

Office de la Recherche Scientifique et Technique

Outre - Mer

Centre de Ouagadougou

Projet Mare d'Oursi

Rapport de synthèse à l'échelle du bassin

Cycle de l'eau et bilan hydrique annuel des sols

A.M. SICOT

Avril 1982

S O M M A I R E

INTRODUCTION

I. CADRE EXPERIMENTAL

11. Caractéristiques écologiques du bassin influant sur la dynamique de l'eau
12. Dispositif expérimental
13. Caractéristiques spécifiques aux sites et parcelles d'étude

II. METHODES ET MESURES

21. Méthodologie d'étude du cycle de l'eau et de l'établissement du bilan hydrique
 211. Bilan hydrique annuel à petite échelle
 212. Bilan hydrique décadaire à l'échelle parcellaire
22. Mesures effectuées
 221. La pluviométrie
 222. Le ruissellement
 223. La réserve hydrique du sol
 224. L'évapotranspiration

III. RESULTATS

31. Les termes du bilan hydrique
 311. La pluviométrie
 312. Le ruissellement
 313. Le drainage
 314. La réserve hydrique du sol
 315. L'évapotranspiration
32. Bilan hydrique des sols
 321. Bilan hydrique annuel
 3211. Bilan hydrique annuel en milieu sableux
 3212. Bilan hydrique annuel en milieu argileux
 3213. Bilan hydrique annuel en milieu intermédiaire à texture grossière
 322. Bilan hydrique décadaire

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'eau des précipitations atmosphériques s'infiltré dans le profil pédologique, ruisselle à la surface du sol et retourne dans l'atmosphère, totalement ou en partie, directement ou indirectement au travers de la végétation :

$$P(\text{précipitation}) = I(\text{infiltration}) + R(\text{ruissellement}) + E(\text{évaporation})$$

Tels sont dans toute leur généralité le devenir de l'eau et l'équation du bilan hydrique applicable en toute circonstance et en tout point du globe.

Mais cette simplicité n'est qu'apparente. En réalité, chaque compartiment du système sol-plante-atmosphère est le siège de processus biophysiques nombreux et complexes et chaque terme du bilan résultat d'interactions d'un grand nombre de facteurs écologiques s'évalue assez laborieusement.

De plus, la dynamique des phénomènes et les fluctuations locales de l'intensité de leurs manifestations obligent à situer avec précision les investigations dans l'échelle spatio-temporelle et rendent particulièrement épineux le problème de la représentativité et de l'intégration des mesures ponctuelles.

Ces considérations s'appliquent tout particulièrement au milieu sahélien où aucun phénomène du cycle de l'eau, aucune composante du bilan ne peut être négligé.

Nous décrirons successivement le dispositif expérimental mis en place pour cette étude, le matériel et la méthodologie utilisés en précisant leur domaine et limites d'utilisations. Les résultats comprendront l'analyse des phénomènes et des termes du bilan hydrique et l'exposé de bilans hydriques proprement dits à l'échelle de la station d'étude, c'est à dire l'écosystème représenté par un groupement végétal type.

I. CADRE EXPÉRIMENTAL

11. Caractéristiques écologiques du bassin influant sur la dynamique de l'eau.

De prime abord, le bassin de la Mare d'Oursi se présente comme un assemblage, hétéroclite d'éléments très disparates. Etant donné l'étendue des variations des caractéristiques micro-climatiques, édaphiques et végétales, on doit, pour appréhender exhaustivement les faits, résoudre impérativement les problèmes inhérents à la représentativité des observations

et mesures et à leur intégration dans l'espace et le temps. Avant d'exposer les solutions retenues, examinons succinctement les disparités diverses du milieu.

Elles sont illustrées à petite échelle par le schéma de la figure 1. Celui-ci appelle peu de commentaires, car il en ressort clairement que les hétérogénéités du bassin sont multiples et de tout ordre : géologique, minéralogique, géomorphologique, hydrologique, pédologique et phytosociologique. Mais il est à noter que ces disparités d'origine surtout morphogénétique s'organisent en fonction de la topographie. Cette organisation évolue sous l'effet de l'érosion éolienne et surtout hydrique en nappe, phénomène généralisé sur le vaste plan incliné que constitue la majeure partie du bassin. La figure 2 complémentaire de la précédente se rapporte à la surface du sol. Elle montre l'existence d'un microrelief qui reproduit à l'échelle de la rugosité superficielle, les différentes formes du paysage : microbuttes, microdépressions, replats, interfluves...

Le microrelief est aussi soumis aux effets de l'érosion éolienne et hydrique. Le schéma indique de façon explicite comment s'édifient et évoluent cette micromorphologie et met en évidence l'influence de la microtopographie dans les processus de redistribution hydrique.

En conclusion, pour tout ce qui a trait au bilan hydrique, le bassin de la Mare d'Oursi constitue un cadre d'une complexité et d'une hétérogénéité peu ordinaire. Fort heureusement, il existe une organisation du type toposéquentielle perceptible à différents niveaux. C'est sur cette base que se fonde la méthodologie utilisée pour l'échantillonnage du bassin, la localisation des sites d'étude, l'élaboration et implantation du dispositif de mesures, l'intégration et interprétation de celles-ci dans l'espace et le temps (cf. tableau 1).

12. Le dispositif expérimental

Il comprend :

- un dispositif dit stationnel pour l'ensemble du bassin (figure 3), de 30 à 40 sites de mesures.

- un dispositif parcellaire (figure 4), composé de neuf parcelles clôturées de 100 m x 100 m : deux en sable dunaire (Oursi AMs et Oursi Cdc),

trois en glacis argilo-sableux (Kouni-Kouni, Kolel glacis, station météorologique de Djalafanka), un en bas-fond (Windé-Tiuluki) et deux en pèdiments de texture grossière (Gountouré et Polaka).

Le dispositif stationnel a comme objectif l'estimation globale du bilan hydrique et de la production végétale annuels.

Le dispositif parcellaire est axé sur l'analyse du bilan hydrique et de la liaison biomasse-bilan hydrique à l'échelle décadaire.

13. Caractéristiques spécifiques aux sites et parcelles d'étude.

Les 30 à 40 sites du dispositif stationnel embrassent la quasi totalité des disparités physiques et chimiques des sols échantillonnant 14 des 23 groupements végétaux définis par TOUTAIN (1976).

Au tableau 2 illustré en partie par la figure 5, sont regroupées les principales caractéristiques des parcelles élémentaires du dispositif parcellaire. Elles sont interprétées en détail par SICOT en 1978.

S'agissant des propriétés influant sur les transferts hydriques, nous notons que :

- les sols sont généralement profonds, dépassant partout un mètre d'épaisseur (plus de 4 m dans l'ensemble dunaire),

- exception faite pour les milieux sableux, la texture limoneuse à argileuse est peu perméable d'autant plus que la structuration est massive et dense,

- celle-ci n'est pas améliorée par un taux de matière organique généralement très faible même dans les bas-fonds (l'accumulation se fait dans la mare et ses abords immédiats).

A la figure 6 sont représentées quelques caractéristiques hydrodynamiques des sols des parcelles étudiées. En milieux sableux, la porosité totale constitue véritablement le réservoir maximal pour l'air et l'eau. De 30 à 40 % du volume totale, elle est élevée mais la rétention hydrique d'origine texturale est faible et l'eau est facilement cessible. En milieux argileux, on observe que la rétention hydrique peut être nettement supérieure à la porosité, ce qui traduit l'effet du gonflement du matériau en fonction de son état hydrique. La capacité de rétention des sols de pèdiments grossiers est intermédiaire en raison de l'hétérogénéité de la composition texturale et structurale du milieu.

Les mesures de perméabilité sont regroupées au tableau 3.

Tableau 3 : La perméabilité des sols déterminées suivant les tests d'Hénin et de Pioget (cm/h).

Milieux	sableux	argileux	pédiments
Test d'Hénin	3,2 - 18,0	0,5 - 2,1	0,4 - 1,2
Test de Pioget	26,0 - 100,0	1,5 - 5,8	5,0 - 13,0

On note une certaine distorsion entre les déterminations, les valeurs découlant du Test de Pioget effectuées sur le terrain étant systématiquement supérieures aux valeurs obtenues au laboratoire par le Test d'Hénin. En tenant compte des imperfections spécifiques à chacun de ces tests, on peut dire que le Test de Pioget permet de situer la gamme de perméabilité du profil non perturbé sur le terrain tandis que le Test d'Hénin se rapporte à la perméabilité d'origine texturale du sol engorgé.

En résumé, en dehors des milieux sableux, la circulation de l'eau est difficile dans la plupart des profils pédologiques du bassin. Le réseau des fissures plus ou moins nombreuses, fines et profondes qu'on y trouve, joue un rôle primordial dans le transfert latéral de l'eau ou en profondeur.

II. METHODES ET MESURES

21. Méthodologie d'étude du cycle de l'eau et de l'établissement du bilan hydrique.

Le cycle de l'eau se résout en transferts hydriques entre les différents compartiments du continuum sol-plante-atmosphère. Ces compartiments qui font office de volants régulateurs des échanges sont variables en nombre et en dimension selon l'écosystème considéré. La figure 7 schématise la structuration du bassin par rapport aux différentes modalités du cycle de l'eau.

On distingue :

- un compartiment atmosphérique (1), point de départ des précipitations et d'arrivée de l'évaporation et de la transpiration,
- un compartiment édaphique (2), réservoir et transitaire pour l'eau qui joue un rôle important dans l'alimentation hydrique des végétaux,
- un compartiment végétal (3), pompe aspirant l'eau du sol, pour en rejeter la quasi totalité dans l'atmosphère, siège de processus biologiques concomitants aboutissant à la production de biomasse,
- et un compartiment d'eau libre (4) formé par les mares et cours d'eau plus ou moins permanents, qui servent d'accumulateur pour l'élément.

Les exemples qui suivent montre la spécificité de l'écosystème en fonction de l'importance relative de ces compartiments : écosystème de bas-fond (eau libre, sol, plante, atmosphère), écosystème de la mare (eau libre, plante, atmosphère), écosystème de sol nu (sol, atmosphère), écosystème normal (sol, plante, atmosphère).

211. Bilan hydrique annuel à petite échelle

Dans les sites de mesures de 3 à 4 km², on considère que toute l'eau infiltrée (pluie ou pluviométrie efficace) est totalement évaporée au cours de cycle annuel. Donc :

$$E = I = P \pm R$$

soit, si l'on considère K le coefficient de ruissellement ; $R = KP$:

$$E = I = (1 \pm K) I$$

Le signe - traduit les pertes d'eau par ruissellement dans le cas le plus général et le signe + les gains d'eau en bas-fonds.

212. Bilan hydrique décadaire à l'échelle parcellaire.

La réserve hydrique du sol peut exercer un effet tampon durant la période décadaire, emmagasinant de l'eau ou en cédant pour l'évaporation. Il est par suite nécessaire de s'intéresser au devenir de l'eau infiltrée en relevant les profils hydriques décadaires pour évaluer les fluctuations de la réserve hydrique du sol afin de séparer de l'évapotranspiration l'eau mise en réserve ou transitant (entrée et sortie)

dans le compartiment édaphique, par drainage ou remontées capillaires.

Le principe de base pour l'établissement du bilan hydrique décadair est l'égalité de la variation de la réserve hydrique du sol $AS = S(t_2) - S(t_1)$ d'une part et de la différence de flux d'entrée \varnothing_e (précipitations P ; gains d'eau par ruissellement, drainage latéral et remontées capillaires) et de sortie \varnothing_s (évapotranspiration, pertes d'eau par drainage latéral et vertical, (cf. organigramme de la figure 8), d'autre part.

Entre les instants t_1 et t_2 , le bilan s'établit comme suit :

$$AS = S(t_2) - S(t_1) = \left\{ \int_{t_1}^{t_2} (\varnothing_e - \varnothing_s) dt * \right\}_{t_1}^{t_2} d \varnothing dt$$

soit pour la décade i rapporté à la décade $i-1$

$$AS_i = S_i - S_{i-1} = P_i + R_i + D_i - ETR_i$$

$$\text{ou } ETR_i = P_i + R_i + D_i + AS_i = (1 + K_i) P_i + D_i + AS_i$$

où R_i , D_i et AS_i , valeurs algébriques sont les résultantes des gains et des pertes par ruissellement, drainage (latéral ascendant et descendant) et la fluctuation de la réserve hydrique du sol.

Les hypothèses simplificatrices pour l'établissement du bilan sont les suivantes :

- pour le drainage latéral, égalité des flux d'entrée et de sortie d'où une résultante nulle,

- pour le drainage vertical, flux profonds nuls ou négligeables à partir de la zone d'invariance des teneurs en eau.

22. Mesures effectuées

221. La pluviométrie

La pluie est mesurée à 1 m dans les parcelles agrobotaniques, 2 m dans un réseau de pluviomètres totalisateurs et au sol (pluviomètre snowdon à grille anti-rebonds), dans les bassins versants hydrologiques et certaines parcelles.

222. Le ruissellement

Le ruissellement superficiel est nul ou négligeable en milieux sableux où il est remplacé par un drainage oblique important en piémont sableux.

Dans les autres milieux, le ruissellement est mesuré par des mesures hydrologiques effectuées dans 7 bassins versants (cf. rapports hydrologiques). Les coefficients de ruissellement obtenus sont attribués aux sites et parcelles, similaires, quant aux caractéristiques édaphiques et végétales. Le ruissellement est évalué indirectement dans deux parcelles (Kolel piémont en milieu sableux, Kolel glacis en glacis argilo-limoneux), à partir des relevés de profils hydriques avant et après pluie qui permettent de quantifier l'eau infiltrée dans le profil.

On doit mentionner aussi l'étude expérimentale des phénomènes d'infiltration, de ruissellement et d'érosion sous pluies artificielles provoquées par un simulateur de pluies, étude dont la conduite a réuni agronomes, hydrologues et pédologues sur le terrain, et qui doit permettre l'analyse et la modélisation du ruissellement. Les résultats n'étant pas disponibles, il n'en sera pas question dans ce rapport.

223. La réserve hydrique du sol

Les fluctuations de la réserve hydrique du sol, nulles par hypothèse dans l'étude du bilan annuel à petite échelle, sont repérées dans le cas du bilan hydrique décadaire à l'échelle parcellaire par des relevés au moins décadaires de profils hydriques effectués par gravimétrie en surface (0-15 cm) et par neutronométrie de 15 en 15 cm, de 15 cm à 150-360 cm, dans le profil.

Le dispositif de mesures routinières comprend 5 à 6 tubes de sondage dans chaque parcelle. La précision instrumentale supérieure à 5 % est bonne à acceptable pour les mesures d'humidité et excellente pour les déterminations de réserve hydrique. L'hétérogénéité du milieu occasionne la dispersion des mesures intersites. La précision diminue jusqu'à 10-20 % en moyenne. A cet égard, il est à noter l'efficacité de la méthode neutronique qui stabilise entre relevés l'erreur due à l'hétérogénéité du milieu et permet de s'en abstraire pour calculer les fluctuations effectives de la réserve hydrique du sol.

224. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle ETP, est calculée par la formule de Penman pour la nappe d'eau libre (albedo 0,05) et la végétation (albedo 0,20). L'évapotranspiration réelle est estimée à partir du bilan hydrique. Compte tenu de la non-vérification de certaines hypothèses ou de certaines situations, les estimations peuvent être entachées

d'erreurs systématiques, en particulier de l'erreur commise en négligeant le drainage.

III. RESULTATS

31. Les termes du bilan hydrique

311. La pluviométrie

La pluviométrie est étudiée en détail en climatologie. Parmi les caractéristiques importantes pour le cycle de l'eau, on note :

- la hauteur pluviométrique annuelle moyenne de 1976 à 1980 est de 412 à Djalafanka, la station météorologique du bassin,
- elle est distribuée suivant une loi gamma tronquée assimilable à une loi log-normale (SICOT, GROUZIS 1981).

Tableau 4 : Paramètres des lois Pearson III et log-normales d'ajustement des pluies à Gorom-Gorom, Markoye et Oursi.

Station	loi	x	S	xo
Gorom-Gorom	Pearson III	8,935	31,806	0
Markoye	"	5,579	48,319	0
Oursi	"	7,202	39,085	0
Oursi	log-normale	0,253	413	0

x : paramètre de forme

s : paramètre d'échelle

xo : paramètre de position*

- il tombe annuellement en moyenne 42 averses,
- au moins les 2/3 sont inférieures à 10 mm,
- l'intensité moyenne de ces averses s'étale de 5 à 42 mm/h, avec des valeurs instantanées pouvant dépasser 120 mm/h en 5 minutes,
- les pluviomètres ordinaires (type Associations) sont inadaptés à la mesure de la pluie au-dessus du sol en raison des vents tourbillonnaires soufflant en rafales qui accompagnent les averses orageuses. Il tombe au niveau du sol en moyenne 33 % de pluie excédentaire par rapport à la hauteur pluviométrique mesurée à un mètre,

- la distribution spatiale et temporelle de la pluie est très hétérogène sur l'ensemble du bassin : le nombre de jours de pluies varie localement et il est courant d'enregistrer des écarts pluviométriques annuels de 100 à 200 mm d'un point à un autre du bassin. A l'échelle de la parcelle, les fluctuations peuvent atteindre 10 %.

312. Le ruissellement

L'alternative infiltration-ruissellement dépend en premier lieu des caractéristiques texturales et structurales du substrat qui confèrent sa perméabilité au profil. Des valeurs de perméabilité consignées au tableau 3, il ressort que :

- en milieu sableux, le sol sec est capable d'absorber des intensités 5 à 10 fois supérieures aux intensités pluviométriques maximales,

- en milieu argileux, le sol est déjà inapte à absorber les intensités de la gamme des valeurs moyennes,

- en milieu de pédiments grossiers, l'absorption édaphique est intermédiaire.

En conséquence, même en tenant compte de la diminution de la perméabilité sous l'influence de l'énergie cinétique libérée par les gouttes de pluie en conditions naturelles, le ruissellement est exceptionnel en milieu sableux alors qu'il est quasi obligatoire en milieu argileux et dans une moindre mesure en milieu de pédiments grossiers.

Le ruissellement peut être aggravé et intervenir même en milieu sableux à la suite de la détérioration des propriétés de la surface du sol (encroustement, disparition du tapis végétal, tassement) ou des horizons sous-jacents (compactage excessif). En second lieu intervient les caractéristiques de la pluie. L'analyse des données de ruissellement des études hydrologiques (cf. rapport CLAUDE et al.) résumé au tableau 5, montre que pour les trois bassins de Djalafanka, Kolel et Gountouré correspondant respectivement au milieu argileux des lithosols de la colline de Kolel et de pédiments grossiers, il existe une régression linéaire annuelle entre les lames d'eau ruisselées et les hauteurs des averses responsables. De même que les quantités d'eau écoulées, les coefficients de corrélations sont particulièrement élevés en glaciis argileux et en pédiments grossiers.

Les constantes de la régression peuvent différer significativement chaque année, sous l'influence conjuguée des caractéristiques spécifiques des bassins (topographie, caractéristiques édaphiques végétales...) et des modalités de la pluviosité. Cependant, bien que l'incidence de ces autres facteurs soit indéniable, les mesures effectuées ne les mettent pas nettement en évidence.

Le tableau 6 où sont comparées le coefficient de déterminations des liaisons lame ruisselée - hauteur pluviométrique d'une part, et lame ruisselée - hauteur et intensité pluviométrique d'autre part, montre que l'introduction de l'intensité de la pluie n'influence pas significativement la régression précédente.

Tableau 6 : Comparaison du coefficient de détermination R^2 des liaisons lame d'eau ruisselée - hauteur pluviométrique et lame d'eau ruisselée - hauteur et intensité pluviométrique dans le bassin versant de Djalafanka.

Année	R = f (P)	R = f (P,I)
1977	0,87	0,94
1978	0,93	0,90
1979	0,93	0,93
1980	0,92	0,93
1981	0,76	0,85
Moyenne	0,90	0,86

La hauteur pluviométrique reste le facteur déterminant du ruissellement, particulièrement en milieu argileux où l'on peut véritablement établir une régression pluriannuelle ruissellement, hauteur pluviométrique.

A l'échelle du bassin, une régression linéaire pluriannuelle existe entre le ruissellement et la pluviométrie annuelle. Elle s'exprime par l'équation :

$$R = 0,40 P - 77,4 \quad r = 0,95$$

Au niveau des parcelles, les relevés de profils hydriques reflètent les situations topographiques locales (pente, impluvium, bas-fond...) et les redistributions hydriques intersites dues à la microtopographie. En l'absence des données intégrées recueillies sous pluies simulées, on se contente dans l'immédiat des mesures découlant de l'étude des bassins versants similaires.

313. Le drainage

Etant donné le relief en cuvette très accentué du bassin, il existe un important flux de drainage oblique d'ensemble qui se dirige vers la mare. Celui-ci peut se décomposer en une composante verticale et une horizontale ou latérale. Le flux de drainage vertical ou latéral ne sont pas mesurés en raison de difficultés quasiment insurmontables pour l'exécution des mesures : lysimètres de plus de 3 m de profondeur en milieu aride, décrochement et décollement de tensiomètres par dessèchement et retraction du substrat, dérivé thermique des psychromètres, substrat concrétionné, écoulement hypodermique. On les considère comme étant nuls en première approximation et d'après les hypothèses diverses conditionnant l'établissement du bilan hydrique. On peut néanmoins en avoir une estimation et vérifier tout au moins la véracité de l'hypothèse de la nullité des flux de drainage profond qui sont données par application des équations de drainage d'Hénin, valables à l'échelle mondiale, d'après l'auteur. :

$$D = \frac{\gamma'P3}{1 + \gamma'P2} \quad \gamma = a\gamma \quad \gamma = \frac{1}{0,15T - 0,13}$$

D et P représentent le drainage et la pluviométrie exprimés en m, et T la température en degrés Celsius. La constante a varie en fonction de la texture du terrain. On a :

limon : a = 1, argiles : a = 0,5, sables : a = 2.

Sur la base d'une température moyenne de 31,5°C pendant l'hivernage, le tableau 7 donne l'estimation de drainage annuel selon la texture du terrain et en fonction de la pluviosité.

Le drainage est effectivement négligeable en milieux argileux, argilo-limoneux et même limoneux, la pluviométrie efficace ne dépassant pas de surcroît les 300 mm en raison du ruissellement, même en tenant compte de l'excédent hydrique au niveau du sol.

Tableau 7 : Estimation du drainage annuel (mm) selon la texture du terrain et en fonction de la pluviométrie (mm)

Texture	Argile		Argile-limon		Limon		Sable	
	D	% P	D	% P	D	% P	D	% P
200	0,3	0,4	1,3	0,6	1,7	0,9	3,4	1,7
300	2,9	1,0	4,3	1,4	5,8	1,9	11,3	3,8
400	6,8	1,7	10,2	2,5	13,5	3,4	26,0	6,5
500	13,2	2,7	19,6	3,9	25,8	5,2	49,1	9,8

Par contre 300-500 mm mesurés à 1 m du sol correspondent à 400-675 mm d'eau infiltrée en milieu sableux et c'est 26 à 112 mm d'eau, soit 7 à 17 % de la pluie au sol qui sont susceptibles de drainer en profondeur. Par suite, à 50-360 cm de profondeur, nous le verrons ci-après, le drainage vertical n'est pas toujours nul en milieu sableux.

Quant au drainage latéral, la résultante des entrées et sorties seraient nulle si le flux était continu et uniforme au moins durant la période de mesure. Tel n'est pas le cas. La distribution discontinue et hétérogène des pluies engendre des flux de drainage latéral discontinus et variables. Chaque période pluvieuse, chaque averse donnant lieu à drainage latéral est à l'origine d'une onde de drainage plus ou moins importante en amont qui arrive au site de mesure après un temps de latence plus ou moins long, et peut occasionner des erreurs entre séries de mesures.

Il s'en suit qu'en dépit des difficultés des manipulations, il est impératif en zone sahélienne et tout spécialement en milieux sableux, ou à écoulement hypodermique, de mesurer les flux de drainage afin d'éliminer de l'évaporation, l'erreur systématique due au drainage.

314. Comportement hydrique des sols du bassin : humidité, réserve, transferts hydriques.

3141. Comportement hydrique des sols

Les observations et données recueillies permettent de discriminer quatre milieux types différant par le comportement hydrique des sols.

a) Les milieux rocheux ou de lithosols

Le stockage de l'eau sur place y est très aléatoire. L'intérêt majeur de ces milieux est d'être le siège de l'infiltration de quantités importantes d'eau dans les fissures et infractuosités, eau à l'origine de flux de drainage oblique ou de ruissellement hypodermique en zone de piémont ou de transit.

b) Les milieux sableux

Dans ces milieux (fig. 11), la perméabilité du substrat permet l'absorption de toute l'eau des précipitations sans ruissellement superficiel. Les phénomènes hydriques d'infiltration, de ressuyage et de dessèchement s'y déroulent suivant les processus classiques décrits par FEODOROFF (1962, 1965).

Des gains ou des pertes hydriques peuvent survenir dans le profil par remontées capillaires, drainage profond et latéral.

c) Les milieux argilo-limoneux

L'infiltration d'origine texturale y est lente et peu profonde, jusqu'à 15 à 30 cm en moyenne, 45-60 cm sous immersion prolongée en impluvium ou bas-fonds (fig. 12). Rapidement l'argile engorgée en surface laisse ruisseler jusqu'à 50 % de l'eau des précipitations. Les macropores et fentes de retrait, se comportant comme la surface du sol, augmentent modestement la pénétration de l'eau. Le front d'humectation est une surface irrégulière prolongée par un réseau de conduite engorgés, entourant des monolithes totalement secs. Comme l'infiltration, le dessèchement est souvent bloqué par la formation d'une croûte superficielle. Les fluctuations de l'humidité des fissures, intégrées dans la sphère d'influence de la sonde à neutrons, peuvent induire en erreur, laissant croire à l'existence de flux profonds intéressant l'ensemble du profil. Le drainage latéral est possible au travers du réseau de fissures.

d) Les milieux complexes à textures grossières

La couche superficielle des pédiments et zones concrétionnées qui constituent ces milieux est généralement battante et imperméable. Mais cette barrière traversée, par infiltration normale ou par les nombreuses fissures et galeries de termites, l'eau rencontre un milieu à matrice grossière, très poreux où elle s'infiltré jusqu'à la roche-mère. Là elle s'accumule dans les excavations ou circule sur la surface de contact. Le profil hydrique y est très hétérogène, le sol pouvant s'humecter, soit uniquement par l'infiltration à partir de la surface, soit par remontées capillaires (fig. 13).

Le tableau 8 résume le comportement hydrique de ces différents milieux en mettant l'accent sur les modalités de la circulation de l'eau dans les profils.

Tableau 8 : Modalités de la circulation de l'eau en différents milieux.

Phénomènes	Infiltration	Ruissellement superficiel	Drainage diffus	Ecoulement hypodermique
Milieux sableux	+++	0	++	-
Milieux concrétionnés	+	++	+	+++
Milieux argileux	+	+++	-	0

0 nul - très faible + faible à moyenne ++ fort +++ très fort

3142. Humidité, réserve et transferts hydriques dans les sols du bassin.

Durant les longs mois de saison sèche, les sols sont intensément desséchés, bien en deçà du point de flétrissement, surtout dans les horizons superficiels (fig. 11).

Le profil se rehumecte avec les pluies. L'humidité et la réserve hydrique des sols sont très hétérogènes (fig. 11 à 13) et la recharge du profil se fait avec d'importantes fluctuations en rapport avec l'occurrence des précipitations, leur hauteur et redistribution locale et

les transferts hydriques (fig. 14 à 16).

Ceux-ci sont très variables en modalités (évaporation, drainage, vitesse de transfert, épaisseur de sol concerné), dans l'espace comme dans le temps, même en milieu sableux où la circulation et la cessibilité de l'eau ne posent pas de problème. Ainsi, la figure 17 montre que l'averse de 45,6 mm du 13/06/77 a occasionné dans le sol sablo-argileux du piémont de Kolel l'infiltration de 47,0 mm d'eau sur 60-75 cm autour du tube 1, et 16,1 sur 30-45 cm autour du tube 2. Respectivement 22,1 mm et 5,5 mm ont été évapotranspirés au 20/06/77.

315. L'évapotranspiration

En hivernage comme en saison sèche, l'offre par l'eau des précipitations est inférieure à la demande de l'évapotranspiration. Les différents écosystèmes de la zone fonctionnent normalement en régime d'évapotranspiration réelle ETR. Même durant la phase de levée de la végétation où l'évapotranspiration réelle maximale est peu élevée, l'irrégularité des premières pluies est cause de déficits hydriques souvent insupportables pour les jeunes plantes et qui entraînent leur fanaison jusqu'à la mort. Généralement, plusieurs germinations se succèdent avant l'installation définitive du tapis végétal. En plein hivernage, en dehors des bas-fonds ou des sites à écoulement hypodermique qui reçoivent des suppléments hydriques advectifs, rares sont les périodes où l'ETR est totalement satisfaite (cf. figure 18).

A cette variabilité temporelle de l'ETR induite par la distribution des précipitations et l'évolution de l'activité de la végétation s'ajoute une variabilité spatiale ayant pour origine la redistribution superficielle de l'eau des pluies et les fluctuations spatiales de l'infiltration, du rapport sol nu, couvert végétal et de l'activité évapotranspirante qui en résulte. Les valeurs mesurées d'ETR en situation naturelle sont par suite très hétérogènes, dépendent très sensiblement des conditions édaphiques et végétales dont on connaît la variabilité. La représentativité des résultats posent de nombreux problèmes théoriques et techniques et doit être basée sur un échantillonnage de mesures aussi nombreuses que possible. La séparation des composantes évaporation et transpiration est de ce fait aléatoire, tributaire des conditions édaphiques et végétales particulières des sites de mesures.

A moins de résulter d'un plan d'expérimentation rigoureux et précis, les valeurs recueillies seront ou partielles ou artificielles, mais en tout état de cause sans rapport avec la réalité.

32. Le bilan hydrique des sols

321. Le bilan hydrique annuel

L'établissement et la modélisation du bilan hydrique annuel ne posent pas de problème à partir des relations explicités pour les différents termes. Puisque $AS = 0$, on a $ETR = P - R - D$ avec

$$D = \frac{\gamma' P^3}{1 + \gamma' P^2} \quad \gamma' = a\gamma \quad \gamma = 1/(0,15 T - 0,13)$$

D est calculé à partir de la pluie mesurée au sol tandis que R est déduit de la pluviométrie à 1 m.

3211. Bilan hydrique annuel en milieux sableux

$R = 0$. Le tableau 9 donne les valeurs fréquentielles des termes du bilan.

Tableau 9 : Bilan hydrique annuel en milieu sableux

F	1/F	P	Ps	D	ETR	F	1/F	P	Ps	D	ETR
0,01	100	218	294	11	284	0,50	2	412	556	66	490
0,02	50	236	319	13	305	0,80	5	512	691	119	572
0,05	20	266	359	19	340	0,90	10	576	778	162	616
0,10	10	294	397	25	371	0,95	20	632	853	205	648
0,20	5	330	446	35	410	0,98	50	692	934	257	677

P, Ps, D, ETR : pluviométrie à 1 m, au sol, drainage profond, ETR en mm, F = fréquence, 1/F = recurence en année.

De la fréquence 0,01 à 0,98, la pluviométrie à 1 m, et au sol varient respectivement de 218 à 692 mm et de 294 à 934 mm, le drainage varie de 11 à 257 mm et l'ETR de 284 à 677 mm. On note que le drainage passe de 4 % à 28 % et qu'inversement l'ETR diminue de 96 % à 72 % de la pluie au sol. Dans la gamme des pluviométries enregistrées, le drainage avoisine 10 %.

3212. bilan hydrique annuel en milieux argileux

R et P sont liés par la relation globale.

$R = 0,603 P - 2,38$ (cf. tableau 5).

Dans l'équation de D, $a = 0,5$

Le tableau 10 donne les valeurs fréquentielles des différents termes du bilan.

Tableau 10 : Bilan hydrique annuel en milieux argileux

F	1/F	P	Ps	R	Pe	D	ETR
0,01	100	218	294	129	165	0	165
0,02	50	236	319	140	179	1	178
0,05	20	266	359	158	201	1	200
0,10	10	294	397	175	222	1	221
0,20	5	330	446	197	249	2	247
0,50	2	412	556	246	310	3	307
0,80	5	512	691	306	385	6	379
0,90	10	576	778	345	433	9	424
0,95	20	632	853	379	474	11	463
0,98	50	692	934	415	519	15	504

Pe = pluie efficace ou pluie infiltrée

De la fréquence 0,01 à 0,98, la pluviométrie à 1 m et au sol, le ruissellement, l'eau infiltrée, le drainage et l'ETR varient respectivement de 218 à 692 mm, 294 à 934 mm, 129 à 415 mm, 165 à 519 mm, 0 à 15 mm et 165 à 504 mm. Le ruissellement réel reste fixé à 45 % de la pluie au sol, le drainage profond est négligeable dans l'absolu et l'ETR est de 55 %

3213. Bilan hydrique annuel dans le piémont de Kolel, milieu sablo-argileux

$R = 0,335 P - 2,90$

$a = 1,25$

Le tableau 11 donne les valeurs fréquentielles des différents termes du bilan.

Tableau 11 : Bilan hydrique annuel en milieux sablo-argileux

F	1/F	P	Ps	R	Pe	D	ETR
0,01	100	218	294	70	224	3	221
0,02	50	236	319	76	243	4	239
0,05	20	266	359	86	273	5	268
0,10	10	294	397	96	301	7	294
0,20	5	330	446	108	338	10	327
0,50	2	412	556	135	421	19	402
0,80	5	512	691	169	522	36	486
0,90	10	576	778	190	588	50	537
0,95	20	632	853	209	644	65	579
0,98	50	692	934	229	705	84	621

De la fréquence 0,01 à 0,98, la pluviométrie à 1 m et au sol, le ruissellement, l'eau infiltrée, le drainage et l'ETR varient respectivement de 218 à 692 mm, 294 à 934 mm, 70 à 229 mm, 3 à 84 mm et 221 à 621 mm. Le ruissellement est de 24-25 % de la pluie au sol, le drainage augmente de 1 à 9 % et l'ETR diminue de 75 à 66 %.

3214. Bilan hydrique annuel dans les sols concrétionnés ou pédiments grossiers.

$$R = 0,526 P - 4,06 \quad a \neq 0,75$$

Tableau 12 : Bilan hydrique annuel en milieux concrétionnés

F	1/F	P	Ps	R	Pe	D	ETR
0,01	100	218	294	111	183	1	183
0,02	50	236	319	120	199	1	197
0,05	20	266	359	136	223	2	221
0,10	10	294	397	151	246	2	244
0,20	5	330	446	170	276	3	273
0,50	2	412	556	213	344	6	337
0,80	5	512	691	265	426	12	414
0,90	10	576	778	299	479	17	461
0,95	20	632	853	328	525	23	502
0,98	50	692	934	360	574	29	545

De la fréquence 0,01 à 0,98, le ruissellement, la pluie efficace, le drainage et l'ETR varient respectivement de 111 à 368 mm, 1 à 29 mm, 183 à 574 mm et 183 à 545 mm. Le ruissellement est de 38-39 %, le drainage local négligeable de 0-3 % et l'ETR varie de 62 à 58 % de la pluie au sol.

3215. Bilan hydrique annuel pour l'ensemble du bassin

$$R = 0,397 P - 77,4 \quad a = 1,036$$

Tableau 13 : Bilan hydrique annuel pour l'ensemble du bassin

F	1/F	P	Ps	R	Pe	D	ETR
0,01	100	218	294	9	285	6	279
0,02	50	236	319	16	302	7	295
0,05	20	266	359	28	331	10	321
0,10	10	294	397	39	358	12	346
0,20	5	330	446	54	392	16	376
0,50	2	412	556	86	470	27	443
0,80	5	512	691	126	565	45	520
0,90	10	576	778	151	626	60	566
0,95	20	632	853	173	680	76	604
0,98	50	692	934	197	737	95	642

De la fréquence 0,01 à 0,98, le ruissellement, la pluie efficace, le drainage et l'ETR varient respectivement de 9 à 197 mm, 285 à 737 mm, 6 à 95 mm et 279 à 642 mm. Le ruissellement augmente de 3 à 21 %, le drainage de 2 à 10 % et l'ETR diminue de 95 à 69 %.

Pour la pluviométrie moyenne des cinq années d'étude, soit 412 mm pour la mesure à 1 mm du sol et 556 mm au sol, le ruissellement représente 15 %, le drainage profond 5 % et l'ETR 80 % de la pluviosité, pour l'ensemble du bassin.

Remarques

L'arrêt de l'activité végétale est généralement fixée vers la fin du mois de septembre, le cycle phénologique réglé par la photopériode s'arrêtant même en absence d'épuisement du stock d'eau du sol

et de séchage prolongée. En conséquence, le bilan hydrique durant le cycle végétatif s'établit en négligeant les pluies tardives survenant après la 3^{ème} décade de septembre. Elles arrivent alors que la majeure partie de la strate herbacée est morte et les repousses qu'elles occasionnent, sont pratiquement négligeables.

En restant toujours dans les conditions susmentionnées pour le bilan annuel (évaporation de toute l'eau des précipitations), l'équation du bilan hydrique en bas-fond s'écrit :

$$ETR = P + R + D$$

R représente l'eau collectée sur l'aire du bassin versant. Elle peut être diminuée des éventuelles sorties à l'exutoire qu'il est nécessaire de mesurer. Il en résulte que sur le plan du bilan hydrique, chaque bas-fond est un cas particulier.

322. Le bilan hydrique décadaire

Les relations paramétriques décrites ci-dessus intègrent les différents phénomènes du cycle annuel de l'eau sur des sites de 2 à 4 km² de surface ou l'ensemble du bassin. Au niveau des parcelles de 1 ha ou des tubes de mesure et à l'échelle décadaire, le niveau de la réserve hydrique du sol varie en fonction de l'évaporation et suivant l'occurrence des pluies par rapport aux mesures.

Par ailleurs, les modalités de déroulement des différentes phases du cycle et l'importance réciproque des termes peuvent varier suivant les conditions édaphiques et végétales locales. La redistribution des pluies suivant le microrelief et le recouvrement végétal, la dynamique de l'évapotranspiration suivant le recouvrement et la biologie de cette même végétation (surface foliaire, fonctionnement photo-synthétique en C₃ ou C₄...) sont responsables de telles modifications qui aggravent l'hétérogénéité des mesures. Une analyse approfondie doublée d'un effort de synthèse s'imposent donc à ce niveau pour l'interprétation et la modélisation des résultats. Ce travail ébauché ne peut être exhaustif actuellement en raison de l'indisponibilité des données de ruissellement sous pluies artificielles et de l'imprécision quant à la quantification des flux de drainage. Les remarques qui suivent, illustrées par les figures 19 et 20, précisent les faits et sont destinées à servir des fondements à la modélisation des phénomènes.

- les premières pluies pénètrent peu dans le sol et sont rapidement et totalement évaporées,

- l'hypothèse simplificative selon laquelle les horizons supérieurs sont d'abord amenés à la capacité au champ, avant humectation des horizons inférieurs est mal adaptée aux sols du bassin. Malgré la possibilité d'engorgement hydrique superficiel du profil, l'humidification des horizons inférieurs se fait pratiquement conjointement à celle des horizons supérieurs au travers de fissures très répandues dans ces types de sol,

- les premières pluies ont surtout pour effet de rompre la croûte superficielle du sol et de rétablir la continuité du film d'eau d'humectation et de dessèchement,

- le drainage non mesuré sera estimé à partir des rapports dégagés des précédents tableaux,

- le passage de l'onde de drainage peut être enregistré par les relevés de profils hydriques : entrées ou sorties d'eau disproportionnées par rapport aux précipitations et/ou à l'évapotranspiration potentielle, faussant le calcul de l'ETR.

Il est alors conseillé de calculer l'ETR moyenne déterminée sur plusieurs décades et d'assimiler l'ETR à l'ETP en périodes d'excédent hydrique incontrôlable. Cette dernière remarque s'applique spécialement aux bas-fonds inondés.

- les problèmes liés aux remontées capillaires (quantités, périodes de manifestation) ne sont pas encore résolus.

Il est pratiquement impossible d'établir le bilan hydrique des milieux à écoulement hypodermique,

- l'évaporation des horizons de profondeur (en dessous de 150 cm) n'est pas négligeable, en milieux sableux surtout.

DISCUSSION et CONCLUSION

Durant les trois à quatre mois d'hivernage, les différentes phases du cycle de l'eau se déroulent dans la zone sahélienne avec une intensité et une hétérogénéité telle qu'aucun terme du bilan ne peut pratiquement pas être négligé dans les différents milieux. Les études dans ce domaine requièrent donc pour être exhaustives, un matériel pléthorique et sophistiqué pour la détermination d'un grand nombre de variables et un personnel nombreux pour exécuter un grand nombre de répétitions de mesures.

De telles études sont assez lourdes à supporter financièrement et difficiles à exécuter sur le terrain, si bien que les objectifs sont très vite limités et que diverses hypothèses simplificatrices viennent diminuer le nombre des variables mesurées.

Ne faisant pas exception à cette règle, l'étude du bilan hydrique dans le bassin de la Mare d'Oursi était de type finalisé ayant pour objectif final l'élaboration d'un modèle de production primaire, c'est à dire d'explicitier l'incidence du bilan hydrique sur la croissance végétale.

Moyennant quelques hypothèses, le bilan hydrique a pu être dressé dans un tel contexte et l'évapotranspiration réelle calculée pour être mise en parallèle avec la production de biomasse (voir ci-après). Ce travail terminé, il est à noter que l'étude est à peine ébauchée dans certains domaines et que l'analyse de certains phénomènes est à approfondir. Il s'agit tout spécialement de l'étude des phénomènes hydriques en milieux argileux où le gonflement du matériau gêne considérablement les déterminations et l'interprétation des faits et du drainage dans toutes ses formes (drainage latéral, remontées capillaires, écoulement hypodermique) qui n'a pu être traité faute de disposer de matériels de mesures appropriés, matériels dont l'usage est par ailleurs inadapté à la zone sahélienne (dérivé thermique des psychromètres, perte de contact des bougies poreuses des tensiomètres par retrait du matériau ou au contraire obturation des pores à la suite de son gonflement...) et qu'il faut mettre au point.

ANNEXE

Tableau 1 - REPRESENTATIVITE DES MESURES HYDROPEDOLOGIQUES

NIVEAU DE L'ECHELLE SPATIALE			MESURES HYDROPEDOLOGIQUES
	Physiques	végétales	
Discontinuités élémentaires dm ² - m ²	rugosité : microbuttes microdépressions... fissuration pièges à graines	faciès de groupe- ment végétal (définition GROUZIS) - plages nues, couvertes	- site stratifié de mesures neutro- niques microbutte microdépression site stratifié de prélèvements gravi- métriques : microbutte, microdépression - pluviomètre journalier pluviomètre totalisateur
Intégration			paramètres de stratification micro- morphologiques phytosociologiques
Parcelles de 100m x 100m Dispositif parcellaire	- unité géomorphologique - unité pédologique - caractéristiques texturales situation topographique	groupement végétal, (définition TOUTAIN)	5-6 tube de mesures neutroniques 8 prélèvements gravimétriques 1 pluviomètre journalier 1 pluviomètre totalisateur
Intégration			paramètres de stratification morphologiques phytosociologiques
site de mesures "à petites échelles" Dispositif stationnel 2 - 4 km ²	- idem -	- idem -	30-40 notations de microrelief (cf. pré- lèvements de biomasse épigée) - pluviométrie ponctuelle ou d'après réseau d'isohyètes - ruissellement sur bassin versant local ou similaire
Intégration à l'en- semble du bassin 60 000 ha	complexe d'unités morphogénétiques	complexe de groupe- ments végétaux	paramètres de stratification phytosociologiques

Tableau: 2 CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS DE LA MARE D'OURSIS

STATIONS		Dunes AMs, Cdc	Kolel piemont	Gountouré	Kouni - kouni	Bus kolel	Winde - Tiuluki
Groupements végétaux		AMs, Cde C	C ep C sd	Asc, Ase Asg	Sgl	Sgr	Spl
Caractéristiques		Sols brun-rouge	Sols ferrugineux	Tropicaux	Sols bruns subarides modaux		Sols bruns subarides vertiques
Grenulométriques	Argile (% MS)	8,7 - 3,1	3,5 - 17,4	9,2 - 34,6	33,2 - 3,6	33,5 - 36,4	37,2 - 47,6
	Kaolinite (% d'argile)				11 - 20	10 - 27	47 - 61
	Montmorillonite (% d'argile)				80 - 89	73 - 90	31 - 51
	Beidellite (")				0,10 - 0,6	0,17 - 0,6	0 - 0,47
	Illite (")				0	0	0 - 7
	Limon fin (% MS)	2,9 - 0,1	1,9 - 5,6	2,5 - 6,9	9,5 - 16,5	12,7 - 8,0	9,1 - 12,7
	Limon grossier (% MS)	1,2 - 0,1	0,7 - 3,3	2,5 - 0,8	3,3 - 7,1	3,0 - 8,3	2,0 - 5,1
	Sable fin (% MS)	54,2 - 60,4	48 - 35,4	46,7 - 15,4	26,3 - 27,4	23,2 - 8,0	16,1 - 27,9
	Sable grossier (% MS)	27,5 - 46,0	47,4 - 36,3	36,1 - 36,7	21,0 - 10,4	18,8 - 53,6	13,6 - 22,5
	Matière organique totale (% MS)	0,2 - 0,1	0,4 - 0,3	0,4		0,7 - 0,3	1,1
Organo-minérales	Carbone totale (% MS)	1,24 - 0,64	2,36 - 2,0	2,08		3,82 - 1,62	6,3 -
	Azote total (% MS)	0,14 - 0,04	2,36 - 0,20	0,14		0,24 - 0,1	0,58 -
	C/N	8,9 - 16,0	9,1 - 10,0	14,9		-	-
	Taux d'humidification (%)	31,9 - 35,9	19,9 - 40,5	28,4		15,9 - 10,1	10,9 -
	P ₂ O ₅ assimilable (% MS)	-	0,0 - 0,06				
	pH (eau)	6,2 - 6,8	6,9 - 7,5	6,6 - 7,4	7,6 - 8,7	7,5 - 9,5	6,9 - 8,6
	Somme des bases échangeables (meq % MS)	0,58 - 3,28	2,11 - 5,69	2,58 - 9,71	18,61 - 29,63	3,88 - 18,66	5,66 - 18,66
	Capacité d'échange (meq % MS)	4,30 - 3,28	2,32 - 4,73	4,29 - 9,27	12,80 - 30,27	3,36 - 18,24	13,93 - 18,77
	Taux de saturation (%)	33 - 76	80 - 100	80 - 100	100	88 - 100	32 - 100
	Hydro-dynamiques	Densité cm ³ / cm ³	1,57 - 1,65	1,48 - 1,60	1,54 - 2,15	1,50 - 1,75	1,59 - 1,90
Porosité totale (% volume)		33,1 - 36,8	32,0 - 35,5	24,5 - 32,3	18,6 - 31,4	19,2 - 32,7	25,5 - 18,3
Indice d'instabilité structurale		0,5 -	0,3 - 0,5	3,0 -	4,9 - 8,0	5,4 - 5,6	4,4 - 4,7
Perméabilité (cm/h)		4,7 - 18,0	3,2 - 9,6	0,4 - 1,2	2,1 - 0,8	0,5 - 1,5	
Humidité à pF 2,5 (% MS)		4,5 - 1,6	2,9 - 9,6	7,2 - 16,7	16,3 - 31,4	21,6 - 9,4	
" " 3,0 (")		3,3 - 0,9	2,0 - 6,6	5,0 - 14,2	14,0 - 24,8	15,5 - 6,9	17,5 - 21,2
" " 4,2 (")	2,9 - 0,5	1,7 - 4,4	2,7 - 10,2	4,4 - 16,4	11,0 - 13,9	11,0 - 15,6	

Fig. 1 SCHEMA D'ORGANISATION MACROSCOPIQUE DU BASSIN DE LA MARE D'OURSIS SUIVANT UNE TOPOSEQUENCE

SUD

NORD

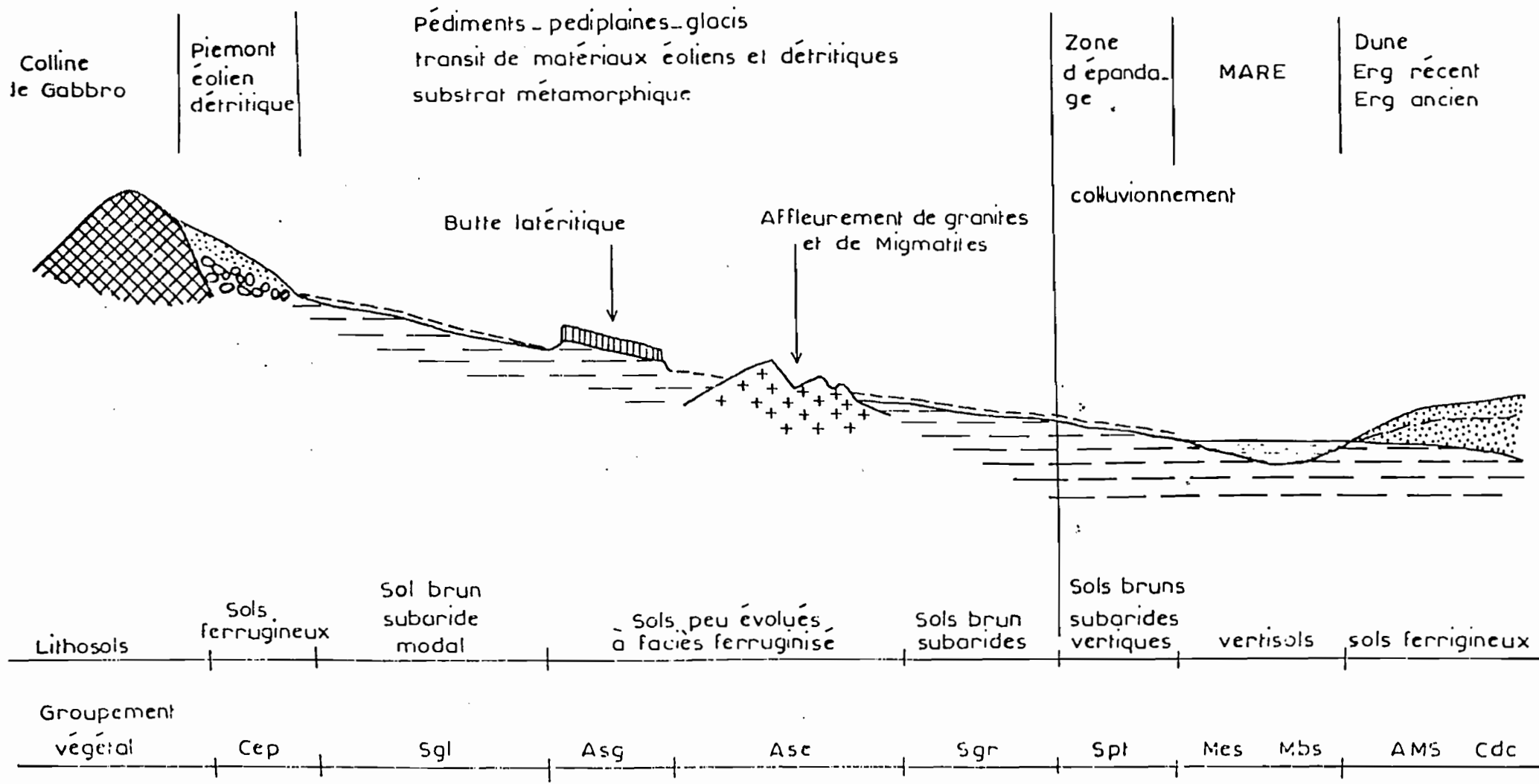


Fig. 2 SCHEMA EVOLUTIF DU MICRORELIEF

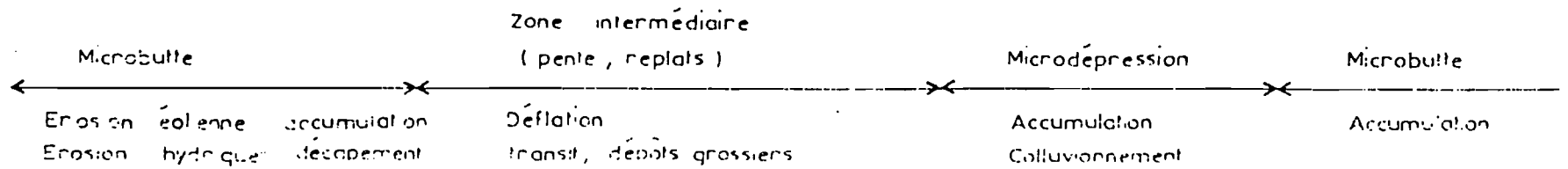
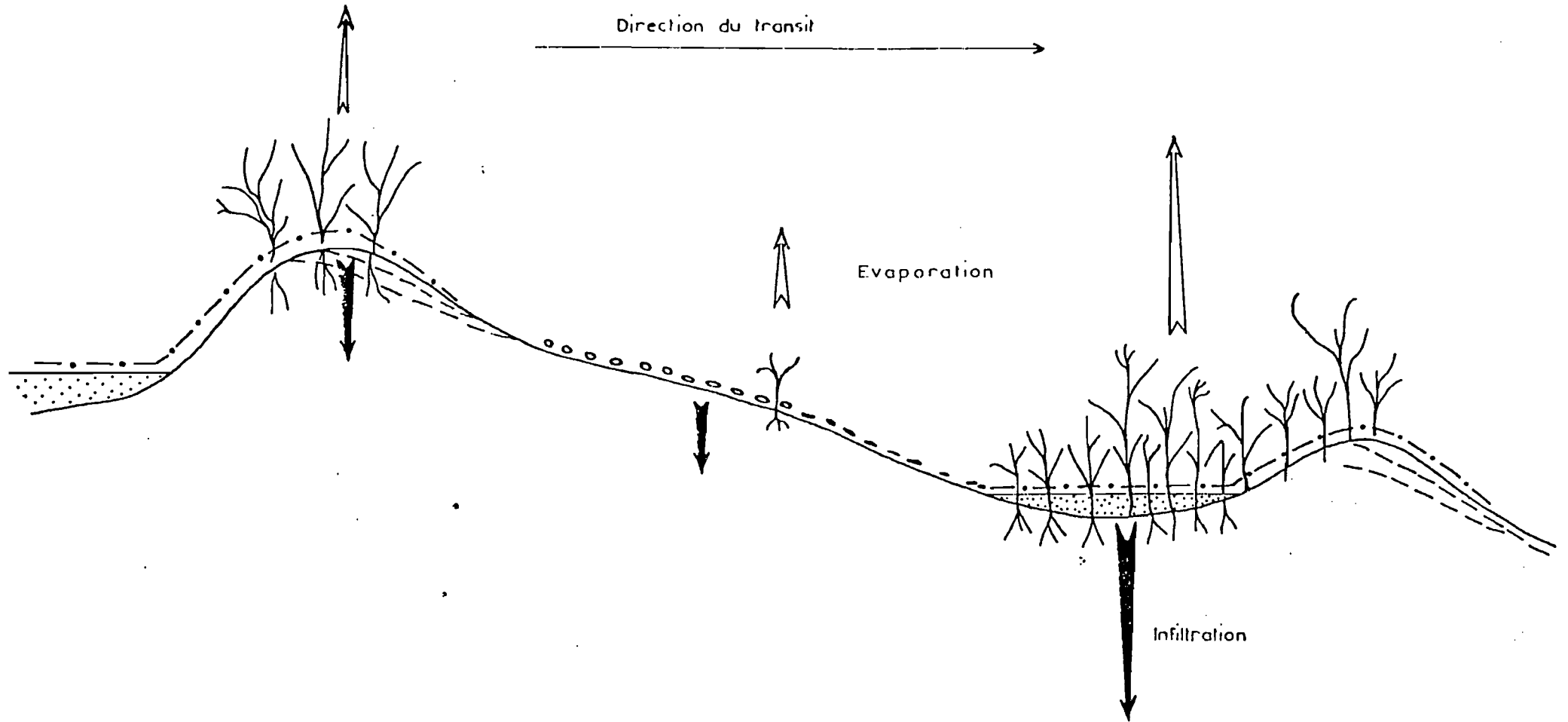


Fig. 3 DISPOSITIF STATIONNEL

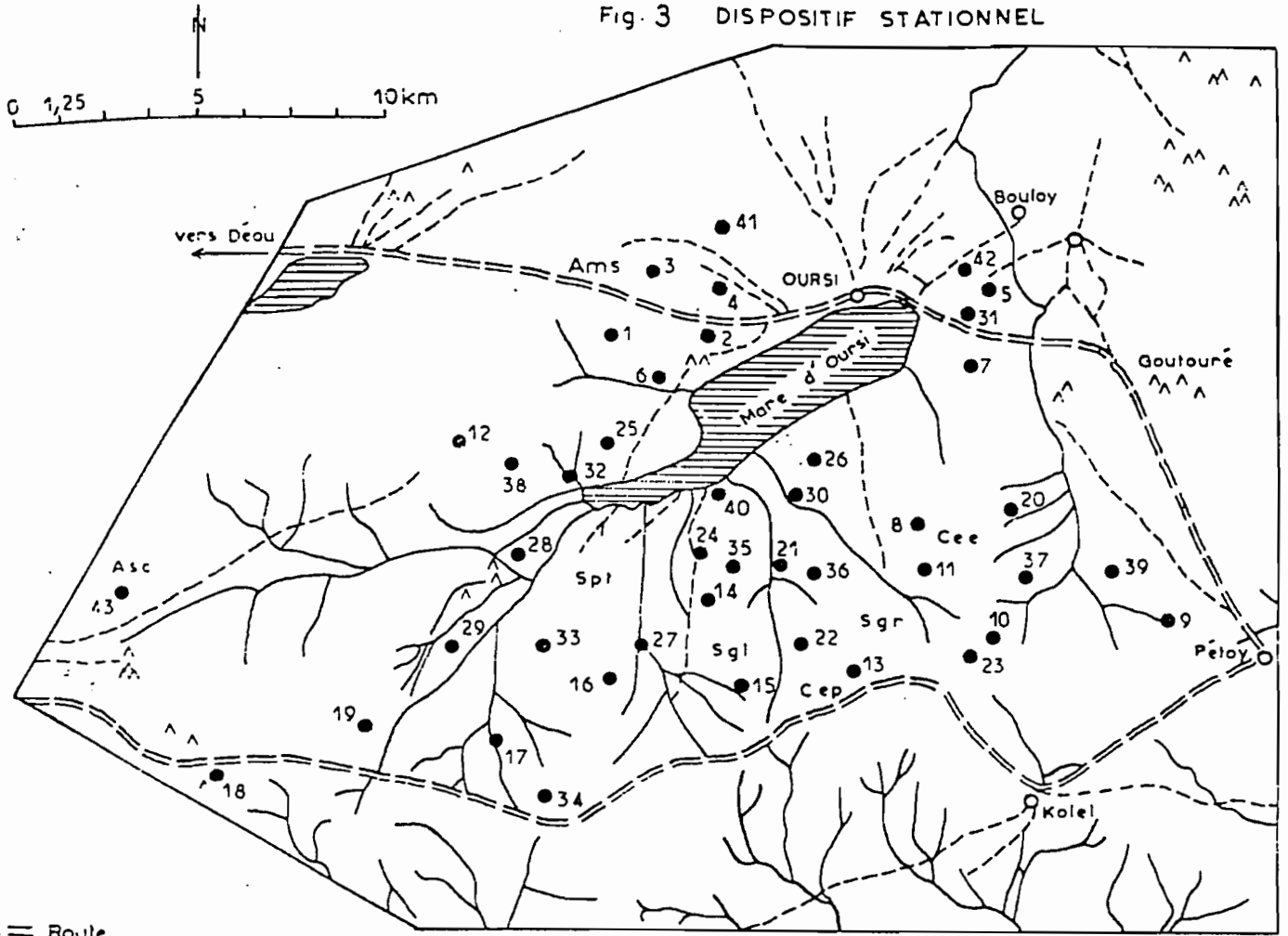


Fig 4 DISPOSITIF PARCELLAIRE

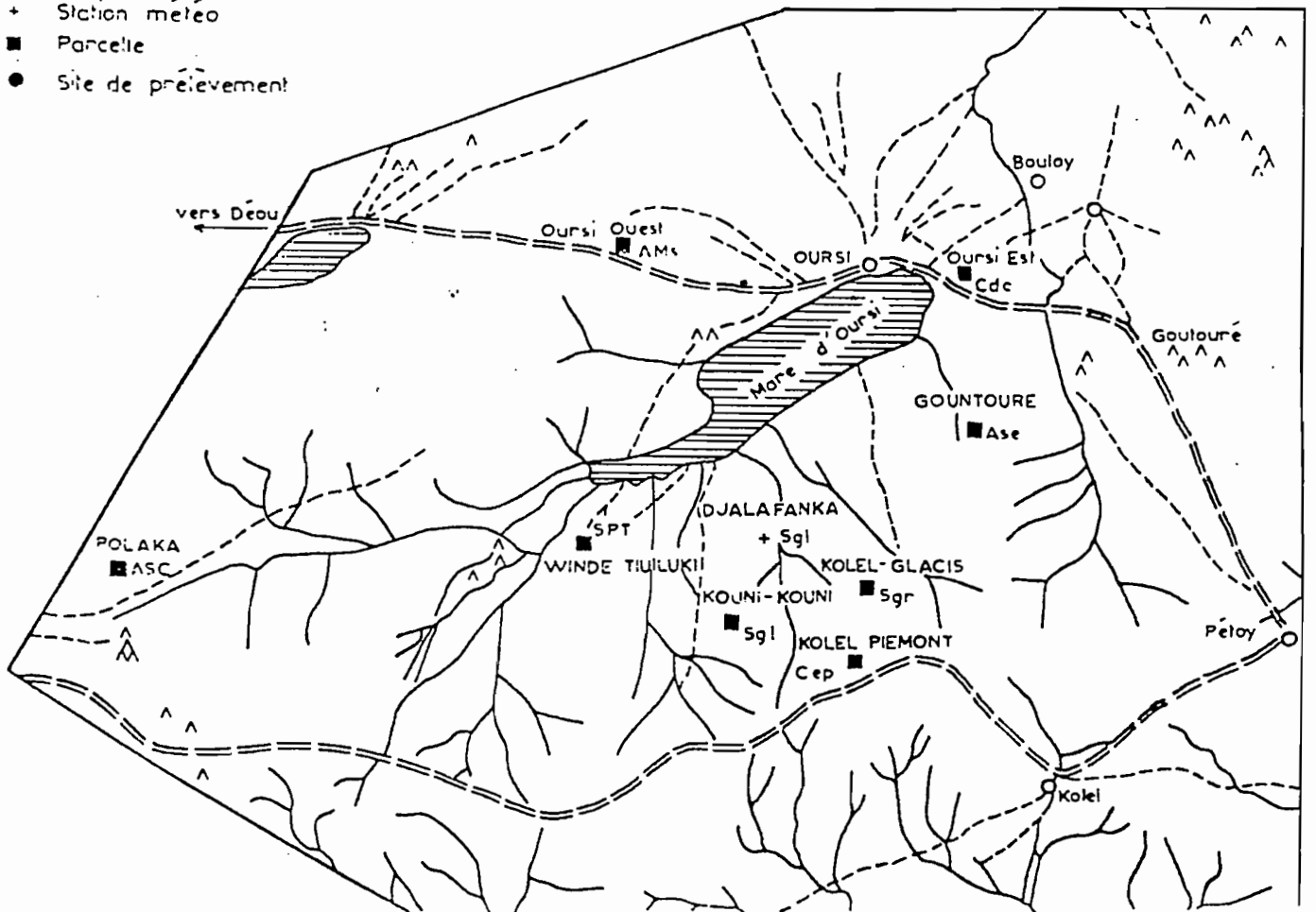
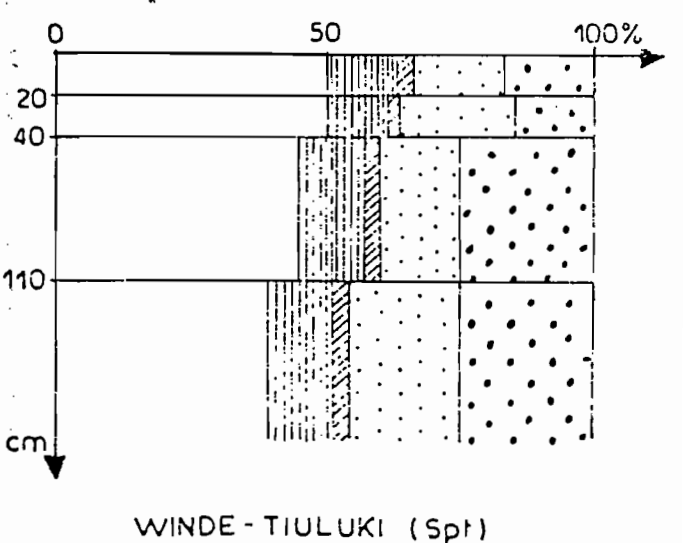
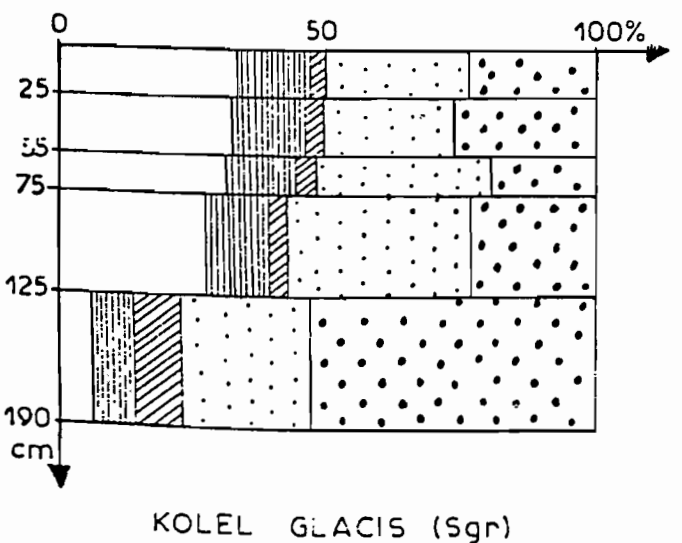
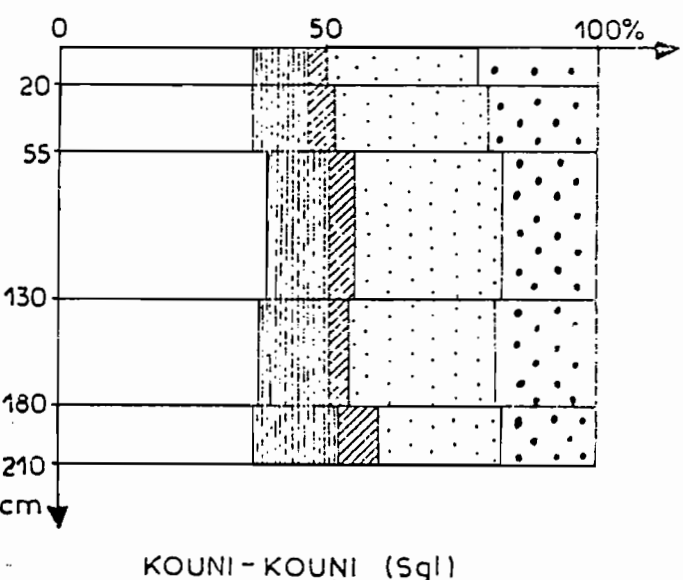
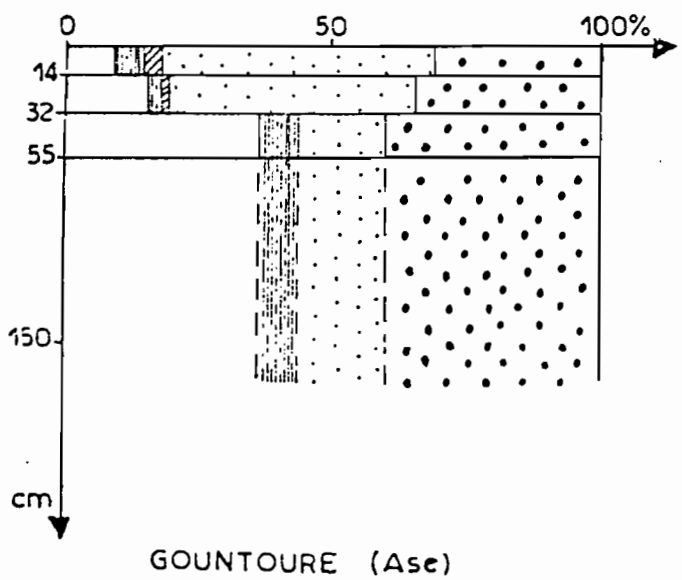
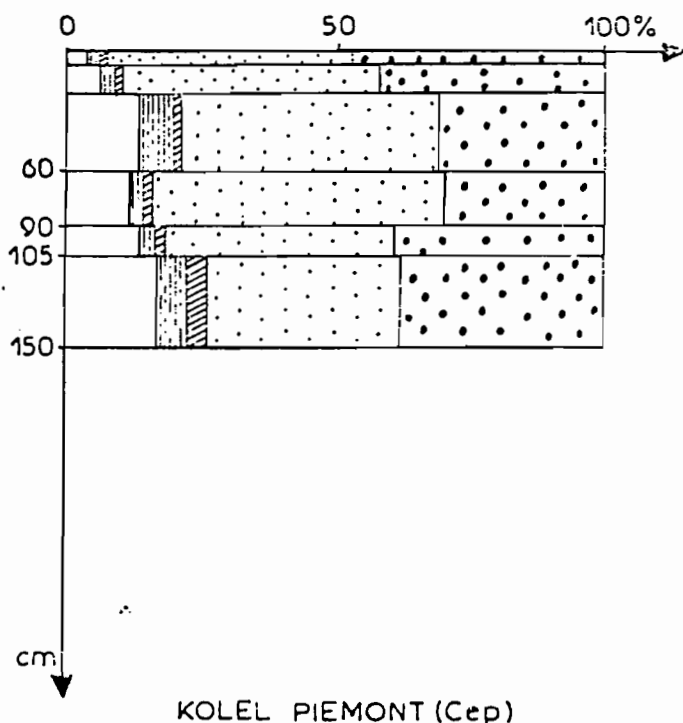
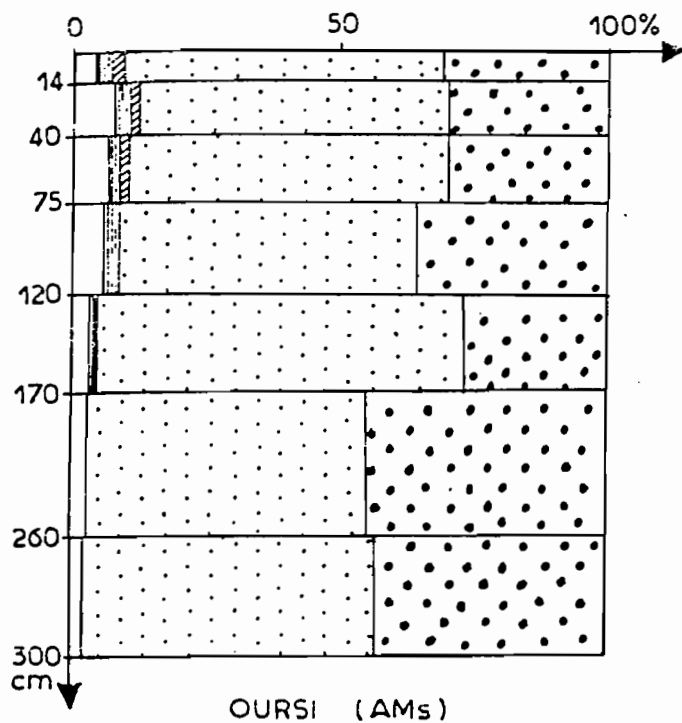
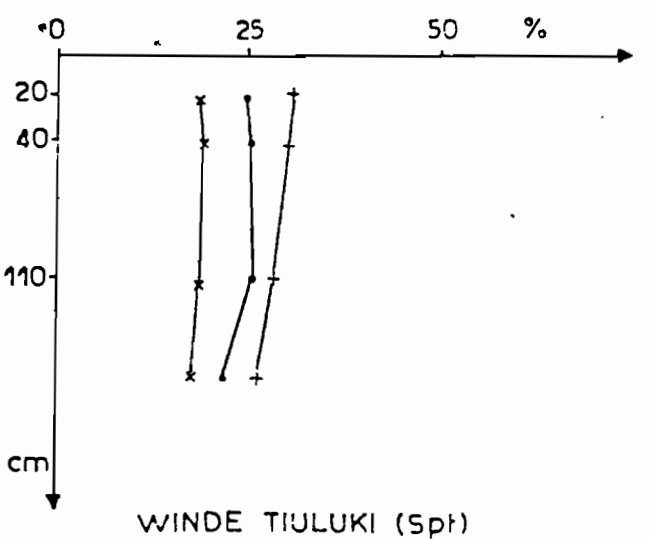
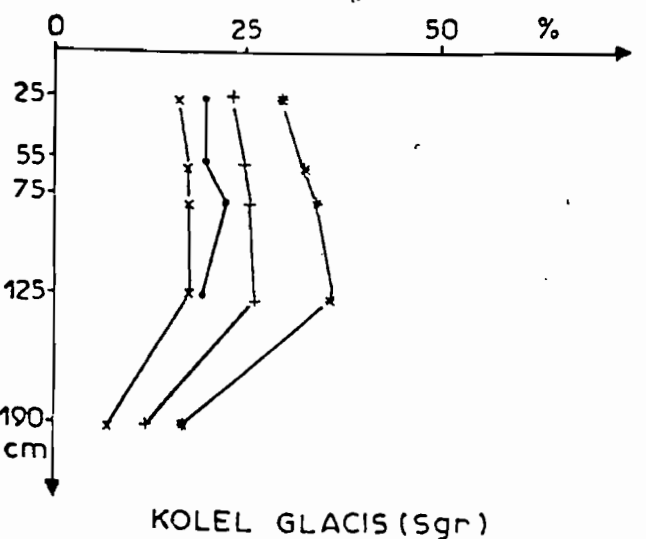
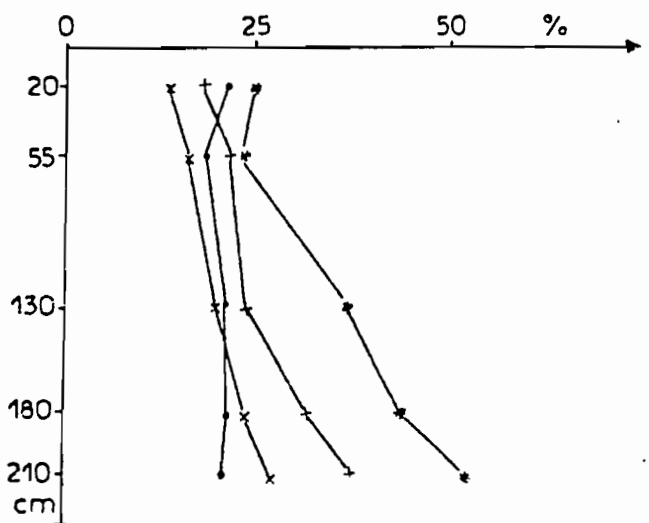
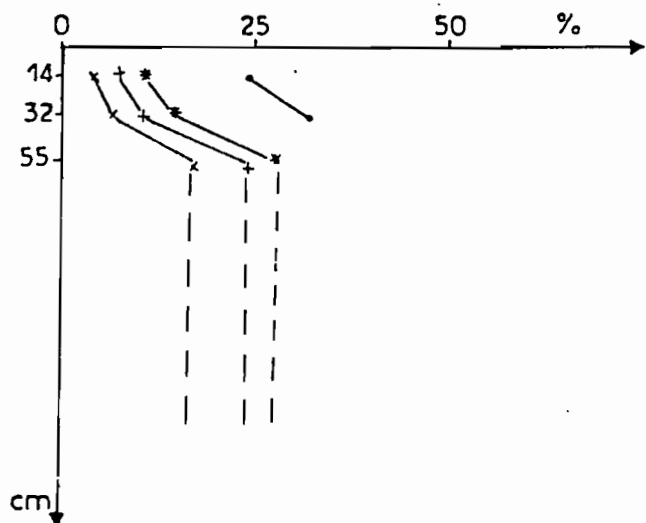
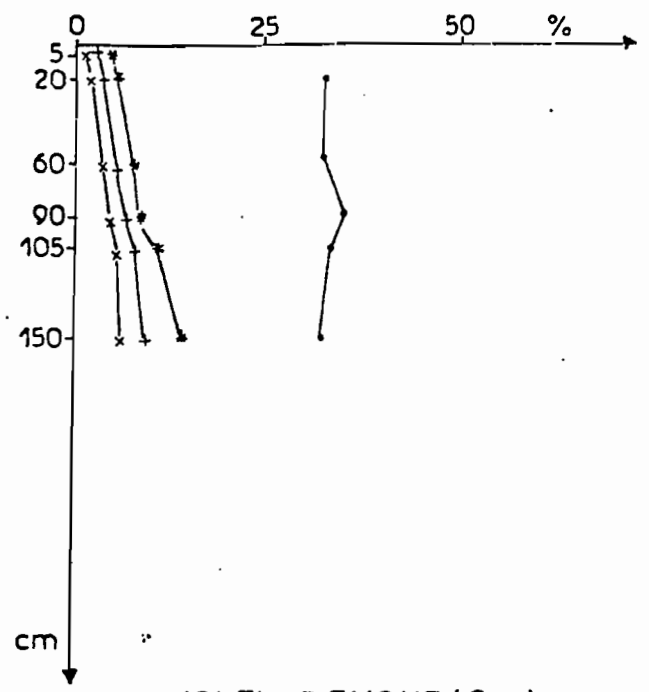
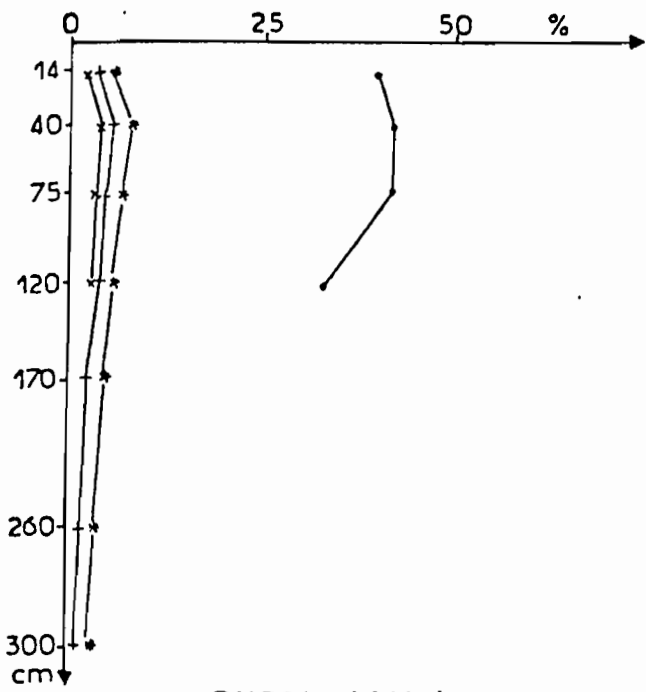


Fig. 5 CARACTERISTIQUES GRANULOMETRIQUES DES STATIONS PRINCIPALES



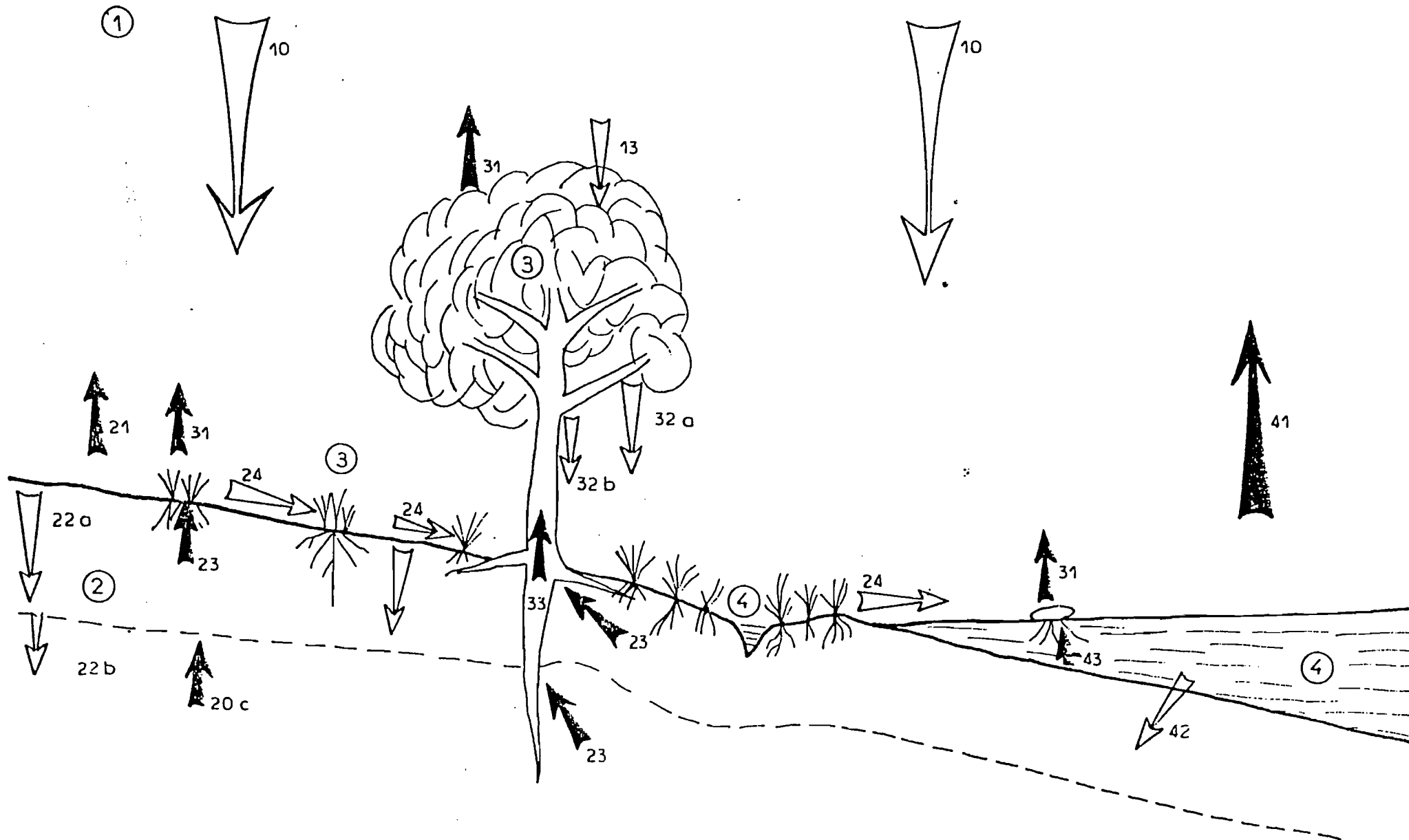
Argile
 Limon fin
 Limon grossier
 Sable fin
 Sable grossier

Fig. 6 RETENTION HYDRIQUE DES SOLS DES STATIONS PRINCIPALES



— Porosité totale Humidité volumique à x — pF 4.2, + — pF 3.0, * — pF 2.5

Fig. 7 CYCLE DE L'EAU DANS LES ECOSYSTEMES
DU BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURS

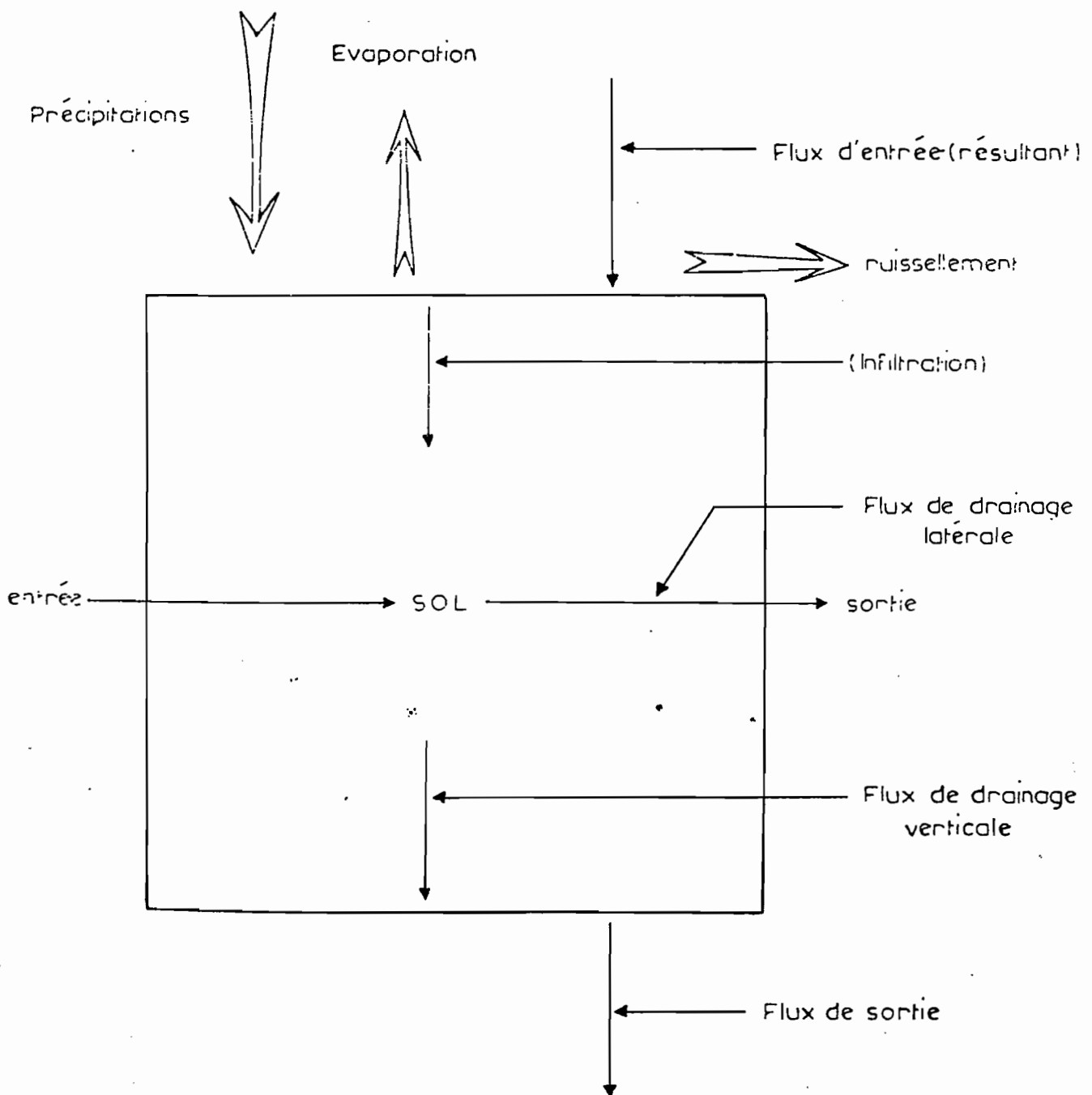


LEGENDE DE LA FIGURE 7

Composants du cycle schématique de l'eau
dans les écosystèmes du bassin versant
de la mare d'OURSI

- 1 Compartiment atmosphérique
 - 10 Eau atmosphérique
 - 12 Précipitation, atteignant directement le sol
 - 13 Précipitation, interceptées par le feuillage
- 2 Compartiment pédologique
 - 20 Eau infiltrée dans le sol
 - 21 Evaporation en sol nu
 - 22 Mouvement interne
 - 22 a Eau suspendue dans la zone colonisée par les racines de la strate herbacée
 - Limite de la zone colonisée par les racines
 - 22 b Drainage profond
 - 22 c Remontée capillaire
 - 23 Absorption végétale
 - 24 Ruissellement
- 3 Compartiment végétal
 - 30 Eau absorbée par la végétation
 - 31 Evapotranspiration
 - 32 Mouvement vers le sol
 - 32 a Egouttement
 - 32 b Ecoulement le long des trongs
 - 33 Mouvement interne (translocation)
- 4 Réservoirs d'eau libre
 - 40 Eau des talwegs et dépression
 - 41 Evaporation de la nappe libre
 - 42 Infiltration vers le sol
 - 43 Absorption végétale

Fig. 8 ORGANIGRAMME DU BILAN HYDRIQUE
TEL QU'IL EST SAISI PAR LES DIFFERENTES MESURES



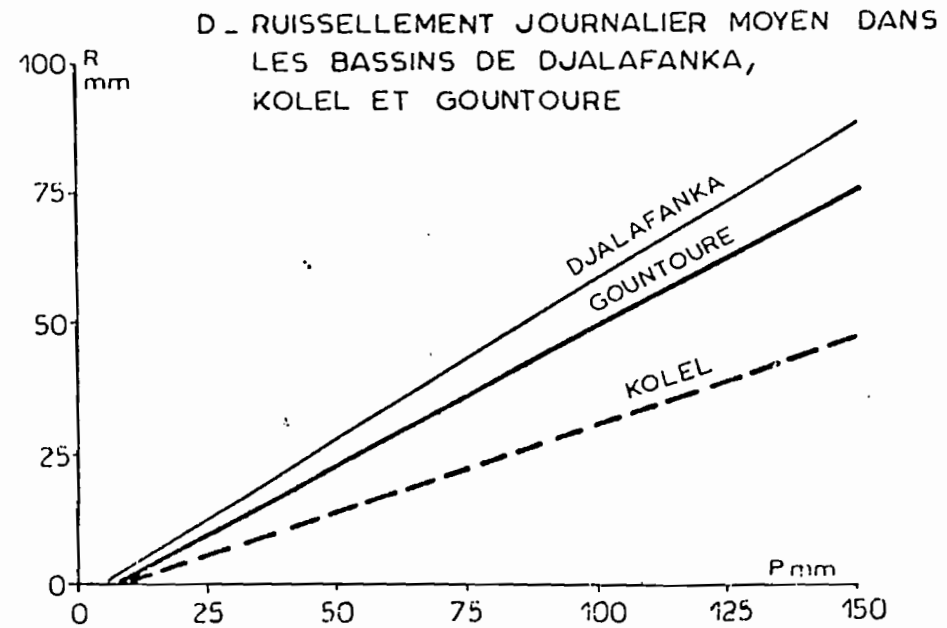
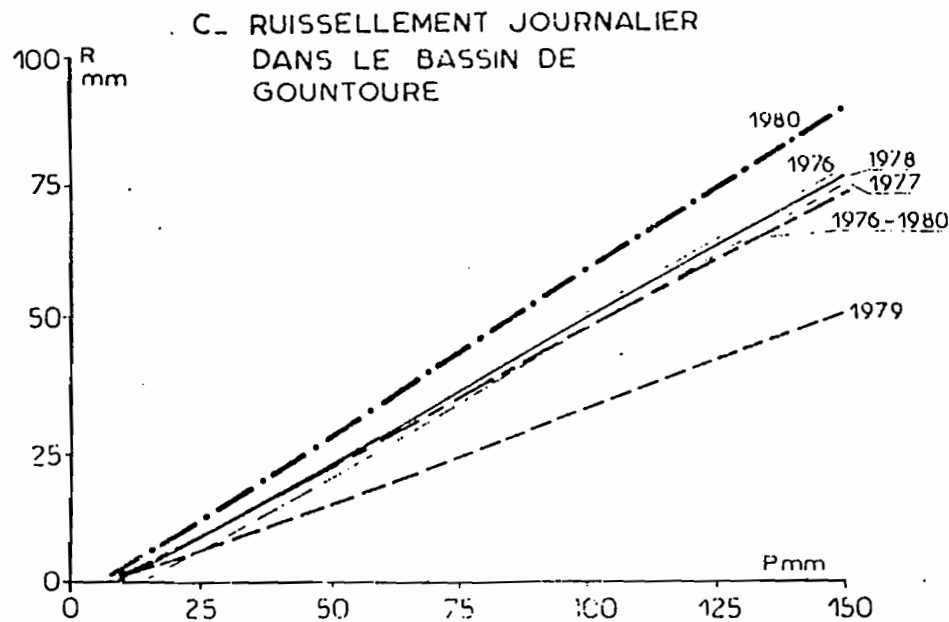
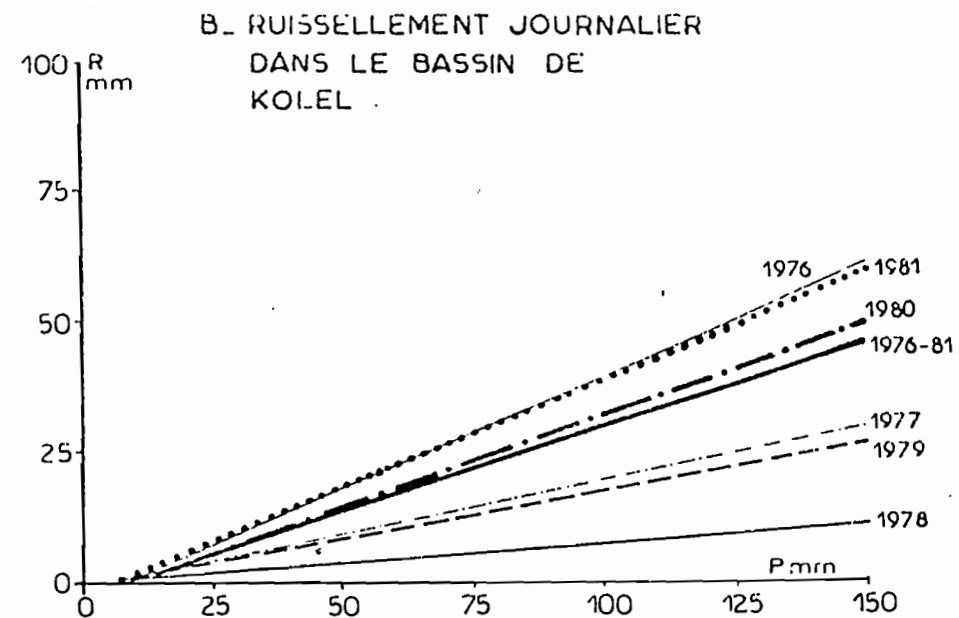
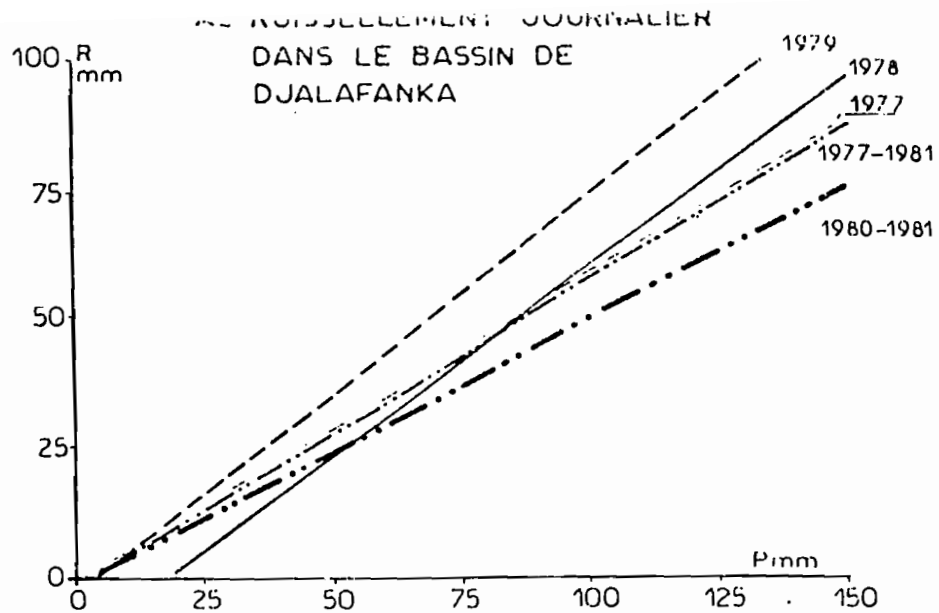


Fig: 9 RUISSELLEMENT JOURNALIER ANNUEL DANS LES BASSINS
DE DJALAFANKA (A), KOLEL (B) ET GOUNTOURE (C)
ET RUISSELLEMENT JOURNALIER MOYEN (D)

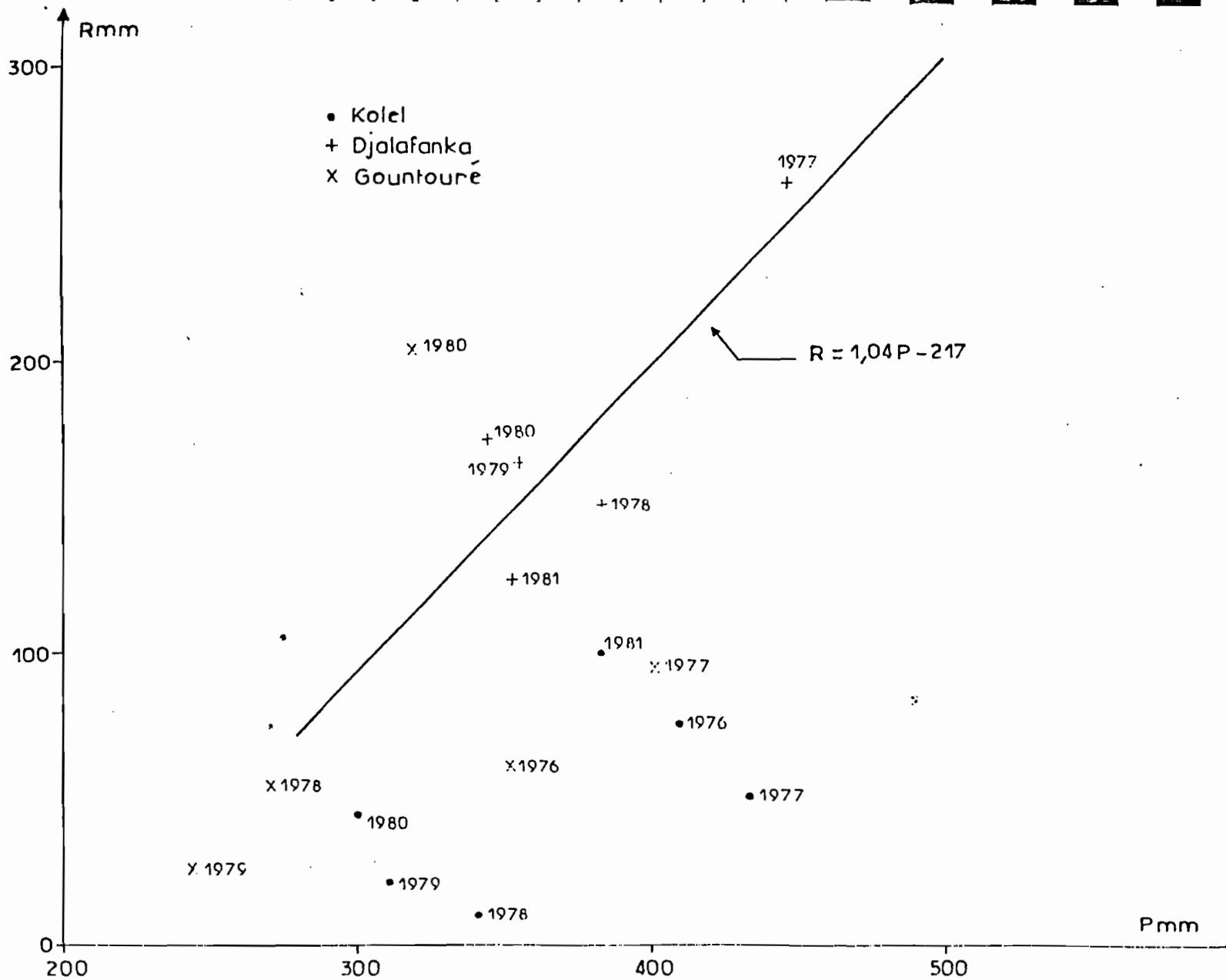


Fig. 10 RUISSELLEMENT ANNUEL DANS LES BASSINS
 DE DJALAFANKA KOLEL. ET GOUNTOURE

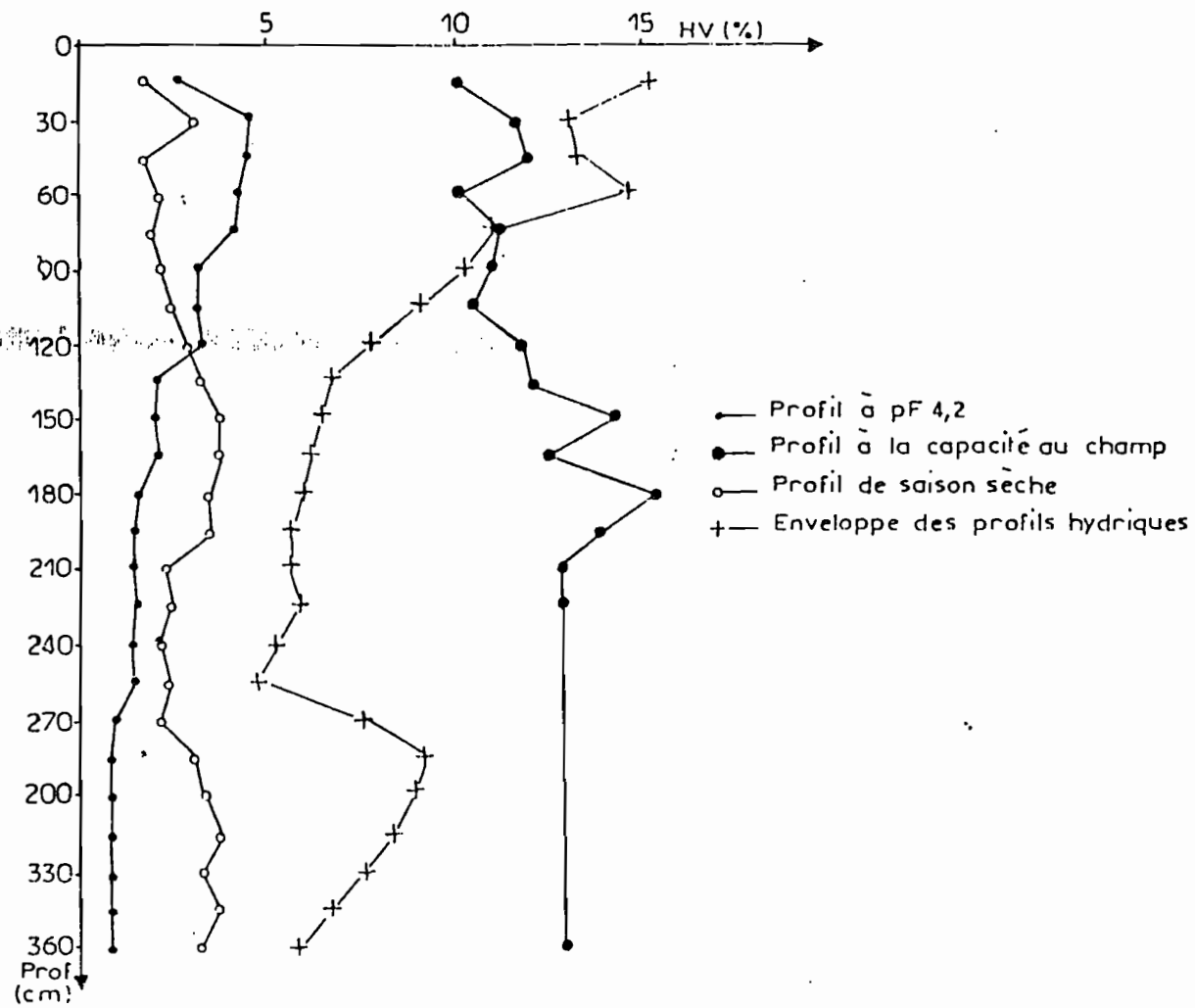


Fig: 11 PROFILS HYDRIQUES EN MILIEUX SABLEUX DUNAIRES

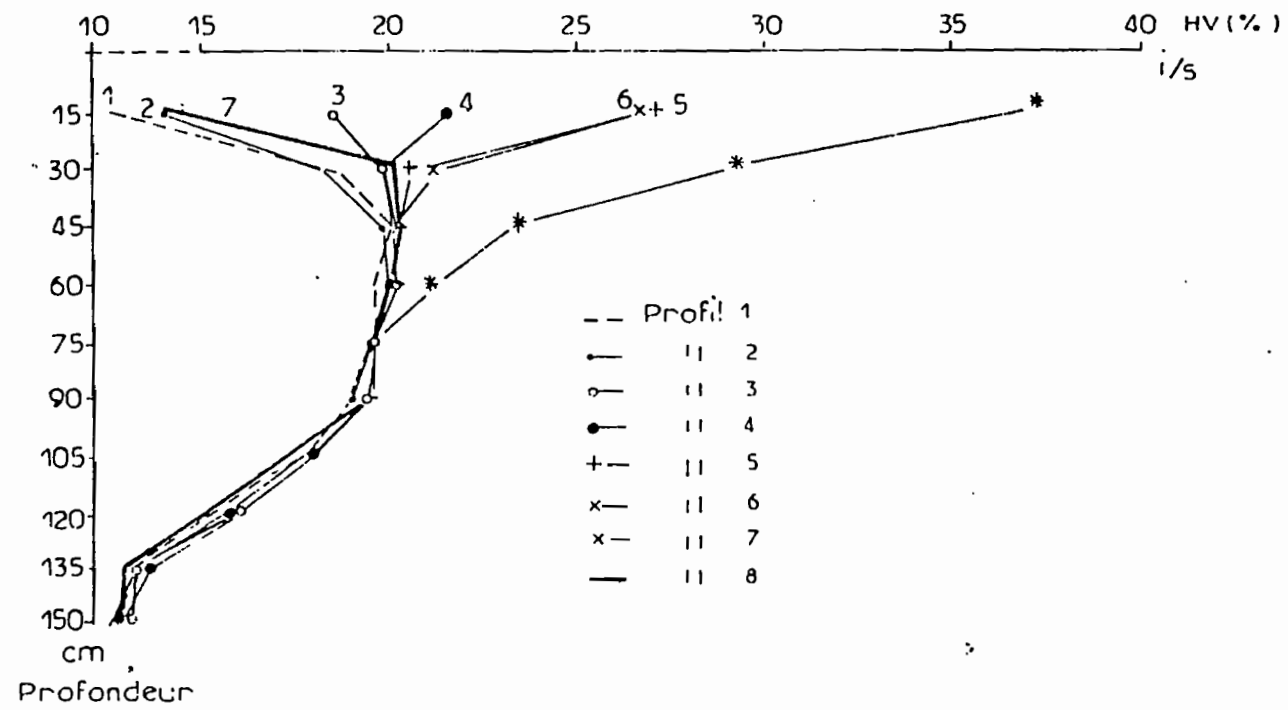


Fig:12 PROFILS HIDRIQUES EN GLACIS ARGILO-LIMONEUX

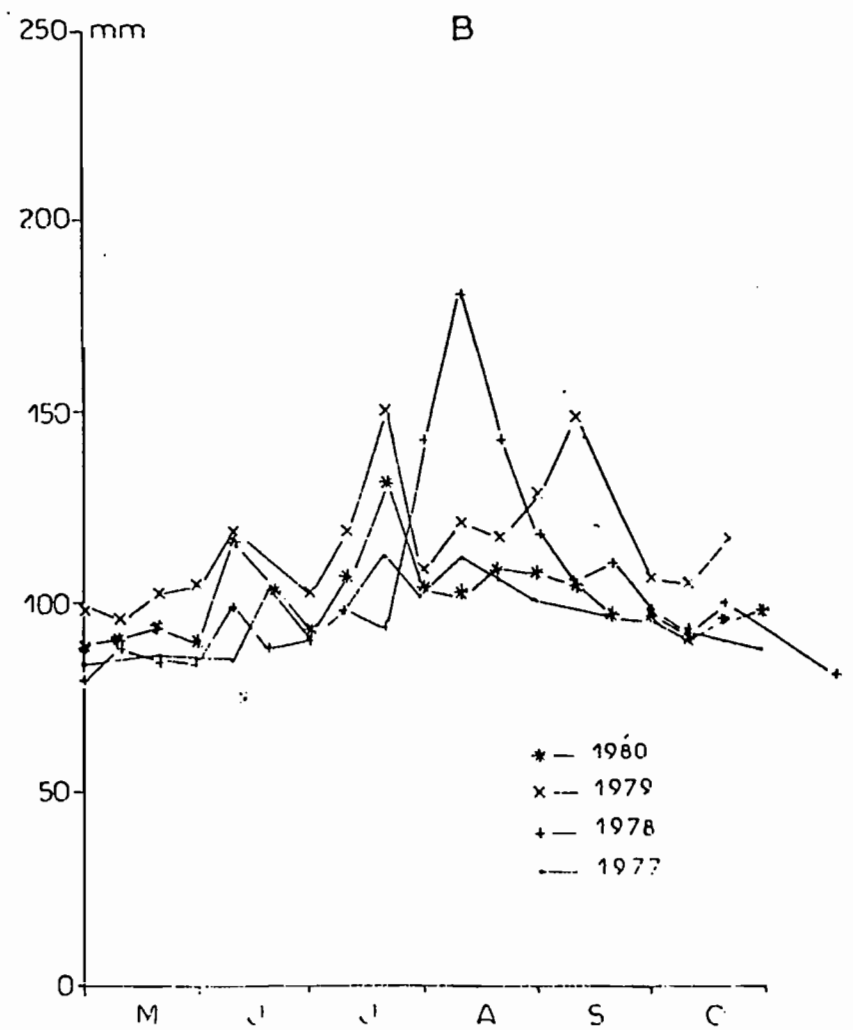
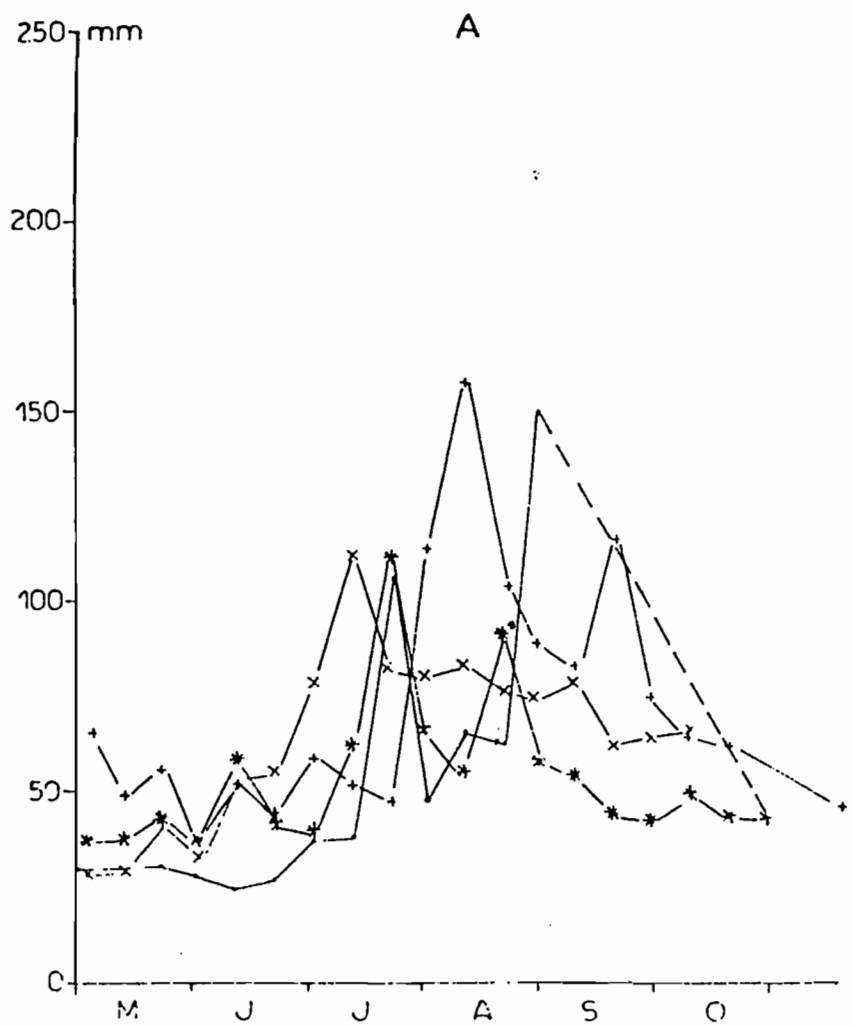


Fig 14 EVOLUTION DE LA RESERVE HYDRIQUE DES SOLS EN MILIEUX SABLEUX DURANT LES HIVERNAGES DE 1977 A 1980 . A. DUNE D'OURSI . B. KOLEL NIEMONT

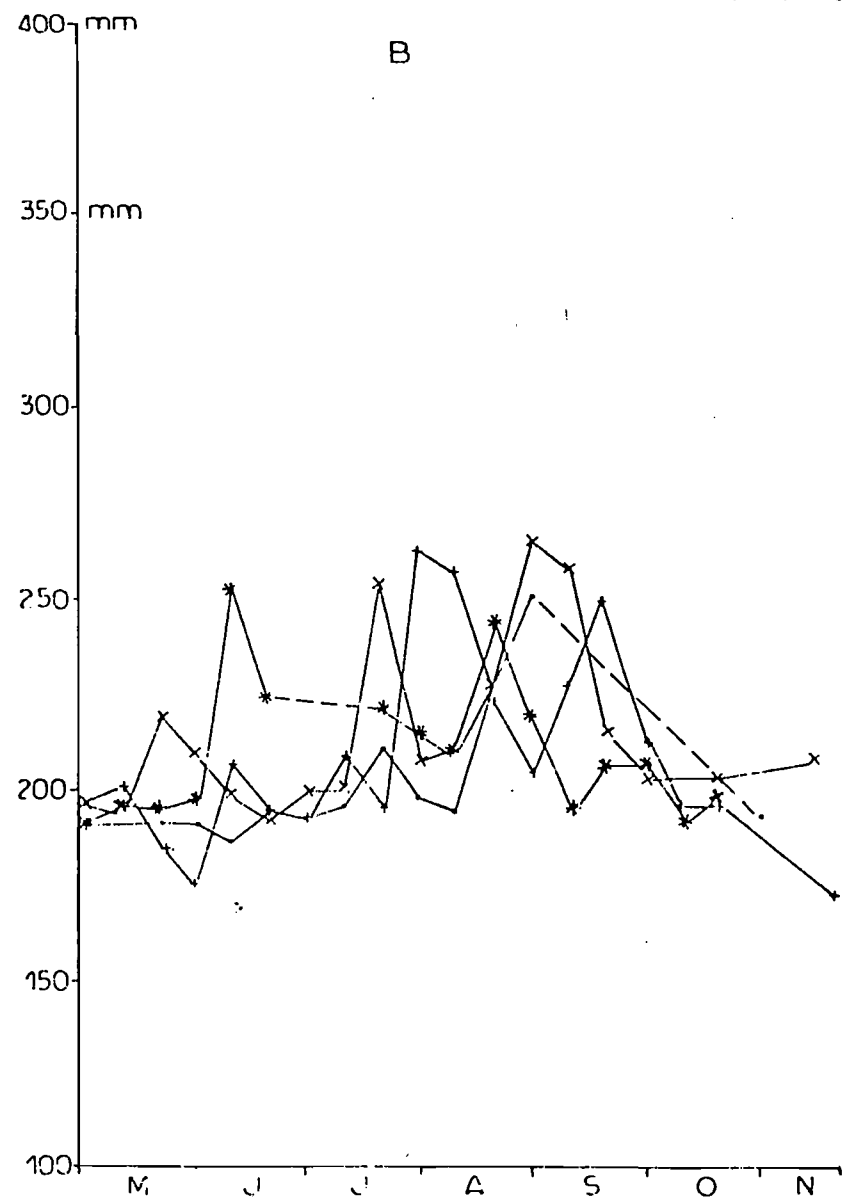
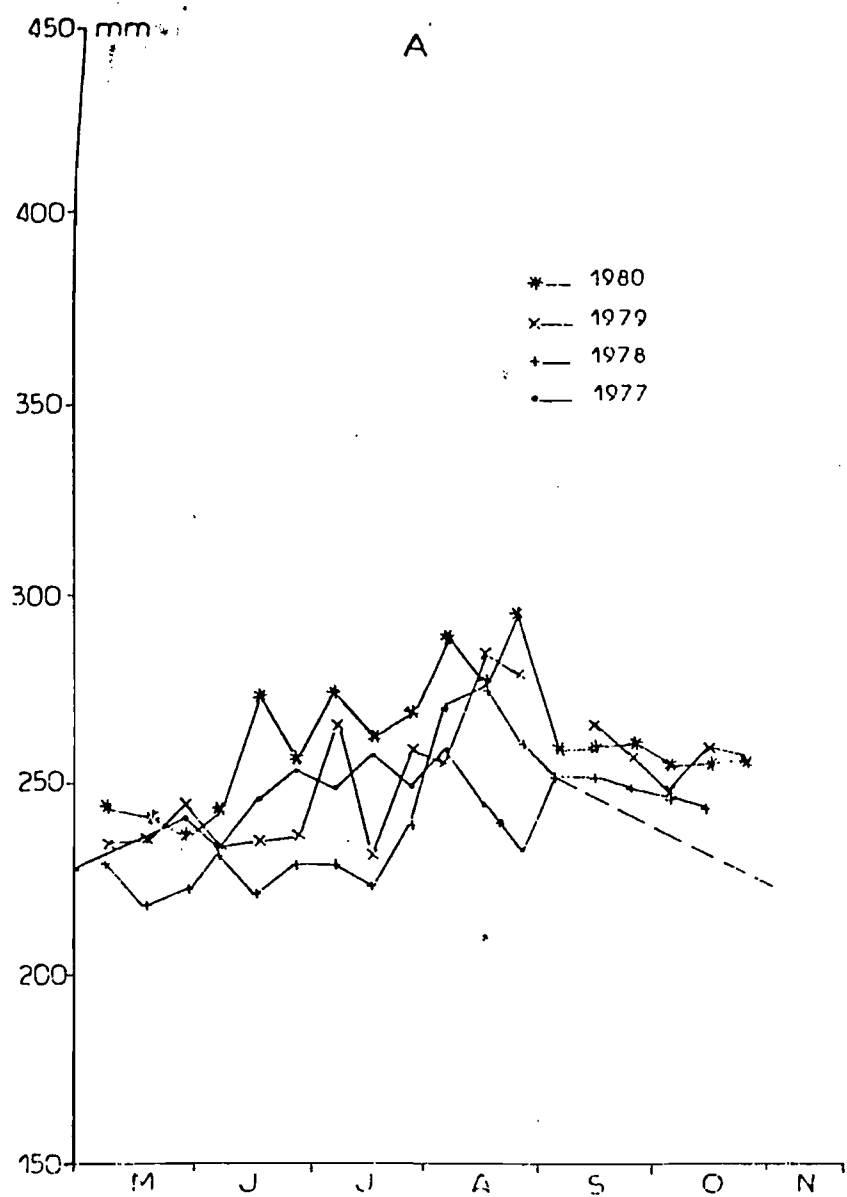


Fig:15 EVOLUTION DE LA RESERVE HYDRIQUE EN MILIEU ARGILEUX DURANT LES HIVERNAGES DE 1977 A 1980 (A) KOUNI-KOUNI (B) KOFEL GLACIS

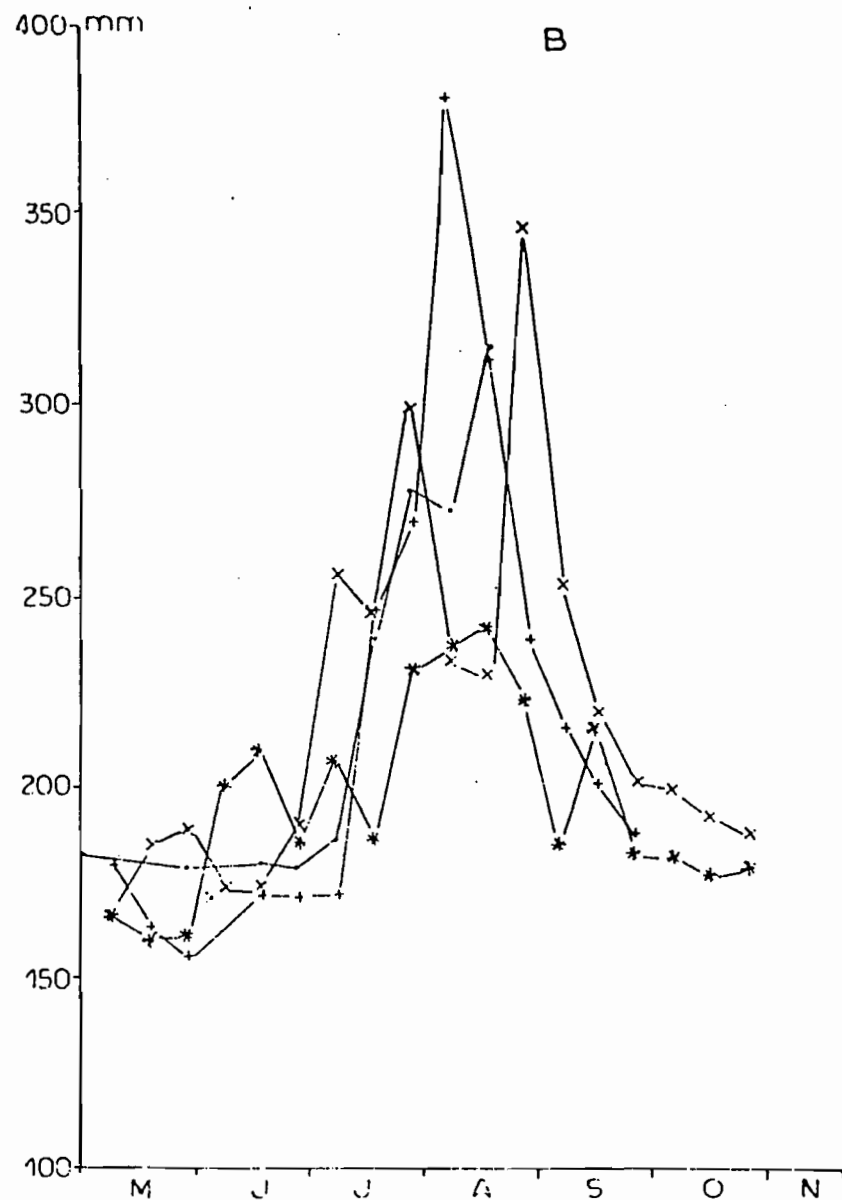
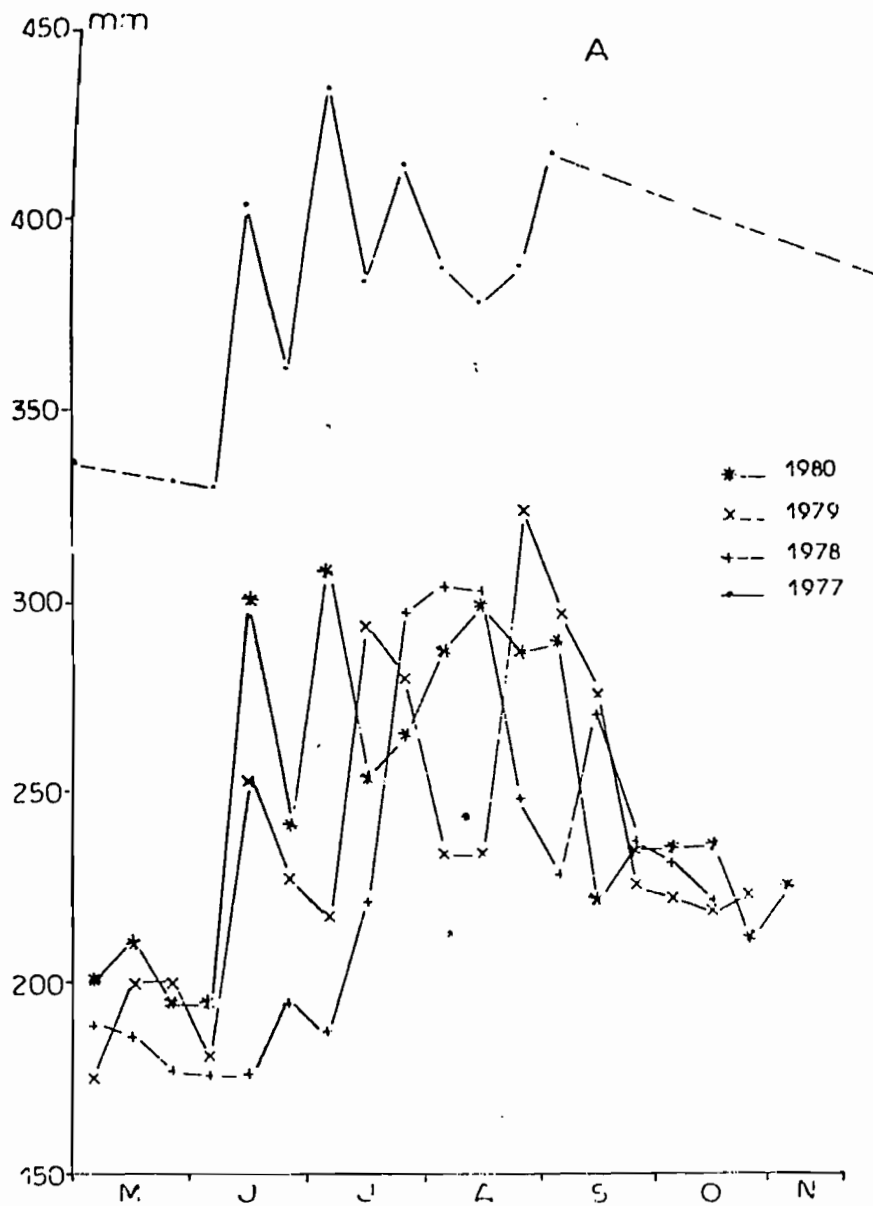


Fig: 16 EVOLUTION DE LA RESERVE HYDRIQUE DU SOL DURANT LES HIVERNAGES DE 1977 A 1980

(A) BAS-FOND VINDE-TIULUKI (B) GOUNTOURE

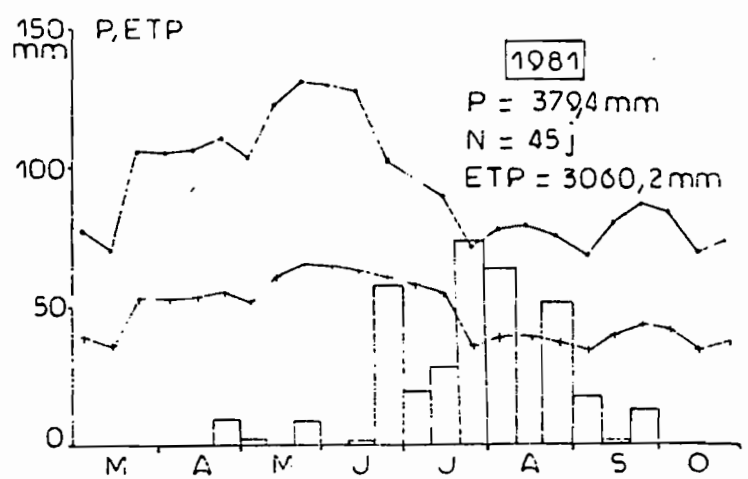
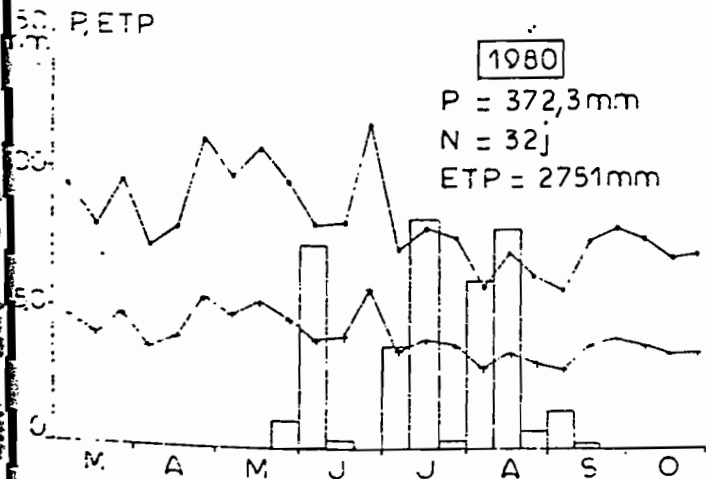
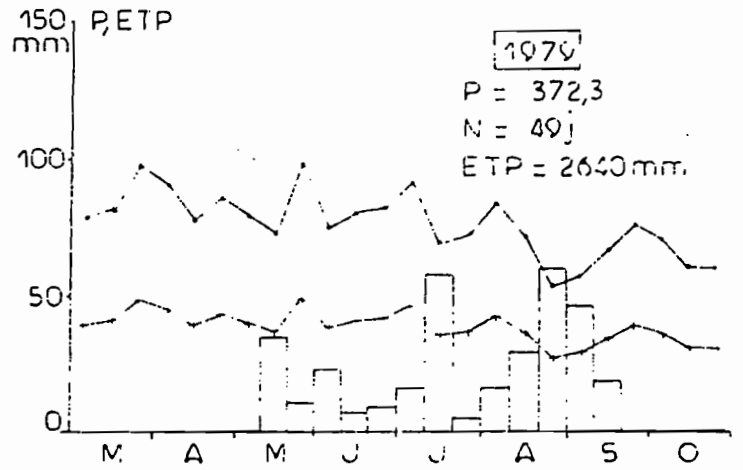
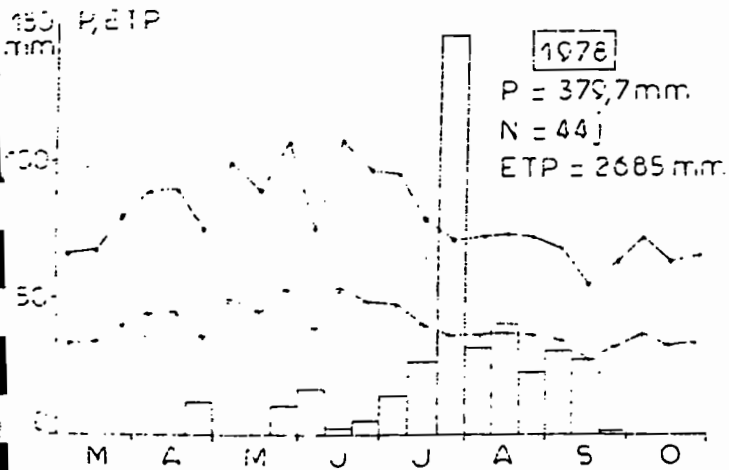
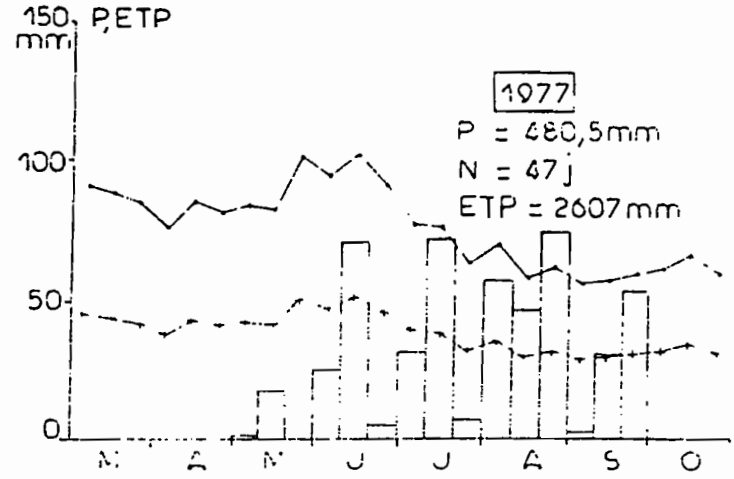
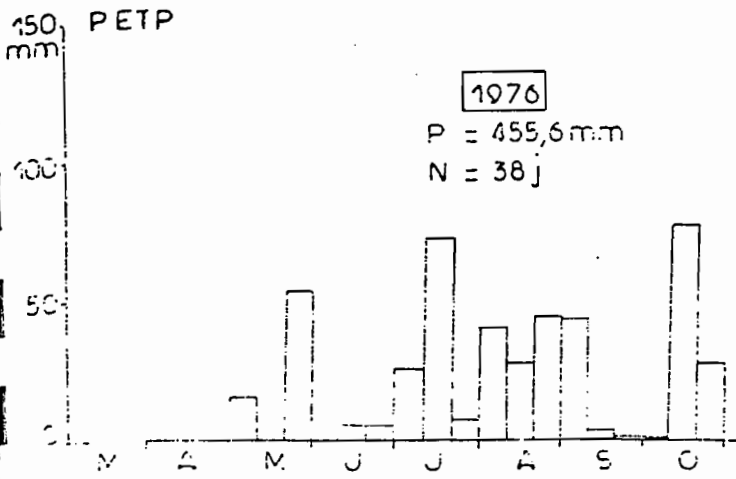


Fig. 18 PRECIPITATIONS ET EVAPOTRANSPIRATIONS POTENTIELLES,

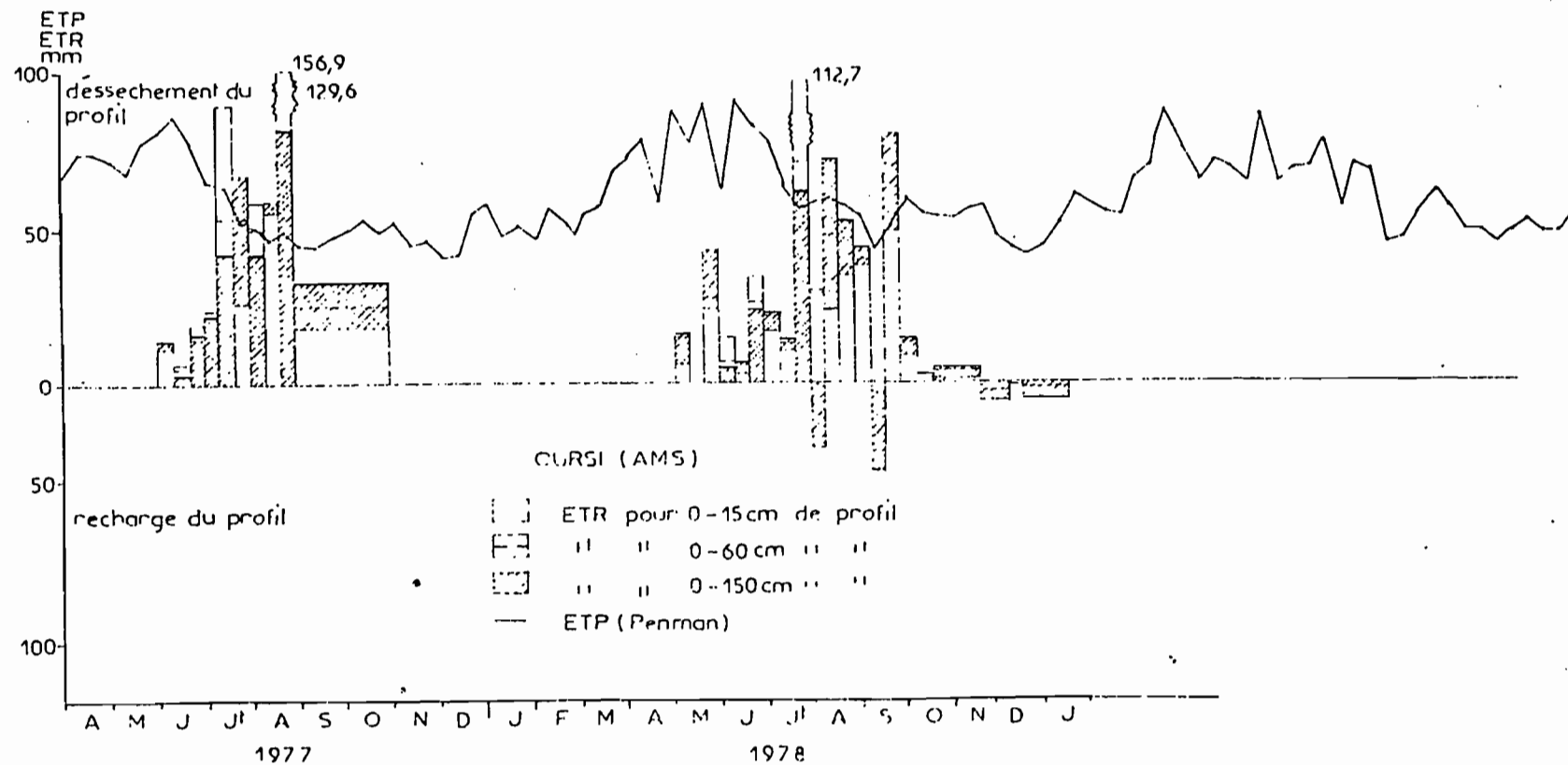


Fig:19 EVOLUTION DECADAIRE DE L'ETP (Penman) ET DE L'ETR CALCULEE SUIVANT L'EPAISSEUR DE SOL CONSIDEREE