complète des types de sols qu'il aurait fallu entreprendre, puis une recherche des corrélations entre les différents caractères du sol et les critères de présence ou de vigueur. Par contre, certaines exigences du cèdre étant déjà connues, il était plus logique de rechercher les variables édaphiques pouvant déterminer des conditions favorables ou défavorables du milieu.

C'est dans cette optique que nous sommes situés puisque les travaux antérieurs (LEPOUTRE, PUJOS) ont montré que la régénération du cèdre, dont dépend son extension, est en liaison étroite avec les réserves en eau du sol d'une part et le régime climatique thermique d'autre part. Rappelons à ce sujet que le semis de cèdre ne peut croître, et par conséquent profiter des réserves hydriques ou chimiques du sol, que dans une période comprise entre l'occurrence de température maximales moyennes supérieures à 10°C et le début de la sécheresse estivale. Les auteurs avaient alors distingué des secteurs bioclimatiques d'après les exigences du cèdre et les types de forêts ; les types de sols placés dans ce cadre permettaient de chiffrer « l'espérance pluviothermique » de survie des jeunes cèdres selon les particularités de la germination sur chaque matériau et les réserves hydriques estimées de ceux-ci au moment de l'installation des plantules.

On avait alors entrevu le caractère souvent beaucoup plus favorable des sols développés sur matériaux volcaniques, par opposition aux sols développés sur matériaux de décalcarification ou d'altération des calcaires. Le problème de l'asylvatisme de certaines zones volcaniques, dont le vaste découvert du plateau d'Azrou, n'avait cependant pas reçu de réponse.

Pour tenter de résoudre ce problème nos investigations ont été fondées sur l'hypothèse de l'importance du régime hydrique des sols sur matériaux volcaniques, puisque cette hypothèse s'est révélée déterminante dans les autres milieux édaphiques.

Nous vérifions donc d'abord la validité de cette hypothèse sur quelques profils types.

Nous rechercherons ensuite les paramètres édaphiques qui déterminent le bilan hydrique.

Nous classerons enfin les sols d'après les paramètres les plus déterminants.

#### 4.2.2. Evolution du régime hydrique annuel dans quelques sols hors forêt et sous forêt

##### 4.2.2.1. Les sols étudiés (annexe pédologique)

Les profils étudiés sont choisis parmi les plus représentatifs. Ils correspondent tous à des sols de type andique.

Ils sont formés sur roche-mère volcanique, c'est-à-dire :

- sur coulées de basalte,
- sur cendres altérées,
- sur colluviums polyphasés, cendreux et basaltiques (voir 2.1.).

Les sept profils étudiés correspondent, rappelons-le, aux végétations suivantes : sols sur colluvium fin, profond :

- pelouse sèche            profil 5
- forêt de cèdre dense    profil 17

sols sur colluviums polyphasés à couverture limoneuse, reposant sur argile :

- prairie mésophile      profil 7
- forêt de cèdre dense    profil 14

sols sur colluvium hétérogène limono-caillouteux, reposant sur cendre altérée :

- matorral à *Cenista pseudophlosa* profil 3

sols minces sur coulée basaltique proche de la surface :

- prés-bois d'aubépines profil 15
- forêt de cèdre            profil 16.

Pour plus de détails on se référera aux indications données en annexe pédologique.

##### 4.2.2.2. Propriétés hydriques des sols andiques et andosols

Certains caractères des sols développés sur matériaux volcaniques sont liés à la présence en plus ou moins grande quantité d'éléments amorphes (fer, silice, alumine) isolés ou associés sous formes de composés aluminosiliciques, que l'on a l'habitude de désigner sous le terme d'*allophanes*.

Ces constituants ont la possibilité de s'hydrater fortement et de développer alors des charges négatives supplémentaires. Suivant le degré d'hydratation, les quantités d'eau retenues par les forces de succion sont variables ; c'est ainsi que les quantités d'eau retenues à pF 4,2 sont généralement plus élevées sur échantillon frais hydraté que sur échantillon séché à l'air, donc partiellement déshydraté. Il en est de même pour les quantités d'eau retenues à la capacité de rétention (pF 2,8).

Si l'échantillon est fortement déshydraté en-dessous du point de flétrissement, il est incapable de se réhydrater au même degré. Ces propriétés compliquent donc beaucoup les interprétations du comportement des sols vis-à-vis de l'eau. En particulier, pour un état d'humidité déterminé, on ignore quel est exactement le point de flétrissement, sauf si l'échantillon est fortement hydraté ou au contraire fortement desséché.

Dans le sol en place il va de soi qu'en hiver, dans un état d'hydratation maximum, les caractéristiques hydriques sont voisines de celles mesurées sur échantillon humide frais, si toutefois le sol n'a pas subi avant la saison humide une déshydratation excessive. C'est le cas des profils étudiés puisque, d'une année sur l'autre, on constate que le sol reprend chaque hiver une humidité analogue.

En été, à la suite d'une dessiccation lente, on s'achemine sans doute vers un état plus proche de celui qu'on mesure au laboratoire sur échantillon séché à l'air.

En effet, si l'on mesure les quantités d'eau retenues à pF 4,2 sur un échantillon de cendres altérées (andosol) à des stades de déshydratation progressivement plus poussée (fig. 6), on obtient d'abord des valeurs sensiblement constantes quand l'humidité initiale est forte, puis brusquement les valeurs diminuent linéairement jusqu'à un minimum correspondant à une humidité initiale très faible (dessiccation à 105° pendant 72 heures).

Il est probable que l'eau retenue à pF 4,2 par un sol qui a subi une dessiccation estivale même incomplète, est beaucoup plus proche de la valeur mesurée sur échantillon séché à l'air que de celle mesurée sur échantillon frais.

On a d'ailleurs pu constater dans notre étude que l'humidité minimale des sols en place était toujours très voisine de l'humidité mesurée à pF 4,2 sur *échantillon séché à l'air* au laboratoire. On constate en effet une corrélation très étroite entre ces deux valeurs quelle que soit la profondeur de l'échantillon dans le profil. On obtient :

$$\begin{array}{l} \text{H}_2\text{O minimale} = 0,905 \text{ H}_2\text{O pF 4,2} + 1,02 \quad R = 0,82 \quad N = 24 \quad ++ \\ \text{(été)} \qquad \qquad \qquad \text{(éch. séché à l'air)} \end{array}$$

La même corrélation recherchée entre l'humidité minimale estivale et le point de flétrissement sur *échantillon frais* est à peine significative :

$$\begin{array}{l} \text{H}_2\text{O minimale} = 0,40 \text{ H}_2\text{O pF 4,2} + 9,7 \quad R = 0,43 \quad N = 24 \quad + \\ \text{(été)} \qquad \qquad \qquad \text{(éch. frais)} \end{array}$$

Cependant il eut fallu en toute rigueur pour chaque profil hydrique mesurer le point de flétrissement exact correspondant à chaque stade de déshydratation des échantillons, comme nous l'avons fait sur l'échantillon de la fig. 6. Pour l'étude

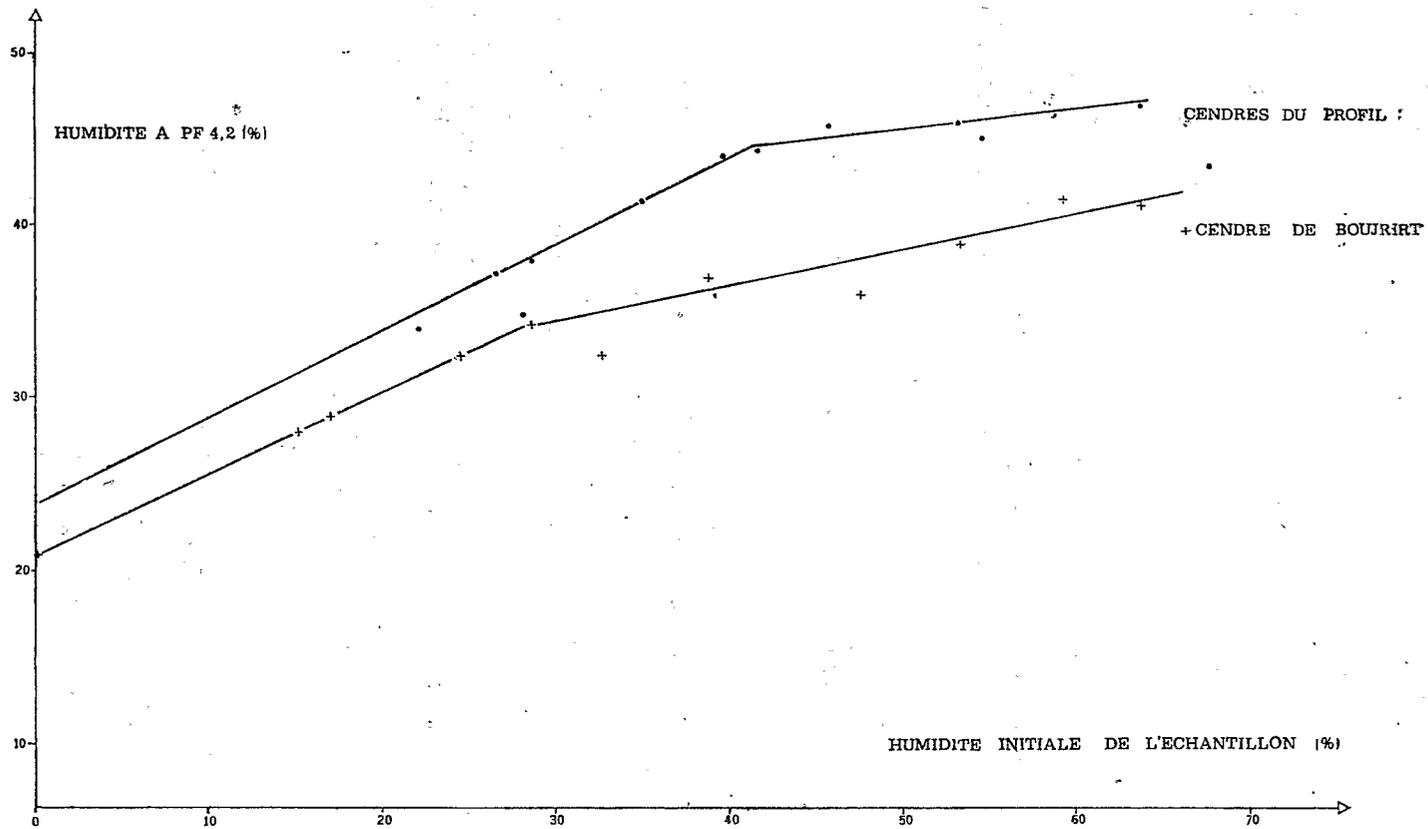


Fig: 8 VARIATION DE L'HUMIDITE A PF 4,2 SUIVANT LA DESHYDRATION DES CENDRES VOLCANIQUES

qui suit, notamment pour le calcul des réserves hydriques utiles (1), nous avons adopté des valeurs approchées, soit pour le point de flétrissement, la mesure sur échantillon séché à l'air, et pour la capacité de rétention, celle mesurée sur échantillon frais non déshydraté.

#### 4.2.2.3. *Etude du régime hydrique des sols développés sur colluvium fin profond (années 1970-1971)*

##### 1. Sol sous pelouse sèche : profil 5

###### a) Localisation

Ce type de sol occupe des zones déprimées du plateau, où des colluviums de matériaux fins (d'origine cendreuse ?), souvent dépourvue de blocs basaltiques, sont venus s'accumuler.

###### b) La végétation

Elle est constituée par une pelouse rase et ouverte à *Poa bulbosa*, *Festuca ovina* et *Carex divisa*.

###### c) Le sol

Il est du type A(B)C, avec une texture très riche en éléments de taille inférieure à 2  $\mu$  à partir de 20 cm de profondeur (48 à 83 p. cent).

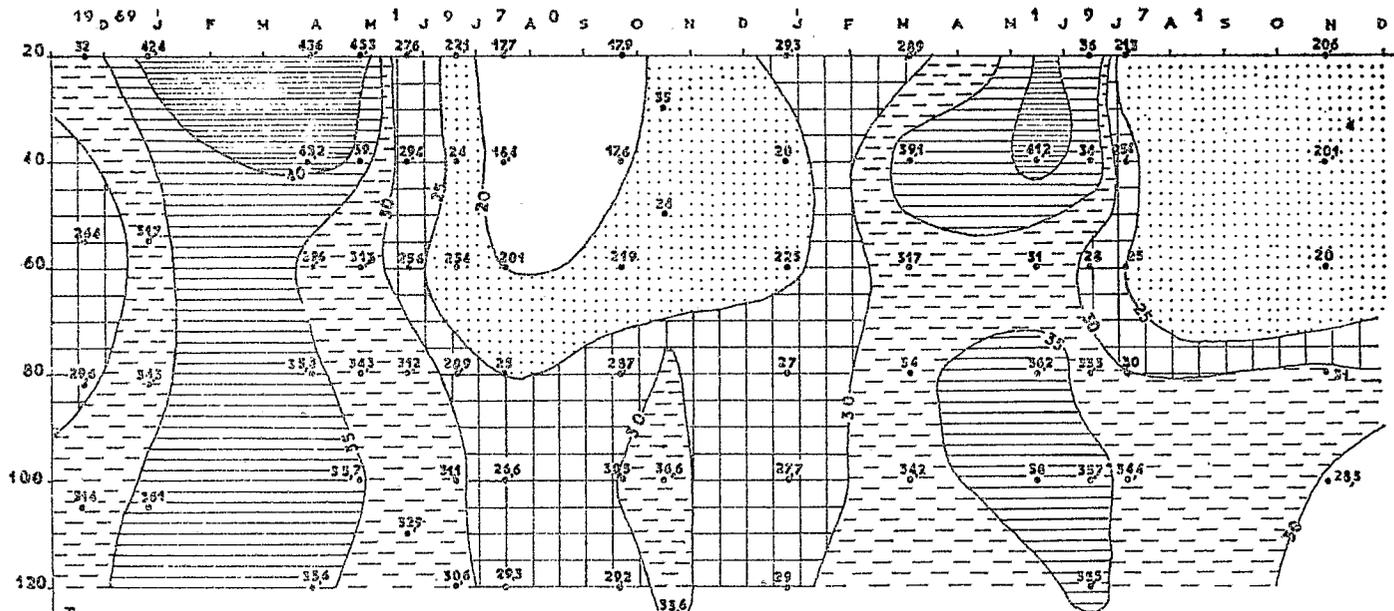
La structure, à tendance grumeleuse en surface, tend à être polyédrique en profondeur. On a distingué des « cuttings » à 1,2 m et une structure de type « soufflée » à cette profondeur.

La densité apparente faible, le point de flétrissement élevé et la dominance du rôle des amorphes classent nettement ce profil parmi les sols andiques (voir ci-après, 4.2.4.).

(1) On entendra par *réserves utiles* ou réserves en eau facilement utilisables (R.F.U.) les quantités d'eau disponibles pour la plante. Elles représentent la différence entre l'humidité du sol et l'humidité au point de flétrissement (pF=4,2). Dans les tableaux qui suivent, ces réserves utiles sont converties en tranches millimétriques par le calcul suivant :

$$R. \text{ Utiles en gr} = H_2O \text{ du sol} - H_2O \text{ au pF } 4,2$$

$$R. \text{ Utiles en mm} = \frac{R. \text{ Utiles en gr} \times \text{densité apparente} \times \text{épaisseur de l'horizon}}{\text{densité apparente}}$$



EVOLUTION DE L'HUMIDITE  
DU SOL

Profil 5

Fig. 7a

  $t < 55\%$

	$45 < t < 55$		$25 < t < 30$
	$35 < t < 45$		$20 < t < 25$
	$30 < t < 35$		$t < 20\%$

# RESERVES EN EAU FACILEMENT UTILISABLES (%)

## Profil 5 (Hors Forêt)

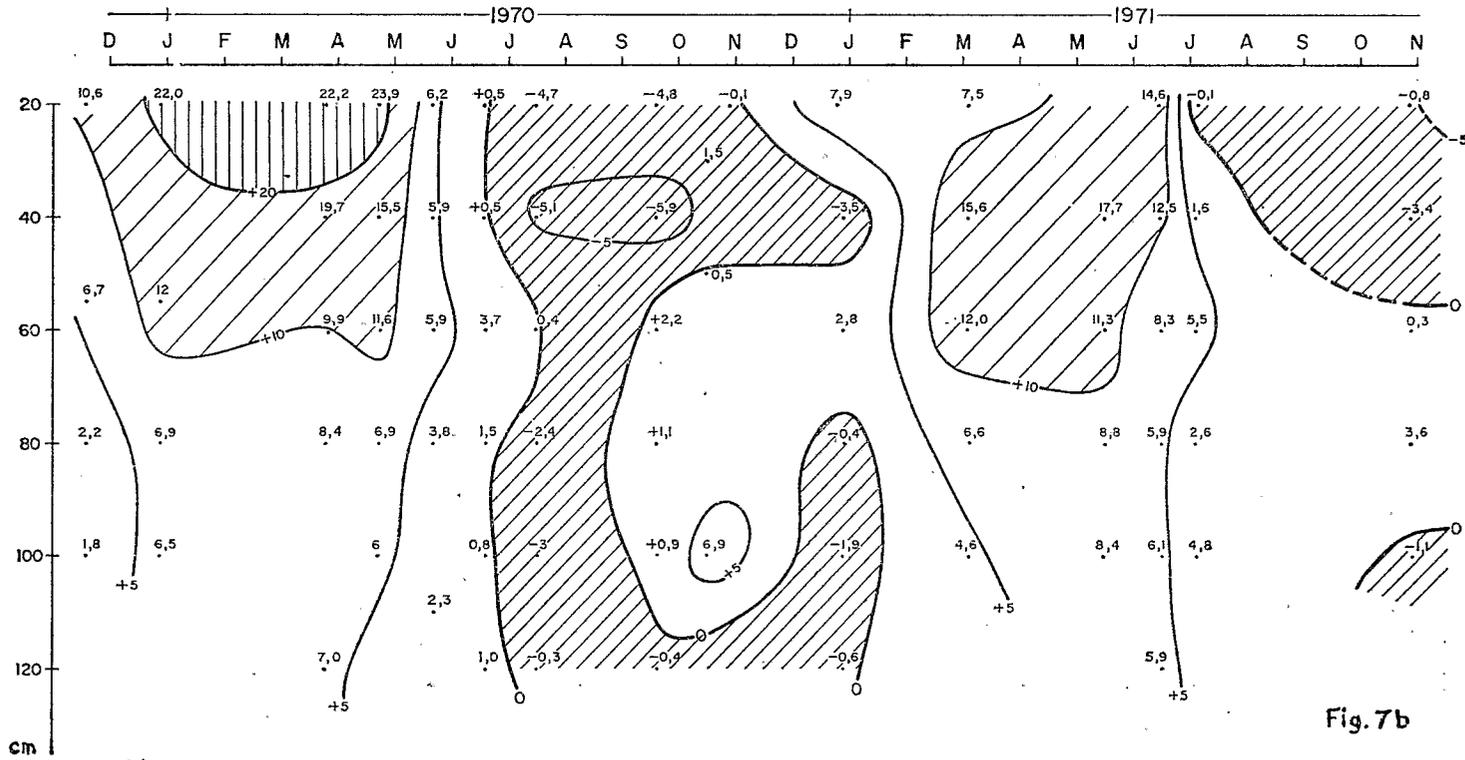


Fig. 7b

## d) Régime hydrique (voir fig. 7 a et 7 b)

— humidité du sol.

La réhumidification du sol n'a lieu qu'en novembre-décembre 1970 ou même janvier 1971. Elle est en relation avec le régime pluviométrique et ne semble survenir qu'après des précipitations importantes, de l'ordre de 200 mm, groupées. Les précipitations d'automne, de l'ordre de 30 à 40 mm par quinzaine, ne paraissent avoir aucun effet sur le sol en-dessous de 20 cm de profondeur. Ces pluies d'automne représentent pourtant 130 mm en 1970.

En hiver, la capacité de rétention n'est atteinte qu'en surface, et en-deçà de 40 cm de profondeur.

— réserves en eau utile.

Elles se reconstituent sensiblement de la même façon chaque hiver, à partir du mois de novembre en surface, mais surtout à partir de décembre.

Elles se localisent essentiellement jusqu'à 60 cm de profondeur. Enfin elles sont pratiquement épuisées le 15 juin, en 1970, et plus tardivement en 1971, où les pluies sont exceptionnellement printanières.

La période de sécheresse physiologique intéresse donc tout le profil du 15 juin au 15 janvier et les 20 premiers centimètres du 15 juin au 1<sup>er</sup> décembre.

Les chiffres suivants (mm d'eau) donnent quelques valeurs caractéristiques du régime hydrique de 0 à 1,20 m de profondeur.

---

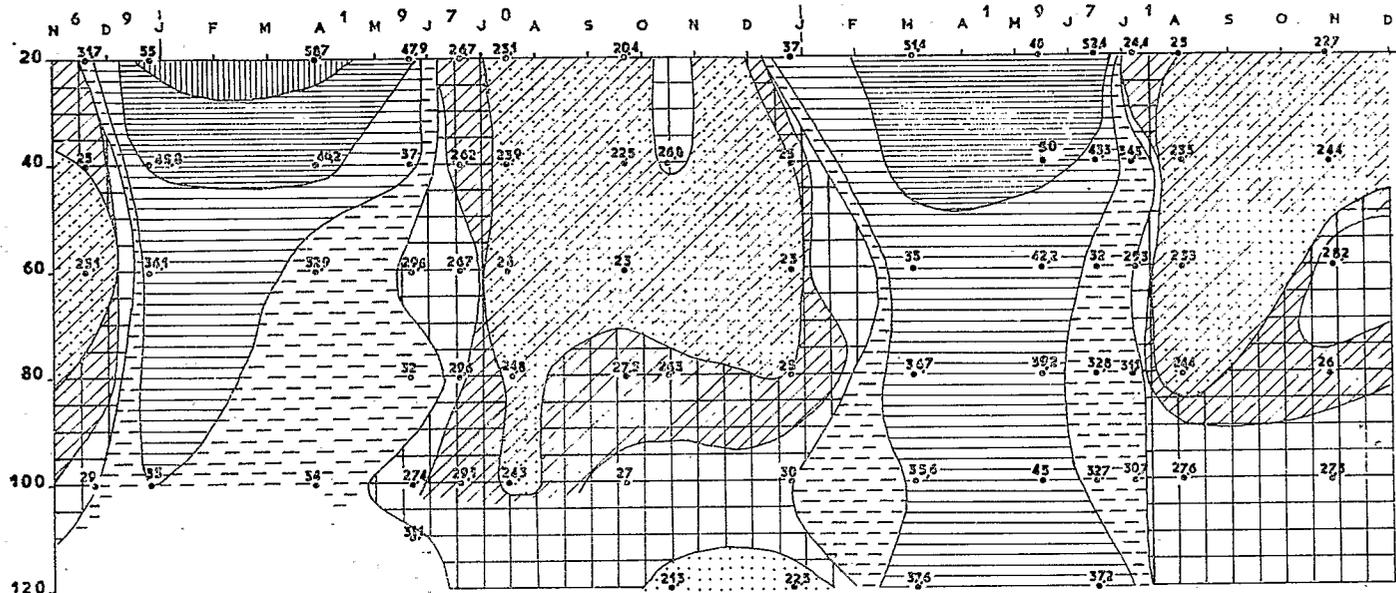
Humidité maximale .....	599
Humidité minimale .....	296,5
Réserves utiles — le 15.4.1970 .....	201
— le 1.6.1971 .....	163

---

## 2. Sol sous forêt de cèdre dense : profil 17

## a) Localisation

Le sol occupe une position topographique plane sur une large surface en pente régulière de quelques pour cents. Il est localisé au contact de la clairière de Mel-Caid, où sont installés la station de mesures dendrométriques et les postes climatiques de référence.



EVOLUTION DE L'HUMIDITE  
DU SOL

Profil 17

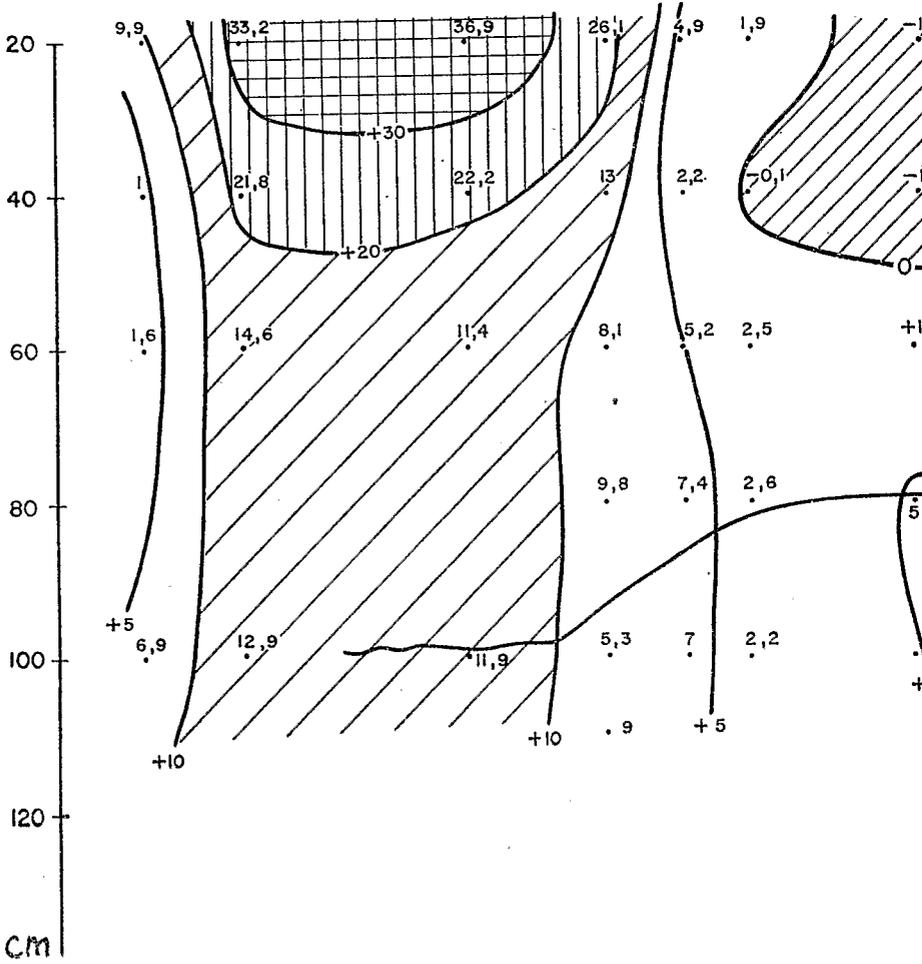
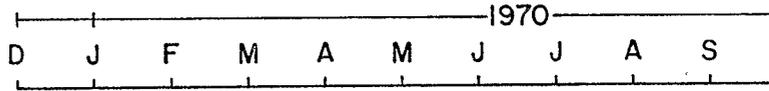
Fig. 8d

  $t < 55 \%$

	$45 < t < 55$		$25 < t < 30$
	$35 < t < 45$		$20 < t < 25$
	$30 < t < 35$		$t < 20 \%$

# RESERVES EN

Prof



# ACILEMENT UTILISABLES (%)

Sous Forêt)

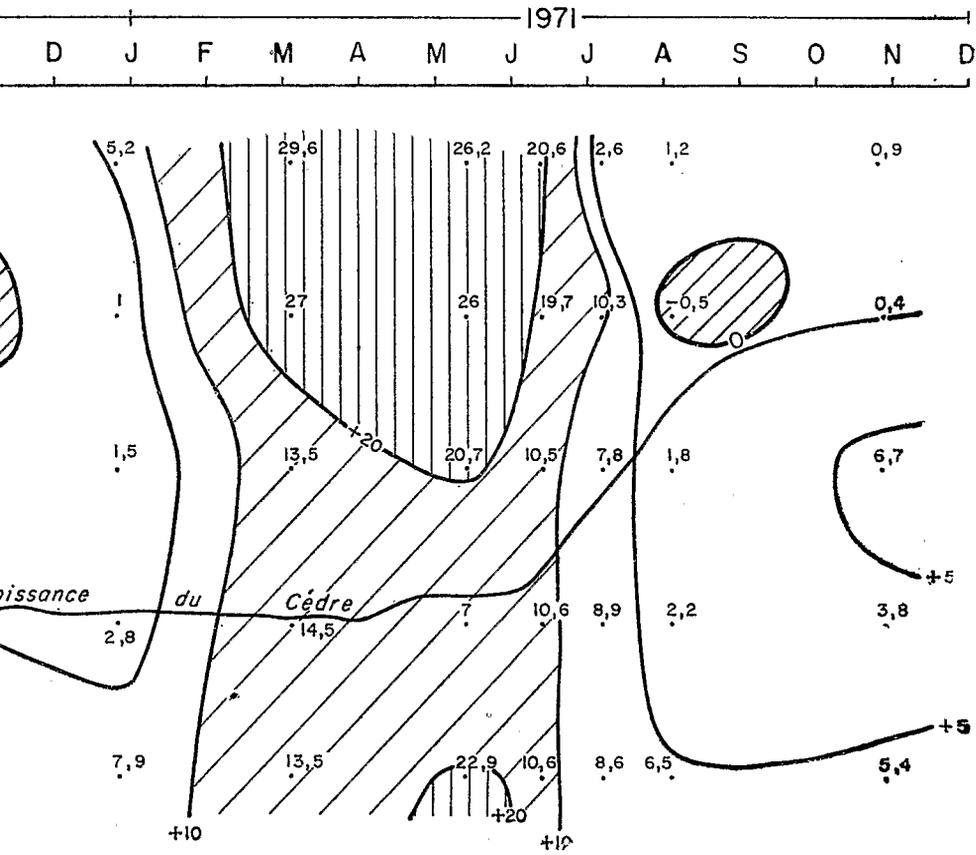


Fig. 8b

## b) La végétation

Elle est constituée par un perchis très dense de cèdre avec un tapis dense de *Brachypodium sylvaticum*.

## c) Le sol

Comme le précédent il est du type A(B)C, avec des teneurs élevées (65 pour cent) en particules de dimension inférieure à  $2 \mu$  à partir de 50 cm de profondeur. En surface cette teneur est plus faible (28 à 38 p. cent).

On ne trouve que quelques rares blocs de basaltes, sauf un lit à un mètre de profondeur, ce qui confirme le caractère polyphasé du profil.

## d) Régime hydrique (voir fig. 8 a et 8 b)

— humidité du sol.

La réhumidification du sol n'a lieu qu'en novembre-décembre 1969 et même janvier (1971), comme pour le profil précédent hors forêts.

L'humidité maximale n'est atteinte que dans le courant de janvier 1970, et même février 1971, donc très tardivement.

L'humidité atteinte en hiver est voisine de la capacité de rétention dans tout le profil. La dessiccation maximale paraît atteinte dans le courant de juillet 1970, et un peu plus tardivement en 1971, à la suite des pluies tardives d'avril et mai (fig. 9).

— réserves en eau utile.

Elles sont beaucoup plus importantes en hiver que dans le profil précédent hors forêt et s'épuisent moins rapidement puisque le point de flétrissement n'est atteint qu'un mois et demi plus tard à 20 cm de profondeur, le 15 août 1970 et à peine atteint en 1971. Par ailleurs, l'épuisement des réserves hydriques ne dépasse pas 50 cm de profondeur pour une pluviométrie normale en 1974, contre 1,2 m hors forêt.

Enfin, des réserves utiles supérieures à 10 % sont réalisées en hiver dans toute l'épaisseur du profil, alors qu'elles se limitent aux 60 premiers centimètres dans le profil hors forêt.

Les chiffres suivants (en mm d'eau) donnent quelques valeurs caractéristiques du régime hydrique, de 0 à 1 m de profondeur.

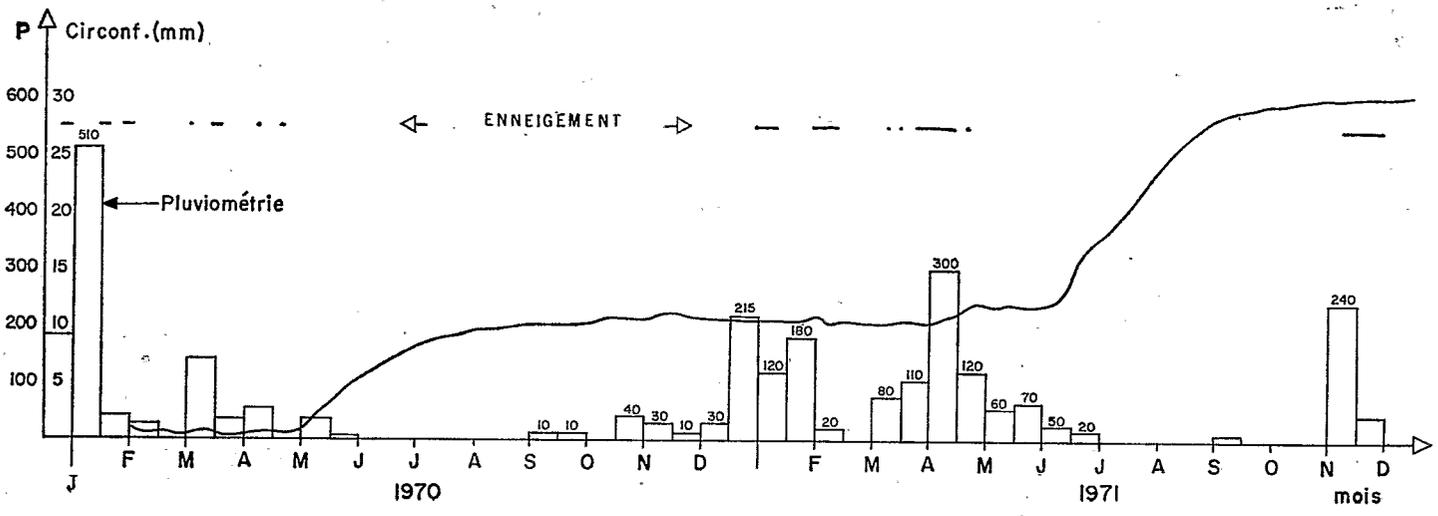
---

Humidité maximale .....	554
Humidité minimale .....	285
Réserves utiles — le 15.4.1970 .....	240
— le 1.6.1971 .....	207

---

*Rythme de croissance de Cedrus libanoti var atlantica*  
*Moyen atlas*

Fig. 9



On constate que la dessiccation est moins forte et les réserves utiles supérieures à celles observées dans le profil 5 hors forêt. On notera que la croissance diamétrale du perchis de cèdre paraît normale tant que ces réserves sont supérieures à 5 % (voir fig. 8 b).

#### 4.2.2.4. *Etude du régime hydrique des sols développés sur couverture limoneuse reposant sur colluvium argileux à blocaille basaltique (année 1971)*

##### 1. Sous prairie - profil 7

###### a) Localisation

Ce profil est situé en bordure sud de la dépression du Seheb, sur un replat à pente nulle.

###### b) La végétation

Elle est constituée par une prairie à graminées très dense (100 % de recouvrement au sol), parsemée d'aubépines.

###### c) Le sol

Il est développé sur deux colluviums polyphasés d'âges tensiftien et soltanien (cf. 21). Jusqu'à 70 cm il s'agit d'un matériau humifère très riche en particules  $2\ \mu$ - $20\ \mu$  (40 à 45 p. cent). En profondeur on se trouve en présence d'un second matériau, composé de blocailles basaltiques noyées dans une matrice argileuse (42 à 50 % de particules inférieures à  $2\ \mu$ ). Il s'agit d'un sol andique complexe.

###### d) Le régime hydrique (voir fig. 10 a et 10 b)

L'humidité en hiver est très importante dans les 70 premiers centimètres, plus faible dans le colluvium de profondeur, mais sans doute la capacité de rétention est-elle atteinte dans tout le profil.

En été on constate une *dessiccation* plus importante en *profondeur*. Dans tout le profil cette *dessiccation* est parfaitement corrélée avec le point de flétrissement car les humidités minimales sont presque identiques à l'humidité au pF 4,2, du moins sur échantillon séché à l'air.

La réhumidification en novembre est mal connue, mais on constate cependant l'aptitude des horizons de surface à retenir l'eau des précipitations automnales (voir pluviométrie, fig. 9).

*Les réserves en eau utile* sont très importantes en hiver dans le colluvium de surface, mais sont épuisées sur tout le profil dès la fin juillet. En surface et jusqu'à 20 cm il semble que le point de flétrissement soit atteint dès le *début* du même mois.

Les chiffres suivants (en mm d'eau) donnent quelques valeurs caractéristiques du régime hydrique, de 0 à 1 m de profondeur.

Humidité maximale .....	416
Humidité minimale .....	206
Réserves utiles (le 1.6.1971) .....	176

## 2. Sol sous forêt : profil 14

### a) Localisation

Le profil est situé en forêt du Seheb, sur une surface plane à pente nulle.

### b) La végétation

Elle est constituée par une cédraie dense, d'allure jardinée, avec sous-bois de brachypode.

### c) Le sol

Il est formé sur deux colluviums superposés comme le profil précédent. Le colluvium de surface est très riche en particules 2  $\mu$ -20  $\mu$  (40 à 48 p. cent) sur les premiers 70 cm. En profondeur, le deuxième colluvium contient des blocailles de basaltes noyées dans une matrice riche en éléments inférieurs à 2  $\mu$  (52 p. cent). *Les profils 14 et 7 sont presque identiques.*

### d) Régime hydrique (voir fig. 10 a et 10 b)

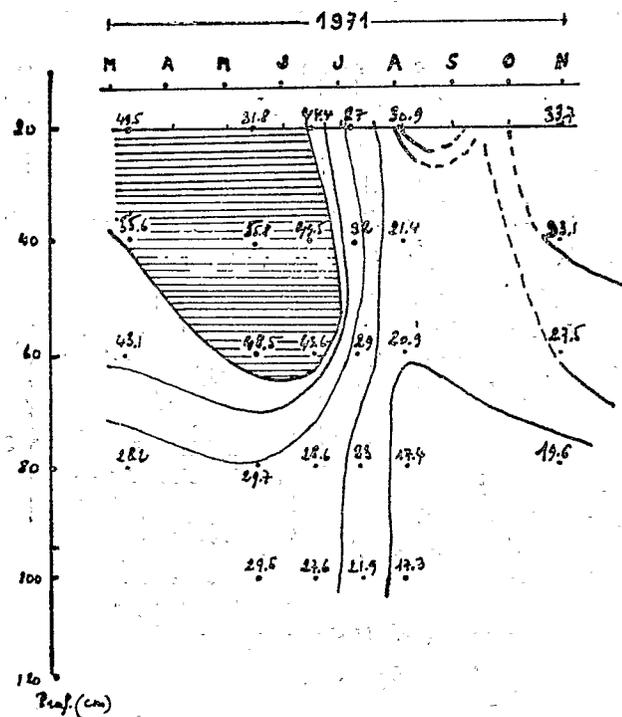
Comme pour le profil 7 le colluvium de surface est capable de s'humidifier jusqu'à la capacité de rétention. En profondeur le colluvium plus argileux atteint également la capacité de rétention, mais celle-ci est beaucoup plus faible.

La *dessiccation* est rapide mais moins forte que pour le profil hors forêt. Notons qu'en octobre le sol ne semble pas avoir reçu les précipitations qui sont tombées sur le profil 7.

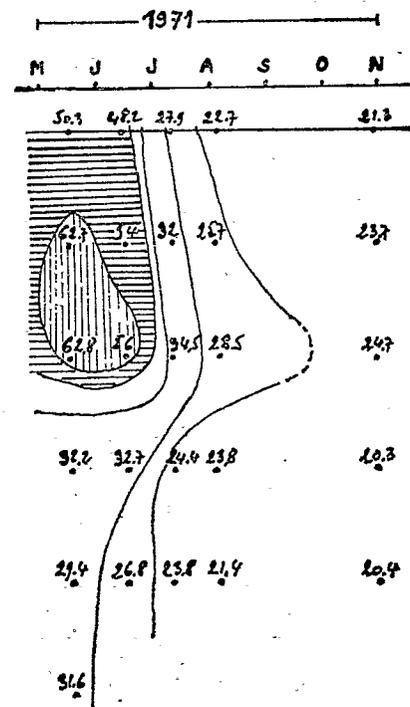
Les *réserves en eau utile* sont parallèlement beaucoup plus importantes en hiver dans le colluvium de surface que dans celui de profondeur, mais elles s'épuisent cependant plus rapidement au début de l'été. En effet, en-dessous de 40 cm il semblerait que *le sol conserve encore quelques faibles réserves pendant tout l'été*, contrairement à ce qui se passe dans le profil hors forêt.

Les chiffres suivants (en mm d'eau) donnent quelques valeurs caractéristiques du régime hydrique, de 0 à 100 cm de profondeur.

# ÉVOLUTION DE L'HUMIDITÉ DU SOL



Profil 7  
(Hors forêt)



Profil 14  
(Sous forêt)

Fig. 10a<sup>c</sup>

RESERVES EN EAU FACILEMENT UTILISABLES (%)

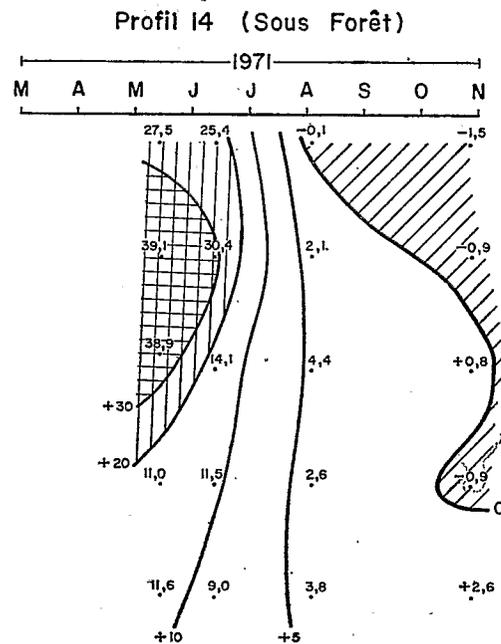
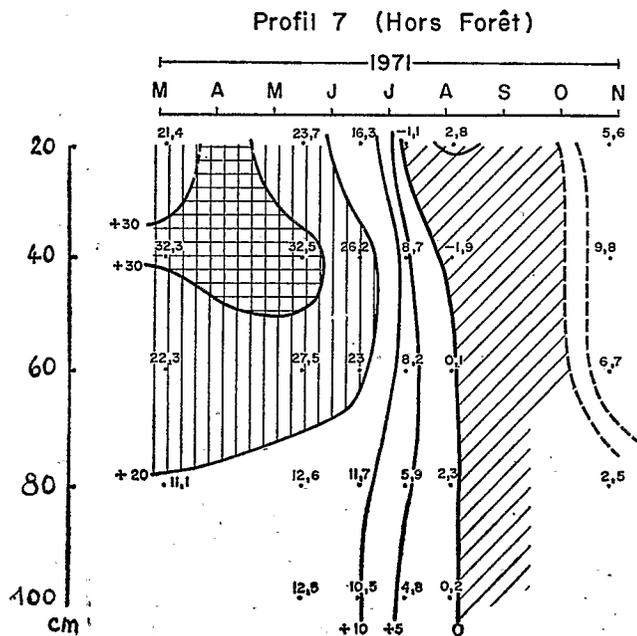


Fig. 10b

---

Humidité maximale .....	427
Humidité minimale .....	212
Réserves utiles (le 1.6.1971) .....	203

---

4.2.2.5. *Etude du régime hydrique d'un sol sur colluvium hétérogène limono-caillouteux reposant sur cendres profondes altérées : profil 3 (années 1970-1971)*

a) Localisation

Le profil est situé sur le plateau d'Azrou, au pied du Jbel Hébrî, hors forêt. La pente est faible (4 à 5 %).

b) La végétation est une mosaïque de matorral à *Cenista pseudopilosa* et de pelouse à fétuques.

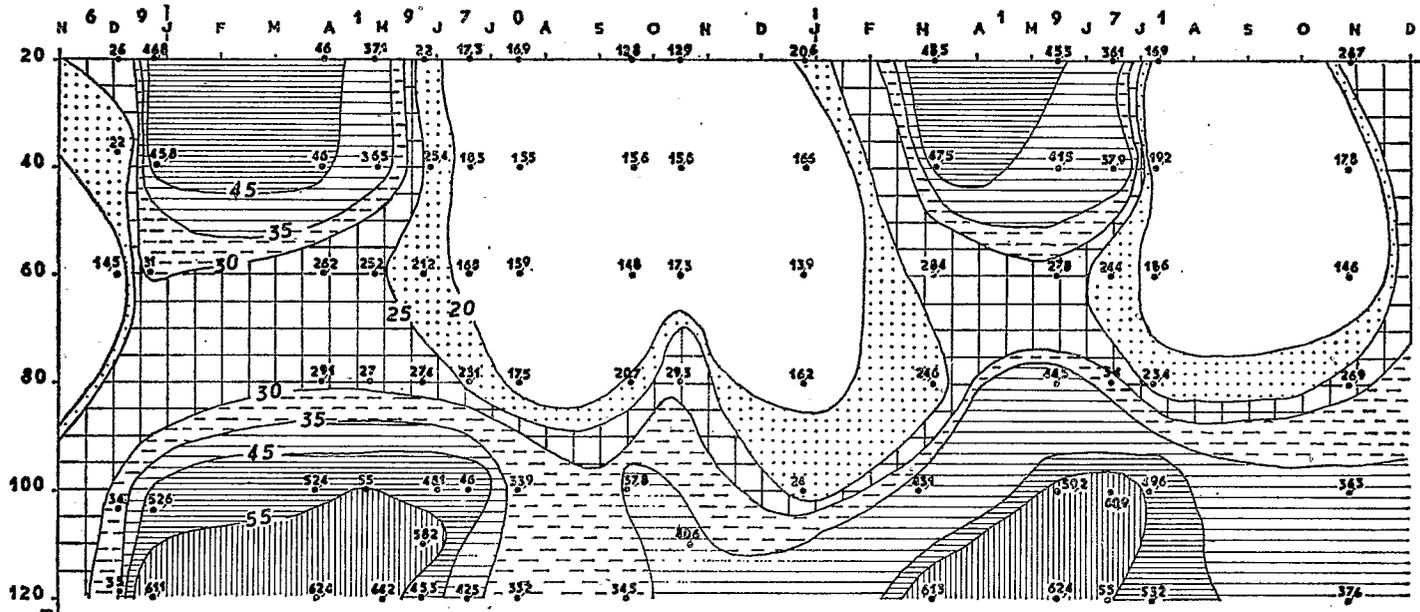
c) Le sol est de type andique, polyphasé, de profil A(B)C. Le colluvium de surface est de texture équilibrée (38 p. cent de particules inférieures à 2  $\mu$ ; 33 p. cent de particules 2-20  $\mu$ ), sur 70 cm de profondeur. Le colluvium profond est plus riche en particules inférieures à 2  $\mu$  (52 p. cent). Enfin, les cendres altérées, à un mètre de profondeur, ont curieusement la même texture que le colluvium de surface. Des blocs basaltiques se répartissent de façon anarchique jusque dans l'horizon (B). A un mètre vingt, on trouve un tuf cendreux consolidé.

d) Le régime hydrique (voir fig. 11 a et 11 b).

*L'humidification* atteint 20 cm de profondeur au plus tard courant décembre. Par contre, il semble que de fortes précipitations soient nécessaires pour humidifier l'ensemble du profil ; on constate par exemple que le 25 décembre 1971 celui-ci est encore à son humidité minimale en-dessous de 40 cm. En profondeur, au niveau des cendres altérées, l'humidité est toujours plus importante.

On peut considérer que la capacité de rétention est atteinte sur toute la hauteur du profil dans le courant de l'hiver, pour chacune des deux années d'observations.

*La dessiccation* est brutale et intense dès le printemps. Les humidités minimales sont atteintes courant juillet en-dessous de 40 cm de profondeur. On notera par contre qu'à 20 cm, l'évaporation continue à dessécher le sol qui atteint ses humidités les plus basses entre le 15 septembre et le 15 octobre. On pourra constater également que la dessiccation aboutit à des valeurs sensiblement identiques chaque année ; toutefois, elle est retardée lorsque les pluies sont tardives comme c'est le cas en 1971.



**EVOLUTION DE L'HUMIDITE  
DU SOL**

Profil 3

Fig.11a   $t > 55\%$

	$45 < t < 55$		$25 < t < 30$
	$35 < t < 45$		$20 < t < 25$
	$30 < t < 35$		$t < 20\%$

# RÉSERVES EN EAU FACILEMENT UTILISABLES (%)

## Profil 3 (Hors Forêt)

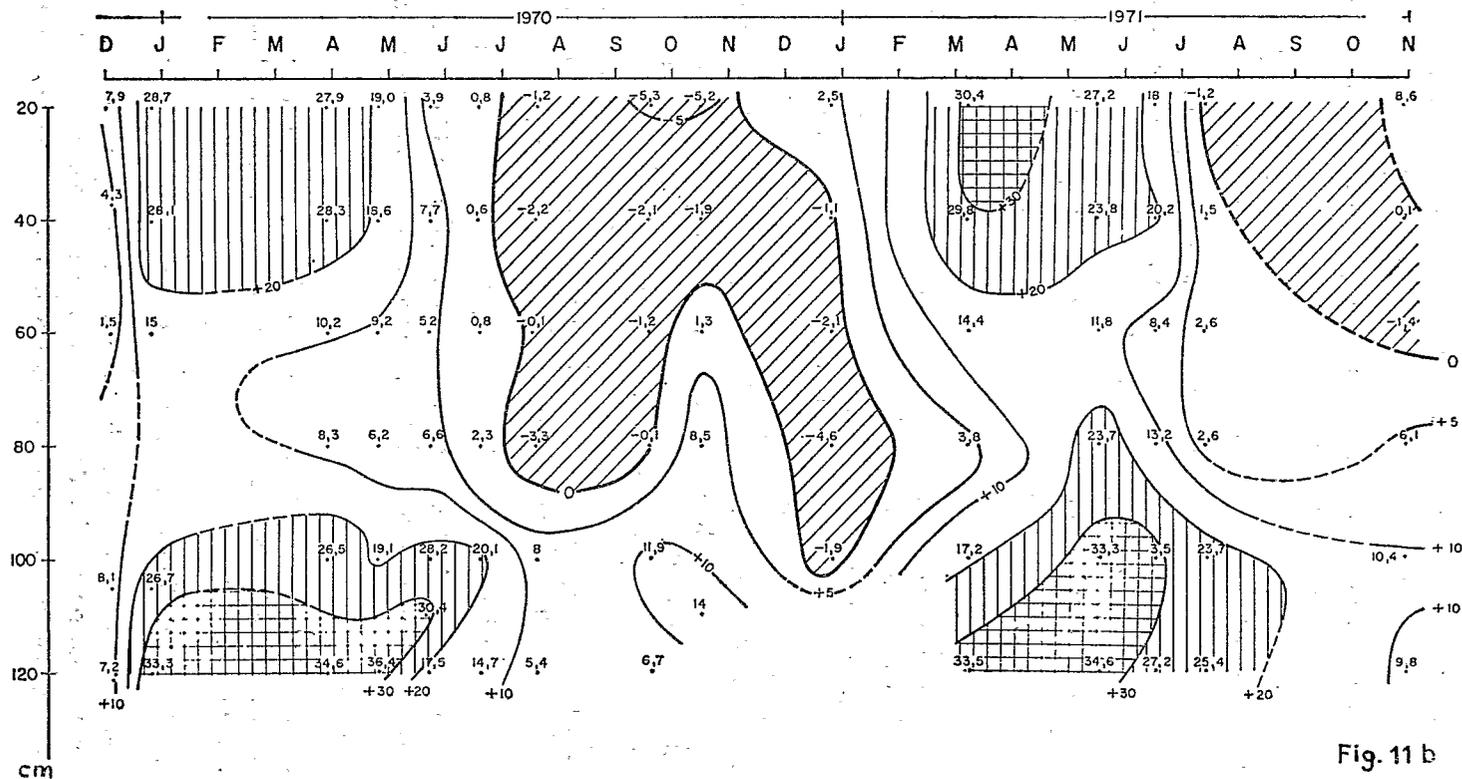


Fig. 11 b

*Les réserves hydriques* sont importantes et du même ordre de grandeur qu'ailleurs en hiver dans les 60 premiers centimètres, mais s'établissent très tardivement (décembre 1970 et janvier 1971).

On remarque une très forte réserve en *profondeur*, au niveau des cendres altérées, *réserve qui subsiste tout l'été*.

Par contre, pour le reste du profil, la réserve est épuisée début juillet ! La période où le sol est physiologiquement sec est donc très longue ; elle est de 5 mois à 20 cm et de six mois plus profondément, jusqu'au niveau des cendres altérées. Le déficit hydrique est comparable à celui du profil 5, également situé sur le plateau, quoique les deux sols soient bien différents.

Les chiffres suivants (mm de pluie) donnent quelques valeurs caractéristiques du régime hydrique de 0 à 120 cm.

	0-90 cm	0-120 cm
Humidité maximale .....	368	573
Humidité minimale .....	166	287
Réserves utiles — le 15.4.1970 .....	145	246
— le 1.6.1971 .....	163	278

On constatera que les horizons profonds de cendres altérées (90-120) retiennent le 1/3 environ de l'humidité maximale et près de la moitié de l'humidité minimale. Quant aux réserves utiles au printemps, ce sont les plus faibles que l'on ait observées pour les 90 premiers centimètres.

#### 4.2.2.6. *Etude du régime hydrique de deux sols peu épais développés sur coulée basaltique (1970-1971)*

##### 1. Sol hors forêt : profil 15

a) Localisation : le profil est situé sur un replat en position relativement basse, dans une formation arbustive très lâche à aubépines accompagnée de *Thymus zygis*.

##### b) Le sol

Le profil est du type A(B)C. L'horizon A est très peu épais (20 à 30 cm), l'horizon (B) plus argileux est limité aux interstices entre les blocs basaltiques d'une coulée de lave.

##### c) Régime hydrique (voir fig. 12 a et 12 b)

Nous avons été obligés d'évaluer le point de flétrissement par calcul à partir de la granulométrie, à l'aide des corrélations établies plus loin (424). Compte tenu de cette approximation, on peut estimer que les réserves en eau sont épuisées dans

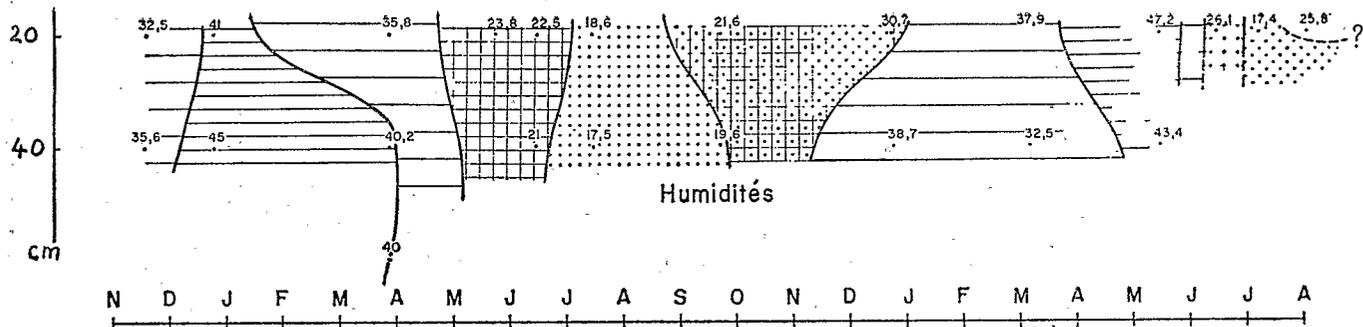


Fig. 12a

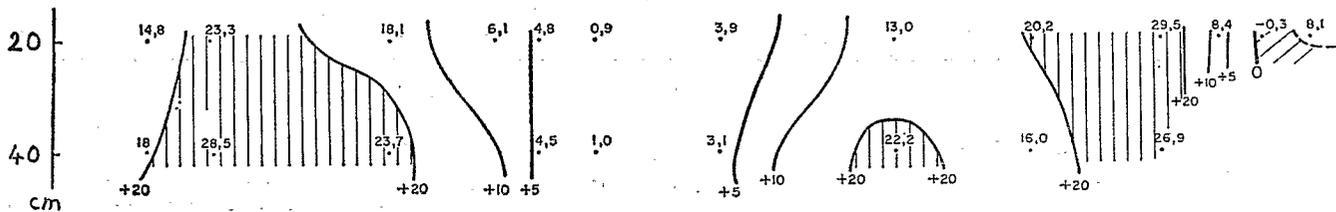


Fig 12b

RESERVES EN EAU FACILEMENT UTILISABLES (%)

Profil 15 (Hors Forêt)

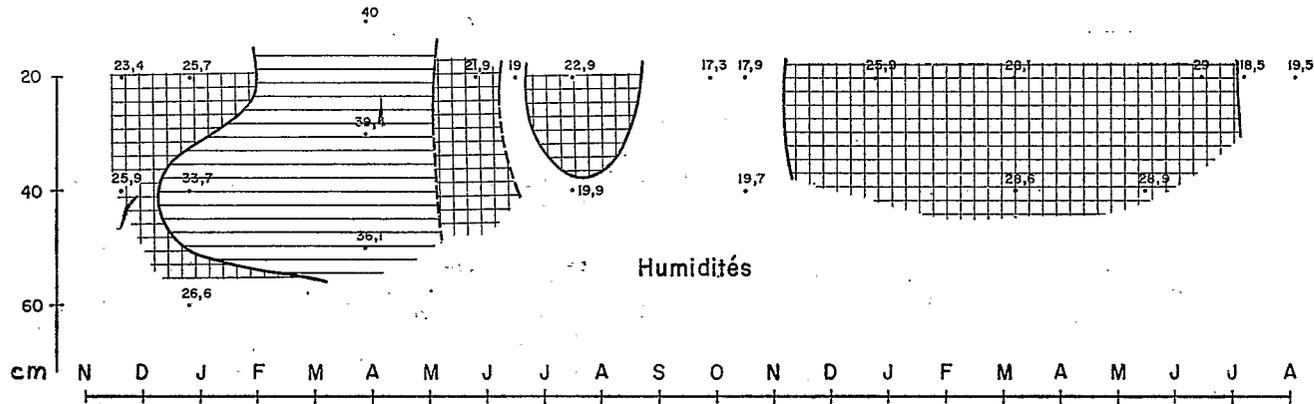


Fig. 13 a

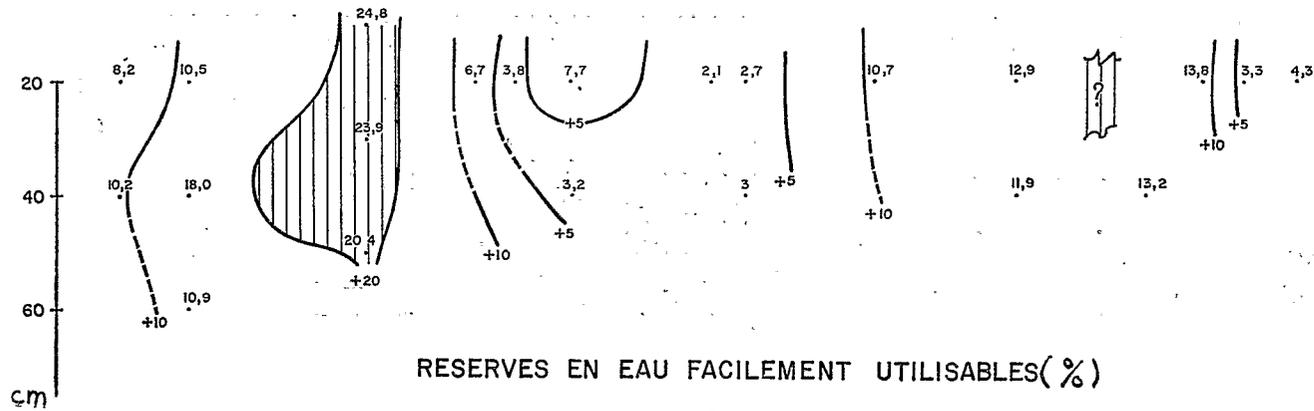


Fig. 13 b

Profil 16 (Sous Forêt)

le courant de la première quinzaine de juillet. Toutefois, l'absence de données pour les horizons profonds limite l'interprétation et il est impossible de chiffrer les caractéristiques du régime hydrique, sauf pour les comparer au profil suivant.

On peut noter que la capacité de rétention paraît nettement dépassée en surface dans le courant du printemps 1971.

## 2. Sol sous futaie de cèdre : profil 16

### a) Localisation

Le sol est situé sur un replat d'une coulée horizontale en position topographique un peu plus haute que le précédent. La végétation est constituée par une futaie dense de cèdre d'apparence équienne dont le couvert est presque total. Le sous-bois est réduit à quelques rares espèces herbacées. Il n'y a pas de régénération.

b) Le sol est sensiblement du même type que le précédent ; l'horizon A est toutefois très riche en racines provenant du système traçant de la jeune futaie de cèdre.

### c) Le régime hydrique (voir fig. 13 a et 13 b)

Comme pour le profil précédent, le point de flétrissement qui a servi pour l'évaluation des réserves a été calculé en fonction de la granulométrie et à l'aide des corrélations établies ci-après (voir 4.2.4.).

En 1971, le profil se réhumecte à partir du mois de novembre. Cette date paraît être sensiblement la même que pour le profil 17 (sous forêt) mais un peu plus tardive que pour le profil 15 précédent, les premières précipitations étant sans doute captées immédiatement par les racines des cèdres.

		Humidité (en %)			
		à 20 cm		à 40 cm	
		Profil 15 hors forêt	Profil 16 sous forêt	Profil 15 hors forêt	Profil 16 sous forêt
1969	Novembre	32,5	23,4	35,6	25,9
1970	Janvier	41	25,7	45	33,7
	Avril	35,8	40	40,2	37,6
	Mai	23,8	21,9		
	Juin	22,5	19	17,5+	19,9+
	Septembre	21,6	17,3		
	Décembre	30,7	25,9		
1971	Mars			32,5	28,6
	Mai			43,4	28,9
1972	Mars	37,9	28,1		
	Juin	26,1	29		
	Juillet	17,4	18,5		

L'humidité minimale est atteinte courant juin en 1970, mais seulement au début de juillet en 1971, en raison des pluies plus tardives. Pour l'année 1971 c'est la même date que pour le profil 15. Pour l'année 1970 aucune comparaison n'est possible. Quoi qu'il en soit il apparaît que les humidités sont, *sauf en été*, toujours plus faibles ici que hors forêt, en particulier dans les 20 premiers cm (si on exclut une pluie exceptionnelle le 24 juillet 1970).

On peut donc affirmer que sur ce type de substrat la forêt, tout en asséchant le sol au printemps, le protège en été contre l'évaporation.

En ce qui concerne les réserves utiles, elles sont corrélativement toujours plus basses ici qu'hors forêt dans les horizons de surface, mais nous ignorons ce qu'elles sont en profondeur.

Contrairement au profil 15, il n'y a pas ici d'engorgement de surface en hiver.

#### 4.2.3. *Importance du régime hydrique à l'égard de la végétation*

Nous n'examinerons pas ici l'influence des variables purement pédologiques qui seront étudiées dans le chapitre suivant.

##### 4.2.3.1. *Reconstitution des réserves hydriques*

Dans tous les cas, elles s'établissent lorsque les pluies sont groupées et suffisamment importantes. La tranche pluviométrique minimum serait voisine de 200 mm.

L'année 1970 semble caractéristique à cet égard, puisque 130 mm de pluies tombés entre le 1<sup>er</sup> septembre et le 15 décembre par tranches de 10 à 40 mm ne permettent jamais la reconstitution de réserves hydriques supérieures à 5 % au-delà de 20 cm de profondeur.

Il est remarquable de constater qu'à la date du 25 décembre 1970, à l'exception des horizons supérieurs (20 cm) les profils sont encore aussi secs, sinon plus que dans le courant de l'été.

Plus tard dans le courant de l'hiver, les réserves hydriques sont toujours très importantes dans les horizons supérieurs de texture limoneuse et sont beaucoup plus faibles dans les horizons (B) argileux. Le profil 5, de texture très fine, illustre bien ceci.

Enfin, les horizons cendreaux profonds constituent une réserve hydrique très importante comme on le constate dans le profil 3.

##### 4.2.3.2. *Épuisement des réserves hydriques*

L'épuisement des réserves utiles commence vers le 15 avril, avant que les pluies de printemps ne cessent, puisqu'il pleuvra encore 100 mm d'eau en 1970 et 320 en 1971. La plus grande partie des réserves est épuisée un mois plus tard. Elles de-

viennent inférieures à 5 % entre le 15 juin et le début juillet selon les cas. Comme en automne, les faibles précipitations de printemps sont donc immédiatement consommées (le ruissellement étant pratiquement nul).

A partir du début juillet, la dessiccation se poursuit pour assécher le sol jusqu'au point de flétrissement. On constate alors certaines différences selon la nature du sol et le couvert.

#### 4.2.3.3. Comparaison des bilans d'eau libre, et leurs conséquences écologiques

##### a) Rappel de quelques données fondamentales

Pour bien situer le problème, il est nécessaire de rappeler quelques données :

— Le plateau d'Azrou est couvert par des formations végétales basses. La cédraie est localisée à certains des appareils volcaniques qui dominent le plateau ou sur les marges de celui-ci comme le Seheb forestier, dont les caractères géologiques et pédologiques ne paraissent pas fondamentalement différents de ceux du plateau proprement dit.

— L'installation des semis de cèdre n'est possible qu'au moment où les températures maximales dépassent 10°C pendant une dizaine de jours, ce qui se produit entre le 15 avril 1970 et le 1<sup>er</sup> juin 1971 ; c'est pourquoi nous avons évalué les réserves d'eau utiles dans le sol à ces deux dates précises (voir tableau ci-après).

##### b) Bilans hydriques et période de végétation du cèdre

Les caractéristiques principales de ces bilans hydriques, sont récapitulées et complétées dans le tableau ci-après.

On peut faire les constatations suivantes :

— Les sols sous forêt s'humidifient autant que leurs homologues hors forêt ; les colluviums fins profonds emmagasinent toujours plus d'eau (profils 5 et 17).

— Les réserves utiles sont toujours plus élevées au printemps sous forêt.

Le profil 3 hors forêt ne contredit pas cette règle car ses 224 mm de réserves comprennent les réserves des cendres sous-jacentes, qui sont de 146 et 163 mm en 1970 et 1971, respectivement.

On peut donc dire qu'au *printemps*, et avant le démarrage de la végétation, les réserves en eau utile ont été protégées d'avantage sous couvert forestier que sur le plateau.

Au début de l'*été*, et dans le courant de celui-ci, les diagrammes représentant l'évolution des réserves en eau libre montrent que la dessiccation estivale est plus intense dans les sols *hors forêt*, où elle concerne une profondeur plus importante.

L'épuisement total de ces réserves survient à des dates différentes suivant le couvert végétal, par exemple :

Caractéristiques de quelques bilans hydriques des sols (mm d'eau)

N° du profil	Type de sol	Formation végétale	Profondeur	Humidités extrêmes pour 1970 et 1971		Réserves utilisables par le cèdre	
				Maxi	mini	15.4.70	1.6.71
5	sol sur colluvium	pelouse sèche	0-130	599	296	201	163
			0-110	528	220	183	132
17	fin épais	cédraie dense	0-110	554	285	240	207
7	colluvium limoneux	prairie	0-110	416	206		176
14	colluvium argileux	cédraie dense	0-110	427	212		203
3	colluvium hétérogène	matorral à genêt	0-130	573	287	246	278
			0-110	461	227	183	224

On notera que les réserves utilisables par le cèdre sont légèrement inférieures aux capacités en eau du sol = Maxi—mini.

le 15 août 1971 pour le profil 17 sous forêt

le 1<sup>er</sup> août 1971 pour le profil 14 sous forêt

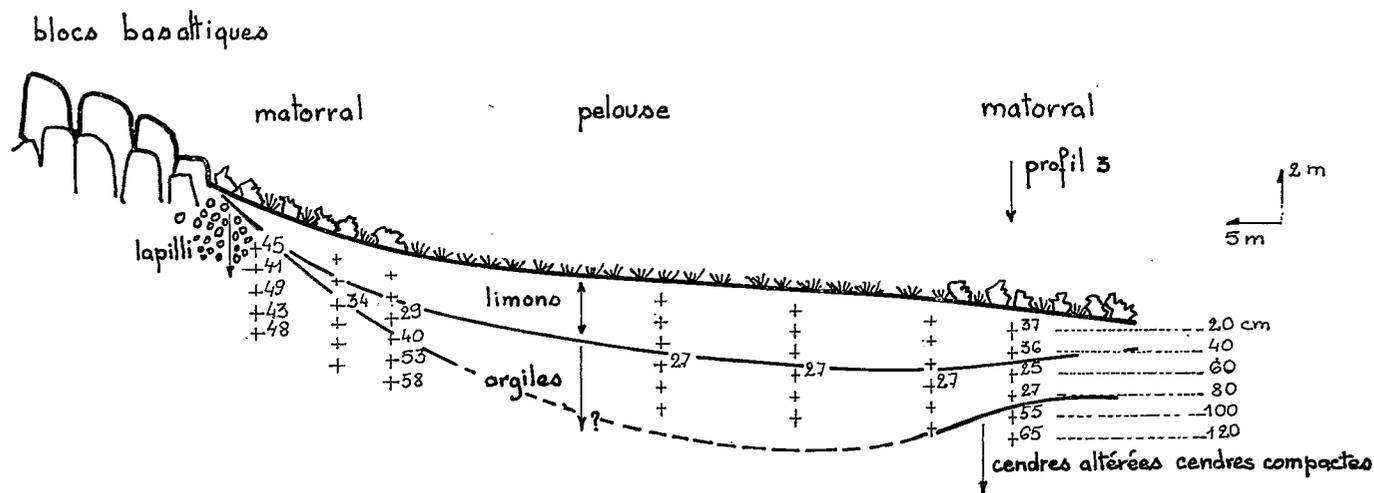
le 1<sup>er</sup> juillet 1971 pour les profils 3 et 7 hors forêt

le 15 juin 1971 pour le profil 5 hors forêt.

En conséquence les durées de la période végétative du cèdre seraient les suivantes (nombre de jours séparant la période thermique favorable de la date d'épuisement des réserves en eau libre) :

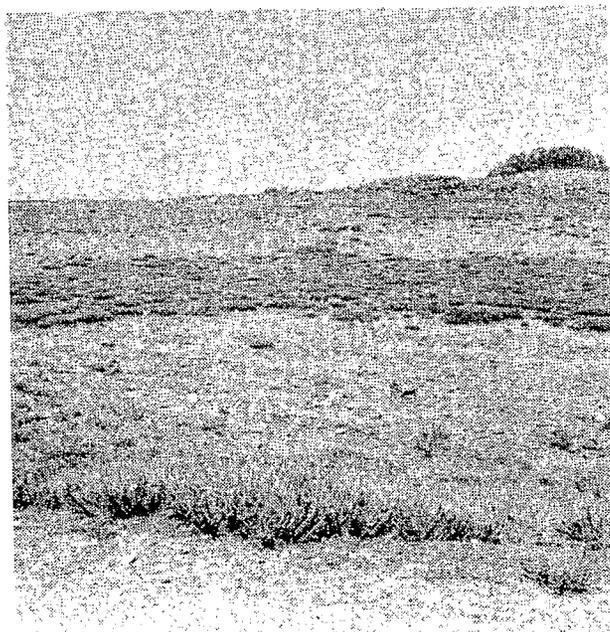
Profil	1970	1971
5 = pelouse	67	24
17 = cédraie	120	toute la saison
7 = prairie	—	80
14 = cédraie	—	100
3 = matorral	65	40

Ces chiffres confirment le rôle protecteur du couvert forestier, même par rapport à la prairie dense. Ils montrent que les sols étudiés sont sans doute incapables, en l'absence de ce couvert, de permettre l'installation du cèdre, du moins dans les conditions climatiques de 1970 et 1971 (pourtant non défavorables, surtout en 1971).



Les nombres indiquent les humidités en % à différentes profondeurs, le 24.04.70, en cours de période humide (cf. fig. 9)

fig. 14 : Affinités édaphiques du matorral à Genista pseudopilosa à la périphérie du profil 3.



Cliché 3. → Vue d'ensemble de la station du profil 3.  
Du premier au dernier plan, en montant : succession  
pelouse-matorral (profil 3) - pelouse-matorral-blocaille  
basaltique.

Aucune conclusion analogue n'a peut être tirée pour les profils 15 et 16, parce que nous ignorons le régime hydrique des horizons profonds. Ces types de substrats devraient faire l'objet de nouvelles investigations.

c) Utilisation des réserves en eau du sol par le cèdre

La courbe de croissance en circonférence du cèdre adulte, portée sur les diagrammes du profil 17 (fig. 8 b) montre que la période de croissance de l'arbre est très réduite dans l'année. Elle confirme les exigences thermiques de la croissance et son synchronisme avec l'évolution des réserves en eau du sol.

On constate que la plus grande partie des réserves d'eau libre ne peut pas être utilisée par l'arbre :

— au printemps parce que la croissance, soumise au régime thermique, ne peut débuter que tardivement lorsque le sol a déjà perdu une partie de ses réserves ; on notera que la courte période de croissance d'avril 1971 correspond justement à une brève période où les maxima dépassent 10°C ;

— en automne, à l'inverse, parce que le sol n'est pas encore réapprovisionné en eau ; et lorsque ces réserves sont reconstituées, le froid interdit alors la croissance de l'arbre.

Celle-ci dépendra donc uniquement *des réserves en eau à la fin de l'hiver et du volume des pluies de printemps*. Les pluies hivernales, qui dépassent largement les capacités de rétention des sols, restent partiellement inutilisées car elles sont reçues avant la période végétative du cèdre.

d) Cas particulier du profil 3 : affinités édaphiques du matorral à genêts et de la pelouse à fétuques (fig. 14 et cliché n° 3)

Le profil 3 réunit des conditions de dessiccation importante dans les 90 centimètres supérieurs et des conditions d'humidité permanente en profondeur, grâce à la présence de matériaux cendres ; il est cependant vraisemblable que les réserves en eau utile des cendres sont moins importantes que celles calculées, car l'hydratation permanente de ces matériaux leur confère sans doute un point de flétrissement plus élevé que celui mesuré sur échantillon séché à l'air (cf. 4222).

Une séquence de sondages a été réalisée aux alentours de ce profil, qui permet de préciser la relation entre la nature du sol et la végétation sur cette station (voir fig. 14).

Il apparaît que le genêt, à enracinement plus profond, s'installe là où les cendres *altérées* se situent à moins de 75-80 cm de profondeur. Dans le cas contraire, c'est la pelouse qui couvre le sol. Notons que la pelouse du profil 5 correspond également à une forte épaisseur de matériaux terreux.

Cette relation entre la présence du genêt et la proximité de la cendre s'expliquerait par les réserves hydriques de celle-ci, comme le montrent, sur la figure 14, les valeurs des humidités mesurées le 24.4.70.

Ces observations expliqueraient la fréquence des espèces ligneuses, à enracinement profond, et la présence exclusive du cèdre sur les cônes volcaniques cendreaux, où le substrat accumule des réserves d'eau en profondeur.

Quant à l'installation des *semis* de cèdre dans ces mêmes conditions elle doit dépendre de la nature des matériaux d'altération de surface et du rythme de leur dessèchement dans le temps. C'est un problème qui n'a pas été abordé ici mais qu'on sait être lié étroitement aux conditions d'exposition (B. LEPOUTRE, 1966).

#### 4.2.3.4. Conclusions

Compte tenu d'une pluviosité de l'ordre de 1 200 mm du 1.1.70 au 1.1.71, et de 1 300 mm du 1.9.70 au 1.9.71, on constate que les sols emmagasinent une tranche d'eau variant entre 200 et 300 mm. L'excédent est drainé en profondeur, s'évapore, ou est consommé par la végétation. Mais cette consommation est réduite parce que la période végétative est toujours courte.

L'évapotranspiration pendant la croissance du cèdre correspond approximativement à la différence entre les humidités au début de la période de végétation (15.4.70 et 1.6.71) et les humidités minimales, auxquelles viennent s'ajouter les pluviosités printanières, soit les valeurs suivantes :

		Humidité évaporée	Pluviosité de printemps
Profil 5	Pelouse	308 mm	
17	Cédraie	269	
7	Prairie	210	40 à 50 mm
14	Cédraie	215	
3	Matorral	286	

A l'exception de la prairie dense, pour laquelle l'évapotranspiration n'est pas éloignée de celle de la cédraie du profil 14, les sols sous formations basses (matorrals, et surtout pelouses) subiraient une évapotranspiration supérieure à celle des sols sous forêt. Ce n'est certes pas la surface foliaire évaporante qui est en cause ici, car il n'y a aucun point commun entre la maigre végétation discontinue de la pelouse et celle de la cédraie dense avec son sous-bois herbacé. Il faut donc admettre que l'évaporation purement physique est principalement en cause, et qu'elle est supérieure, hors du couvert forestier, à l'évapotranspiration de la cédraie dense durant sa période de végétation.

La nature particulière des sols n'est pas étrangère à l'importance de l'évaporation physique, car les capacités de rétention étant très élevées, les précipitations, surtout si elles sont faibles, sont stockées dans les horizons de surface et sont donc davantage sujettes à l'évaporation.

Il en résulte que le bilan hydrique est presque toujours négatif en été dans la partie supérieure des profils, et même jusqu'à 90 cm dans les profils hors forêt, tant la dessiccation y est forte.

*C'est donc seulement sous le microclimat forestier que l'on pourra espérer une réserve d'eau permanente certaines années favorables.*

Le couvert forestier sur sol andique du Moyen-Atlas constitue par conséquent un facteur de modération des variations hydriques du sol, contrairement à ce qui avait été observé sur les sols rouges méditerranéens, ou sur les rendzines dolomitiques (B. LÉPOUTRE, 1961) (1). Cette influence est parfaitement convenable dans l'étage bioclimatique humide, la protection contre l'évaporation ne pouvant devenir efficace que dans la mesure où les réserves en eau du sol sont supérieures momentanément à la consommation de la végétation !

On constate finalement que le comportement de la végétation dans le Moyen-Atlas dépend de la juxtaposition dans le temps de plusieurs facteurs : ceux qui commandent l'évaporation, ceux qui déterminent les cycles physiologiques de la croissance des espèces et enfin, ceux qui sont responsables des réserves hydriques du sol. Il nous reste à aborder l'étude de ces derniers, afin de pouvoir reconnaître les milieux édaphiques les plus favorables au stockage et à la conservation des réserves en eau.

#### 4.2.4. *Les variables édaphiques responsables des réserves en eau facilement utilisables*

##### 4.2.4.1. *Généralités*

Les Réserves en eau Facilement Utilisables s'expriment par la différence entre l'humidité retenue à la capacité de rétention et l'humidité retenue au point de flétrissement :

$$\text{R.F.U.} = \text{H}_2\text{O capacité de rétention} - \text{H}_2\text{O point de flétrissement.}$$

Nous étudierons donc successivement le point de flétrissement puis la capacité de rétention. Préalablement, il faut rappeler certains caractères particuliers aux sols développés sur matériaux volcaniques (voir 4222).

(1) Dans les deux cas, les réserves facilement mobilisables au printemps se sont toujours révélées faibles (2 à 3 %), en raison soit de la dessiccation accentuée des argiles rouges en surface, soit de la grande perméabilité des sables dolomitiques.

Les points de flétrissement sont élevés. Ils dépendent de l'état d'hydratation du sol et de ses composés amorphes (allophanes). Ils sont plus élevés sur échantillons frais et plus faibles sur échantillons séchés à l'air.

Les capacités de rétention sont également élevées et dépendent, comme le point de flétrissement, du degré d'hydratation.

Il n'y a jamais d'hydromorphie dans le sol.

Il existe des liaisons particulières entre les éléments amorphes, l'argile et la matière organique.

Il existe des éléments amorphes dans toutes les fractions granulométriques.

La capacité d'échange varie avec le degré d'hydratation, plus élevée sur échantillon frais et moins élevée sur échantillon sec.

Comme nous nous intéressons d'abord aux propriétés hydriques de sols andiques *in situ*, nous avons préféré conserver leurs composantes dans leur état naturel. C'est ainsi que nous n'avons pas voulu détruire les pseudo-limons ou pseudo-sables réalisés naturellement par les liaisons matière organique - argile - amorphes. Nous ne parlerons donc ici que des particules naturelles de « taille inférieure à 2  $\mu$  » ou de « taille 2-20  $\mu$  » (« *pseudo-limons* »), et réserverons le terme « d'argile » ou de « limon » pour les fractions obtenues habituellement après destruction de la matière organique. Les suspensions de sols ont, pour cette raison, été réalisées après simple traitement aux ultra-sons (voir article M<sup>me</sup> SAUVAGEOT).

#### 4.2.4.2. Les variables édaphiques responsables du point de flétrissement

On sait qu'il s'agit habituellement de la matière organique et des fractions argileuses, les limons ou sables fins intervenant beaucoup moins. Pour des matériaux minéraux on peut tabler sur une relation classique telle que :

$$H_2O_{pF4,2} = (S.F. \times 0,01) + (\text{limons} \times 0,21) + (\text{argile} \times 0,59).$$

Dans les sols possédant des éléments amorphes, comme c'est le cas, l'alumine, la silice, et le fer non cristallisés interviennent du fait de leur affinité pour l'eau. Parmi ces trois éléments, l'alumine se révèle être l'un des plus caractéristiques des sols andiques. C'est pourquoi nous l'avons prise comme référence de la présence des amorphes. La valeur retenue est celle de l'extraction par la méthode Souchier, la méthode SEGALIN étant peu praticable pour des échantillonnages numériquement importants.

Nous avons recherché systématiquement les liaisons qui pouvaient exister entre le point de flétrissement et les différents constituants du sol.

Le tableau suivant traduit les résultats :

**Relations entre l'humidité au point de flétrissement (pF=4,2)  
et divers constituants du sol**

Echantillon frais				
Eléments mis en relation	Corrélations	R <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>
Particules < 2 μ	non significatif	0,27	26	
Particules 2 μ - 20 μ	H <sub>2</sub> O = 0,238(L) + 19,4	0,82	22	++
Particules 2 μ - 50 μ	H <sub>2</sub> O = 0,191(L+1) + 19,4	0,79	21	++
Matière organique	H <sub>2</sub> O = 0,0071(M <sub>0</sub> ) + 24,4	0,60	21	++
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O = 3,043(Al) + 20	0,69	23	++
Particules < 2 μ et Particules 2 μ - 20 μ	H <sub>2</sub> O = 0,347(L) + 0,169(A) + 8,76	0,68	23	++

Echantillon séché à l'air				
Eléments mis en relation	Corrélations	R <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>
Particules < 2 μ	H <sub>2</sub> O = non significatif		26	
Particules 2 μ - 20 μ	H <sub>2</sub> O = 0,152(L) + 16,1	0,59	24	++
Particules 2 μ - 50 μ	H <sub>2</sub> O = 0,113(L+1) + 16,3	0,57	21	++
Matière organique	H <sub>2</sub> O = 0,773(M <sub>0</sub> ) - 8,02	0,43	23	+
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O = 1,757(Al) + 17,3	0,41	25	
Particules < 2 μ et Particules 2 μ - 20 μ	H <sub>2</sub> O = 0,397(L) + 0,302(A) - 5,3	0,76	25	++

*Remarques* : Pour l'interprétation des relations qui viennent d'être établies et pour celles qui suivront soulignons qu'elles ont *valeur statistique*, permettant d'évaluer l'importance de certains constituants par rapport à d'autres.

Par ailleurs, les corrélations sont calculées dans la gamme des valeurs d'échantillonnage de la variable ; il n'est donc pas possible d'extrapoler au-delà de ces limites, et en particulier sur le terme constant lorsque la variable s'annule.

Les limites d'échantillonnage des différentes variables sont les suivantes :

Particules < 2 μ	18,9 - 83	g p. cent
2 μ - 20 μ	15,7 - 61,5	»
2 μ - 50 μ	16,6 - 76,8	»
Matière organique	1,27 - 19,5	»
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,83 - 5,08	»

*Commentaire du tableau :*

Ces réserves étant faites, on constate que c'est pour les particules 2-20  $\mu$  que les liaisons avec le pF 4,2 sont les plus étroites, et en particulier pour les échantillons frais (coefficient de corrélation  $R_1 = 0,82$ ). On se souviendra que les pseudo-limons possèdent de la matière organique et des éléments amorphes ; d'ailleurs le coefficient de corrélation diminue fortement après déshydratation préalable de l'échantillon, en relation avec la présence de ces éléments.

Les limons grossiers, comptabilisés dans les particules 2-50  $\mu$ , semblent avoir moins d'influence, la matière organique également. Mais il ne faut pas oublier que celle-ci participe aux fractions 2-20  $\mu$ , et inf. à 2  $\mu$ .

Les produits amorphes pris isolément voient leur rôle fortement diminué après déshydratation, comme il fallait s'y attendre. On a vu précisément que l'humidité estivale minimale du sol en place est beaucoup plus en liaison avec le pF 4,2 de l'échantillon séché à l'air qu'avec le pF 4,2 mesuré sur échantillon frais (cf. 4222).

Les particules inférieures à 2  $\mu$  prises isolément ne donnent *aucune relation significative*, sans doute en raison de l'importance du rôle joué par les pseudo-limons, mais aussi parce que ces particules fines sont hétérogènes (composition variable entre argiles minéralogiques et produits amorphes).

Enfin, il est également remarquable de constater dans les corrélations multiples le rôle prépondérant des pseudo-limons par rapport à celui joué par les particules inférieures à 2  $\mu$ .

4.2.4.3. *Les variables édaphiques responsables de la capacité de rétention (pF 2,8)*

On note, comme pour le point de flétrissement, une liaison très étroite avec les particules 2-20  $\mu$ . Les limons grossiers n'améliorent pas cette liaison, tandis que les particules inférieures à 2  $\mu$ , là encore, ne donnent pas de corrélation significative.

La matière organique prise isolément est, cette fois, corrélée très significativement avec la capacité de rétention de l'échantillon *déshydraté*. Ce comportement, comparable à celui des amorphes (voir ci-dessous) est inverse de celui que l'on observe pour ces deux éléments au pF 4,2.

Les amorphes agissent de deux manières différentes sur la rétention de l'eau ; d'une manière directe, grâce à leurs propriétés d'hydratation, et d'une manière indirecte, de par leur contribution à la constitution des fractions texturales responsables de la rétention capillaire. Lorsque ces deux fonctions s'équilibrent, la corrélation entre quantité d'amorphes et eau totale perd nécessairement de sa netteté ; par contre cette corrélation se renforce lorsque l'une des deux fonctions prédomine.

Il est paradoxal en effet de voir à pF 2,8 l'influence des éléments amorphes accusée par la déshydratation ; ceci pourrait résulter de ce que leur déshydratation poussée étant plus ou moins irréversible, l'eau capillaire constitue l'essentiel de la capacité de rétention de l'échantillon séché à l'air, ce qui accuse l'influence purement *texturale* des amorphes (fig. 15 a).

Au contraire l'influence des amorphes ressort davantage sur *échantillon frais* au pF 4,2, du fait de la forte diminution de l'eau capillaire (fig. 15 b). Si l'échantillon a préalablement été séché à l'air, son humidité se partage alors entre de faibles quantités d'eau d'hydratation et de capillarité : l'influence des amorphes ne se manifeste pas davantage vis-à-vis de l'une ou de l'autre et la corrélation avec les quantités totales d'eau retenue est mauvaise (fig. 15 c). Cette situation est symétrique de celle que présente l'échantillon frais à pF 2,8, où les deux fractions de l'eau sont également équilibrées, mais pour de fortes valeurs.

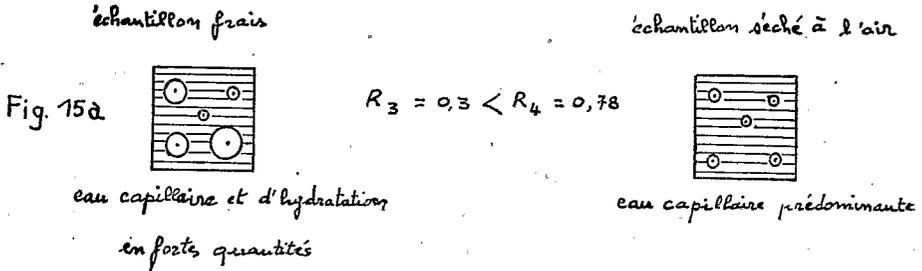
**Relations entre l'humidité à la capacité de rétention (pF=2,8)  
et divers constituants du sol**

Echantillon frais				
Eléments mis en relation	Corrélations	$R_3$	$N_3$	$P_3$
Particules < 2 $\mu$	non significatif	0,45	15	
Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	$H_2O = 0,559(L) + 27,1$	0,72	15	++
Particules 2 $\mu$ -50 $\mu$	$H_2O = 0,409(L+1) + 28,6$	0,65	15	++
Matière organique	$H_2O = 1,42(M_0) + 37,9$	0,56	15	+
$Al_2O_3$	non significatif	0,30	15	
Particules < 2 $\mu$ et Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	$H_2O = 0,266(A) + 0,886(L) + 3,9$	0,71	15	++

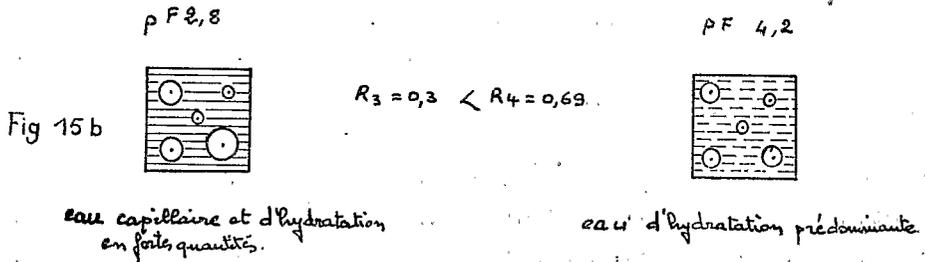
  

Echantillon séché à l'air				
Eléments mis en relation	Corrélations	$R_4$	$N_4$	$P_4$
Particules < 2 $\mu$	$H_2O = -0,527(A) + 71,98$	-0,59	21	++
Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	$H_2O = 0,985(L) + 13,24$	0,82	21	++
Particules 2 $\mu$ -50 $\mu$	$H_2O = 0,871(L+1) + 8,79$	0,82	22	++
Matière organique	$H_2O = 2,465(M_0) + 34,41$	0,75	21	++
$Al_2O_3$	$H_2O = 13,79(Al_2O_3) + 11,73$	0,78	21	++
Particules < 2 $\mu$ et Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	$H_2O = 0,399(A) + 1,439(L) - 20,4$	0,86	21	++

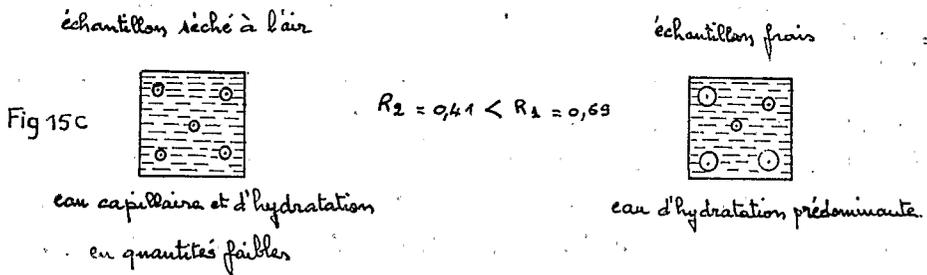
a) Eau retenue à pF 2,8



b) eau retenue sur échantillon frais



c) eau retenue à pF 4,2



Modalité de rétention de l'eau selon différents états des échantillons

On peut donc affirmer que les *éléments amorphes conservent une quantité importante d'eau d'hydratation si l'échantillon n'a pas été desséché préalablement. Toutefois cette eau constitue une fraction relativement plus importante de l'humidité retenue à pF 4,2 qu'à pF 2,8.*

Enfin, on notera là aussi le rôle dominant des particules 2-20  $\mu$  par rapport aux particules 2  $\mu$  dans la corrélation *multiple* qui les relie à la capacité de rétention.

#### 4.2.4.4. *Les variables édaphiques responsables des réserves d'eau facilement utilisables*

Les pseudo-limons conditionnent donc les quantités d'eau disponibles comme l'indiquent toutes les relations établies. Ceci est moins évident pour les particules inférieures à 2  $\mu$ , mais l'absence de corrélation linéaire ne prouve pas qu'elles ne jouent aucun rôle. Nous allons préciser ceci. ○

Nous pouvons repartir de la définition :

R.F.U. =  $H_2O$  capacité de rétention —  $H_2O$  point de flétrissement, que l'on peut calculer soit indirectement, par différence entre les corrélations précédentes, ce qui présente l'inconvénient de cumuler les erreurs, soit directement.

##### a) Méthode indirecte

On a vu que la meilleure estimation du pF 4,2 estivale (voir chap. 4222) est la mesure sur échantillon séché à l'air, tandis que pour le pF 2,8 c'est la mesure sur échantillon frais, à son maximum d'hydratation (cas (1) dans le tableau suivant).

Mais nous envisagerons également les autres estimations possibles, à titre indicatif :

(2) Capacité de rétention sur échantillon frais — point de flétrissement sur échantillon frais.

(3) Capacité de rétention sur échantillon séché — point de flétrissement sur échantillon séché.

On peut constater qu'à poids égal le rôle des *particules inférieures à 2  $\mu$  serait dans tous les cas beaucoup plus faible que celui joué par les pseudo-limons. Il paraît n'avoir quelque importance en valeur absolue que dans le cas (3); ceci paraît logique puisque les produits amorphes déshydratés se comportent alors comme des fractions texturales (voir 4243).*

##### b) Méthode directe

Il s'agit cette fois de calculer directement les valeurs de la R.F.U. et de les mettre en corrélation avec les fractions granulométriques qui nous intéressent; la méthode permet ici d'évaluer l'erreur (voir tableau suivant).

## Expressions diverses des réserves d'eau libre maximales

(1) Capacité de rétention sur échantillon frais — H <sub>2</sub> O à pF 4,2 sur échantillon séché				
		N	R	P
C. R.	H <sub>2</sub> O = 0,886(L) + 0,266(A) + 4,8	15	0,71	++
pF 4,2	H <sub>2</sub> O = 0,397(L) + 0,302(A) - 5,3	25	0,76	++
Méthode indirecte				
R.F.U. calculée	H <sub>2</sub> O = 0,589(L) - 0,036(A) + 10,1			
Méthode directe				
R.F.U. réelle	H <sub>2</sub> O = 0,523(L) - 0,029(A) + 7,6	26	0,82	++
(2) Capacité de rétention sur échantillon frais — H <sub>2</sub> O à pF 4,2 sur échantillon frais				
		N	R	P
C. R.	H <sub>2</sub> O = 0,886(L) + 0,266(A) + 4,8	15	0,71	++
pF 4,2	H <sub>2</sub> O = 0,347(L) + 0,169(A) + 8,7	23	0,68	++
Méthode indirecte				
R.F.U. calculée	H <sub>2</sub> O = 0,539(L) + 0,097(A) - 3,9			
Méthode directe				
R.F.U. réelle	H <sub>2</sub> O = 1,285(L) - 0,520(A) - 49,5	15	0,92	++
(3) Capacité de rétention sur échantillon séché — H <sub>2</sub> O à pF 4,2 sur échantillon séché				
		N	R	P
C. R.	H <sub>2</sub> O = 1,439(L) + 0,399(A) - 20,4	21	0,86	++
pF 4,2	H <sub>2</sub> O = 0,397(L) + 0,302(A) - 5,3	25	0,76	++
Méthode indirecte				
R.F.U. calculée	H <sub>2</sub> O = 1,042(L) + 0,097(A) - 15,1			
Méthode directe				
R.F.U. réelle	H <sub>2</sub> O = 1,076(L) + 0,212(A) - 23,0	21	0,88	++

Les corrélations sont très voisines de celles obtenues par la méthode indirecte pour les cas (1) et (3), et la concordance est remarquable dans le cas (1), qui nous intéresse le plus.

Dans les cas (1) et (2), les particules inférieures à 2  $\mu$  sont affectées d'un coefficient de régression négatif, ce qui équivaut à dire que cette classe granulométrique risque d'être *défavorable* au bilan hydrique. Ceci paraît troublant et nécessiterait des recherches plus approfondies, mais rappelons que BONFILS, dans des sols andiques du Massif Central, a montré une relation inversement proportionnelle entre la R.F.U. et le taux d'argile :

R.F.U. = 2,45 LF/A + 9,5 mais avec R = 0,41 (que l'on suppose significatif; l'auteur ne l'ayant pas indiqué expressément).

Il faudrait donc s'attendre à ce que les milieux trop riches en particules inférieures à  $2 \mu$  s'inscrivent dans le contexte écologique des *milieux secs*. On l'a déjà constaté dans l'étude des bilans hydriques des profils 3 et 5 (cf. 4225 et 4223).

On confirme donc ici le rôle capital joué par les particules 2-20  $\mu$  pour la constitution des réserves en eau facilement utilisables. On attirera l'attention sur le fait que les résultats ne font pas intervenir la place de l'échantillon dans le profil mais qu'ils sont *caractéristiques de la composition granulométrique*. Sachant que les pseudo-limons sont souvent en grande abondance, on saisira alors toute leur importance dans ces types de sols.

#### 4.2.4.5. Influence de la texture sur les propriétés chimiques des sols

Les résultats précédents précisent le rôle des diverses fractions granulométriques dispersées aux ultra-sons, sans destruction de la matière organique.

Bien que les propriétés chimiques du sol ne soient pas prises en considération dans notre hypothèse de travail (voir 421), nous avons cherché à contrôler si la composition physique du sol pouvait également servir à caractériser certains valeurs comme la *capacité de saturation maxima* (T) et la *somme des bases échangeables* (S), cette dernière limitée à Ca et Mg. Les relations ci-après ont été établies (voir tableaux ci-dessous).

On constate cette fois le rôle prédominant de la matière organique, ce qui paraît normal puisque celle-ci fixe une forte proportion des cations. Viennent ensuite les pseudo-limons ; les autres corrélations simples sont moins bonnes.

Il est remarquable de constater que ni T ni S ne sont corrélés avec les particules inférieures à  $2 \mu$ , du fait de l'hétérogénéité de celles-ci, ce que nous avons déjà noté à propos de leurs propriétés hydriques.

Les corrélations multiples manifestent encore la prépondérance des pseudo-limons ou de la matière organique par rapport aux particules  $< 2 \mu$ .

Relations entre la somme des bases Ca, Mg (S)  
et différents constituants du sol

Eléments mis en relation	Corrélations	R	N	P
Particules $< 2 \mu$	non significatif	0,31	28	
Particules $2 \mu - 20 \mu$	$S = 0,194(L) + 7,11$	0,52	28	++
Particules $2 \mu - 50 \mu$	$S = 0,158(L+1) + 6,93$	0,52	28	++
Matière organique	$S = 0,997(M_0) + 8,45$	0,87	28	++
$Al_2O_3$	non significatif	0,26	28	
Particules $< 2 \mu$ et Particules $2 \mu - 20 \mu$	$S = 0,391(L) + 0,172(A) - 7,47$	0,59	28	++
Particules $< 2 \mu$ et Particules $2 \mu - 20 \mu$	$S = 1,284(M_0) + 0,118(A) + 1,79$	0,92	29	++

**Relations entre la capacité de saturation en bases (T)  
et différents constituants du sol**

Echantillon frais				
Eléments mis en relation	Corrélations	R	N	P
Particules < 2 $\mu$	non significatif	0,21	28	
Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	T = 0,40(L) + 29,2	0,60	28	++
Particules 2 $\mu$ -50 $\mu$	T = 0,304(L+I) + 29,7	0,57	28	++
Matière organique	T = 1,346(M <sub>0</sub> ) + 36,11	0,68	28	++
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	T = 4,917(Al) + 29,98	0,45	28	+
Particules < 2 $\mu$ et Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	T = 0,473(A) + 0,863(L) - 7,2	0,72	28	++

Echantillon séché à l'air				
Eléments mis en relation	Corrélations	R	N	P
Particules < 2 $\mu$		0,21	28	
Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	T = 0,303(L) + 21,03	0,57	28	++
Particules 2 $\mu$ -50 $\mu$	T = 0,228(L+I) + 21,59	0,54	28	++
Matière organique	T = 1,159(M <sub>0</sub> ) + 25,44	0,74	28	++
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	T = 3,71(Al) + 21,59	0,43	28	+
Particules < 2 $\mu$ et Particules 2 $\mu$ -20 $\mu$	T = 0,358(A) + 0,674(L) - 7,4	0,67	28	++

#### 4.2.4.6. Caractérisation des pseudo-limons

Nous avons tenté de caractériser les particules 2-20  $\mu$  ; c'est ainsi que les relations suivantes ont été établies :

Particules 2-20 $\mu$ = 3,38 (M <sub>0</sub> ) + 19,1	N=25	R=0,84	++
Particules 2-20 $\mu$ = 11,85 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + 2,53	N=26	R=0,75	++
Particules 2-20 $\mu$ = 1,636 MO + 8,655 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + 2,591	N=28	R=0,88	++

Les trois corrélations sont excellentes.

Il est donc certain que les pseudo-limons incluent des produits amorphes liés à de la matière organique dans des proportions bien définies.

*Remarque* : Il se pourrait cependant que la variation du taux de pseudo-limons dans les profils soit simplement concomitante de celle des produits amorphes et de la matière organique, sans liaison directe ; une telle coïncidence paraît très improbable.

Nous avons également remarqué que l'alumine facilement extractible est en plus grande proportion par rapport à l'alumine totale lorsque les particules 2-20  $\mu$  sont abondantes :

$$\frac{\text{Albumine libre}}{\text{Albumine total}} = 0,0064 (\text{particules } 2-20 \mu) - 0,003 N = 29 R = 0,87++$$

N=29      R=0,87      ++

Le rapport établi ci-dessus se rapproche beaucoup de celui que l'on peut obtenir pour une cendre (base du profil 3) ce qui confirme la contribution des amorphes à la constitution des pseudo-limons.

Tout ceci nous incite donc à penser que les couvertures de pseudo-limons ne sont pas autre chose que des cendres altérées, celles qui traduisent le dernier épisode volcanique (voir 2.1.).

#### 4.2.5. Conclusions

La recherche des variables édaphiques responsables des caractéristiques hydriques du sol fait apparaître des relations remarquables avec les différentes fractions granulométriques prises dans leur état naturel.

L'étude de ces relations montre l'existence et l'importance des *pseudo-limons*, composés de fractions minérales, organiques et d'allophanes. La R.F.U. maximale s'avère en effet très étroitement dépendante de la fraction 2-20  $\mu$ , et très peu influencée par les fractions de taille inférieure à 2  $\mu$ . Pour les particules plus grossières, il ne semble pas que leur importance soit équivalente à celle des pseudo-limons. Ce dernier point mériterait d'être étudié.

Si l'on ajoute que les caractéristiques T et S sont également dépendantes des pseudo-limons, on peut en toute sécurité utiliser les résultats de l'analyse granulométrique des fractions naturelles pour caractériser les milieux édaphiques sur lesquels on se proposera d'étudier le comportement des plantes.

Les résultats obtenus sont en résumé les suivants :

1° Les capacités de rétention seront d'autant plus élevées que le taux de pseudo-limons seront eux-mêmes élevés.

2° Les points de flétrissement seront d'autant plus élevés que les taux de pseudo-limons seront eux-mêmes élevés.

3° Les particules de taille inférieure à 2  $\mu$  ont beaucoup moins d'influence sur la capacité de rétention et sur le point de flétrissement.

4° Les réserves en eau facilement utilisables sont donc très fortement influencées par les pseudo-limons et peu ou pas par les particules inférieures à 2  $\mu$ . Elles croissent avec le taux de pseudo-limons, du fait que la capacité de rétention *croît alors plus fortement que le point de flétrissement*.

5° Les capacités de rétention étant très élevées en surface, les faibles précipitations sont stockées à ce niveau et donc davantage sujettes à l'évaporation. Seules les fortes précipitations sont susceptibles d'humidifier le sol sur toute sa profondeur.

6° Les pseudo-limons sont sûrement constitués par une forte proportion d'allophanes et une plus faible proportion de matière organique.

7° La dominance des produits amorphes dans les pseudo-limons fait penser qu'il s'agit sans doute de produits d'altération de dépôts d'origine cendreuse, plus ou moins remaniés suivant la topographie. Il s'agirait du dernier épisode volcanique, qui a dû recouvrir plus ou moins totalement le plateau de produits pyroclastiques.

En marge de ceci, il nous a paru intéressant d'imaginer le régime hydrique de tels sols andiques sous des climats plus secs et plus chauds.

Sous ces climats, ces sols risquent de créer des conditions défavorables à la végétation, puisque l'eau des *faibles précipitations* reste stockée dans les horizons supérieurs à forte capacité de rétention, est rapidement évaporée, tandis qu'une fraction importante de ces précipitations est immobilisée en raison des points de flétrissement élevés.

Ceci pourrait alors expliquer certaines observations faites dans l'étage semi-aride d'EMBERGER, comme la mauvaise croissance du chêne-liège sur sol volcanique du plateau central (Ch. SAUVAGE, communication orale).

Les sols andiques, et peut-être aussi les andosols, ne présenteraient ainsi des conditions écologiques favorables que dans les climats suffisamment pluvieux ou humides, ce qui semble bien s'avérer exact (plaine de Limagne, Iles Canaries, chaîne volcanique du Cameroun, etc.).

Sur le plan de la *systématique des sols*, les quantités relativement modestes de produits amorphes (allophanes), l'hydratation modérée, la présence d'argiles, parfois abondantes, placent ces sols complexes à la limite des sols andiques et des andosols.

Il est remarquable de retrouver ici toute une série de caractères propres aux andosols, tels que l'influence de l'hydratation sur les propriétés physico-chimiques, la structure, la texture, l'absence d'hydromorphie. Nous savons à présent le rôle important des pseudo-limons vis-à-vis de ces propriétés et le rôle au contraire effacé des particules inférieures à 2  $\mu$ . Il pourrait s'agir là d'un critère de classification, par comparaison avec les andosols proprement dits. Pour ce qui est de la différenciation avec les sols bruns, elle est évidente, et en particulier il nous paraît à présent difficile de placer de tels sols dans la classe des sols humifiés, car il ne fait pas de doute que tous leurs caractères relèvent de processus de pédogénèse différents, dominés par la présence des allophanes.

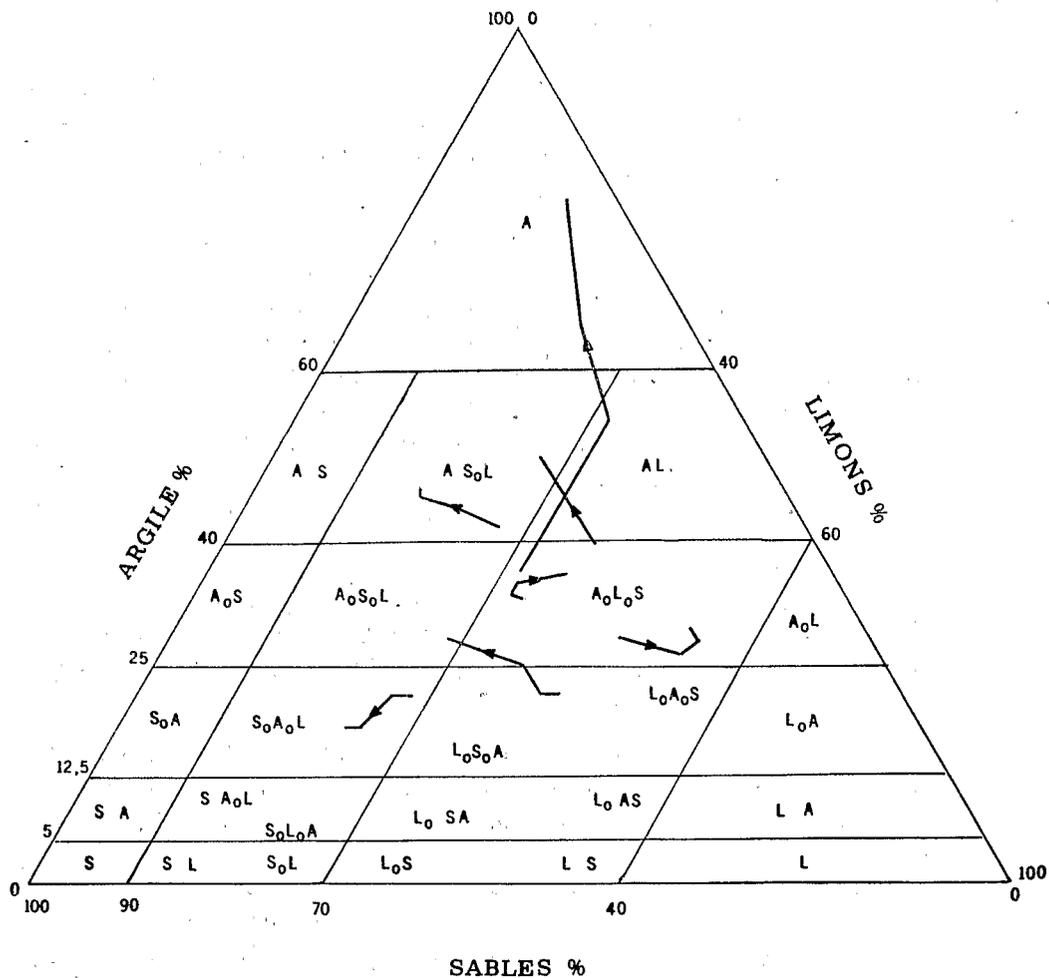


Fig 16 TEXTURES DES PROFILS MOYENS  GRANULOMETRIE DE LA SURFACE VERS LA PROFONDEUR

Il faudrait sans doute les placer dans la classe des andosols, sous-groupe désaturé, faiblement andosolique (à créer).

#### 4.2.6. Classification des sols d'après leur composition granulométrique naturelle

Il est donc possible de caractériser les milieux édaphiques par la granulométrie des profils, et d'étendre ainsi l'échantillonnage à un nombre plus élevé de profils de façon à vérifier statistiquement l'influence écologique des propriétés hydriques mises en évidence sur les profils types.

La comparaison de proche en proche des diagrammes granulométriques permet de les classer selon la prépondérance des diverses fractions (sables - limons - argiles) sur l'ensemble du profil. On parvient à définir ainsi, par référence au triangle des textures (fig. 16), 9 types texturaux moyens (fig. 17). Pour chaque type, nous avons représenté le profil moyen défini par les moyennes des classes granulométriques aux différentes profondeurs. L'intervalle de confiance calculé pour  $P = 0,10$  et le nombre correspondant de valeurs (test de STUDENT) est indiqué pour les particules inférieures à  $2 \mu$  et les sables. Cet intervalle donne une idée de l'homogénéité de l'échantillonnage. Les classes sont dans tous les cas bien distinctes.

Toutefois, les horizons superficiels varient diversement pour une même texture d'ensemble. Or la surface joue un rôle prééminent pour beaucoup d'espèces à enracinement modeste, et particulièrement pour les semis du cèdre ; en conséquence il nous a fallu préciser la texture de la surface (20 premiers cm), selon son caractère argileux, sableux ou équilibré.

L'estimation des réserves en eau facilement utilisables (R.F.U.) fait intervenir finalement trois variables : texture d'ensemble, texture superficielle, et profondeur du profil, dont les valeurs se combinent selon le tableau suivant :

	Profondeur	Texture d'ensemble du profil								
		A (26)	A L (35)	A(SoL) (25)	AoSoL (24)	AoLoS/1 (34)	LoAoS (332)	AoLoS/2 (33)	SoAoL (23)	S(AoL) (22)
Texture équilibrée en surface	> 120									
	> 80									
	> 40									
	< 40									
Argile en surface	> 120									
	> 80									
	> 40									
	< 40									sables en surface

CODE

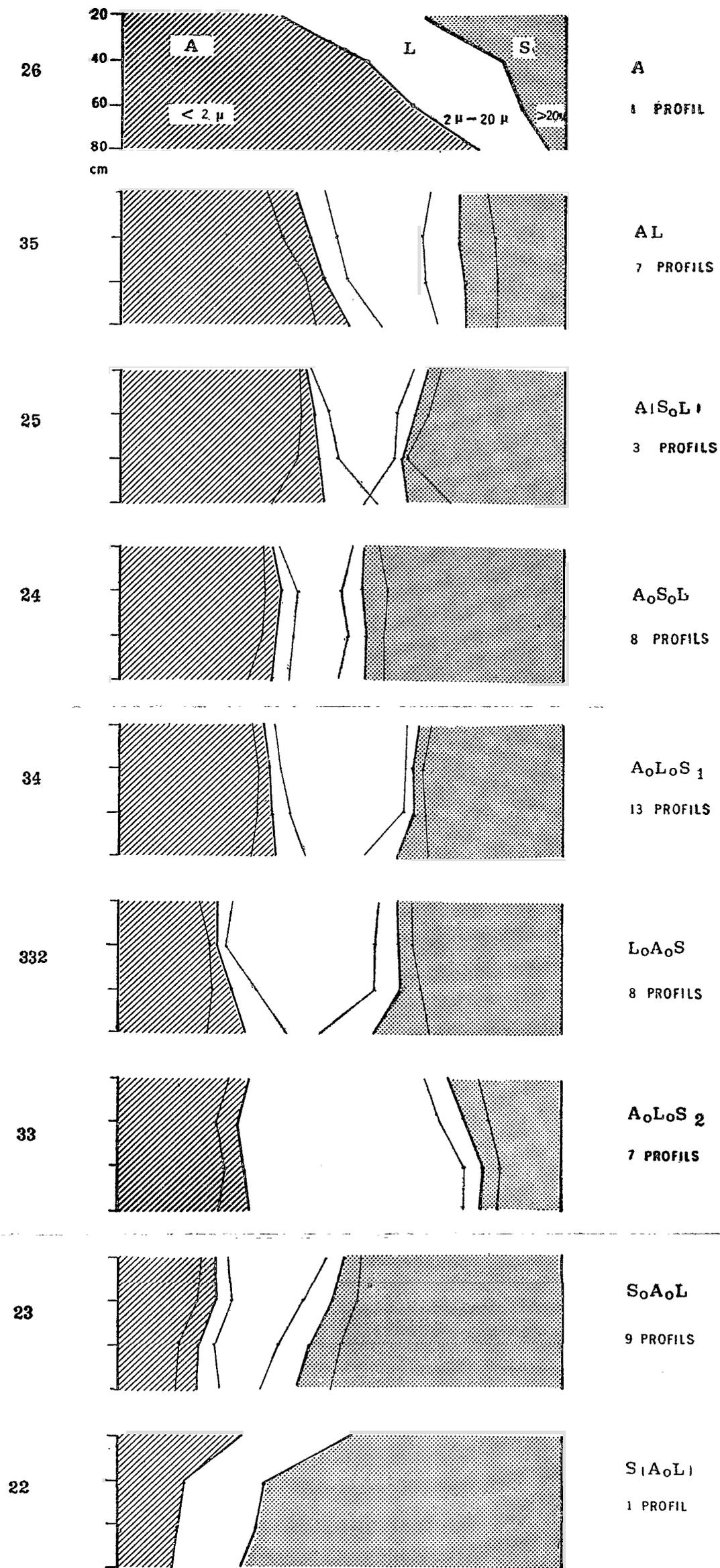


Fig 17 CLASSEMENT DES SOLS SELON LA GRANULOMETRIE  
'INTERVALLE DE CONFIANCE P: 0,10 POUR LES SABLES  
ET L'ARGILE '

L'influence des pentes est négligée en première analyse, du fait de leur modestie générale et de la *faiblesse du ruissellement* sur les cendres et lapillis poreux qui constituent les cônes volcaniques. 56 profils sont ainsi caractérisés, plus 12 classés par analogie. Pour les autres profils, sur lesquels nous ne possédions pas de mesure granulométrique, nous avons recouru à une appréciation qualitative de la nature du matériau meuble du sol extrait à la tarière, codée selon le tableau ci-dessous. Ce critère, combiné aux classes de profondeur, constitue une seconde variable édaphique, approchée, mesurée sur 159 profils.

	Nature du matériau superficiel			
	Terreux	Terreux avec gravillons	Terreux avec pierres	Pierres et rocher
> 120				
> 80				
> 40				
< 40				

#### 4.3. Variables biotiques : la végétation

La végétation est à la fois *expression* et *facteur* du milieu, mais facteur au second degré puisque dépendant indirectement de ceux qui régissent son existence même.

##### 4.3.1. Végétation et échantillonnage

Les variations physiologiques de la végétation constituent la base de notre échantillonnage (311). Or la physiologie rend compte de la structure des formations et de leurs espèces principales (1). Ces critères réunis permettent donc de caractériser des *unités d'occupation du sol*, qui peuvent être traitées comme les termes d'une variable complexe : si celle-ci reflète avec précision l'hétérogénéité du milieu, elle doit fournir une information élevée sur la distribution des espèces. Il est donc possible de *tester* ainsi le bien-fondé de la stratification choisie pour notre échantillonnage.

(1) Les critères structuraux sont définis dans le code du C.N.R.S. ; quant aux espèces principales, nous en retenons deux, l'*espèce dominante*, et la première « *espèce discriminante* » : celle qui, parmi les compagnes les plus abondantes de l'espèce dominante, caractérise le mieux un faciès particulier de la végétation ; ce n'est pas toujours l'espèce qui domine en second.

#### 4.3.2. Dynamique de la végétation - climax

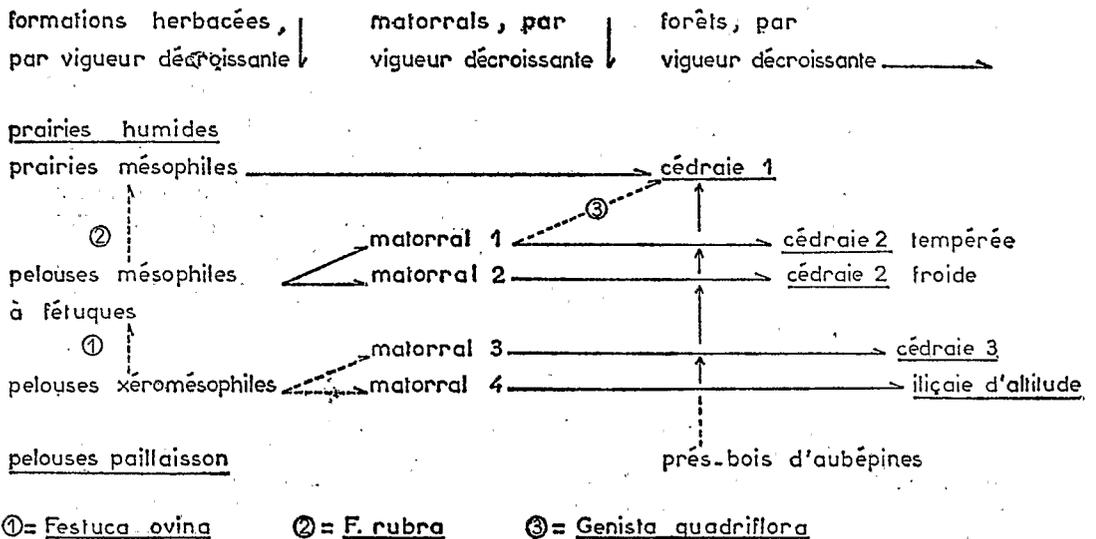
Toutefois, l'occupation actuelle du sol ne reflète pas forcément la vocation actuelle des milieux.

La répartition des espaces asylvatiques, cernés par la forêt sur plusieurs côtés, suggère avons-nous dit (1.1.) une filiation entre les formations ligneuses basses et la forêt. C'est bien ce qui fonde l'intérêt de notre étude, puisqu'il s'agit de déterminer la vocation des milieux découverts. S'il existe des *affinités entre ceux-ci et des milieux asylvatiques*, la distribution de certaines espèces pourrait en rendre (ce ne seront évidemment pas celles qui sont le plus liées aux milieux forestiers puisqu'elles doivent également se rencontrer à découvert). Ceci supposé d'une part que la végétation actuelle prise dans son ensemble ne reflète pas exactement l'action de *tous* les facteurs du milieu et, d'autre part, que l'influence écologique de la forêt ne masque pas trop les autres sinon, il n'y aurait guère d'espèce dans la distribution qui ne lui soit soumise.

Par conséquent il est intéressant de tester un schéma hypothétique de filiation entre les divers types de végétation (T. IONESCO et Ch. SAUVAGE, 1962) ; selon ce schéma certaines formations de découvert sont envisagées comme des termes de transition vers des formations forestières qui en constituent l'aboutissement (*climax*) - voir tableau ci-dessous :

#### Schéma de filiation hypothétique des formations sur basaltes.

(Les climax sont soulignés.)

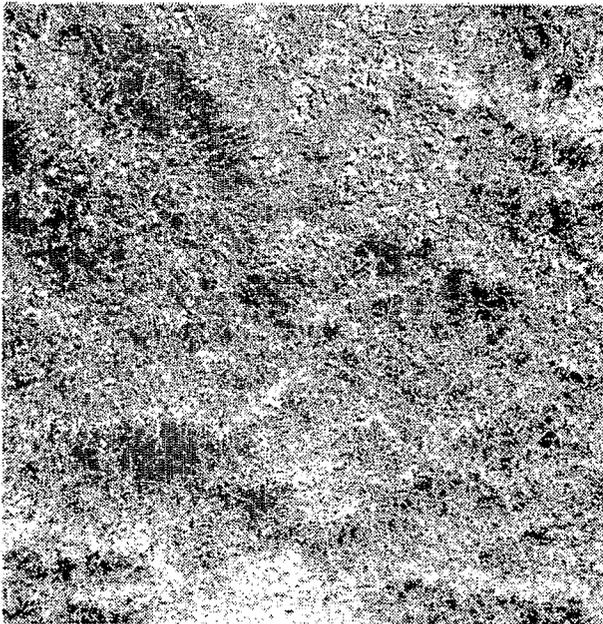




Clichés 4, 5, 6.



Cliché 7. — Vue d'ensemble du matorral dense à adénocarpe, sur le versant SW de J. Hebri.



Cliché 8. — Détail de la vue précédente avec *Festuca ovina* à l'avant-plan de l'adénocarpe.

## a) Formations ligneuses et mixtes (forêts et matorrals)

*Cédraie 1* — Futaie dense, jardinée, à sous-bois herbacé dense (*Brachypodium sylvaticum*) souvent sur colluvium argilo-limoneux épais (ph. n° 4).

*Cédraie 2* — Futaie dense à assez claire, plus régulière (régénération à tendance équienne), à sous-bois herbacé varié, ou herbacé et ligneux bas (*Adenocarpus boudyi* - *Genista jahandiezii*). Souvent sur colluvium moins épais et plus sableux, reposant sur des coulées désagrégées (photo n° 5).

*Cédraie 3* — Futaie assez claire à claire, irrégulière, parfois densément régénérée en bloc (photo n° 6). Sous-bois ligneux haut (chêne vert - houx). Sur coulées assez superficielles ou matériaux détritiques drainants.

*Iliçaie d'altitude* — Climax théorique du climat plus sec du secteur oriental (cf. 411).

*Matorral* (\*) 1 — Formation herbacée-ligneuse basse, dense, dominée par *Adenocarpus boudyi* (photos n° 7 et 8). Elle correspond au climat à caractère tempéré (cf. 411). Une variante à *Genista quadriflora* pourrait s'inscrire dans la première lignée de la cédraie (grande clairière du Seheb, dans sa partie moyenne).

*Matorral 2* — Formation herbacée-ligneuse basse, dense, dominée par *Genista pseudopilosa*, en principe accompagné de *Festuca rubra* et *F. ovina*. Elle correspond au climat à caractère froid.

*Matorral 3* — C'est la formation précédente appauvrie, où les fétuques cèdent la place à *Poa bulbosa* (photo n° 9). Elle constitue de grandes étendues sur les coulées horizontales du troisième secteur orographique. Ces matorrals ne sont pas distingués des précédents sur la carte de situation (fig. 1).

*Matorral 4* — Formation herbacée-ligneuse très basse, dominée par *Helianthemum croceum* et *Thymus algeriensis*. Dans notre schéma, elle correspond au climax supposé de l'iliçaie d'altitude (quatrième secteur orographique).

## b) Formations herbacées

Les formations herbacées sont climaciques dans les milieux très humides ou très secs.

La pelouse « paillaïsson », évoquée ci-dessus (23), couvre des coulées prismatiques à sol très mince (quelques cm), mais aussi des sols très argileux localisés aux secteurs orographiques 3 et 4. Elle doit son aspect aux tiges raides de *Carex divisa* et à l'abondance de *Poa bulbosa*, tôt desséché.

(\*) Ce terme est donc employé ici dans l'acception à la fois physionomique et génétique fixée par T. IONESCO et Ch. SAUVAGE.

Les *pelouses xéromésophiles* constituent un ensemble varié sur matériaux drainants, ou à l'inverse excessivement argileux. Le *Poa* y occupe toujours une grande place, laissant de larges plaques de sol à nu en saison sèche. Il est parfois hasardeux de spéculer sur leur signification dynamique : certaines sont très probablement climaciques, mais d'autres, étroitement imbriquées entre elles et avec les matorrals des types 3 ou 4, correspondent peut-être à des faciès diversement dégradés ; il ne faut pas oublier que tout le domaine asylvatique est intensément pâturé dès que la neige découvre le sol. Celle-ci peut d'ailleurs jouer un rôle dans la différenciation des micromosaïques, mais limité par la durée relativement brève des enneigements.

Les *pelouses mésophiles à fétuques* (*F. ovina* ssp. *laevis* var. *gallica* et *F. rubra* ssp. *eu-rubra* var. *yvesiana*) ont une grande importance. Les fétuques accompagnent par ailleurs les matorrals les plus vigoureux, 1 et 2.

Les *prairies mésophiles à légumineuses* (*Vicia onobrychioides*, *V. tenuifolia*, *Trifolium ochroleucum*) ou à graminées (*Phleum nodosum*, *Dasyphyrum hordeaceum*, *Dactylis glomerata*) sont localisées aux clairières et lisières qui bénéficient de défens forestiers (grande clairière du Seheb, dans sa partie S.-W.). Leurs espèces sont souvent banales, mais prennent ici un développement inaccoutumé. Des variantes appauvries, dominées par *Stipa lagascae*, peuvent occuper des milieux édaphiques moins favorables (cédraie 2) qu'elles disputent alors à l'adénocarpe.

Enfin, les *prairies humides* (*Trifolium humile* - *Lotus corniculatus* - *Festuca elatior*...) correspondent à des « mouillères » sur sol profond.

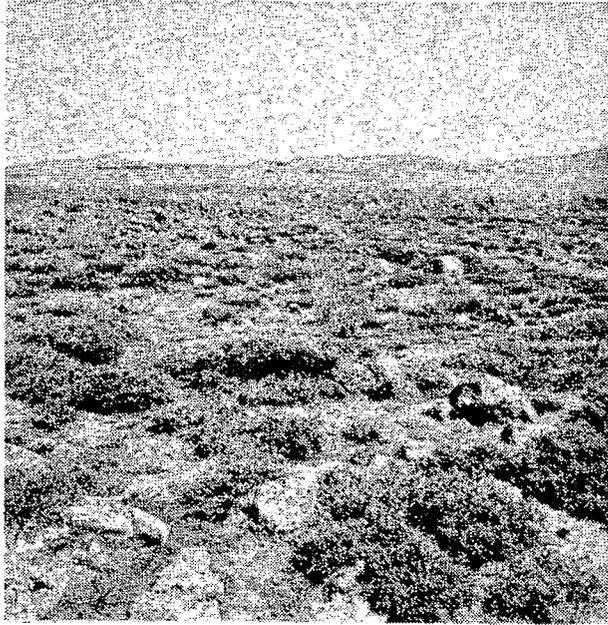
### c) Formations particulières à la lisière et aux clairières forestières

Nos spéculations relatives aux climax se fondent pour une part sur l'existence de formations mêlant les espèces de découvert à celles des boisements clairs. Loin de constituer des frontières nettes, les lisières festonnées des cédraies rassemblent en effet une mosaïque de végétations intermédiaires, que les éclaircies font ressurgir en forêt : c'est ainsi que l'adénocarpe ou l'hélianthème jaune, mais aussi de nombreuses graminées vivaces comme celles des prairies mésophiles transgressent le domaine forestier.

Les aubépines soulignent ces lisières indéçises comme un pré-bois, rapidement dilué lorsqu'on s'éloigne de la forêt. Leurs bosquets abritent de nombreuses espèces d'affinités forestières, et, au contact même de la forêt, des régénérations de cèdre (photo n° 10) ; celles-ci en grandissant dominent progressivement leurs hôtes, qui leur ménageaient sans doute une ombre bénéfique, tout en éloignant l'herbe, concurrente des semis.

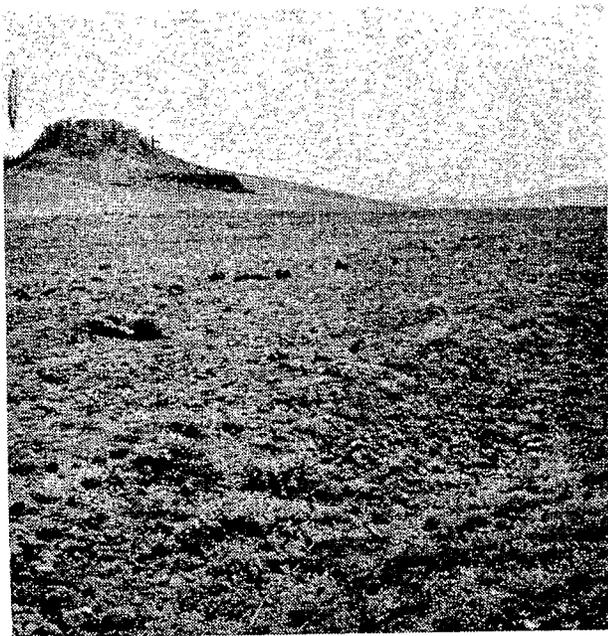
Le voisinage de la forêt et le microclimat de la lisière sont particulièrement favorables à l'installation des semis de cèdre (voir B. LEPOUTRE et A. PUJOS) ; il faut donc envisager la lisière comme un contact dynamique, dont l'activité peut

Cliché 9. — Matorral ouvert à genêt et *Poa bulbosa* sur les coulées blocailleuses du sommet de plateau (secteur 3).



Cliché 10. — Prés-bois d'aubépine sur la lisière de la forêt du Seheb, abritant quelques régénérations.





Cliché 11. — Formation très ouverte à thym sur coulée pierreuse. Au deuxième plan, vestige de cédraie (secteur 4).

être provisoirement réduite par les excès du pâturage, mais qui rassemble en puissance les facteurs d'une expansion forestière.

#### d) Formations de la marge orientale sèche du domaine

La végétation s'appauvrit considérablement vers la haute plaine du Guigou, où les matorrals laissent successivement la place à une thymaie (*Thymus algeriensis*) très ouverte (photo n° 11) puis aux steppes d'armoise (*Artemisia herba alba* et *A. mesatlantica*). Certains indices donnent à penser que ces étendues pierreuses ont pu être anciennement cultivées. En effet, les espèces annuelles constituent l'essentiel de la végétation, qui s'apparente à un erme xérophile. Les adventices de culture, *Herdeum murinum*, *Elymus caput-medusae*, *Aegilops ovata*, *Adonis* sp., etc., sont ici les plus nombreuses ; on sait d'ailleurs que le thym et les armoises eux-mêmes envahissent couramment les friches. Enfin, les pierres jonchent le sol comme après le travail de l'araire.

Fait exceptionnel au Maroc, le recul des cultures pourrait s'expliquer par le désenclavement humain de la haute plaine du Guigou, terroir d'une population autrefois autonome. Les documents historiques ne nous sont malheureusement pas connus. Cependant, l'appauvrissement très marqué de la végétation n'est sans doute pas sans relation avec les conditions hydriques défavorables des sols andiques sous les climats plus secs, évoquées dans les conclusions 4.2.5.

#### 4.4. Conclusion

Le travail précédent a permis de définir un ensemble de variables qui peut être soumis au traitement mécanographique. Celui-ci permettra de tester l'efficacité des combinaisons élaborées en vue d'une meilleure estimation des facteurs écologiques, en particulier du bilan d'eau de la station.

## TROISIEME CHAPITRE

## RELATIONS SOL/CLIMAT/VEGETATION

## 5. RELATIONS SOLS-CLIMAT-VEGETATION

## 5.1. Principes du traitement mécanographiques (1)

## 5.1.1. Notions d'indétermination et d'information

L'indétermination d'un événement porte sur deux variables : le nombre total d'éventualités de cet événement, et la probabilité de chacune. Elle est d'autant plus forte que ces éventualités sont plus nombreuses et que leurs probabilités sont plus voisines. Or nous savons que la probabilité d'un événement complexe est le produit des événements élémentaires, quand ils sont indépendants.

$$p(A ; B) = p(A) \cdot p(B) \text{ (loi des probabilités composées).}$$

Si l'on exprime l'indétermination relative à la combinaison de plusieurs expériences en fonction de leurs probabilités selon une échelle logarithmique, les indéterminations s'ajouteront là où les probabilités se multiplient. Ce que traduit la forme de la relation de SHANNON (in ABRAMSONN, 1963) :

$$H(\alpha) = \sum_{i=1}^{i=k} p(A_i) \log_2 \frac{1}{p(A_i)} \quad (1)$$

ou  $H(\alpha)$  exprime en « binons » l'indétermination relative à une expérience  $\alpha$ , qui peut avoir plusieurs issues  $A_1, A_2, \dots, A_i \dots A_k$ , dont les probabilités respectives sont  $p(A_1), p(A_2), \dots, p(A_i), \dots, p(A_k)$ . On montre que  $H(\alpha)$  est maximum lorsque les issues sont équiprobables.

On adopte le plus souvent pour une base logarithmique le nombre 2 ; l'unité d'indétermination est alors celle qui correspond à une expérience ayant deux issues possibles, également probables. Cette indétermination est souvent appelée « entropie » car il existe une identité, au moins formelle, entre la notion utilisée en thermodynamique et celle d'indétermination.

(1) Ce paragraphe reprend, à quelques modifications de forme près, l'exposé précis que donne B. GARONNE dans sa thèse de spécialité (1970), où il applique les méthodes proposées par M. GODRON (1968) et utilisées déjà par J.L. GUILLERM (1969).

La notion d'*information* est exactement complémentaire de celle d'entropie (ou d'indétermination) ; elle utilise pour sa mesure les mêmes unités.

D'une façon générale, la quantité d'information qu'on obtient en se livrant à une expérience  $\alpha$  précédant une autre expérience  $\beta$  est la différence entre l'entropie de l'expérience  $\beta$  indépendamment de  $\alpha$  (on dit l'entropie *a priori*) et son entropie après l'expérience  $\alpha$  (on dit l'entropie *a posteriori*), la réalisation de  $\alpha$  étant supposée réduire l'indétermination de  $\beta$ .

*Par exemple* : prendre une boule dans l'urne sera l'expérience  $\alpha$  ; y reprendre une boule *sans remettre la première* sera l'expérience  $\beta$ . L'expérience  $\beta$  est moins indéterminée que l'expérience  $\alpha$ , car il y a une boule de moins dans l'urne, donc une issue de moins. Ceci s'exprime par la relation :

$$I_{(\alpha)} = H_{(\beta)} - H_{\alpha}(\beta) \quad (2)$$

- où : —  $I_{(\alpha)}$  est la quantité d'information apportée par l'expérience  $\alpha$ ,  
 —  $H_{(\beta)}$  est l'entropie *a priori* de l'expérience  $\beta$  (c'est-à-dire, comme si l'on n'avait pas déjà pris une boule dans l'urne),  
 —  $H_{\alpha}(\beta)$  (lire entropie de  $\beta$  si  $\alpha$ ) est l'entropie *a posteriori* de  $\beta$  (c'est-à-dire avec une boule de moins dans l'urne).

Ces considérations peuvent s'appliquer aux variables observées dans les relevés d'un inventaire écologique.

### 5.1.2. Entropie des variables écologiques

En appelant  $p(V_i)$  la probabilité de trouver un relevé correspondant à l'état  $i$  de la variable, tandis que  $k$  est le nombre d'états que peut rendre cette variable, la formule de SHANNON s'écrit :

$$H_{(v)} = \sum_k p(V_i) \log \frac{1}{p(V_i)} \quad (3)$$

La probabilité  $p(V_i)$  peut être estimée en première approximation à partir de la fréquence relative des relevés dans les classes (états) de la variable.

Si, *par exemple*, le pH du sol varie de 4 à 8 et que l'on divise cette variable en 5 classes (4-5, 5-6, 6-7, 7-8), on aura  $k = 5$ . Si 200 relevés se répartissent comme suit :

pH	4	5	6	7	8	Total
Nombre de relevés	20	40	10	60	70	200
$p(V)$	0,1	0,2	0,05	0,3	0,35	1,00

$$\text{On aura } p(V_4) = \frac{20}{200} = 0,1 ; \quad p(V_5) = \frac{40}{200} = 0,2 \quad \text{etc.}$$

Cette estimation d'une probabilité par la fréquence observée n'est acceptable que si le nombre des observations dépasse la centaine.

### 5.1.3. *Information mutuelle espèce-variable*

On sait que certaines espèces, dites *indicatrices*, « apportent une information » sur l'état des variables auxquelles elles sont « sensibles ». Ainsi, une psammophyte sur la texture du sol, une calcicole sur la nature du substrat, etc.

Il nous est possible de calculer l'entropie *a posteriori* des variables en fonction de la présence et de l'absence des espèces, à l'aide de la relation :

$$H_E(V) = \sum_k p(EV_i) \log_2 \frac{p(E)}{p(EV_i)} + \sum_k p(\bar{E}V_i) \log_2 \frac{p(\bar{E})}{p(\bar{E}V_i)} \quad (4)$$

où  $p(EV_i)$  est la probabilité de présence de l'espèce pour la valeur  $i$  de la variable,  $p(\bar{E}V_i)$ , celle de l'absence de l'espèce pour la valeur  $i$  de la variable,

$p(E)$  la probabilité de présence de l'espèce sur l'ensemble des observations,

$p(\bar{E})$  la probabilité d'absence de l'espèce sur l'ensemble des observations.

Par ailleurs, l'*information* apportée par l'espèce sur la variable est, d'après (2) :

$$I_E = H(V) - H_E(V)$$

d'où, d'après (3) et (4), l'*information mutuelle* espèce-variable :

$$I_E = \sum_k p(EV_i) \log_2 \frac{p(EV_i)}{p(E)p(V_i)} + \sum_k p(\bar{E}V_i) \log_2 \frac{p(\bar{E}V_i)}{p(\bar{E})p(V_i)} \quad (5)$$

La formule est symétrique en  $E$  (ou  $\bar{E}$ ) et  $V_i$ . Il s'agit donc bien d'*information* « mutuelle » fournie, soit par la présence ou l'absence de l'espèce sur les états de la variable, soit par les états de la variable sur la distribution de l'espèce.

La fréquence relative de l'espèce dans les diverses classes de la variable constitue son « profil des fréquences relatives ». Ce profil est d'autant plus « informatif » qu'il s'écarte d'une distribution aléatoire, ce qui signifie alors que l'espèce est sensible à la variable (ou que celle-ci influence sa distribution).

### 5.1.4. « *Équitabilité* » de l'échantillonnage

L'entropie - variable (relation 3) est une entropie *a priori* ; elle ne dépend que de l'échantillonnage. Nous sommes libres, en effet, de faire varier la proportion d'observations (assimilée à une probabilité) dans chacune des classes des variables.

Il est donc possible de maximiser l'entropie - variable, afin d'augmenter le « potentiel » d'information susceptible d'être fourni par les espèces sur cette variable.

L'entropie maximale correspond à un échantillonnage qui place le même nombre de relevés dans chaque classe de la variable (probabilités équiprobables — voir 511). Dans ce cas, l'entropie de la variable ne dépend que du nombre de classes.

#### 5.1.5. « *Activité* » et « *rendement* » d'une variable

L'*activité* d'une variable se mesure par la moyenne des informations apportées sur la distribution de l'ensemble des espèces.

Toutefois, l'activité des variables dépend de la qualité de leur échantillonnage (cf. *supra*). Afin de réduire l'influence de ce dernier, on préfère donc comparer le « *rendement* » des variables, c'est-à-dire le rapport des informations mutuelles moyennes à l'entropie. C'est ce que représente le diagramme de la fig. 18 (5.2.1.).

## 5.2. Résultats du traitement

### 5.2.1. Rendement comparé des variables élémentaires et élaborées

Le diagramme de la fig. 18 est construit selon les indications de 5.1.5. L'entropie des variables  $y$  est portée en abscisses et la moyenne des informations mutuelles (HIM) relatives aux 50 premières espèces (parmi les 350 espèces rencontrées sur l'ensemble des 187 relevés et éléments de relevés) en ordonnées. L'une et l'autre coordonnées sont exprimées en binons. Afin de faciliter la comparaison des variables, le diagramme est subdivisé en secteur de rendement (rapport de l'ordonnée à l'abscisse) croissant, de 2,5 % à 20 %.

Les variables les mieux échantillonnées sont donc situées à droite du graphique ; ce sont celles qui comportent le plus grand nombre de classes : « l'unité d'occupation du sol » et la « première espèce discriminante » par exemple en comportent une soixantaine. Cependant ce ne sont pas toujours elles qui ont le *plus fort rendement*, puisque pour une valeur en ordonnée celui-ci est obtenu pour une valeur minimale en abscisse. Par ex. pour  $HIM = 0,39$ , la « texture des fractions fines » a un rendement supérieur à la « première espèce dominante » (12,5 % contre 11 %).

La valeur  $HIM = 0,19$  (variable « formation ») partage le diagramme en deux parties ; *au-dessus* de cette valeur, les rendements des variables ne sont pratiquement pas inférieurs à 7,5 % et l'entropie-variable est supérieure à 2 binons (sauf pour la variable 16 — nous y reviendrons).

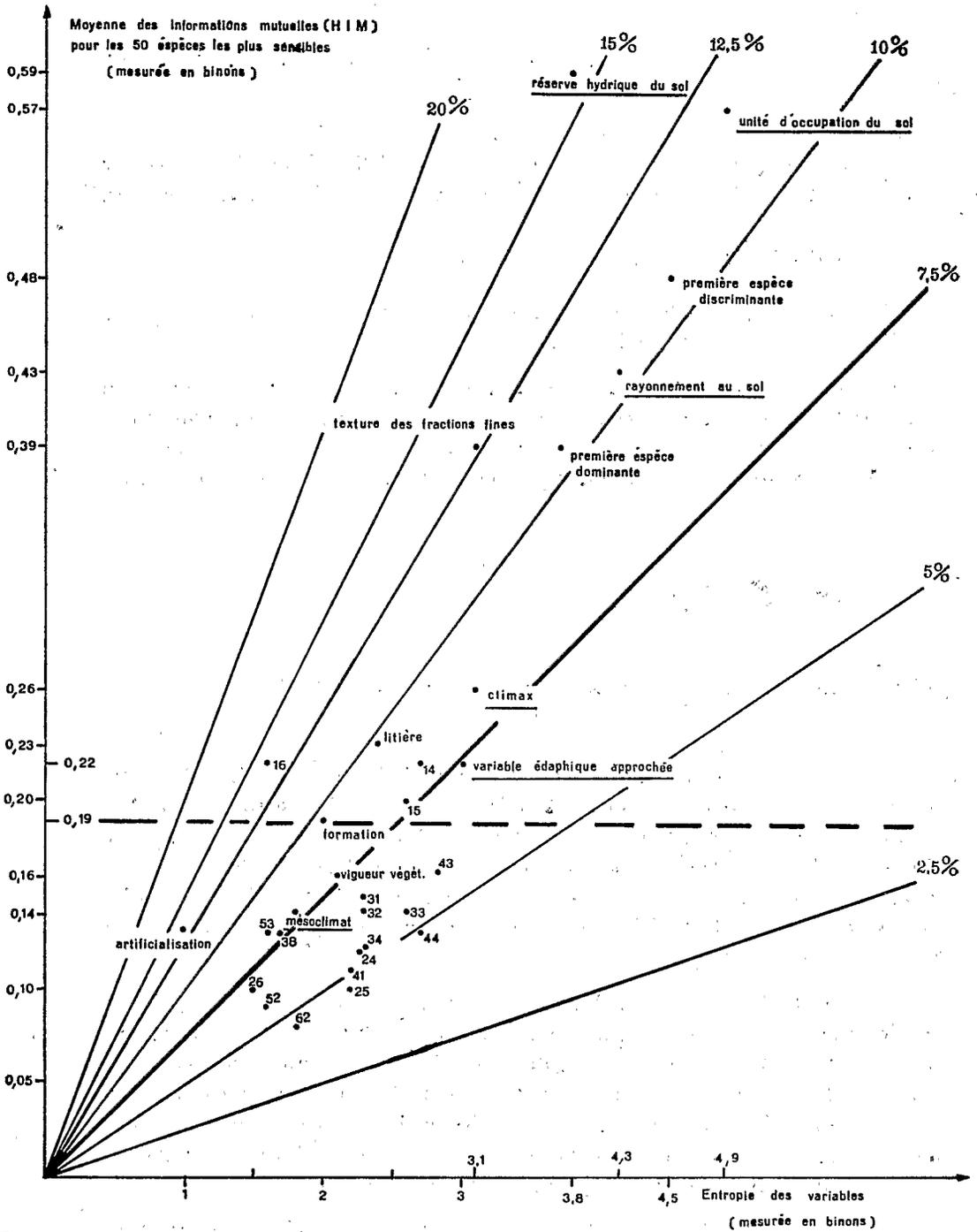


Fig : 18 diagramme du rendement des variables .

( les variables élaborées sont soulignées - les nombres renvoient à la liste des variables élémentaires, en tête du chapitre II )

Mésoclimat excepté, les points représentatifs des variables *élaborées* se dispersent dans la partie supérieure du diagramme, parmi les variables à fort rendement ; comme nous l'espérons, leur rendement est donc amélioré par rapport aux variables élémentaires dont elles combinent l'action. C'est les cas pour la *réserve hydrique du sol*, qui combine rappelons-le la texture des fractions fines et la profondeur du profil (variable 62), pour le *rayonnement au sol* = exposition (variable 32) × couvert angulaire au niveau des strates herbacées (variables 14, 15, 16) (1), pour la *variable édaphique approchée* = nature du matériau meuble de surface (variable 52) × profondeur.

L'*unité d'occupation* du sol regroupe les diverses variables qui décrivent la végétation (cf. 431) ; mais la synthèse est ici décevante, le rendement augmentant à peine par rapport aux composantes les plus actives (1<sup>re</sup> espèce dominante et 1<sup>re</sup> espèce discriminante), sans doute parce que celles-ci, elles-mêmes à fort rendement, recourent plus ou moins leurs informations. Notons enfin que le « *climax* » n'est pas loin d'atteindre le rendement de la variable formation, tout en étant mieux échantillonné. Il y a donc quelque raison de supposer que nos hypothèses relatives aux filiations entre formations apportent des informations particulières.

Plusieurs variables *élémentaires* présentent un rendement supérieur à 7,5 %. Certaines sont déjà évoquées ci-dessus à propos des variables élaborées dans lesquelles elles interviennent, mais on trouve encore, par ordre de rendements décroissants : litière, assise du sol (53), roche-mère (38) et vigueur de la végétation.

Ces variables comportent toutes un petit nombre de classes, inégalement échantillonnées, d'où leur faible entropie ; mais elles dénotent aussi des différences écologiques bien tranchées, d'où un rendement relativement élevé. Ainsi pour la production de litière, qui dépend étroitement du type de formation, ligneux ou herbacé. De même, le choix de quelques stations témoins sur calcaires ou dolomies (voir 3.1.1.) introduit une forte hétérogénéité dans les variables lithologiques (nature de la roche-mère et assise du sol), et le rendement de ces variables s'en trouve amélioré.

Par contre, on pouvait attendre un meilleur résultat de la vigueur de la végétation (431), qui donne classiquement des résultats intéressants. On peut certainement incriminer la qualité des observations, de caractère subjectif ; mais cet échec peut aussi renforcer l'idée selon laquelle la végétation actuelle ne refléterait qu'imparfaitement le milieu, ce qui expliquerait que sa vigueur n'exprime pas toujours les potentialités écologiques des stations étudiées (la *fertilité* au sens forestier).

(1) Le rendement élevé de la variable 16 est dû à son mauvais échantillonnage, puisqu'elle est inexistante dans 130 relevés sur 187.

Il reste que la majorité des variables élémentaires (en bas et à droite du diagramme) n'apporte qu'une information réduite qui, cependant, peut être valorisée dans les variables élaborées.

## 5.2.2. *Interprétation des informations mutuelles entre les espèces et le milieu*

### 5.2.2.1. Choix des variables étudiées

Il paraît naturel d'étudier les résultats du traitement d'information-mutuelle en commençant par les variables à plus fort rendement, sous réserve évidemment d'un échantillonnage suffisant. Cependant les quatre meilleures variables posent toutes des problèmes qu'il nous faut préalablement examiner (fig. 18).

a) La réserve hydrique du sol, et la texture des fractions fines sur laquelle elle se fonde, ne sont connues que d'une minorité de stations (68 sur 187 — cf. 426). Il en résulte une surestimation de leur rendement par rapport à celui des autres variables qui, elles, sont échantillonnées sur l'ensemble des relevés. En effet, l'accroissement du nombre des relevés diminue généralement la *netteté* des liaisons espèces variables (et donc le rendement des variables) jusqu'à ce que les espèces apparaissent dans les classes où leurs probabilités de rencontre sont les plus faibles ; sans compter l'éventualité de l'apparition des espèces dans des conditions inhabituelles, du fait de compensations écologiques inconnues. Aussi, pour éviter de lui en faire « trop dire », faut-il étoffer suffisamment l'échantillonnage. En outre, pour que les variables soient comparables en toute rigueur, cet échantillonnage doit être uniforme. Que faut-il penser alors de la supériorité apparente de nos deux variables édaphiques ?

G. MAVROMATIS (1971) a calculé, pour des données analogues à celles-ci, la réduction d'information-mutuelle résultant d'un doublement du nombre des relevés : celle-ci est de l'ordre de quelques centièmes de binon en moyenne pour les 39 variables qu'il étudie et atteint 0,1 binon pour une seule d'entre elles. Par contre, l'entropie-variable tend, elle, à augmenter, quoique légèrement : de 0,1 à 0,2 binon en moyenne, avec un maximum de 0,6. Les rendements diminuent en conséquence, de 1 à 1,5 % en moyenne et de *quelques* % au maximum.

Par conséquent, même s'il nous fallait majorer légèrement les chiffres de MAVROMATIS, puisque nos deux variables ne figurent que dans un peu moins de la moitié de nos relevés, la première de ces variables au moins resterait probablement en tête de l'ensemble.

b) Par ailleurs, du fait de la multiplicité de leurs classes, l'unité d'occupation du sol et la première espèce discriminante posent de tels problèmes pour le classement de leurs espèces indicatrices (voir ci-dessous, 5222), que nous avons dû les abandonner.

Toutefois, le rendement élevé de ces variables indiquerait la bonne représentativité de l'échantillonnage phyto-écologique, dont la stratification est fondée, rappelons-le, sur les variations physiognomiques de la végétation (cf. 431).

En conséquence nous avons choisi d'interpréter les variables qui suivent, dont nous rappelons la présentation logique (voir 4) — les 5 variables principales sont indiquées en italiques.

- Edaphisme : *réserve hydrique du sol* (tab. I), et secondairement, texture des fractions fines (tab. II) et variable édaphique approchée (tab. III).
- Climat : *rayonnement au sol* (tab. IV) et secondairement, mésoclimat (tab. V).
- Végétation : *première espèce dominante* (tab. VI), *formation* (tab. VII) et secondairement, vigueur de la végétation (tab. VIII).
- Dynamique de la végétation : *climax* (tab. IX).

Le tableau récapitulatif X facilite la comparaison des groupes d'espèces indicatrices relatifs à ces diverses variables.

#### 5.2.2.2. Classement des espèces indicatrices

Les tableaux I à IX présentent les listes ordonnées des 50 espèces les plus sensibles (espèces indicatrices, cf. 515) aux variables étudiées.

Ces tableaux sont une réorganisation des bordereaux (listings) fournis par l'ordinateur pour chaque variable traitée. Le calcul établit en effet le profil des fréquences corrigées de chacune des cinquante espèces pour les différentes classes de la variable. Pour faciliter la comparaison des profils, nous avons remplacé les chiffres de fréquences fournis par les bordereaux par des points qui représentent une égale fraction de la fréquence (1 point = 1/10).

Les bordereaux sont réorganisés de manière à rapprocher les espèces de profils similaires et à éloigner les espèces de profils différents. Pour les variables qui ne comportent que quelques classes, cette opération est aisément conduite visuellement ; elle devient plus ardue lorsque le nombre des classes augmente, et nous n'avons pas été en mesure de la conduire à son terme pour les deux variables qui comportent 60 classes (voir *supra*).

Ainsi réordonnés, les profils de fréquences se succèdent en écailles chevauchantes (M. GODRON, 1967) sur l'axe de l'une des grandes diagonales, entre deux groupes extrêmes situés en haut et en bas du tableau. L'ordre des espèces est alors celui qui se trouve le plus fortement corrélé avec la variable, à condition que celle-ci soit elle-même ordonnée, ce qui n'est pas toujours le cas au départ.

Or le classement des profils fait justement ressortir des similitudes entre colonnes correspondantes à des états voisins de la variable. Alors, des permutations entre colonnes permettent de parfaire la diagonalisation, en rapprochant celles d'aspect similaire : c'est là un moyen très précieux pour ordonner les classes des variables lorsque leur signification écologique n'est pas connue *a priori*. Par exemple, on peut espérer obtenir un classement des sols (tableau I) selon un gradient écologique qui restera à préciser. Les tableaux sont ainsi perfectibles, par retouches successives de l'ordre des lignes et des colonnes, qui concentrent progressivement les cases pleines sur une diagonale.

Après diagonalisation, des « blancs » subsistent cependant ; ils correspondent généralement à des classes sous-échantillonnées (représentées par un ou quelques relevés). Exceptionnellement, ces blancs empêchent une bonne diagonalisation du tableau, ce qui signifie alors que la variable correspondante ne reflète pas un gradient écologique simple ; c'est le cas du tableau VI.

#### 5.2.2.3. Analyse des relations sol - végétation

##### a) Réserves hydriques du sol (tableau I)

Cette variable est définie sur 68 relevés répartis en 32 classes édaphiques, dont 29 correspondent aux basaltes ; les 3 dernières, rejetées à droite du tableau, rassemblent des profils-témoins observés dans des colluviums argileux sur roche sédimentaire. Les classes basaltiques sont désignées par un numéro à 4 chiffres. Les deux premiers définissent la texture d'ensemble des profils (fig. 16 et 17) ; le troisième indique la tendance, argileuse ou sableuse, de cette texture vers la surface ; le quatrième indique la profondeur des profils.

Les textures de caractère extrême, très argileuse (25, 26) ou très sableuse (22) se trouvent groupées à droite du tableau (toutefois la classe 22 est représentée par un seul relevé, ce qui rend son classement aléatoire). Un ensemble de textures de caractère limoneux (33, 34, 35) compose la partie gauche (les huit premières classes). Le caractère « argiles en surface » (le troisième chiffre est alors un 1) n'apparaît pas avant le deuxième tiers du tableau ; enfin, la profondeur 4, la plus grande, coïncide remarquablement avec la moitié droite (à l'exception de la classe 3304).

La gamme des unités édaphiques peut donc être divisée en deux séries. La première, jusqu'à la classe 2301, rassemble sur la moitié gauche du tableau des sols de texture équilibrée, peu profonds (< 120 cm) et sans excès d'argile en surface. Les profils de la seconde série, à partir de la classe 2302, sont soit très argileux ou très sableux, soit profonds (> 120 cm), soit très argileux en surface, ces caractères pouvant s'ajouter ; seules les classes 2303 et 2402 font exception à cette règle. Les classes 3513 et 2401 ont des caractères de transition.

Les deux séries sont inégalement échantillonnées en défaveur de la seconde, dont plusieurs classes comportent seulement un ou quelques relevés. Ceci pourrait être corrigé en regroupant les classes de faible effectif, lorsque leurs caractéristiques voisines permettent de les confondre. Ainsi le regroupement des classes de texture 25 comblerait de nombreux vides dans les colonnes correspondantes. Dans la première série, la classe 2403 présente un aspect singulier, dû à des fréquences élevées aux extrémités de la colonne. De fait, les deux relevés correspondants à cette classe sont floristiquement contrastés, témoignant de conditions hétérogènes ; l'un d'eux, contrairement à l'autre, est en effet situé dans le mésoclimat de caractère sec, où nous avons placé quelques profils-témoins.

La première série de sols est à la fois représentée *en forêt et hors forêt*. Le tableau lui fait correspondre un premier ensemble d'espèces (groupes  $I_1$  et  $I_2$ ) d'affinités forestières ou sub-forestières, quoique certaines fréquentent aussi le plein découvert (voir tableau IV). Le brachypode et *Geum silvaticum* sont, avec le cèdre, les seules espèces vraiment forestières, mais ce ne sont justement pas les meilleures indicatrices édaphiques, car elles se classent respectivement 46° et 43° dans l'ordre des informations mutuelles relatives à la variable étudiée. C'est bien là ce que nous avons prévu en 432.

Le groupe  $I_1$ , réuni autour du cèdre, coïncidé plus étroitement avec l'ensemble de *profils limoneux* correspondant aux six premières classes du tableau. Le groupe  $I_2$ , que nous retrouverons à des nuances près dans tous les autres tableaux, constitue quant à lui un ensemble très homogène jusqu'à la classe 3513. Il est fortement représenté dans les 3 classes-témoins jusqu'à la classe 3513. Il est fortement représenté dans les 3 classes-témoins sur roches sédimentaires (0010, 0011 et 0012), où le groupe du cèdre, par contre, ne figure pas. Enfin, *Agrostis stolonifera* présente une distribution singulière.

La seconde série du sol est toute entière située *hors forêt*. Les groupes  $I_1$  et  $I_2$  sont fort peu représentés. Par contre cette série est liée à un nouveau groupe indicateur,  $I_3$ , qui n'empiète guère sur la première série de sols (sauf le cas particulier de la classe 2403). L'ensemble  $I_3$  comporte un sous-groupe extrême constitué par les 3 dernières espèces de la liste.

Notons toutefois que la majorité des espèces, 26 sur 50, est rassemblée dans un groupe intermédiaire ( $I_3$ ), qui unit les extrêmes par une suite « d'écailles » a, b, c.

#### b) *Texture fine* (tableau II)

44 espèces indicatrices de la réserve hydrique du sol le sont aussi de la *texture fine* (texture d'ensemble  $\times$  texture des horizons superficiels) ; cela n'est pas étonnant, puisque la première variable est dérivée de la seconde. Cependant on observe

des différences importantes de l'ordre des espèces indicatrices, et en particulier, l'éclatement du groupe I<sub>2</sub> précédent. Ceci traduirait l'influence de la *profondeur*, composante de la première variable mais absente de la seconde.

Toutefois, la texture fine confirme l'un des principaux résultats précédents, à savoir la *remarquable coïncidence des espèces forestières avec le groupe des substrats limoneux* (classes commençant par les nombres 33, 34 et 35).

### c) Variable édaphique approchée (tableau III)

On retrouve le même nombre d'espèces indicatrices, 44, communes entre la réserve hydrique du sol et cette variable approchée (nature du matériau meuble de surface  $\times$  profondeur), mais qui se rangent cette fois selon un ordre étonnamment voisin : les quatre groupes indicateurs du tableau I sont à peu près conservés, quoique différemment découpés. Seules *Crucianella angustifolia* et *Euphorbia nicaensis* se trouvent déclassées, sans que nous en percevions les raisons. Il existe donc une bonne corrélation d'ensemble entre les réserves hydriques et la nature des matériaux superficiels.

Toutefois, le classement des matériaux superficiels tel qu'il ressort du tableau III présente apparemment quelques anomalies. Tout d'abord, les profondeurs  $> 120$  cm (le deuxième chiffre du code est un 4) sont différemment distribuées selon qu'il s'agit de substrats terro-pierreux (4 en premier chiffre) ou purement terreux (1 en premier chiffre) ; ainsi 44 est séparé de l'ensemble 43, 42, 41 dans le premier cas, tandis que 14 est bien groupé avec 11, 12 et 13 dans le second. Ceci indiquerait que la végétation est très sensible à la profondeur sur les substrats non purement terreux, ce que confirment les fréquences élevées du cèdre dans les classes 41, 42 et 43. Par contre, la végétation paraît moins sensible à ces variations sur les substrats purement terreux, ce qui témoigne bien du caractère limitant de ce type de texture *dès la surface* (B. LEPOUTRE, 1963).

En second lieu, les classes 20 ne sont pas groupées, contrairement aux autres ; les raisons en sont en partie accidentelles : par suite d'une erreur de transcription, le cèdre et le brachypode manquent sur l'un des deux relevés de la classe 22, qui se trouve ainsi abusivement séparée de la 21. Par contre, la classe 23 est bien à sa place ; on est donc obligé d'admettre le caractère hétérogène du groupe des substrats pierro-rocheux ; notons que le cèdre est présent dans les classes 21 et 22, alors que la classe 23 est asylvatique. Ceci nous interdit toute extrapolation sur l'influence des matériaux rocheux de profondeur.

Enfin, l'allure singulière de la classe 51 est imputable à l'hétérogénéité de l'unique relevé correspondant.

Les espèces forestières mentionnées sur le tableau I (groupe I<sub>1</sub> : cèdre, brachypode, *Geum silvaticum*) coïncident avec les substrats terro-pierreux ou pierreux, point trop profonds, à l'exclusion des substrats purement terreux ou gravillonneux.

Ces espèces sont remarquablement fréquentes dans la classe 43. Cette observation dénote le caractère favorable d'une strate superficielle meuble, d'épaisseur suffisante pour le développement du système racinaire traçant du cèdre.

#### d) Conclusion

Si la variable édaphique approchée n'a pas la valeur discriminante de la variable principale (réserve hydrique du sol) elle corrobore et complète néanmoins ses informations.

Certains comportements du cèdre ont une explication classique. On connaît bien, par exemple, la répugnance du semis (1) pour les argiles proches, comme dans les sols développés sur *terra rosa* (B. LEPOUTRE, 1963, et A. PUJOS, 1965). De même, l'absence de l'essence des substrats de texture extrême reflète évidemment ses limites vis-à-vis des milieux édaphiques excessivement drainants ou à l'inverse trop compacts, impropres à son installation.

Le cèdre manifeste toutefois un éclectisme assez surprenant vis-à-vis de l'ensemble des sols limoneux, quels que soient par ailleurs les taux d'argile ou de sables (voir la fréquence uniforme du cèdre dans les classes 33, 34 et 35 du tableau II). Tout se passe comme si l'abondance des limons rendait négligeables les variations des autres fractions granulométriques, qui oscillent pourtant entre 15 % et 50 % selon les diverses classes de sols limoneux ! L'étude pédologique (42) nous a fourni la clef de ce comportement, dont l'étude botanique nous montre le caractère général : les démarches autécologique et synécologique se rejoignent donc une première fois sur ce point.

#### 5.2.2.4. Analyse des relations climat - végétation

##### a) Rayonnement (tableau IV)

Le rayonnement est distribué en 37 classes qui s'ordonnent en fonction du chiffre d'ouverture angulaire, ou du chiffre d'exposition. L'influence de l'exposition sur ce classement est prépondérante dans la partie droite du tableau, qui correspond aux plus forts découverts ; elle est minimisée dans la partie gauche, où le classement des colonnes est d'abord fonction de l'ouverture angulaire, et secondairement de l'exposition. Toutefois l'influence de l'exposition n'a jamais la netteté de celle du couvert, du fait sans doute de la modestie générale des pentes.

\* On peut s'étonner de ce que le semis de cèdre, qui est codé séparément dans nos relevés, ne figure pas parmi les indicatrices édaphiques, c'est parce qu'il est sans doute trop lié à la forêt pour témoigner d'autres influences écologiques indépendamment de celle-ci (432.). Au mieux, les espèces forestières constituent de médiocres indicatrices édaphiques.

La diagonalisation du tableau est suffisamment nette pour vider pratiquement les coins opposés, en haut à droite et en bas à gauche. Cependant les vides du second coin traduisent aussi un certain sous-échantillonnage des classes correspondantes, dont plusieurs ne comportent qu'un relevé ; ces vides disparaîtraient en partie si l'on regroupait les classes de faible effectif sur leurs voisines.

40 espèces indicatrices sont communes avec le tableau I (réserve hydrique du sol), selon une succession comparable ! Le tableau IV présente cependant plusieurs particularités intéressantes par rapport au premier, comme on pourra l'observer dans le tableau récapitulatif X.

1. Il se constitue autour du cèdre et du brachypode un nouveau groupe, lié au sous-bois forestier (espèces *sciaphiles* - groupe IV<sub>0</sub>). Un petit groupe de transition, IV<sub>1</sub> est lui aussi pratiquement nouveau par rapport au tableau I. L'aubépine (*Crataegus laciniata*) y figure, ce qui confirme bien son affinité forestière : elle est de près-bois ou de sous-bois.

2. Au contraire des précédents, le troisième groupe (IV<sub>2</sub>) est constitué d'espèces connues du tableau I, qui proviennent en majorité du groupe « *subforestier* » I<sub>2</sub>. Il s'y ajoute une espèce nouvelle : *Cynosorus echinatus* et le semis de cèdre. Ce dernier présente d'ailleurs un profil de fréquence particulier, car s'il est absent ou rare dans les premières classes de rayonnement (couvert fort), comme l'ensemble des espèces de son groupe, il est également rare dans la seconde moitié du tableau, comme les espèces forestières du groupe précédent, IV<sub>1</sub>. Le semis manifeste donc les exigences de couvert des plantes de sous-bois à l'exclusion de l'ombre dense, ce que l'on savait (B. LEPOUTRE, 1964).

La majorité des espèces du groupe IV<sub>2</sub>, quoique plus concentrée sur la gauche du tableau, occupe malgré tout une large gamme de rayonnements, qui s'accroît au passage vers le groupe suivant (IV<sub>3</sub>).

Le groupe subforestier du tableau I (I<sub>2</sub>) manifeste donc ici une cohésion étonnante, puisque des 10 espèces qui le constituent, 6 s'incorporent au groupe IV<sub>2</sub>, les 4 autres demeurent d'ailleurs à son voisinage : soit en IV<sub>1</sub> comme *Geum silvaticum*, soit en tête de IV<sub>3</sub>, comme *Trisetaria flavescens*, *Anthoxanthum odoratum* et *Satureja granatensis*.

La similitude des groupes I<sub>2</sub> et IV<sub>2</sub> pourrait traduire une simple coïncidence entre les gammes de sols et de rayonnements qu'ils indiquent respectivement. Mais en fait, nous savons que les sols correspondant au groupe I<sub>2</sub> (dits de la « première série ») se rencontrent aussi bien en forêt que hors forêt (5223 a), c'est-à-dire sous des microclimats variés. Si les espèces de ce groupe indiquent aussi des conditions restrictives de rayonnement (ombre et découverts modérés c'est donc indépendamment de leur distribution édaphique. Les affinités édaphiques et microclimatiques de cet ensemble d'espèces ne peuvent s'expliquer alors que par une même

influence des rayonnements modérés et des sols de texture équilibrée sur le bilan hydrique de la station. L'étude pédologique (4.2.) a déjà conclu à l'importance de cette convergence écologique (1) : les méthodes autécologique et synécologique se rejoignent donc une deuxième fois sur ce point.

3. L'analogie des tableaux I et IV s'affirme avec les groupes de transition I/3 et IV/3 ; en effet, parmi les 22 espèces que rassemble le second, 18 figurent aussi dans le premier (cf. tab. X). Ces espèces communes témoignent simultanément de conditions « moyennes » de rayonnement et de sol. Leur large répartition dans chacun des tableaux indique probablement des compensations entre les deux variables.

4. Par contre, les groupes I<sub>4</sub> et IV<sub>4</sub> ne possèdent que moitié d'espèces communes (5 sur 10), alors que l'on s'attendait à une forte similitude, puisque les sols de caractère extrême *coincident* avec le découvert (5223 a).

La fraction des espèces du groupe I<sub>4</sub> absente du groupe IV<sub>4</sub> ne manifeste donc pas ici de préférence microclimatique marquée. A l'inverse les espèces du IV<sub>4</sub> qui ne figurent pas dans le groupe I<sub>4</sub> : *Thymelaea virgata*, *Romulea* sp., *Veronica arvensis* et *Carex divisa*, n'ont pas de préférence édaphique marquée ; elles paraissent plus exclusivement dépendantes de la lumière (héliophytes s. st.).

Enfin, les espèces communes aux groupes I<sub>4</sub> et IV<sub>4</sub> : *Minuartia funckii*, *Evacium discolor*, *Herniaria hirsuta*, *Thymus algeriensis* et *Koeleria splendens*, manifestent la convergence des conditions édaphiques et microclimatiques les plus extrêmes et seraient plus proprement xérophytiques.

*Genista pseudopilosa* quant à lui apparaît comme franchement héliophyte, sans préférence édaphique suffisante pour qu'il figure parmi les 50 premières espèces indicatrices du tableau I. Cependant, il est possible que la présence du genêt soit plus ou moins liée à l'accessibilité de la roche sous-jacente, comme l'indiquait l'exemple étudié en 4232 d. En effet, l'examen de la variable élémentaire « profondeur du sol meuble » révèle que le genêt vient en bonne place parmi les espèces indicatrices de cette variable (15<sup>e</sup> rang), avec une forte présence pour les sols de faible profondeur, jusqu'à 80 cm, et une présence réduite pour les sols plus profonds.

*En résumé*, la très grande similitude des tableaux I et IV traduit la convergence écologique des variables édaphiques et du rayonnement : le régime hydrique du sol réalise cette convergence, puisqu'il met en jeu aussi bien les propriétés physiques

(1) Rappelons que la comparaison des régimes hydriques entre sols ombragés et découverts montre le dessèchement beaucoup plus rapide des seconds, malgré la moindre consommation d'eau de la végétation.

des sols que le bilan évaporatif, lié au rayonnement (fig. 19). Ainsi, les espèces indicatrices des sols de meilleures caractéristiques hydriques (première série du tableau I) le sont aussi des rayonnements faibles à modérés. De même, les espèces à large gamme édaphique ont aussi une large répartition vis-à-vis de la lumière. Par contre l'analogie floristique entre les sols de mauvaises caractéristiques hydriques (deuxième série du tableau I) et les forts rayonnements n'apparaît pas nettement.

L'analyse fait ressortir en outre l'existence d'un groupe d'espèces *sciaphiles* (IV<sub>0</sub>) et d'un ensemble d'*héliophytes* de tempéramment édaphique varié, dont *Genista pseudopilosa*; elle confirme les exigences lumineuses du semis de cèdre et fournit des indications intéressantes sur la répartition de l'aubépine.

*Remarque* : signalons que l'on observe des distorsions inattendues entre les indications microclimatiques des espèces et leur répartition dans les étages bioclimatiques d'EMBERGER au Maroc (1).

En effet, si les cinq espèces du sous-bois de la cédraie classées dans le groupe IV<sub>0</sub> sont strictement limitées aux étages humide et sub-humide, il n'y a pas contre aucune correspondance entre le classement des autres espèces et leur appartenance aux divers étages bioclimatiques. Dans les étages bioclimatiques forestiers, le rayonnement perturbe donc fortement la flore supposée caractéristique de ces étages.

Les diverses variables étudiées confirment cette observation (voir en particulier la variable formation), qui nous a conduit à discuter les limites du système d'EMBERGER (M. LECOMPTE, 1963), et plus généralement de la bioclimatologie traditionnelle.

#### b) *Mésoclimats* (tableau V)

Bien que les mésoclimats soient classés en fonction de deux variables relativement indépendantes (pluviométrie et refroidissement hivernal — cf. 411), le tableau V est nettement diagonalisé : d'un mésoclimat au suivant, les changements de fréquences spécifiques sont progressifs.

Ceci étant, les mésoclimats apportent des informations différentes de celles du rayonnement (tableau IV), car les deux variables n'ont que moitié d'espèces communes, qui dénotent en outre un déphasage important entre leurs groupes indicateurs (voir tab. récap. X). En effet, les mésoclimats secs, asylvatiques, font appa-

(1) Répartition précisée par Ch. SAUVAGE pour l'ensemble des espèces marocaines (manuscrit), et qui est signalée par un code à deux chiffres en vis-à-vis de chacune des espèces figurant sur nos divers tableaux.

raître en bas du tableau V un ensemble nouveau d'espèces *xérophiles* (groupes V<sub>4</sub> et V<sub>5</sub>), tandis que les espèces communes avec le tableau III sont repoussées vers le haut du tableau V, vers les mésoclimats humides.

Le groupe de tête V<sub>1</sub>, exclusif des mésoclimats humides (2, 1, 0) rassemble autour du cèdre une majorité des espèces « subforestières » déjà regroupées dans les tableaux précédents (notamment dans les groupes I<sub>2</sub> et IV<sub>2</sub>). Véritable trait d'union entre les variables climatiques et édaphiques, ce même ensemble d'espèces témoigne de la convergence de ces variables vers un même facteur écologique ; cette fois encore le *bilan hydrique* de la station est le seul facteur qui nous paraisse réaliser cette convergence.

On observera que les espèces du groupe V<sub>1</sub> sont particulièrement sensibles au froid, comme l'indiquent les fréquences décrues de ces espèces de l'humide tempéré (2) à l'humide très froid (0). Par contre, les espèces liées aux mésoclimats plus secs, très froid et froid (3 et 4), notamment le groupe V<sub>5</sub>, semblent indifférentes aux nuances des basses températures dans le cadre de ces mésoclimats.

Deux espèces nouvelles apparaissent en haut du tableau : *Vicia lathyroides* et *Adenocarpus boudyi*. Ce résultat confirme le caractère humide-termophile de l'adénocarpe (M. Lecompte, 1969), excellent indicateur climatique de la basse cédraie telle que la définit A. Pujos (1966).

#### 5.2.2.5. Informations liées à la végétation

##### a) Espèces dominantes (tableau VI)

Le tableau VI fait apparaître les groupes d'espèces (VI<sub>1</sub> à VI<sub>4</sub>) associés aux diverses dominantes des formations végétales. Ces dominantes, au nombre de 36, se rangent de gauche à droite du tableau depuis les espèces dominantes de forêt et de clairières jusqu'aux herbes sèches des ermes xérophiles, suivant une série caractéristique des formations intermédiaires : près-bois d'aubépines, matorrals à chaméphytes, et pelouses mésophiles et xéromésophiles (voir 432).

Cependant, le tableau VI ne présente pas l'ordonnance régulière des précédents, du fait d'un groupe singulier d'espèces dominantes (classes 270 à 102) qui ne s'intègre pas à la succession diagonale de l'ensemble ; si l'on abstrait ce groupe, la disposition du tableau est bien diagonale.

A l'exception du groupe précédent, le rangement des espèces dominantes reflète bien un gradient de sécheresse croissante ; en effet, leur succession est jalonnée par diverses indicatrices édaphiques et climatiques qui témoignent en ce sens. Par exemple, l'ordre des espèces ligneuses concorde avec celui que l'on observe vis-à-vis de la variable rayonnement (tableau IV), et celui des espèces herbacées ne s'en éloigne guère (à l'exception de *Hieracium pseudopilosella* qui se trouve ici déclassée vers le sec).

Les huit espèces dominantes qui ne s'inscrivent pas dans le gradient précédent correspondent à des formations particulières, saisonnièrement mouillées, ou même noyées, puis desséchées, et donc *azonales* par rapport à ce gradient.

Une fois encore, la comparaison du tableau VI avec les précédents révèle des similitudes floristiques remarquables (voir tab. récap. X) ; les tableaux I (réserves hydriques du sol) et VI ont ainsi 41 espèces communes, les tableaux IV (rayonnement) et VI en ont 38 ; de plus, dans les deux cas, le classement des espèces indicatrices est voisin. Seuls les groupes de tête,  $IV_0$  et  $IV_1$  de la variable rayonnement, disparaissent dans le tableau VI, en raison de leur liaison trop exclusive avec le cèdre, ce qui en fait évidemment de mauvaises indicatrices des autres espèces dominantes.

Curieusement, certaines espèces subissent par rapport au tableau I le même déclassement que l'on observe dans le tableau IV ; il en est ainsi pour *Satureja granatensis*, *Trisetaria flavescens* et *Carex divisa* dans le groupe  $VI_3$  — pour *Romulea* sp. et *Veronica arvensis* dans le groupe  $VI_4$ .

La suite ordonnée des espèces dominantes et les variables climatiques et édaphiques classent donc pratiquement un même ensemble d'espèces indicatrices dans le même ordre. Il existe donc une forte similitude entre les *facteurs que reflète* la distribution des espèces dominantes, et ceux qui s'analysent dans les variables climatiques et édaphiques, lesquels conditionnent en premier lieu l'humidité de la station (fig. 19). La signification écologique du classement des espèces dominantes, selon un gradient de sécheresse, se trouve par là confirmée.

Le fait que les espèces indicatrices de l'humidité de la station soient associées de façon privilégiée avec certaines dominantes est intéressant en pratique, car il permettra dans certains cas favorables l'identification commode du milieu correspondant, du moins pour les dominantes des milieux extrêmes.

Par contre, les espèces dominantes des matorrals (classes 52 à 25) ainsi que la fétuque rouge, ne fournissent guère d'indication sur le milieu car les relevés correspondants sont distribués sur toute la hauteur du tableau VI, c'est-à-dire en vis-à-vis des groupes indicateurs des divers milieux ; or ce sont justement ces formations, les plus vastes, qui posent le problème de notre étude (voir 11 : vocation des espèces asylvatiques). Si les espèces dominantes précisent les limites de ce problème, elles ne le résolvent donc pas.

#### b) Formations

La variable *formation* conduit au tableau VII, bien ordonné, surtout si l'on néglige les classes 4 et 0, qui sont sous-échantillonnées. Ce tableau fait apparaître des groupes d'espèces ( $VII_1$  à  $VII_9$ ), associés aux diverses formations selon les définitions de M. GODRON (1968).

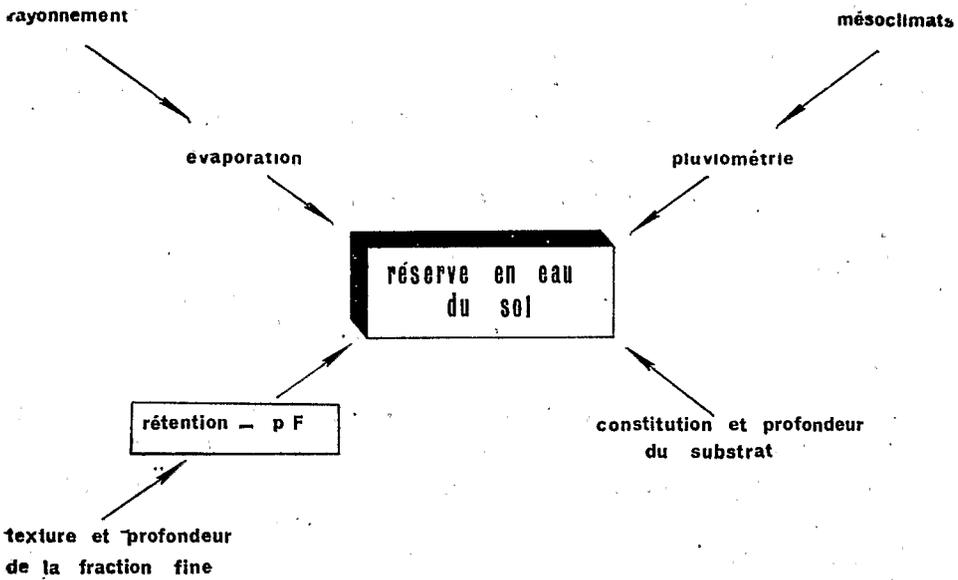


Fig: 19 Conditionnement de la réserve hydrique du sol.

Globalement, la similitude des tableaux IV (rayonnement) et VII reste forte (37 espèces leur sont communes), mais elle est nettement plus faible entre les tableaux I (réserve hydrique du sol) et VII (31 espèces communes); en fait le rapprochement des tableaux IV et VII est dû principalement à l'influence du couvert forestier sur le rayonnement près du sol, ce qui explique la réapparition d'un ensemble d'espèces exigeantes en ombre dans les groupes VII<sub>1</sub> et VII<sub>2</sub>. Par contre, les tableaux IV et VII divergent tout autant que les tableaux I et VII au niveau de leurs groupes intermédiaires, ce qui traduit justement l'hétérogénéité des formations de découvert.

La distribution des formations n'a donc pas la netteté écologique de celle des espèces dominantes. A plus forte raison les formations ne donnent-elles pas de réponse aux questions non résolues par les espèces dominantes.

#### c) *Vigueur apparente de la végétation* (tableau VIII)

Cette appréciation subjective de la qualité écologique de la station apporte des informations tantôt concordantes avec celles des formations, pour les groupes extrêmes VIII<sub>1</sub>, VIII<sub>2</sub> et VIII<sub>3</sub>, tantôt avec celles des premières espèces dominantes, pour le groupe intermédiaire VIII<sub>4</sub> (voir tabl. récap. X).

Hormis le cas des formations bien typées et d'écologie extrême (forêts et prairies humides, pelouses et ermes xérophiles), la vigueur apparente de la végétation paraît donc liée davantage à la nature des espèces dominantes qu'à la formation. Cependant, les espèces dominantes du découvert qui se retrouvent dans la liste des espèces indicatrices du tab. VIII, telles que *Festuca rubra*, *Helianthemum croceum* et *Genista pseudopilosa*, manifestent tous les degrés de vigueur (gr. VIII<sub>1</sub>). Ainsi ces espèces sont-elles trop plastiques ici pour caractériser à elles seules la qualité écologique du milieu. Cette observation corrobore les indications du tableau VI relativement à l'amplitude écologique des espèces dominantes des matorrals (espèces 52 à 25) et de la festucaie.

#### 5.2.2.6. *Dynamique de la végétation : climax* (tableau IX)

Cette dernière variable est particulière, puisqu'il s'agit en fait d'un essai de classement des relevés selon un schéma *hypothétique* de leur filiation (voir 432); chaque classe du tableau IX correspond à une lignée définie par le climax que l'on suppose être son aboutissement. Les formations ligneuses basses et une partie des formations herbacées se trouvent distribuées de la sorte selon les diverses lignées forestières.

Quoiqu'elles définissent des lignées à part, les roches sédimentaires, calcaires ou dolomies, figurent au tableau IX par leurs principaux climax, pouvant fournir des termes de comparaison (ceux-ci sont indiqués par une astérisque). Y figurent

également des milieux particuliers sur basaltes, à végétation très pauvre : *dayas* temporaires (classe 01) et dépôts pyroclastiques inaltérés, stériles (classe 02).

Les 17 climax se rangent de gauche à droite du tableau, depuis les prairies humides et les cédraies sur basaltes jusqu'aux pelouses xérophiles. Quatre groupes d'espèces indicatrices apparaissent. La composition globale de la liste diverge sensiblement de celle de la variable formation, avec laquelle on ne dénombre que 26 espèces communes ; elle est presque aussi différente de celle de la variable rayonnement (30 espèces communes) mais plus proche de celle de la réserve hydrique du sol (34 espèces communes). On notera que les espèces liées au couvert forestier, groupées en tête des tableaux IV (rayonnement) et VII (formation) ne figurent pas au tableau IX, du fait que celui-ci réunit justement les forêts avec des formations du découvert.

*Les trois lignées de cédraies sur basaltes* (classes 11, 12 et 13) constituent un ensemble floristiquement homogène, nettement individualisé des autres lignées par le groupe IX<sub>1</sub>, mais présentant toutefois des différenciations mineures :

1. Les espèces des groupes IX<sub>1</sub> et IX<sub>2</sub> sont plus fréquentes dans les classes 11 et 12, à l'exception d'*Adenocarpus boudyi*, de *Genista pseudopilosa* et de *Silene italica*. Toutefois, la fréquence des deux premières espèces n'a pas grande signification, puisque les formations où elles dominent ont été intentionnellement regroupées avec les cédraies.

A l'opposé, les espèces des groupes IX<sub>3</sub> et IX<sub>4</sub> sont souvent plus fréquentes dans les classes 12 et 13.

2. Un petit nombre d'espèces présente une distribution plus sélective, sans qu'aucune ne se limite strictement à l'une des 3 classes 11, 12 ou 13. Les trois espèces de tête du groupe IX<sub>1</sub>, *Scabiosa columbaria*, *Ranunculus bulbosus*, *Trifolium ochroleucum*, ainsi que *Potentilla maura* seraient ainsi les meilleures indicatrices des cédraies de la classe 11, où elles sont nettement plus fréquentes. Notons que trois d'entre elles sont également fréquentes dans les prairies humides sur sols profonds (classes 53 et 64). Les mêmes figurent aussi dans le groupe qui indique la vigueur maximum de la végétation, sur le tableau VIII.

Les espèces « *subforestières* » précédemment définies reconstituent pratiquement dans le groupe IX<sub>2</sub> le groupe homologue du tableau I (I<sub>2</sub>). Elles marquent parmi les cédraies sur basaltes leur préférence pour les classes 11 et 12, mais elles ont aussi une forte présence dans l'ensemble des lignées forestières sur roche sédimentaire (classés 20 à 30) ; ce groupe est même le seul représenté dans les ilçaies et cédraies sur argiles de décarbonatation (classés 43 et 30), comme il l'était sur les sols correspondant à ces argiles dans le tableau I (classés 0010, 0011 et 0012) ; *il est donc caractéristique des lignées forestières.*

A l'inverse, ce même groupe IX<sub>2</sub> est quasiment absent des climax non forestiers correspondant à la moitié droite du tableau, comme il l'était dans la « deuxième série » des sols du tableau I. Il existe donc une remarquable convergence floristique entre l'ensemble des formations ligneuses, regroupées sur les divers climax forestiers, et les sols de la « première série » du tableau I, de meilleures caractéristiques hydriques. Cette convergence est indépendante de l'influence du rayonnement, puisque les espèces subforestières présentent une large distribution microclimatique (cf. tableau IV).

La seconde moitié du tableau IX, de la classe 41 à la classe 01, constitue un ensemble relativement homogène, la colonne 42 faisant transition avec la première moitié.

*En résumé*, la comparaison attentive du tableau IX avec les précédents permet de préciser la signification écologique du schéma de filiation proposé : les climax hypothétiques montrent une bonne concordance floristique avec les catégories édaphiques définies sur le tableau I. La concordance est moins bonne avec les microclimats lumineux (tableau IV), du fait de la conception même de notre schéma, dont les climax confondent diverses natures de formations de microclimats contrastés.

La médiocre similitude floristique des deux variables *formation* et *climax* montre le caractère complémentaire de leur information. La végétation actuelle reflète davantage les conditions microclimatiques liées à sa structure même, que les conditions édaphiques. Au contraire, les regroupements de formations qui ont conduit aux climax supposés améliorent nettement les liaisons sols - végétation.

Ces résultats peuvent être discutés en étudiant *directement* les interactions entre variables, contrôlant ainsi les déductions tirées de leurs similitudes floristiques. Nous ne ferons qu'ébaucher cette étude complémentaire, en guise de conclusion à notre essai d'interprétation.

### 5.2.3. Interactions entre variables (tableau XI)

Les indications floristiques des variables (522) suggèrent avons-nous dit des modalités d'action du milieu (fig. 19), qui ne seraient que partiellement reflétées par la végétation actuelle (5226).

Dans la région étudiée, le cèdre et certaines espèces compagnes seraient surtout sensibles au régime hydrique édaphique, commandé principalement par les caractères physiques du sol, et par le microclimat lumineux de la station. Ceci expliquerait la très forte similitude floristique de ces deux variables, du fait de leur action convergente.

Cependant, cette similitude floristique pourrait aussi s'expliquer par une *interaction* entre le sol et le rayonnement, réalisée indirectement par l'intermédiaire de la végétation ; en effet si les formations étaient étroitement liées à la mosaïque des sols, les microclimats le seraient indirectement puisqu'ils dépendent largement de la nature de la formation. Cette liaison pourrait d'ailleurs être renforcée par une action réciproque de la végétation sur l'évolution des sols ; toutefois, les caractères pédologiques (granulométrie) pris en considération dans notre analyse échappent aux influences microclimatiques.

Or il se trouve que les indications floristiques de la variable *formation* divergent passablement de celles des variables édaphiques, et ne témoignent pas par conséquent d'une telle interdépendance. Par contre, nos climax *hypothétiques* semblent davantage concorder floristiquement avec les variables édaphiques (voir *supra*). Il est donc intéressant de vérifier directement ces relations entre variables, suggérées par les similitudes floristiques.

Le mieux serait évidemment d'étudier les *informations-mutuelles* entre les variables intéressées (M. GODRON, 1968) ; mais on peut dans un premier temps étudier ce traitement en tirant parti de la réorganisation des tableaux floristico-écologiques précédents. En effet, dans la mesure où les états des variables se trouvent ordonnés selon une progression écologique de sens constant, celles-ci sont comparables deux à deux dans de simples tableaux de contingence figurant les fréquences relatives, assimilables à des probabilités, des relevés communs à deux classes des deux variables (tableaux XI - A, B, C et D).

Les données subissent donc les mêmes transformations que pour un traitement d'information mutuelle (cf. 512 et 513). Les fréquences relatives sont exprimées en millièmes et figurées par des points (chaque point représente 1/10). L'interdépendance des variables doit se traduire par la disposition diagonale des fréquences.

Un simple coup d'œil au tableau XI montre la diversité des résultats ; si A (formation  $\times$  rayonnement) et B (climat  $\times$  réserve hydrique du sol) ont une disposition à peu près diagonale, cette disposition n'apparaît pas dans les tableaux C (formation  $\times$  réserve hydrique du sol) et D (rayonnement  $\times$  édaphisme).

Plus particulièrement, le tableau A confirme la bonne corrélation du rayonnement avec la nature de la formation, mais cette dernière manifeste par contre dans le tableau C une large indépendance par rapport à la réserve hydrique du sol... du moins pour les formations basses (classes 8 et 5), car les formations s'avèrent bien liées aux sols de la première série (cf. 5223).

La corrélation du tableau B n'est pas aussi nette, mais on ne doit pas s'en étonner car le schéma hypothétique des climax, de par la synthèse qu'il réalise, ne peut constituer qu'une *approche* de la réalité. L'existence de cette corrélation confirme néanmoins l'efficacité du schéma : les climax sont un meilleur reflet des différences édaphiques que ne le sont les formations.

## 6. CONCLUSION GENERALE

L'étude avait pour objectif principal d'expliquer l'absence paradoxale du cèdre sur les vastes étendues couvertes de végétaux ligneux bas du plateau basaltique d'Azrou, contrastant avec le dynamisme de la cédraie dans des milieux voisins, *a priori* comparables.

### 6.1. Résultats analytiques

Rappelons les résultats essentiels, dans l'ordre de l'exposé.

1. Contrairement au *climat* des reliefs orientaux du Moyen-Atlas plissé, celui du Moyen-Atlas tabulaire occidental paraît autoriser l'existence du cèdre dans l'ensemble de la région étudiée, sauf sur la retombée du plateau d'Azrou vers la plaine du Guigou.

2. L'analyse des conditions édaphiques met en évidence d'importantes variations du *bilan hydrique stationnel* selon la nature des sols et le couvert de la végétation. La forêt joue un rôle déterminant sur la préservation de la réserve d'eau facilement utilisable (R.F.U.) du sol dès que l'évaporation s'intensifie au printemps. L'évaporation purement physique à découvert, sur sol pratiquement nu, l'emporte même sur l'évapotranspiration de la cédraie dense durant sa période de végétation.

Compte tenu des exigences thermiques du cèdre et de ses besoins en eau (B. LEPOUTRE, 1964 et B. LEPOUTRE et A. PUJOS, 1964), l'étude du régime hydrique des sols montre que l'installation de l'essence est très improbable à découvert en raison de l'extrême vitesse de la dessiccation.

3. On a pu montrer que les fractions « limoneuses », riches en allophanes, des *sols andiques* déterminent la R.F.U., les argiles jouant un rôle secondaire. Cependant, les capacités de rétention et les points de flétrissement étant élevés, les avantages de ces sols particuliers ne se révèlent que si la pluviosité est élevée et l'évaporation modérée. Sous le bioclimat humide du plateau d'Azrou ces conditions ne sont pratiquement réunies que sous le couvert de la cédraie.

4. *L'étude botanique* permet de *généraliser* ces résultats. En effet, l'analyse des « informations mutuelles » entre les espèces et les variables du milieu montre le rôle prépondérant de l'édaphisme et du rayonnement au sol sur la distribution de l'ensemble des espèces.

Le cèdre en particulier s'avère nettement lié aux sols de texture limoneuse, indépendamment des autres fractions texturales, quoique ce type de sol se rencontre également hors forêt, notamment sur matériaux issus de projections volcaniques. Les sols argileux semblent au contraire réaliser des conditions défavorables pour cette essence.

La liaison convergente des variables microclimatiques et édaphiques avec des groupes floristiques de composition analogue ne peut s'expliquer que par l'influence complémentaire de ces deux variables sur le régime hydrique du sol. Cette convergence (tableau X) se manifeste particulièrement à l'égard d'un groupe d'espèces « subforestières », également indicatrices des sols de meilleures caractéristiques hydriques et des microclimats d'éclaircissements moyens. Ce groupe est remarquablement constant dans l'ensemble des tableaux floristico-écologiques (I à IX).

5. Le regroupement des formations ligneuses basses et de certaines formations herbacées avec les *climax forestiers* supposés au sein d'une même variable biotique synthétique, fait nettement ressortir le groupe floristique précédent. Les filiations proposées entre ces formations paraissent donc édaphiquement fondées, ce que confirme l'interaction positive de cette variable et de l'édaphisme (tableau XI).

La *régénération de la cédraie* est principalement soumise au microclimat créé par son couvert, dont dépend l'existence d'une réserve d'eau estivale accessible aux semis. Hors forêt, cette réserve ne semble jamais garantie, quelle que soit la capacité en eau du sol. Sous forêt, par contre, elle semble garantie même sur des sols à faible capacité.

*En définitive, la forêt doit ici son existence à son ombre !* Si cette ombre se trouvait, en pure hypothèse, réalisée d'emblée au cœur du plateau, rien ne s'opposerait à ce que la forêt puisse y trouver son équilibre, du moins sur sol convenable. En fait, l'ombre étant créée par la cédraie même, la progression forestière n'est possible que sur *ses lisières* ou à l'ombre de certaines espèces qui leur sont liées, comme le chêne-vert ou l'aubépine.

## 6.2. Synthèse

La progression du cèdre peut être facilitée par les sols limoneux, et au contraire freinée ou même bloquée sur les sols argileux ou minéraux bruts (lapillis, ou coulées basaltiques superficielles).

L'équilibre de la cédraie est donc fragile puisqu'il dépend d'un facteur interne à elle-même ; on imagine en effet, les difficultés de sa réinstallation si elle devait subir une ouverture trop brutale, même là où elle est actuellement la plus exhubérante.

Sur le *plan pratique* notre étude aboutit, grâce à la compréhension de l'équilibre et du dynamisme actuel de la forêt, à un choix très clair de méthode d'aménagement. Il est maintenant évident que le traitement en futaie régulière est à prescrire, puisqu'il réaliserait précisément l'action brutale dont nous avons montré le danger. Par contre, l'aménagement en futaie jardinée conservant un couvert permanent *sur toute la surface* est propre à préserver la pérennité de la forêt. C'est par bonheur la méthode prudemment adoptée par les forestiers.

Quant aux matorrals, au-delà des près-bois d'aubépines, les difficultés que soulèverait un éventuel projet d'occupation forestière militant indiscutablement en faveur de leur amélioration pastorale, pour laquelle l'inventaire floristique n'est qu'un préalable ; les groupes d'espèces indicatrices définis sur les tableaux floristico-écologiques I à IX faciliteront néanmoins la caractérisation des milieux sur le terrain.

La netteté des conclusions et leur importance pratique, puisqu'il n'y va pas moins que de la survie d'une forêt hautement productive, montrent l'intérêt de l'étude écologique, aboutissant précisément à la compréhension de l'écosystème forestier.

Si le *dynamisme* actuel de la forêt sur ses lisières, vers le plateau, trouve ainsi son explication, on ne saisit pas l'origine des petits peuplements isolés sur les cônes volcaniques (le cèdre est présent, de même, dans certains gouffres isolés sur le plateau, où il bénéficie de conditions microclimatiques particulières non précisées dans notre étude). Il est certain que ces reliefs sont constitués de matériaux particulièrement favorables à la cédraie adulte, car les cendres conservent en profondeur des réserves d'eau importantes ; mais il faudrait imaginer de plus que des graines aient pu franchir les distances parfois considérables qui séparent les différents volcans (jusqu'à plusieurs km) ; ceci est improbable, car la dissémination ne dépasse pas une quarantaine de mètres, du moins sur le plat ! Il faut alors supposer le caractère *relictuel* de ces peuplements, ce qui est, admettre que l'ensemble du plateau ait pu être boisé.

L'existence de la forêt n'est pas incompatible, d'après ce qui précède, avec l'édaphisme du plateau ; néanmoins elle n'est attestée par aucun vestige sur des centaines de km<sup>2</sup>. Or il paraît impossible que dans cette région faiblement peuplée les hommes aient pu faire disparaître aussi complètement la forêt sur de telles surfaces, d'autant qu'il eût fallu pour cela réaliser des coupes rases (voir *supra*) !

Il faut donc invoquer des événements naturels, majeurs et anciens : la dégradation climatique du quaternaire récent, succédant depuis 5 millénaires avant nos jours à l'optimum climatique de la période atlantique, pourrait constituer cet événement.

Par suite du resserrement de son « espérance pluviothermique » (B. LEPOUTRE, 1964), le cèdre aurait été progressivement refoulé vers les marges occidentales climatiquement plus propices, du haut plateau, en ne conservant sur celui-ci que d'exceptionnelles et spectaculaires positions.

A l'inverse, la progression de la cédraie vers le plateau observée de nos jours, suggère qu'il se développe actuellement une oscillation climatique favorable. Dans cette hypothèse, la physionomie de certains bordements marginaux indiquerait le caractère tout récent de cette récurrence. La vue suivante du J. Chedifate (cliché 12)

manifeste, par exemple; l'opposition entre la génération très dispersée des vieux semenciers et leur descendance vigoureuse, quoique en formation d'allures équiennes; celles-ci dateraient de quelques centaines d'années au plus l'amélioration des conditions pluviothermiques.

Des fluctuations climatiques mineures pourraient de même expliquer l'existence d'arbres ou de petits peuplements isolés à l'avant des grandes lisières, par suite d'avancées passagères de la forêt datant de générations antérieures.

Quoi qu'il en soit, sachant la lenteur de la progression de la forêt de cèdre, que l'on évalue au mieux à une cinquantaine de mètres par siècle, l'instauration ou la restauration du *climax forestier* exigerait, même dans les milieux *a priori* convenables du plateau d'Azrou des délais sans commune mesure avec ceux que l'on observe pour l'installation de la forêt en Europe tempérée: au rythme actuel, il faudrait en effet 10 000 ans à la cédraie pour occuper l'ensemble du plateau, sur une profondeur de 5 km.

---

#### SUMMARY

In order to find the basis for the lack of forest on the volcanic Azrou Plateau in the Middle Atlas mountains of Morocco, the authors first seek to define the ecological factors of the environment.

They begin with a discussion of particular features of the mesoclimate. Basing their hypothesis on the importance of the soil water balance in the Morocco Cedar forest, as shown in previous research, they give evidence for the unique partitioning between percolation and evaporation in the water balance of these andic soils, and demonstrate the fundamental influence of forest shading on this partitioning.

Then, using informatic and analytic methods they compare data from floristic inventories with microclimatic factors and edaphic variables determining the climate-vegetation interaction thus revealed allow the authors to define indicator species groups, and conversely, to interpret the variables influence of soils and microclimate on the understory vegetation. By this way, the predominant influence of soil water reserves and importance of forest cover for regeneration of cedar are confirmed.

An hypothesis of climax associations for the vegetation types studied is then formulated and tested. From this, affinities of some species for certain edaphic conditions, independant of cover type, are revealed. The cedar forest is found to be very sensitive to enviromental factors, but nevertheless it is very slowly avancing toward the open plateau. Thus the authors are lead to postulate an ancient, naturel deforestation due to a climatic perturbation, perhaps during the recent quaternary.

From a practical point of view, the results of this study indicate that pastoral usage is preferable for the nonforested area, and that selective cutting method rather than clearcutting must be used in order to maintain the equilibrium of the cedar forest ecosystem.

## R E S U M E

Dans le but de trouver les causes de l'asylvatisme constaté sur le plateau volcanique d'Azrou, dans le Moyen-Atlas marocain, les auteurs cherchent à définir d'abord les facteurs écologiques caractéristiques du milieu.

Ils mettent en évidence les particularités des mésoclimats puis, se basant sur l'importance du bilan hydrique des sols déjà reconnue par des travaux antérieurs sur la cédraie marocaine, ils font apparaître le comportement très spécial des sols andiques vis-à-vis de l'eau et de l'évaporation, et le rôle fondamental de l'ombrage créé par la forêt.

Utilisant alors les variables édaphiques caractéristiques des réserves estivales d'eau accessibles à la végétation et aux semis de cèdre, ainsi que certaines variables microclimatiques, ils les confrontent par une méthode informatique avec les relevés floristiques. Les résultats fournis par les informations mutuelles sol-climat-végétation permettent de définir des groupes d'espèces indicatrices et d'interpréter le rôle écologique des variables considérées. C'est ainsi que le rôle prépondérant des réserves hydriques du sol et l'importance du couvert forestier se trouvent confirmés.

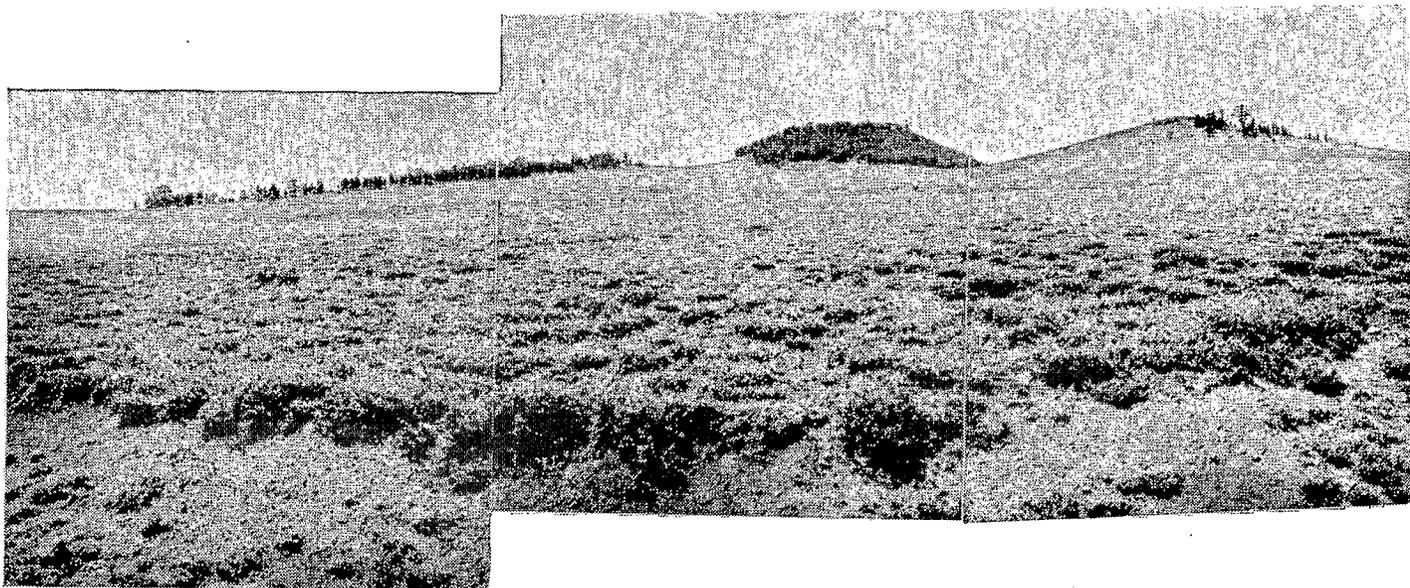
L'hypothèse d'une filiation climacique de la végétation est formulée, puis testée. Ainsi, on vérifie l'existence d'affinités édaphiques entre formations de découvert et cédraie; la différenciation de ces deux milieux est donc seulement d'ordre microclimatique. Les auteurs peuvent conclure à la précarité de l'équilibre de la cédraie, à sa progression extrêmement lente vers le plateau et ils sont alors conduits à supposer sa disparition très ancienne.

Sur le plan pratique les résultats de l'étude précisent la vocation pastorale des surfaces non boisées, et permettent, pour la forêt, le choix d'un aménagement conforme à la préservation de l'équilibre actuel de l'éco-système forestier.

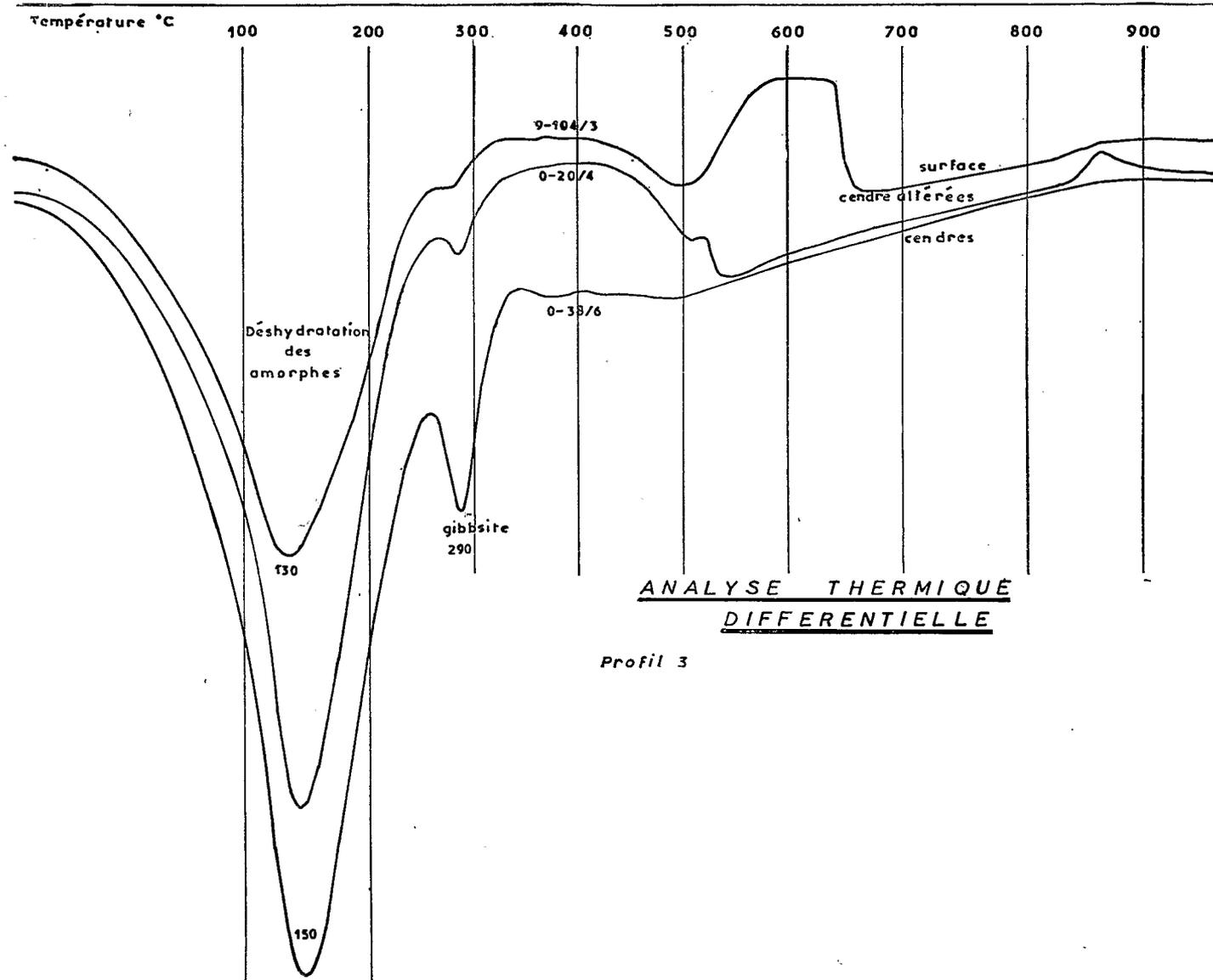
## BIBLIOGRAPHIE

1. ABRANSON (N.) 1963. — Information theory and coding. *Mc Graw-Hill. U.S.A.*
2. BEAUDET (G.), MAURER (G.), RUELLAN (A.). 1967. — Le quaternaire marocain, observation et hypothèses nouvelles. *Rev. géogr. phys. et géol. dynam.* IX, 4, 269-309.
3. BONFILS (P.) et MOINEREAU (J.) 1971. — Propriétés physiques des andosols et des sols bruns andiques du Sud du Massif Central. *Cah. Orstom, Pédologie*, vol. IX, n° 3, Masson, Paris.
4. BOUDY (P.) 1958. — Economie forestière nord-africaine, I, II, III, Paris, Larose
5. CARONNE (B.) 1970. — Sur l'emploi de quelques méthodes statistiques pour l'étude de la sociologie et de l'écologie végétale. *Montpellier. Thèse de spécialité*, 1, fasc. ronéo., 131 p.
7. DELANNOY (H.) et LECOMTE (M.) 1974. — Méthode d'étude des régimes thermiques en liaison avec les situations météorologiques dans le Moyen-Atlas (Maroc). *Bull. Ass. Géogr. Fr.*, sous presse.
8. EMBERGER (L.) 1939. — Aperçu général sur la végétation du Maroc. Commentaire de la carte phytogéographique du Maroc au 1 : 1 500 000. *Veroff. Géobot. Inst. Rübel in Zurich*, 14 et *Mém. Soc. Sc. Nat. Maroc h.s.*, 40-157.
9. EMBERGER (L.) et MAIRE (R.) 1934. — Tableau phytogéographique du Maroc, 1<sup>re</sup> partie, *Mém. Sc. Nat. Maroc*, 38, 187 p.
10. F.A.O. 1962. Influences exercées par la forêt sur son milieu.
11. GEIGER (R.) 1965. — The climate near the ground. *Harv. Univ. Presse, Cambridge*, 611 p.
12. GODRON (M.) 1968. — Quelques applications de la notion de fréquence en écologie végétale. *Oecologie plantarum*, 3, 3, 185-212.
13. GODRON (M.) et collab. 1968. — Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. Principes et transcription sur cartes perforées. *Ed. C.N.R.S.*, 292 p.
14. GOUNOD (M.) 1969. — Méthodes d'études quantitative de la végétation. Masson, Paris, 314 p.
15. GUILLERM (J.-L.) 1969. — Relations entre la végétation spontanée et le milieu dans les terres cultivées du bas Languedoc. *Montpellier. Thèse de spécialité*, 1, fasc. ronéo., 155 p.
16. IONESCO (T.) et SAUVAGE (Ch.) 1962. — Les types de végétation du Maroc : essai de nomenclature et définitions. *Rev. Géogr. Maroc*, 1-2, 75-86.

17. LECOMPTE (M.) 1969. — La végétation du Moyen-Atlas central, esquisse phytécologique et carte des séries, la végétation au 1 : 200 000. *Trav. Inst. Sc. Chérif., série bot. et bio. vég.*, 31. 34 p., 1 carte h.t.
18. LEPOUTRE (B.) 1961. — Recherches sur les conditions édaphiques de régénération des cédraies marocaines. *Ann. Rech. For. Maroc*, 6, 2.
19. LEPOUTRE (B.) 1963. — Suite d'observations sur la régénération du cèdre par taches. *Ann. Rech. For. Maroc*, 7, 1.
20. LEPOUTRE (B.) 1964. — Premier essai de synthèse sur le mécanisme de régénération du cèdre dans le Moyen-Atlas marocain. *Ann. Rech. For. Maroc*, 7, 1.
21. LEPOUTRE (B.) et PUJOS (A.) 1963. — Facteurs climatiques déterminant les conditions de germination et d'installation des plantules de cèdre. *Ann. Rech. For. Maroc*, 7, 1.
22. MARION (J.) 1955. — La régénération naturelle du cèdre dans les cédraies du rebord septentrional du Moyen-Atlas occidental calcaire. *Ann. Rech. For. Maroc*, I.
23. NAVROMATIS (G.) 1971. — Recherches phytosociologiques et écologiques dans le massif de l'Ossa (Grèce) en vue de sa gestion forestière. *Montpellier. Thèse de docteur-ingénieur*, 1, fasc. ronéo, 70 p.
24. PIQUE (A.) 1966. — Recherches sur le milieu et la végétation du Jbel Hébri. *Mém. ronéo.*, 89 p.
25. PUJOS (A.) 1966. — Les milieux de la cédraie marocaine. *Ann. Rech. For. Maroc*, 8.
26. ROSANE (F.) 1972. — Utilisation de l'analyse multivariable en phytoécologie. *Investigacion Pesquera* 36, 131, 139.
27. SAUVAGE (Ch.) 1961. — Recherches géobotaniques sur les subéraies marocaines. *Trav. Inst. Sc. Chérif., Sér. bot. et biol. vég.*, 21, 462 p.
28. SAUVAGE (Ch.) 1963. — Etages bioclimatiques. *Atlas du Maroc*, sect. II, pl. 6 b. not. expl., 44 p.
29. SAUVAGE (Ch.) 1966. — Les problèmes de couverture végétale dans le bassin du Sebou et plus particulièrement sur les possibilités de développement des pâturages. *Rapport ronéo.*, 18 p.
30. SAUVAGE (Ch.) 1967. — Rapport mission Sebou. *F.A.O., ronéo.*
31. SAUVAGEOT (A.) 1975. — Contribution à l'étude des propriétés de quelques sols du plateau volcanique d'Azrou. *Ann. Rech. For. Maroc*, 15.



Cliché 12. — J. Chedifate. Au centre, cédraie vigoureuse. A gauche, quelques rares semenciers pluriséculaires ont engendré chacun une descendance dispersée. A droite, les semenciers disparaissent, laissant une descendance qui, quoique fragile, pourrait reboiser le cône volcanique. Au premier plan : matorral très dense à genêt.



## A N N E X E S

ETUDE DES SPECTRES DE RAYONS X,  
DES COURBES THERMIQUES DIFFERENTIELLES  
ET DES ELEMENTS AMORPHES  
DANS LES SOLS FORMES SUR MATERIAUX VOLCANIQUES  
DU MOYEN-ATLAS

**I. Analyse de quelques profils types***a) Profil 3*

Le profil est constitué par une couverture limoneuse puis par un horizon B<sub>1</sub> jusqu'à 80 cm, l'ensemble étant de nature colluviale avec quelques débris de basalte ; le tout repose sur une cendre volcanique consolidée, en place à 110 cm ; altération de la cendre.

La position topographique du profil a favorisé le colluvionnement qui a pu rassembler toute une série de matériaux fins ou grossiers.

L'analyse aux rayons X (voir tableau n° 1) a traité l'horizon B-75 cm, l'altération de la cendre à 85 et la cendre de base. Le régime hydrique annuel est représenté graphiquement (fig. 11 b).

On y constate les interstratifiés, illite-vermiculite et la kaolinite dans l'horizon B, la gibbsite dans les cendres enterrées ou altérées.

La figure ci-contre nous montre dans les cendres un départ d'eau important à 150° dû à l'eau d'hydratation des amorphes (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12,3 % ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 13,4 % ; SiO<sub>2</sub> 4,45 %).

Ensuite un pic très net à 300° est attribuable à la gibbsite comme le confirme l'analyse aux rayons X.

Pour les températures supérieures, aucun indice n'est interprétable.

L'horizon rouge d'altération des cendres montre un léger déplacement du pic de déshydratation vers 140°, la présence d'un peu de gibbsite à 290°C, la présence de kaolinite à 550° et sans doute à 880° où le pic exothermique est amorti et décalé par le fer.

L'horizon argileux B est sensiblement identique avec seulement des traces de gibbsite cette fois et un pic amorti de 600°C, qu'il faudrait peut-être attribuer à la matière organique (?). On notera également que le départ d'eau d'hydratation a encore glissé vers 130°C, ce décalage étant sans doute attribuable au taux de matière organique plus élevé.

#### b) Profil 5

Le profil est très argileux cette fois avec un taux d'éléments fins inférieur à 2  $\mu$  qui croît rapidement de la surface jusqu'à 90 cm de profondeur où il atteint 60 %. Il y a quelques rares blocs basaltiques qui prouvent le colluvionnement, mais à 90 cm un changement de coloration laisse penser qu'il peut y avoir altération d'une cendre.

La position topographique est à l'un des points bas du plateau du Djebel Hebri.

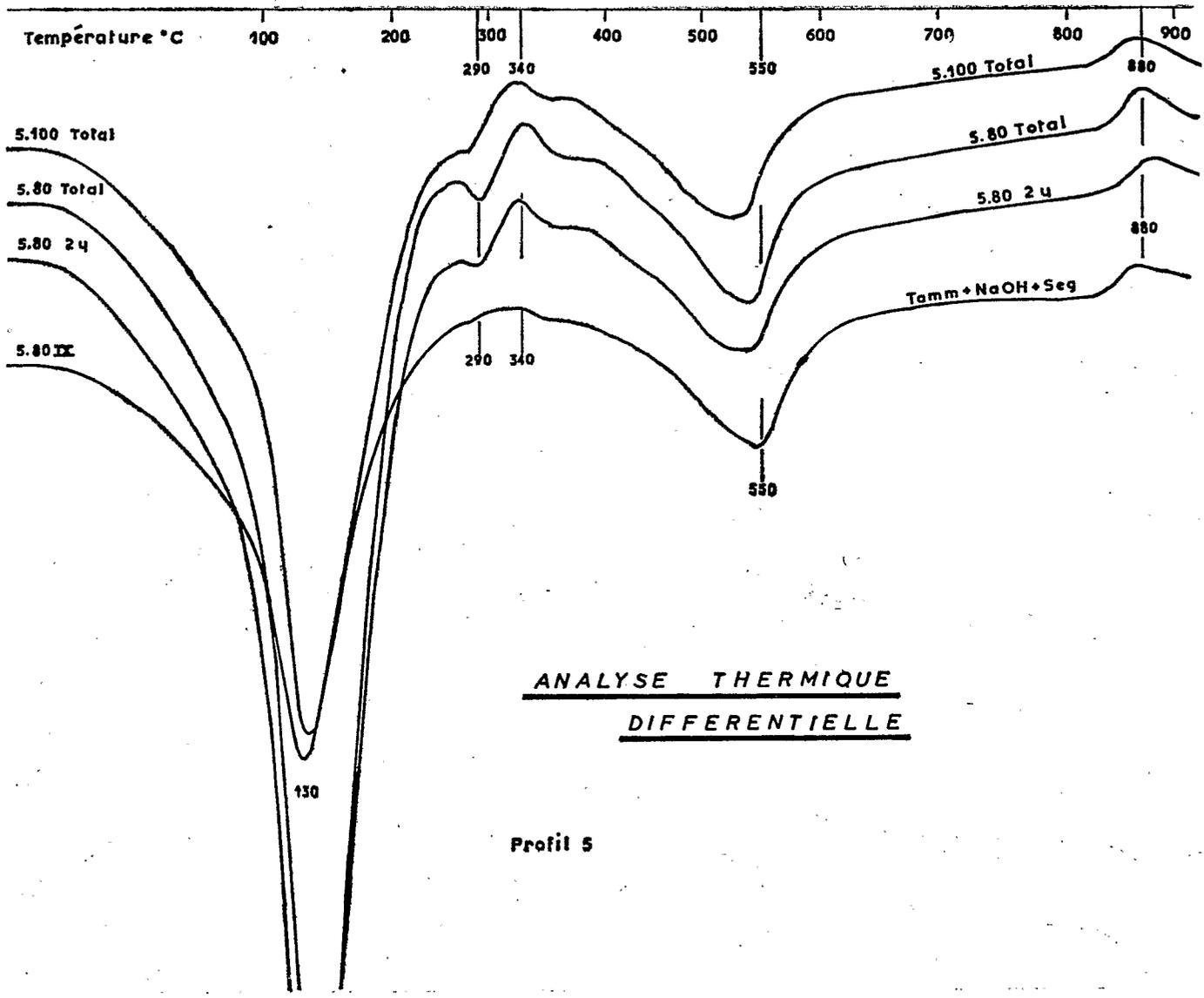
L'analyse aux rayons X (voir tableaux 1 et 2) donne des résultats semblables à ceux du profil 3 à l'exception de l'horizon 50 cm où les interstratifiés sont absents.

L'extraction des amorphes montre un accroissement assez régulier pour  $Al_2O_3$  de 3,9 % à 20 cm jusqu'à 5,9 % en profondeur à 100 cm, pour  $SiO_2$  de 2,18 % à 40 cm jusqu'à 85-100 cm et pour  $Fe_2O_3$  de 6,32 en surface à 7,98 à 100 cm. On constate que les éléments amorphes sont en quantité nettement moins grande que dans le profil 3, ce qui laisse penser à une évolution plus avancée, l'absence d'interstratifiés à 50 cm caractériserait alors cette évolution particulière à la surface.

L'analyse thermique différentielle donne des résultats très analogues à ceux du profil 3. On y constatera le même type de déshydratation entre 130° et 150° ; des traces de gibbsite qui disparaissent avec le traitement Tamm + NaOH + Segalen et peut-être des traces d'hallowite à 350°. A 550°, le pic de la kaolinite peut-être mélangé à l'hallowite (dissymétrie du pic) est net et se décale vers 500° en présence de matière organique. La moins grande déshydratation à 100 cm par rapport à 80 cm pourrait correspondre à un matériau différent où les traces de gibbsite sont d'ailleurs moins importantes, à moins que le régime hydrique souvent plus sec et moins humide soit responsable de la différence observée (amplitude faible du rythme humectation/déshydratation) (voir fig. 7 b).

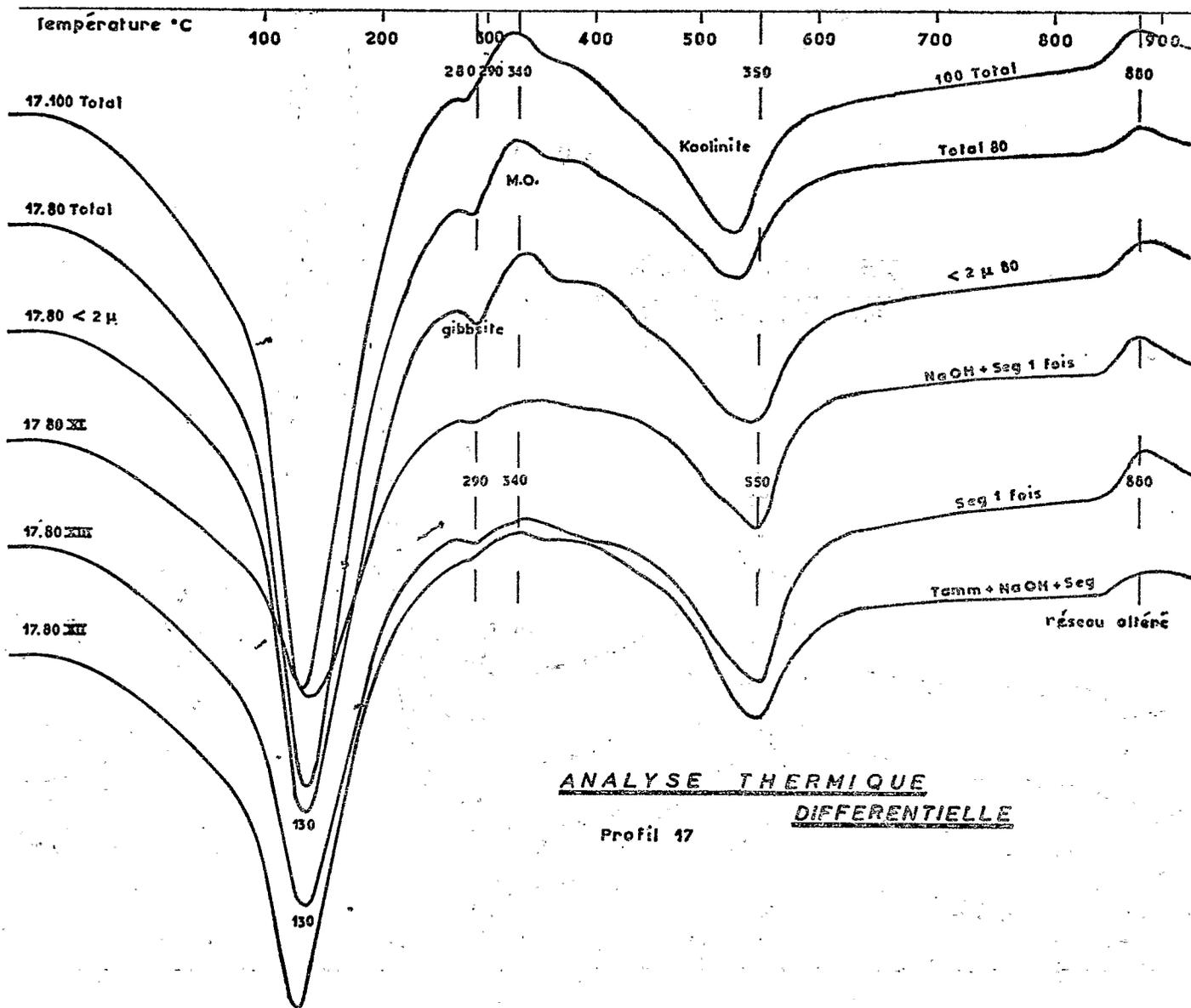
#### c) Profil 17

Ce profil est sans doute lui aussi polyphasé avec des cendres altérées en profondeur en dessous de 110 cm. Au-dessus, c'est un colluvium fin dont la fraction inférieure à 2  $\mu$  s'accroît jusqu'à 80 cm. Il s'agit très certainement d'une zone de piégeage de cendres entre des épandages basaltiques. Les deux phases sont d'ailleurs séparées par un lit de blocs basaltiques.



ANALYSE THERMIQUE  
DIFFERENTIELLE

Profil 5



ANALYSE THERMIQUE  
DIFFERENTIELLE

Profil 17

L'analyse aux rayons X faite à 50, 100 et 120 cm de profondeur révèle une absence d'interstratifiés en profondeur, là où le régime hydrique annuel (voir fig. 8 b) est beaucoup plus humide en permanence. Au dessous, les interstratifiés apparaissent avec la vermiculite et celle-ci est même présente à 80 cm. Cette évolution un peu plus poussée (?) pourrait être en liaison avec la présence de la forêt très dense dont l'enracinement est précisément très abondant à cette profondeur.

L'extraction des amorphes montre qu'ils sont présents dans tout le profil à des taux sensiblement voisins (6 à 7 % pour  $Al_2O_3$ , 4 à 5 % pour la silice et 9 à 10 % pour le fer).

L'analyse thermique différentielle révèle en outre de la kaolinite et peut-être des traces d'halloïsité, la présence de gibbsite qui disparaît avec les traitements successifs (XI, XIII, V); de même le pic endothermique à 130° s'atténue avec les extractions.

On constatera aussi que la montée exothermique qui se produit à 340°C reflète l'existence d'un constituant du sol particulier. Nous aurions tendance à le relier à la matière organique (comme l'a déjà montré COLMET-DAGE dans certains sols de l'équateur), puisqu'il disparaît avec les traitements.

De même, il semblerait bien que cette même matière organique contribue au déplacement du pic exothermique de la kaolinite de 550° vers 530°C.

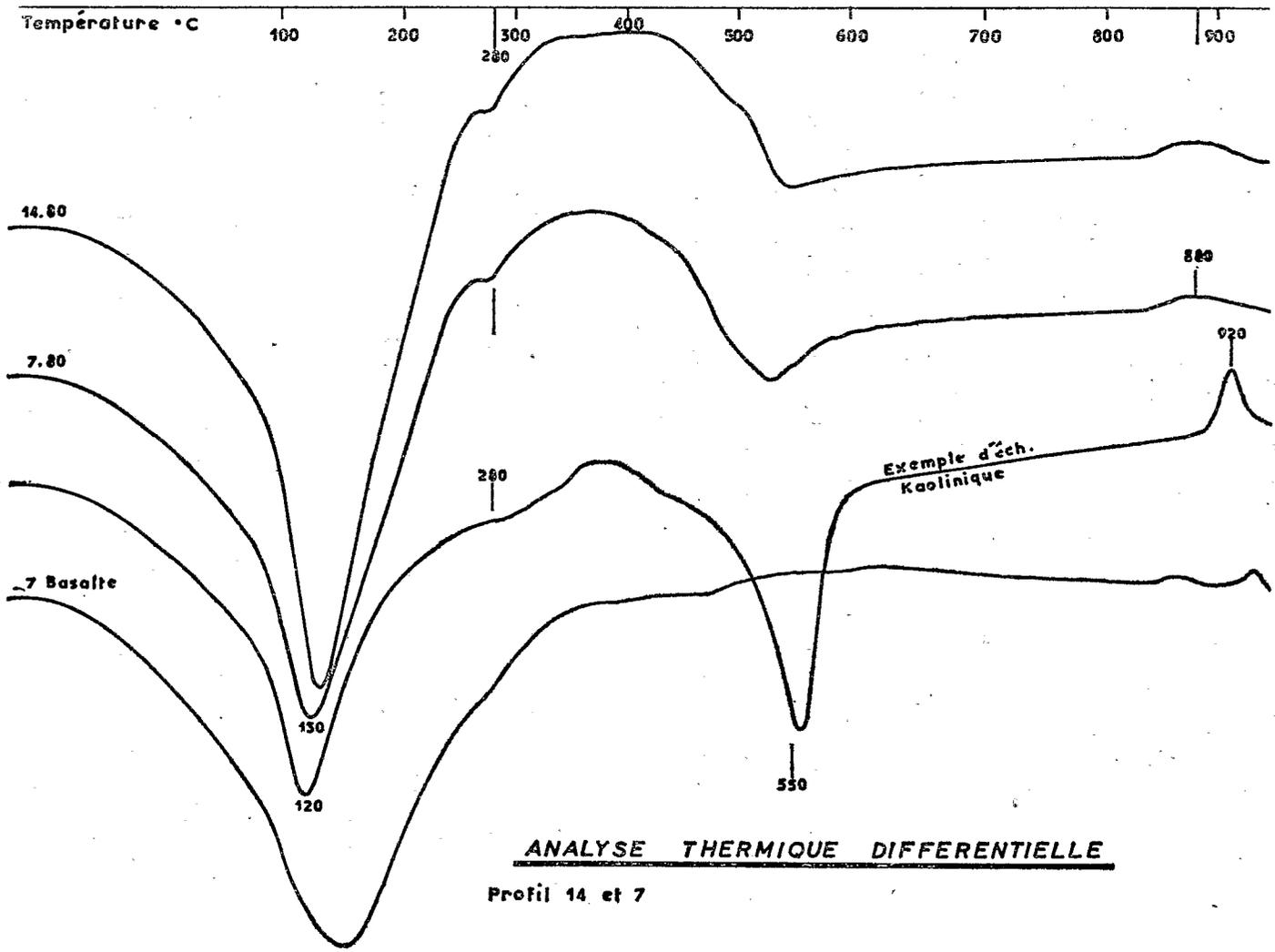
#### d) Profils 7 et 14

Ces deux profils sont rigoureusement identiques et sont constitués par une couverture limoneuse de 80 cm reposant sur un colluvium argileux à blocailles de basaltes.

Ces profils n'ont pas été analysés par spectrographie. Seul l'horizon argileux du profil 7 a été testé par l'ATD avec un échantillon de basalte appartenant au colluvium.

L'extraction des amorphes donne des quantités assez semblables dans tous les horizons ( $Al_2O_3$ —6 % ;  $SiO_2$ —4 à 5 % ;  $Fe_2O_3$ —7 à 8 %). Il y a donc autant de silice et d'alumine dans les limons que dans les argiles alors que le fer serait en plus grande quantité dans les horizons argileux.

L'analyse thermique différentielle des horizons 80 cm des deux profils est parfaitement identique alors que l'un des sols est sous forêt et l'autre ne l'est pas : déshydratation à 130°, traces de gibbsite à 280°, bombement exothermique à 350°, kaolinite (ou halloïsité) à 520° et 880°C. Il semble encore ici que toutes les températures caractéristiques des accidents classiques soient décalées vers des températures plus basses en présence de matière organique ou d'amorphes (?).



ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE

Profil 14. et 7

L'analyse du basalte montre la déshydratation à 160° au lieu de 130°C dans le matériel d'altération, l'absence certaine de gibbsite cristallisée et la disparition du pic amorti exothermique à 350°C. Celui-ci paraît donc bien lié à la matière organique au moins en partie.

L'absence de kaolinite dans le basalte vérifie la néoformation connue de celle-ci dans ces types de sol.

#### Profil 8

Il s'agit d'une accumulation de cendres profondes. L'analyse spectrale montre une évolution vers l'halloïsite et la métahalloïsite. On notera que le régime hydrique est sans doute plus humide en permanence.

#### Profil 9

L'échantillon analysé aux rayons X est constitué par des cendres grossières, prélevées en profondeur dans les accumulations cendreuses du volcan de Boujrit. Son évolution vers la vermiculite pure ne peut être expliquée bien qu'elle se rattache à l'évolution de matériaux cendreux enterrés et subissant sans doute des variations d'humidité et de sécheresse moins importants. On notera que les matériaux n'ont pu être pollués par des apports de minéraux allochtones.

#### Profils 10 et 15

Ces deux profils hors forêt sont constitués par des sols de très faible épaisseur sur des blocs basaltiques que l'on peut supposer parvenir d'une coulée en place, sans que l'on puisse en être certain.

#### Profils 16 et 19

Ce sont des sols identiques aux précédents mais sous forêt. Le profil 16 diffère essentiellement par la présence en surface d'un horizon A et d'un horizon A<sub>2</sub> très mince qui pourrait être un horizon A<sub>2</sub> podzolique, alors que le 19 ne le possède pas. Peut-être faudrait-il voir là un facteur pouvant influencer l'évolution vers des interstratifiés à vermiculite sur ces types de sol. On notera également que la perméabilité du profil 16 est particulièrement forte comparativement à celle mesurée sur le profil 15 très voisin, mais hors forêt ; il en résulte un rythme d'humectation/dessiccation à forte amplitude dans le P. 15 et à faible amplitude dans le P. 16.

Tableau n° 1. - Evolution vers la vermiculite halloïsite et métahalloïsite

Type d'évolution	Roche	Conditions biotiques	Milieu pédologique	Régime hydrique ou pédoclimat	Aboutissement
- 2 - Profil 8 80-400 cm	cen­dres volcaniques	hors forêt	horizons profonds ou enterrés; matériaux en place	humidité variant peu le long de l'année	<i>métahalloïsite halloïsite</i> ; sans interstratifiés - grande quantité d'amorphes
- 1 - Profil 3 120 cm	cen­dres volcaniques consolidées	hors forêt, sans traces d'enracinement	horizons enterrés; sans colluvium	humidité entretenue dans une gamme faible de dessiccation	<i>gibbsite</i> ; amorphes en grande quantité; trace de kaolin­ites.
- 3 - Profil 9 120 cm	lapillis grossiers	hors forêt	accumulation cendreuse	sans doute assez hu­mide toute l'année.	<i>métahalloïsite vermiculite gibbsite</i> (?)
- 4 - Profil 17 120-140 cm	cen­dres altérées colluviales	sans forêt, avec absence de racines	horizon enterré, sans colluvium fin	humidité entretenue dans des limites assez étroites relative­ment (déshydrata­tion partielle)	<i>kaolin­ite</i> et <i>gibbsite</i>

## II. Interprétation générale

On peut distinguer dans les analyses aux rayons X (voir tableau), trois types de composition de la fraction inférieure à  $2 \mu$  :

1° dominance de la métahalloïsité et de l'halloïsité

2° présence d'illite, chlorite, kaolinite avec évolution vers les interstratifiés, 10 - 14 ou 14 - 14 soit :

a) vers la montmorillonite

b) vers la vermiculite.

### 1° *Evolution vers la métahalloïsité et l'halloïsité*

Si on peut en juger d'après le type de matériau initial, il faut constater que cette évolution se produit sur cendres volcaniques profondes (profil 8) ; il est possible aussi que cette évolution traduise un temps de pédogénèse plus court que partout ailleurs ; le volcan de Boujrit, en cause ici, pouvant peut-être correspondre à des manifestations volcaniques plus récentes du quaternaire moyen (communication orale de MARTIN). Ces matériaux de toutes façons n'ont pu être pollués par aucun apport direct de minéraux allochtones (accumulation profonde).

On peut dans tous les cas considérer cette évolution comme caractéristique des cendres volcaniques peu évoluées, car la morphologie du profil laisse encore apparaître la stratification polyphasée du dépôt de cendre.

La méthode SEGALIN appliquée à ces matériaux fournit de très belles courbes d'extraction des éléments amorphes donnant des teneurs, assez précises de  $\text{SiO}_2$  (11 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12 %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (12 %). Il s'agit donc bien d'andosols au sens classique du terme, mais il faut souligner que ce type de dépôt est rare dans le Moyen-Atlas.

### 2° *Evolution vers la kaolinite avec interstratifiés*

Deux cas semblent pouvoir se produire :

— soit une évolution vers les interstratifiés à montmorillonite

— soit une évolution vers les interstratifiés à vermiculite.

Dans les deux cas, il s'agit d'une évolution plus marquée par la présence d'horizons argileux (B) plus ou moins bien distincts ou d'enrichissement en argile en profondeur.

Tableau n° 2. - Evolution vers les interstratifiés à vermiculite

Type d'évolution	Roche	Conditions biotiques	Milieu pédologique	Régime hydrique ou pédoclimat	Aboutissement
<b>B1</b> Profil 5 80-100 cm	colluvium fin argileux cendreaux	hors forêt	horizon profond 80-100 cm	supportant des rythmes de dessiccations plus intenses	interstratifiés chlorite - vermiculite kaolinite
Profil 17	colluvium fin ; argiles avec quelques basaltes	sous forêt, enracinement important	horizon profond 100 cm	supportant des rythmes de dessiccations plus intenses	illite - vermiculite chlorite - vermiculite
Profil 3 85 cm	colluvium fin argileux	hors forêt, enracinement faible	horizon argileux transitoire avec l'altération des cendres sous-jacentes	rythmes de dessiccation importants	illite - vermiculite chlorite - vermiculite
<b>B2</b> Profil 17 50-60 cm	colluvium fin sans doute originaire de cendres	sous forêt	horizons souvent moins argileux, riches en matière organique	rythmes de dessiccation intenses modérés par le couvert	interstratifiés illite - vermiculite kaolinite
<b>B3</b> Profil 3 75 cm	colluvium fin d'origine mélangée cendres et basaltes	hors forêt, enracinement important du matorral de <i>Genista pseudopillosa</i>	horizon assez argileux et riche en matière organique	rythmes de dessiccation intenses modérés par le couvert	interstratifiés illite - vermiculite kaolinite
<b>B4</b> Profil 5 surface	colluvium fin de surface	hors forêt	horizon argileux	rythmes de dessiccation importants non modérés par le couvert	kaolinite
Profil 16	coulée ou colluvium basaltique	sous forêt, enracinement puissant	horizon modérément argileux s'humidifiant peu	rythmes de réhumectation amortis par la forêt. Dessiccation importante	interstratifiés chlorite - vermiculite kaolinite

L'origine de ces interstratifiés résiderait dans l'évolution de l'illite et de la chlorite qui semblent présentes dans tous les matériaux analysés à l'exception des matériaux cendreux. On peut alors poser deux questions nouvelles :

- Quelle est l'origine de l'illite et de la chlorite ?
- Dans quelles conditions l'évolution se fait-elle vers la montmorillonite ou vers la vermiculite ?

#### a) *Origine de l'illite et de la chlorite*

Pour les hypothèses proposables, à savoir héritage ou pollution colluviale, on peut avancer les arguments suivants :

— L'illite et la chlorite semblent absentes des cendres volcaniques altérées comme c'est le cas dans le profil 8 et à la base du profil 3 où ces cendres sont enterrées sous des dépôts colluviaux basaltiques.

— Il ne peut dans ce cas s'agir d'une disparition par dégradation puisque d'autres types d'argiles n'apparaissent pas parallèlement (éch. 0-38/6 du profil 3).

— Par ailleurs, il faut constater que le recouvrement de cendre observable sur l'ensemble du plateau du Jbel Hebri est actuellement discontinu, mais qu'il a certainement été général à toute la région. On en retrouve d'ailleurs des traces perchées sur des surfaces de piégeage des massifs calcaires alentourés. On peut donc assurer que les matériaux colluviaux qui surmontent certaines formations cendreuses de profondeur proviennent en partie des recouvrements des massifs calcaires voisins érodés.

Dans ces conditions, seule l'hypothèse d'une pollution colluviale n'est pas en contradiction avec les faits cités, puisqu'alors, seuls les dépôts enterrés ou les brèches cendreuses en place depuis leurs dépôts seraient dépourvus des deux matériaux illite et chlorite, comme dans le cas des matériaux analysés où ces deux minéraux sont absents.

D'autres observations seraient évidemment nécessaires pour contrôler cette hypothèse qui reste pour le moment vraisemblable.

#### b) *Origine des interstratifiés*

Ces édifices proviennent de la dégradation des illites et chlorites <sup>(1)</sup> mais il apparaît visiblement que la chlorite est la plus fragile, car sa diminution est liée corrélativement à l'augmentation des interstratifiés ou de kaolinite néoformée.

(1) Ces résultats nous ont été communiqués par M. Martin, Géographe de l'I.S.C. qui avait sollicité le laboratoire de Strasbourg pour analyser quelques échantillons. Interprétation H. Paquet, laboratoire de minéralogie des argiles de Strasbourg.

Quant aux conditions de transformation vers la montmorillonite ou vers la vermiculite, il paraît très difficile de les déterminer avec les seuls éléments en notre possession.

En effet,

— on peut considérer que tous ces sols sont soumis au même régime pluviométrique et thermique avec quelques modifications apportées par leur situation hors forêt ou sous forêt. Le couvert forestier amortit les effets de la dessiccation estivale, favorise la mise en réserve de l'eau, retarde la dessiccation et permet une réhumectation automnale plus rapide ;

— on peut donc se baser sur un régime hydrique du sol moins contrasté sous couvert que hors-couvert, malgré un passage par une période sèche moins longue toutefois sous forêt (6 mois au lieu de 8). En profondeur à partir de 80 cm ces différences s'estompent et disparaissent ;

— à l'intérieur d'un même profil, il ne semble pas y avoir de variation de la surface vers la profondeur à l'exception du profil 5 à 50 cm de profondeur où les interstratifiés sont absents. Il faut dire que cet échantillon est l'un de ceux qui sont soumis à la plus forte dessiccation mais surtout à une réhumectation beaucoup plus faible que partout ailleurs du fait d'une perméabilité très inférieure (voir régime hydrique annuel) ;

— on peut constater que le type d'interstratifié est indépendant du milieu biotique ; les modifications du pédoclimat apportées par le couvert forestier seraient donc insuffisantes pour orienter l'évolution vers un interstratifié déterminé du moins sur matériaux plus ou moins cendreaux.

Il faut alors penser que la nature des matériaux originels est en cause et que les facteurs biotiques s'ils peuvent agir ne peuvent le faire que dans le cadre « lithologique ».

Vue sous cet aspect, l'étude des résultats conduit aux observations suivantes :

Les profils 10, 15, 16 et 19 sont situés sur coulée basaltique en place. Ce sont des sols peu épais au sens pédologique de ce caractère. On constate que l'évolution vers les interstratifiés chlorite - montmorillonite ou illite - montmorillonite est caractéristique de trois de ces profils à l'exception du quatrième : profil 16.

Par contre les profils 3, 5 et 17 formés sur matériaux fins colluviaux (3 et 5) ou en place (17) évoluent vers des interstratifiés illite ou chlorite - vermiculite.

On notera aussi que l'analyse du profil 10 n'a fourni aucun élément amorphe autre que le fer, en quantité modeste d'ailleurs (6 %) ce qui pourrait confirmer l'absence de matériaux cendreaux originels ou une évolution plus poussée.

Cette constatation conduirait donc à penser que l'évolution vers les interstratifiés à montmorillonite sont liés à l'altération des matériaux basaltiques sous faible épaisseur ; mais cette conclusion reste en contradiction avec l'analyse du profil 16. On notera que pour ce profil le fait d'être situé sous forêt ne lève pas la contradiction puisque le profil 19 est aussi sous couvert et qu'il a évolué vers la montmorillonite.

En ce qui concerne les matériaux colluviaux des profils 3, 5 et 17, il semblerait bien que l'évolution vers la vermiculite soit assez conforme avec la présence de cendres dans les matériaux initiaux puisqu'on trouve celle-ci à la base des deux profils 3 et 17 et que la finesse des matériaux du profil 5 puisse être rattachée à des colluviums cendreux. On retrouverait là l'évolution possible des cendres soulignées par l'analyse du profil 9.

A défaut d'informations complémentaires, il faudrait donc penser à une influence déterminante de la nature des matériaux volcaniques initiaux — cendres ou basaltes — et une influence secondaire des facteurs biotiques.

TABLEAU I. — RESERVE HYDRIQUE DU SOL

PREMIERE SERIE

DEUXIEME SERIE

GROUPE 11

GROUPE 12

GROUPE 13

GROUPE 14

CLASSES EDAPHIQUES	3503	3402	3401	3304	3303	3323	3322	2403	2301	3513	2401	2302	2413	3314	3414	3413	2303	3404	3314	2404	2402	2314	2512	2502	2614	2214	3504	3411	0012	0011	0010			
Nombre de relevés par classe	9	4	2	3	4	4	2	2	5	1	1	3	1	2	2	1	1	2	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1			
<i>Brachypodium sylvaticum</i> 45	...	.	..	.	...	.																												
<i>Cedrus libanotica</i> (adulte) 45	..	.	....	..	...	..					....	..																						
<i>Trifolium ochroleucum</i> 45	..	.	..	..	....	.	..			....				..	..																			
<i>Agrostis stolonifera</i> 46	.	..	..		..	.	...	..					...	..						..														
<i>Satureja granatensis</i> 47	.	..	...	...	.	.	...	.						.				...																
<i>Anthoxanthum odoratum</i> 47	.	.	.	.	...	...	.	.	..							..																		
<i>Geum silvaticum</i> 46	.	.	..	.	....	.	..	.																										
<i>Catananche coerulea</i> 26	.	..	.	.	.	.	.	.				..		.																				
<i>Mantisales salmantica</i> 26	.	..	.	.	...	.	.	.		...																								
<i>Trisetaria flavescens</i> 46	.	..	..	..	.	..	...	..	.	...																								
<i>Caucalis coeruleascens</i> 45	.	.	..	.	...	..	..	..		....	...																							
<i>Cynosurus elegans</i> 55	.	.	..	.	..	..	.	.	..	...	...																							
<i>Malva tournefortiana</i> 55	.	..	..	.	...	.	..	.	..	...			...	...																				
<i>Trifolium striatum</i> 05	.		...		...	.	...			.....	.....		.....					..																
<i>Silene italica</i> 25	x	....			...	..	...	...	....	...	..		....	..	....																	...		
<i>Trifolium canpestre</i> 26	..		...		.	...	...	...	....	....	....		....	..	....	....																		
<i>Vicia amphicarpa</i> 26	..		..						...	...	...		...	..	....	....																		
<i>Dactylis glomerata</i> 36	x		..		.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Taraxacum obovatum</i> 46	.				.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Arenaria serpyllifolia</i> 45	x	.			.	...	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Plantago coronopus</i> 05	..		..		.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Cerastium gibraltanicum</i> 47	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Vulpia geniculata</i> 26	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Cruetianella angustifolia</i> 26	.	..	...	.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
<i>Erysimum bocconei</i> 47	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Hieracium pseudopilosella</i> 47	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Bromus hordeaceus</i> 26	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Dasyphyrum hordeaceum</i> 45	.	.	.	.	x	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
<i>Cerastium pentandrum</i> 45	.	..	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
<i>Thymelaea virgata</i> 46	.	..	..	.	.	.	.	.	.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
<i>Romulea sp.</i> 00	.	..	..	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Ranunculus paludosus</i> 35	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Alyssum montanum</i> 47	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Helianthemum croceum</i> 47	.	.	.	.	..	...	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Festuca rubra</i> 47	.				.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Festuca ovina</i> 45	.				.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Euphorbia ricuensis</i> 47	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Veronica arvensis</i> 26	x	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Carex divisa</i> 25	x	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Poa bulbosa</i> 26	.	.	.	.	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Mimuartia funckii</i> 50	x					..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Alyssum granatense</i> 36	.		...			...	.....	..	..	.....	.....	..	.....	..	.....	.....	..	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
<i>Taraxacum larvigatum</i> 46	.		..			..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Echinaria capitata</i> 05	.		..			..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Paronychia argentea</i> 26	.				..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Evacidium discolor</i> 46	x		..			..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Herniaria hirsuta</i> 05	.				.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Buffonia mauritanica</i> 00	.		...			...	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Thymus algeriensis</i> 45	.	.			.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
<i>Koeleria splendens</i> 45	.				..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	

Les deux premiers chiffres des classes édaphiques définissent la texture d'ensemble des profils par référence aux figures 16 (triangle des textures) et 17 (422); le troisième chiffre indique la tendance argileuse (1), sableuse (2) ou équilibrée (0) de cette texture vers la surface; le quatrième indique la profondeur des profils, selon le code que nous rappelons :

TABLEAU II. — TEXTURE DES FRACTIONS FINES

Classes de texture		Textures limoneuses					Argiles en surface									
		350	350	352	340	240	230	331	341	351	241	221	251	250	261	
Nombre de relevés par classe		10	7	7	7	7	9	2	4	4	1	1	2	1	1	
Groupe II 1	a	<i>Brachypodium sylvaticum</i>	45	...	...	..	..									
		<i>Satureja clinopodium</i>	55	...	...	..	..									
		<i>Galium rotundifolium</i>	55	...	...	..	..	x								
		<i>Scabiosa columbaria</i>	35	...	..	..	..	..								
		<i>Cedrus libanotica (adultes)</i>	45	..	..	..	..	x								
		<i>Geum silvaticum</i>	46	..	...	..	..	x								
		<i>Satureja granatensis</i>	47	..	..	..	..	x								
		<i>Ranunculus bulbosus</i>	36	..	....	..	..	..	....							
		<i>Knautia arvensis</i>	45	...	..	..	..	..	..							
		<i>Catananche coerulea</i>	26	..	..	..	..	x								
		<i>Anthoxanthum odoratum</i>	45	..	..	..	..	x								
		<i>Cynosurus elegans</i>	55	..	..	..	..	..	..							
		<i>Trisetaria flavescens</i>	46	..	..	..	..	x	x							
		<i>Mantisalca salmantica</i>	26	..	..	..	..	..	..							
	<i>Trifolium ochroleucum</i>	45	..	...	..	..	..	..	..							
Groupe II 2	a	<i>Silene italica</i>	25	x	..	..	..	..	..	..						
		<i>Agrostis stolonifera</i>	46	..	..	..	..	x	..	..	..	..				
		<i>Dactylis glomerata</i>	36	x	x	..	..	..	..	..	..	..				
		<i>Malva tournefortiana</i>	55	..	..	x	..	x	x	..	..	..	..			
		<i>Erysimum boccanei</i>	47	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..			
		<i>Crucianella angustifolia</i>	26	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..		
		<i>Alyssum granatensis</i>	36	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..		
		<i>Arenaria serpyllifolia</i>	45	x	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..		
		<i>Taraxacum obovatum</i>	46	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Vulpia geniculata</i>	26	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Phleum phleoides</i>	55	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Cerastium gibralturicum</i>	47	..	..	..	..	x	..	x	x	..	..	..	..	
		<i>Helianthemum croceum</i>	47	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
		<i>Minuartia junckii</i>	50	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
	<i>Paronychia argentea</i>	26	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Hieracium pseudopilosella</i>	47	..	..	..	..	x	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Bromus hordeaceus</i>	26	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Taraxacum laevigatum</i>	46	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Cerastium pentandrum</i>	45	..	..	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Dasypyrum hordeaceum</i>	45	..	..	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Euphorbia nicaensis</i>	47	..	..	..	..	x	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Ranunculus paludosus</i>	35	..	..	x	..	..	..	..	..	x	..	..	..	..	
Groupe II 3	a	<i>Carex divisa</i>	25	..	..	x	..	..	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Poa bulbosa</i>	26	..	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Thymelaea virgata</i>	46	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Evacidium discolor</i>	46	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Romulea sp.</i>		..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Echinaria capitata</i>	05	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Alyssum montanum</i>	47	..	x	..	x	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Herniaria hirsuta</i>	05	..	..	x	x	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Festuca rubra</i>	47	..	..	..	x	x	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Veronica arvensis</i>	26	x	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
	<i>Festuca ovina</i>	45	x	x	x	x	..	..	..	..	..	..	..	..		
	<i>Thymus algeriensis</i>	45	..	..	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..		
	<i>Koeleria splendens</i>	45	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..		

Les deux premiers chiffres de chaque classe désignent la texture d'ensemble et le troisième chiffre, la texture en surface, selon les conventions du tableau I.

Fréquences : la signification des symboles est la même que sur le tableau I.

TABLEAU III. — VARIABLE EDAPHIQUE APPROCHEE

Nature et profondeur du sol meuble		43	42	41	21	14	11	12	13	22	44	52	23	53	54	51	
Nombre de relevés par classe		23	21	32	26	18	9	4	7	2	5	5	2	2	2	1	
Groupe III 1	a	<i>Brachypodium sylvaticum</i> 45	....	.	.	x	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
		<i>Cedrus libanotica</i> (adultes) 45	...	.	x	.	x	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		<i>Trifolium ochroleucum</i> 46	..	..	.	.	x	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		<i>Geum silvaticum</i> 45	..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
		b	<i>Caucalis coerulea</i> 45	...	.	x	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
		<i>Malva tournefortiana</i> 55	...	.	.	x	.	x	.	..	..	..	..	..	..	..	..
		<i>Mentzelia salmantica</i> 26	..	.	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..
		<i>Potentilla maura</i> 46	.	.	x	.	...	..	....	..	..	..	..	..	..	..	..
		<i>Cynosurus elegans</i> 55	..	..	.	.	x	.	.	..	..	..	..	..	..	..	..
	Groupe III 2		<i>Trisetaria flavescens</i> 46	..	..	.	.	.	x	.	x	..	..	..	..	..	..
		<i>Catananche coerulea</i> 26	..	..	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Cerastium gibraltarium</i> 47	.	.	.	.	.	x	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Agrostis stolonifera</i> 46	..	.	.	.	.	x	.	..	...	..	..	..	..	..	
		<i>Anthoxanthum odoratum</i> 45	..	..	.	x	x	.	.	x	.	..	..	..	..	..	
		<i>Euphorbia nicaensis</i> 47	.	.	.	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Dactylis glomerata</i> 36	.	.	.	.	.	.	.	x	.	x	..	..	..	..	
		<i>Plantago coronopus</i> 05	..	.	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Ranunculus polidosus</i> 35	.	.	.	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Satureja granatensis</i> 47	.	.	.	.	.	x	.	x	...	..	..	..	..	..	
Groupe III 3		<i>Jurinea humilis</i> 47	.	x	.	.	.	..	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Romulea</i> sp. 47	x	.	.	.	.	x	.	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Hellanthemum croceum</i> 47	x	..	.	.	x	.	..	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Hieracium pseudopikossella</i> 47	.	.	.	x	.	.	..	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Alyssum montanum</i> 47	.	.	.	.	.	..	..	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Festuca rubra</i> 47	.	.	.	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Festuca ovina</i> 45	.	.	.	.	.	..	..	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Cerastium pentandrum</i> 45	.	.	.	.	.	x	.	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Genista pseudopilosa</i> 46	x	.	..	.	.	.	..	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Bromus hordeaceus</i> 26	.	.	.	.	.	.	..	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Dasyphyrum hordeaceum</i> 45	.	.	.	.	.	.	.	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Vulpia geniculata</i> 26	.	.	.	.	x	.	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Arenaria serpyllifolia</i> 21	x	.	..	.	.	.	..	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Poa bulbosa</i> 26	.	.	.	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Erysimum buccinei</i> 47	.	.	.	.	.	.	x	.	..	..	..	..	x	..	
	<i>Minuartia junckii</i> 50	x	.	.	.	.	.	..	.	..	x	..	..	..	..		
	<i>Thymus algeriensis</i> 45	x	.	.	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..		
	<i>Thymelaea virgata</i> 46	.	.	.	.	..	..	..	x	..	..	..	..	..	..		
Groupe III 4		<i>Koeleria splendens</i> 45	.	x	.	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Carex divisa</i> 25	.	x	.	.	..	..	..	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Veronica arvensis</i> 26	x	.	.	.	.	.	.	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Phleum phleoides</i> 55	x	x	.	.	.	..	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Buffonia mauritanica</i> 00	x	.	.	..	.	..	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Herniaria hirsuta</i> 05	.	x	.	.	..	.	..	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Trifolium phleoides</i> 36	.	x	x	..	.	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Taraxacum lacvigatum</i> 46	x	.	x	x	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
		<i>Evacidium discolor</i> 46	.	x	x	.	.	..	..	x	..	..	..	..	..	..	
		<i>Echinaria capitata</i> 05	.	x	x	..	.	..	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Bromus squarrosus</i> 05	.	.	.	..	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	
		<i>Crucianella angustifolia</i> 26	.	.	.	..	.	.	.	.	..	..	..	..	..	..	
	<i>Alyssum granatense</i> 36	.	x	.	..	.	..	.	.	..	..	..	..	..	..		

Nature du sol meuble (premier chiffre de chaque classe) :

1. terreux
2. pierro-rocheux
4. terro-pierreux
5. gravillonneux

Profondeur du sol meuble (deuxième chiffre de chaque classe) : mêmes conventions que pour le tableau I.

Fréquences : la signification des symboles est la même que sur les tableaux précédents.



TABLEAU V. — ESPECES INDICATRICES DES MESOCLIMATS

		Humides Secs				
Classes mésoclimatiques		2	1	0	3	4
Nombre de relevés par classe		30	90	46	13	8
Groupe V 1 (espèces subforestières)	<i>Vicia lathyroides</i>	46	.....	.....		
	<i>Adenocarpus boudii</i>	45	.....	..		
	<i>Trifolium striatum</i>	05	.....	.....		
	<i>Caucalis coerulescens</i>	45	.....	.....		
	<i>Cynosurus elegans</i>	55	.....	.....		
	<i>Cedrus libanotica</i> (semin)	45	.....	.....		
	<i>Cedrus libanotica</i> (adultes)	45	.....	.....		
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	45	.....	.....		
	<i>Malva tournefortiana</i>	55	.....	.....	..	
	<i>Geum silvaticum</i>	46	.....	.....	..	
	Groupe V 2	<i>Festuca rubra</i>	47	..	.....	.....
<i>Trifolium campestre</i>		26	.....	..		
<i>Maritima salmantica</i>		26	.....	.....		
<i>Cerastium gibraltarium</i>		47	.....	.....		
<i>Silene italica</i>		25	.....	.....		
<i>Satureja granatensis</i>		47	.....	.....		
<i>Vulpia geniculata</i>		26	.....	..		
<i>Ranunculus paludosus</i>		35	.....	.....		
<i>Hypochaeris radicata</i>		26	.....	..		
<i>Vicia amphicarpa</i>		26	.....	..		
<i>Catananche coerulea</i>		26	.....	.....		
<i>Bromus hordeaceus</i>		26	.....	.....		
<i>Euphorbia nicaensis</i>		47	.....	..		
Groupe V 3	<i>Hieracium pseudopilosella</i>	47	.....	.....		
	<i>Herniaria hirsuta</i>	05	.....	.....		
	<i>Trifolium glomeratum</i>	26	.....	.....		
	<i>Cerastium pentandrum</i>	45	.....	.....		
	<i>Poa bulbosa</i>	26	.....	.....		
	<i>Dasyphyrum hordeaceum</i>	45	.....	.....		
	<i>Dactylis glomerata</i>	36	.....	.....		
	<i>Tunica prolifera</i>	36	.....	.....		
	<i>Bromus squarrosus</i>	05	.....	.....		
	<i>Phleum phleoides</i>	55	.....	.....		
	<i>Carex divisa</i>	25	.....	.....		
	<i>Sanguisorba minor</i>	26	.....	.....		
	<i>Thymus algeriensis</i>	45	.....	.....		
	<i>Crucianella angustifolia</i>	26	.....	.....		
	<i>Evacidium discolor</i>	46	.....	.....		
Groupe V 4 (espèces xérophiles/s. st.)	<i>Thymus zygis</i>	46	.....	.....		
	<i>Alyssum granatense</i>	36	.....	.....		
	<i>Trifolium phleoides</i>	36	.....	.....		
	<i>Eryngium campestre</i>	26	.....	.....		
	<i>Ajuga reptans</i>	26	.....	.....		
	<i>Buffonia mauritanica</i>	00	.....	.....		
Groupe V 5 (espèces xérophiles-cultigènes)	<i>Echinaria capitata</i>	05	.....	.....		
	<i>Aegilops ovata</i>	26	.....	.....		
	<i>Elymus caput-medusae</i>	05	.....	.....		
	<i>Hordeum murinum</i>	16	.....	.....		
	<i>Carduncellus pinnatus</i>	47	.....	.....		
<i>Reseda luteola</i>	45	.....	.....			

Fréquences  
 x < 25/1000  
 . < 50/1000  
 50/1000 < .. < 100/1000  
 100/1000 < ... < 150/1000  
 ↓  
 450/1000 < : : : : :

Mésoclimats humides 2 tempéré  
 1 froid  
 0 très froid  
 Mésoclimats secs 3 très froid  
 4 froid



TABLEAU VII — FORMATION

Formations forestières Formations basses

FORMATION (8 classes)		FORMATION							
		1	2	7	9	8	5	4	0
Nombre de relevés par classe		8	16	8	12	80	58	3	2
Groupe VII 1 (espèces sciaphiles)	<i>Cedrus libanotica</i> (adultes)	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Galium rotundifolium</i>	55	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Brachypodium sylvaticum</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Satureja clinopodium</i>	55	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Galium aparine</i>	26	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Geum urbanum</i>	55	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Cynosurus balansaе</i>	55	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Arabis hirsuta</i>	56	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Cedrus libanotica</i> (jeunes)	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Groupe VII 2 (espèces de demi-ombre)	a <i>Cynosurus elegans</i>	55	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Geum silvaticum</i>	46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Crataegus</i> sp.		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Rubia laevis</i>	36	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Trifolium ochroleucum</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Cedrus libanotica</i> (semin)	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
b <i>Rosa</i> sp.		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Agropyrum marginatum</i>	55	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Groupe VI 3 (espèces sub-forestières)	<i>Ranunculus bulbosus</i>	36	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Trifolium striatum</i>	05	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Trisetaria flavescens</i>	46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Mertensia salmantica</i>	26	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Dactylis glomerata</i>	36	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Catananche cœrulea</i>	26	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Vicia lathyroides</i>	46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Cnicus cœrulescens</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Groupe VI 4 (espèces du découvert et des clairières)	<i>Cerastium cibrataricum</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Ademurpax humilis</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Satureja canariensis</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Erysimum brachybotrys</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Helianthemum cicutum</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Euphorbia nicaeensis</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Groupe VI 5 (espèces du découvert)	<i>Poa bulbosa</i>	26	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Rumex</i> sp.		.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Genista pseudopillana</i>	46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Thymus algeriensis</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Veronica urvensis</i>	26	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Alyssum montanum</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Thymelaea virgata</i>	46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Lactuca viminea</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Herniaria hirsuta</i>	05	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Festuca ovina</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Carex divisa</i>	25	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Mimartia funkii</i>	50	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Evacidium discolor</i>	46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	<i>Jurinea humilis</i>	47	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<i>Koeleria splendens</i>	45	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
<i>Phleum phleoides</i>	55	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
<i>Taraxacum laevigatum</i>	46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	

- |                        |   |   |
|------------------------|---|---|
| Formations forestières | } | 1 formation ligneuse haute dense                            |
|                        |   | 2 formation ligneuse haute assez claire                     |
|                        |   | 7 formation complexe herbacée - ligneux hauts               |
|                        |   | 9 formation complexe herbacée - ligneux hauts - ligneux bas |
| Formations basses      | } | 8 formation complexe herbacée - ligneux bas                 |
|                        |   | 5 formation herbacée  |
|                        |   | 4 formation ligneuse basse                                  |
|                        |   | 0 zone à végétation très claire ou nulle                    |

Fréquences : mêmes conventions que sur le tableau V.

TABLEAU VIII. — VIGUEUR DE LA VEGETATION

		Classes de vigueur décroissante						
		0	1	2	3	4	5	6
		8	20	54	64	20	9	1
Groupe VIII 1 (prairies humides)	<i>Geum urbanum</i>	55	.....	.....	..			
	<i>Ranunculus bulbosus</i>	36	.....	.....	..			
	<i>Trifolium ochroleucum</i>	45	.....	.....	..			
	<i>Echium italicum</i>	46	.....	.....	..			
	<i>Lotus corniculatus</i>	26	.....	.....	..			
	<i>Potentilla anserina</i>	46	.....	.....	..			
	<i>Potentilla maura</i>	46	.....	.....	..			
Groupe VIII 2 (espèces forestières)	<i>Galium rotundifolium</i>	55	.....	.....	..			
	<i>Galium aparine</i>	26	.....	.....	..			
	<i>Satureja clinopodium</i>	46	.....	.....	..			
	<i>Brachypodium sylvaticum</i>	55	.....	.....	..			
	<i>Rosa sp.</i>		.....	.....	..			
	<i>Geum silvaticum</i>	46	.....	.....	..			
	<i>Cedrus libanotica</i> (adultes)	45	.....	.....	..			
Groupe VIII 3 (espèces subforestières)	<i>Catananche coerulea</i>	45	.....	.....	..			
	<i>Cynosurus elegans</i>	55	.....	.....	..			
	<i>Mentha sylvestris</i>	26	.....	.....	..			
	<i>Caucalis coerulea</i>	26	.....	.....	..			
	<i>Agrostis stolonifera</i>	46	.....	.....	..			
	<i>Beracium pseudopilosella</i>	47	.....	.....	..			.....
	<i>Cerastium gibraltarium</i>	47	.....	.....	..			.....
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	45	.....	.....	..			.....
<i>Trisetaria flavescens</i>	47	.....	.....	..			.....	
Groupe VIII 4	<i>Euphorbia nicaensis</i>	47	.....	.....	..			
	<i>Bromus hordeaceus</i>	46	.....	.....	..			
	<i>Alyssum montanum</i>	26	.....	.....	..			
	<i>Carex divisa</i>	25	.....	.....	..			.....
	<i>Poa bulbosa</i>	26	.....	.....	..			.....
	<i>Dasyphyrum hordeaceum</i>	45	.....	.....	..			.....
	<i>Festuca rubra</i>	47	.....	.....	..			.....
	<i>Veronica arvensis</i>	26	.....	.....	..			.....
	<i>Rondea sp.</i>		.....	.....	..			.....
	<i>Helianthemum croceum</i>	47	.....	.....	..			.....
	<i>Genista pseudopilosa</i>	46	.....	.....	..			.....
	<i>Campanula filiculis</i>	47	.....	.....	..			.....
	<i>Minuartia junckii</i>	50	.....	.....	..			.....
<i>Arenaria serpyllifolia</i>	45	.....	.....	..			.....	
Groupe VIII 5	<i>Bromus squarrosus</i>	05	.....	.....	..			.....
	<i>Stipa legumicæ</i>		.....	.....	..			.....
	<i>Trifolium phleoides</i>	36	.....	.....	..			.....
	<i>Crucianella angustifolia</i>	26	.....	.....	..			.....
	<i>Xeranthemum inapertum</i>	46	.....	.....	..			.....
	<i>Jurinea humilis</i>	47	.....	.....	..			.....
	<i>Thymus algeriensis</i>	45	.....	.....	..			.....
	<i>Evacidium discolor</i>	46	.....	.....	..			.....
	<i>Ajuga reptans</i>	26	.....	.....	..			.....
	<i>Alyssum granatense</i>	36	.....	.....	..			.....
	<i>Echinaria capitata</i>	05	.....	.....	..			.....
	<i>Buffonia maritima</i>	00	.....	.....	..			.....
	<i>Koeleria splendens</i>	45	.....	.....	..			.....
<i>Elymus caput-medusæ</i>	05	.....	.....	..			.....	

Fréquences : mêmes conventions que sur le tableau V







ERRATA

-----

- p. 164            ligne 7 - lire (teneur en eau -  $H_2 O_{PF} 4,2$
- p. 175            ligne 18 - lire *Genista pseudopilosa*
- p. 177            courbe du haut : lire cendres du profil 3
- p. 181            en bas de page lire P. cent
- p. 189            en b) lire *Genista pseudopilosa*
- p. 197            ligne 16-17 - lire : ce qui se produit le 25 Avril 1970 et  
le 1er Juin 1971
- p. 203            ligne 13 - lire : est parfaitement concevable
- p. 204            ligne 17-18 - lire : ou de "limon" pour les fractions
- p. 211            Tableau - Dernière corrélation, lire Matière organique -  
Particules  $2\mu - 20\mu$
- p. 213            ligne 4 : supprimer :  $N = 29 R = 0,87 ++$   
                  lire : alumine libre  
                  alumine totale
- p. 214            ligne 36 : lire classe des sols brunifiés
- p. 218            ligne 8 - lire : pourrait en rendre compte
- p. 237            ligne 10 - lire : terra rossa
- p. 249            ligne 34 - lire : le traitement en futaie régulière est à  
proscrire.

**BILAN DE L'EAU**  
**ET CONDITIONS D'EXISTENCE DE LA CEDRAIE**  
**DANS LE MOYEN ATLAS BASALTIQUE (MAROC)**

**UTILISATION**  
**D'UNE « ANALYSE D'INFORMATION MUTUELLE »**  
**ENTRE LES ESPECES ET LES VARIABLES DU MILIEU**

**PAR**

**M. LECOMPTE**  
Faculté des Sciences  
Rabat

**B. LEPOUTRE**  
Station de recherches forestières  
Rabat

**Avec la collaboration de A. SAUVAGEOT**  
Laboratoire de pédologie  
de la Station de recherches forestières - Rabat

17 FEV. 1980

Extrait des « Annales de la Recherche forestière au Maroc ». G. T. S. T. O. M. Tome 15. (1975)

Collection de Référence  
n° B9992