



HAL
open science

Alimentation des nappes en pays aride : étude de l'infiltration et de l'évapotranspiration en Tripolitaine (Libye)

Michel Allemmoz

► **To cite this version:**

Michel Allemmoz. Alimentation des nappes en pays aride : étude de l'infiltration et de l'évapotranspiration en Tripolitaine (Libye). Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1976. Français. NNT : . tel-00781723

HAL Id: tel-00781723

<https://theses.hal.science/tel-00781723>

Submitted on 28 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1374

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE SPÉCIALITÉ

(troisième cycle de GÉOLOGIE APPLIQUÉE)

par

Michel ALLEMMOZ

Alimentation des nappes en pays aride – Etude de l'infiltration et de l'évapotranspiration en Tripolitaine (Libye)

Soutenue le 18 Juin 1976 devant la Commission d'Examen

R. BARBIER Professeur à l'USMG

J. SARROT-REYNAULD Professeur à l'USMG

Ph. OLIVE Sous-directeur du Centre de Recherches
Géodynamiques de THONON (PARIS VI)

P. MUTIN Chargé de Mission auprès du Président
Directeur Général du GERSAR

Président

Examineur

Examineur

Invité

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE SPÉCIALITÉ

(troisième cycle de GÉOLOGIE APPLIQUÉE)

par

Michel ALLEMMOZ

**Alimentation des nappes en pays aride _
Etude de l'infiltration et de l'évapotranspiration en
Tripolitaine (Libye)**

Soutenue le 18 Juin 1976 devant la Commission d'Examen

R. BARBIER Professeur à l'USMG

J. SARROT-REYNAULD Professeur à l'USMG

Ph. OLIVE Sous-directeur du Centre de Recherches
Géodynamiques de THONON (PARIS VI)

P. MUTIN Chargé de Mission auprès du Président
Directeur Général du GERSAR

Président

Examineur

Examineur

Invité

AVANT-PROPOS

Au terme de cette étude il m'est agréable de pouvoir remercier tous ceux qui m'ont permis de la réaliser :

- Monsieur P. MUTIN, Chargé de Mission auprès du Président Directeur Général du GERSAR, qui m'a complaisamment intégré à son équipe ; sans son aide et sa compréhension, cette thèse n'aurait pu voir le jour ;

- Monsieur le Professeur J. SARROT-REYNAUD qui m'a permis d'entreprendre et de mener à bien ce travail en me guidant de ses critiques et de ses conseils ;

- Monsieur le Professeur R. BARBIER qui m'a initié à la géologie appliquée et me fait l'honneur de présider le jury ;

- Monsieur Ph. OLIVE, sous-directeur du Centre des Recherches Géodynamiques de THONON, pour m'avoir fait profiter de ses connaissances en matière d'isotopes naturels.

Je remercie toute l'équipe du GERSAR pour sa sympathie et son aide qui me furent précieuses.

Que mes parents et amis trouvent ici la marque de mon affection.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
AVERTISSEMENT	1
I - INTRODUCTION	3
II - SITUATION	5
1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE	5
2 - MORPHOLOGIE	8
III - CLIMATOLOGIE	11
1 - GENERALITES	11
2 - LA TEMPERATURE ATMOSPHERIQUE	12
3 - LES PRECIPITATIONS	16
3.1 - Valeurs moyennes	16
3.2 - Evolution de la pluviométrie depuis 1892	17
3.3 - Données pour la période 1973-1975	19
4 - L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR	20
5 - LES VENTS	21
6 - EVAPORATION	23
7 - ENSOLEILLEMENT	26
8 - CLASSIFICATION CLIMATIQUE DE LA ZONE ETUDIEE	27
8.1 - Indice d'aridité de DE MARTONNE	27
8.2 - "Quotient pluviométrique" de EMBERGER	29
8.3 - Classement bioclimatique de LE HOUEROU	29
IV - HYDROLOGIE	31
1 - LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE	31
2 - LES CRUES	36

	<u>Page</u>
V - GEOLOGIE	41
1 - LES FORMATIONS LITHOLOGIQUES	41
1.1 - Les formations triasiques	41
1.1.1 - La formation OULED CHEBBI	41
1.1.2 - La formation RAS HAMIA	42
1.1.3 - La formation AL AZIZIYAH	42
1.1.4 - La formation ABU SHAYBAH	45
1.2 - Les formations jurassiques	47
1.3 - Les formations crétacées	47
1.3.1 - La formation KIKLAH	47
1.3.2 - La formation AIN TOBI	48
1.4 - Les formations tertiaires et quaternaires	48
1.4.1 - Le miocène	48
1.4.2 - Le pliocène	48
1.4.3 - Le quaternaire	49
1.5 - Les formations granitiques et volcaniques	49
1.5.1 - Le granite	49
1.5.2 - Les roches volcaniques	49
2 - L'HISTOIRE GEOLOGIQUE REGIONALE	50
3 - CARACTERES HYDROGEOLOGIQUES DES FORMATIONS	52
3.1 - Les formations triasiques	52
3.1.1 - La formation OULED CHEBBI	52
3.1.2 - La formation RAS HAMIA	52
3.1.3 - La formation AL AZIZIYAH	52
3.1.4 - La formation ABU SHAYBAH	52
3.2 - Les formations jurassiques	52
3.3 - Les formations crétacées	53
3.3.1 - La formation KIKLAH	53
3.3.2 - La formation AIN TOBI	53
3.4 - Les formations tertiaires et quaternaires	53
3.5 - Les formations granitiques et volcaniques	53
4 - LES ZONES HYDROGEOLOGIQUES	54

	<u>Page</u>
VI - VARIATION DE LA TENEUR EN EAU DU SOL	57
1 - BUT DE L'ETUDE	57
2 - PRINCIPE DE LA MESURE	57
2.1 - La source	57
2.2 - Le détecteur	58
3 - REALISATION DES POSTES DE MESURE	58
3.1 - Le tube d'accès	58
3.2 - Mise en place du tube d'accès	59
4 - LOCALISATION DES POSTES DE MESURE	59
5 - LE MATERIEL UTILISE ET LA MESURE	61
6 - DETERMINATION DE LA COURBE D'ETALONNAGE DE L'HUMIDIMETRE	64
7 - CALCUL DES STOCKS	67
8 - PRINCIPE D'INTERPRETATION	69
9 - COMMENTAIRE SUR LES DIFFERENTS SITES	70
9.1 - Sans infiltration	70
9.2 - Infiltration superficielle	71
9.2.1 - Site 3 - SIDI AL GHABIB	71
9.2.2 - Site 4	71
9.2.3 - Site 5	76
9.2.4 - Site 6	76
9.3 - Infiltration profonde	80
9.3.1 - Site 2	80
9.3.2 - Site 7	83
9.3.3 - Site 8	85
9.3.4 - Site 9	87
9.3.5 - Site 10	89
10 - EVALUATION DE L'INFILTRATION ET MECANISME DE L'ALIMENTATION DES NAPPES	93
11 - APPLICATION AU CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE	96
11.1 - Pluviométrie et crues	96
11.2 - Site 3 - SIDI AL GHARIB	96
11.3 - Site 4 - BIR BIN HAMADI	100
11.4 - Site 5 - Plaine de BIR AL DARDUR	100
11.5 - Site 6 - Wadi AL HIRA branche ouest	102
11.6 - Détermination d'une ETR moyenne	102
12 - CONCLUSION	107

	<u>Page</u>
VII - OBSERVATION DES VARIATIONS DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES	109
1 - BUT DE L'ETUDE	109
2 - GENERALITES	109
3 - PRESENTATION DES DIFFERENTS POINTS D'OBSERVATION	110
3.1 - Nature des points d'observation	110
3.2 - Code des numéros d'inventaire des puits	111
3.3 - Durée d'observation	111
4 - VARIATIONS INTERANNUELLES DE LA PIEZOMETRIE	113
4.1 - Interprétation des graphes	113
4.1.1 - Evolution générale du niveau piézométrique	113
4.1.2 - Recharge et pompages	114
4.2 - Cartes des baisses de la nappe	116
5 - VARIATIONS SAISONNIERES DE LA PIEZOMETRIE	117
5.1 - Carte des remontées de la nappe	117
5.2 - Interprétation des graphes des variations de la piézométrie	118
5.2.1 - AL AZIZIYAH et ses environs	118
5.2.2 - WADI AL HIRA : zone d'épandage, piémont et jebel	121
5.2.3 - WADI ABU SHAYBAH, WADI ZAQQUT et WADI ZARRAT : jebel et zones d'épandage	125
5.2.4 - Nord de la route AL AZIZIYAH - BIR AL GHANAM	126
5.2.5 - Région de BIR AL GHANAM et route de ZAWIYAH	126
6 - VARIATIONS PIEZOMETRIQUES SELON L'AQUIFERE OBSERVE	129
6.1 - Les formations quaternaires	129
6.2 - Les formations tertiaires (Mio-Pliocène)	129
6.3 - Les formations AIN TOBI et KIKLAH	129
6.4 - La formation ABU SHAYBAH	130
6.5 - La formation AL AZIZIYAH	130
6.6 - Les formations RAS HAMIA et OULED CHEBBI	130
7 - LES MAREES DE NAPPES	131
8 - CONCLUSION	132

	<u>Page</u>
VIII - ANALYSE ISOTOPIQUE	133
1 - GENERALITES	133
2 - LE CARBONE-14	133
2.1 - Principe de la méthode	133
2.2 - Analyse des résultats	135
3 - LE TRITIUM	138
3.1 - Principe de la méthode	138
3.2 - Analyse des résultats	138
4 - LES ISOTOPES STABLES DE L'HYDROGENE ET DE L'OXYGENE	141
4.1 - Principe de la méthode	141
4.2 - Analyse des résultats	143
5 - CONCLUSIONS	144
IX - CONCLUSION GENERALE	145
BIBLIOGRAPHIE	147
ANNEXE	151

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX DANS LE TEXTE

	<u>Page</u>
Carte n° 1	6
Carte n° 2	7
Schéma n° 3	8
Tableau n° 4	11
Graphique n° 5	13
Graphique n° 6	15
Tableau n° 7	14
Graphique n° 8	17
Graphique n° 8bis	18
Tableau n° 9	17
Tableau n° 10	19
Graphique n° 11	20
Planche n° 12	22
Graphique n° 13	25
Graphique n° 14	26
Tableau n° 15	34
Planche n° 16	35
Tableau n° 17	37
Tableau n° 18	39
Planche n° 19	43
Planche n° 20	44
Planche n° 21	46
Planche n° 22	55
Planche n° 23	62

	<u>Page</u>
Planche n° 23bis	63
Planche n° 24	66
Planche n° 25	68
Graphique n° 26	72
Graphique n° 27	73
Graphique n° 28	74
Graphique n° 29	75
Graphique n° 30	77
Graphique n° 31	78
Graphique n° 32	79
Graphique n° 33	91
Graphique n° 34	84
Graphique n° 35	86
Graphique n° 36	88
Graphique n° 37	90
Tableau n° 38	91
Tableau n° 39	95
Tableau n° 40	97
Tableau n° 41	99
Tableau n° 42	101
Tableau n° 43	103
Tableau n° 44	104
Planche n° 45	105
Planche n° 45bis	127
Graphique n° 46	131
Tableau n° 47	136
Tableau n° 48	140
Graphique n° 49	141
	142

LISTE DES FIGURES EN ANNEXE

	<u>Page</u>
Carte n° 1A : Localisation des points d'observation	151
Carte n° 2A : Isotempérature et isohumidité	152
Carte n° 3A : Isohyètes moyennes annuelles	153
Carte n° 4A : Formations sous recouvrement	154
Graphique n° 5A : Courbe d'étalonnage de la sonde à neutrons	155
Graphique n° 6A : Profils hydriques pour le site 1	156
Graphique n° 7A : Profils hydriques pour le site 1	157
Graphique n° 8A : Profils hydriques pour le site 3	158
Graphique n° 9A : Profils hydriques pour le site 3	159
Graphique n° 10A : Profils hydriques pour le site 3	160
Graphique n° 11A : Profils hydriques pour le site 4	161
Graphique n° 12A : Profils hydriques pour le site 4	162
Graphique n° 13A : Profils hydriques pour le site 4	163
Graphique n° 14A : Profils hydriques pour le site 5	164
Graphique n° 15A : Profils hydriques pour le site 5	165
Graphique n° 16A : Profils hydriques pour le site 6	166
Graphique n° 17A : Profils hydriques pour le site 6	167
Graphique n° 18A : Profils hydriques pour le site 6	168
Graphique n° 19A : Profils hydriques pour le site 2	169
Graphique n° 20A : Profils hydriques pour le site 2	170
Graphique n° 21A : Profils hydriques pour le site 2	171
Graphique n° 22A : Profils hydriques pour le site 7	172
Graphique n° 23A : Profils hydriques pour le site 7	173
Graphique n° 24A : Profils hydriques pour le site 7	174
Graphique n° 25A : Profils hydriques pour le site 8	175
Graphique n° 26A : Profils hydriques pour le site 8	176
Graphique n° 27A : Profils hydriques pour le site 8	177
Graphique n° 28A : Profils hydriques pour le site 9	178

	<u>Page</u>
Graphique n° 29A : Profils hydriques pour le site 9	179
Graphique n° 30A : Profils hydriques pour le site 10	180
Graphique n° 31A : Profils hydriques pour le site 10	181
Graphique n° 32A : Profils hydriques pour le site 10	182
Graphique n° 33A : Variations du niveau piézométrique	183
Graphique n° 34A : Variations du niveau piézométrique	184
Graphique n° 35A : Variations du niveau piézométrique	185
Graphique n° 36A : Variations du niveau piézométrique	186
Graphique n° 37A : Variations du niveau piézométrique	187
Graphique n° 38A : Variations du niveau piézométrique	188
Graphique n° 39A : Variations du niveau piézométrique	189
Graphique n° 40A : Variations du niveau piézométrique	190
Graphique n° 41A : Variations du niveau piézométrique	191
Graphique n° 42A : Variations du niveau piézométrique	192
Graphique n° 43A : Variations du niveau piézométrique	193
Graphique n° 44A : Variations du niveau piézométrique	194
Graphique n° 45A : Variations du niveau piézométrique	195
Graphique n° 46A : Variations du niveau piézométrique	196
Graphique n° 47A : Variations du niveau piézométrique	197
Graphique n° 48A : Variations du niveau piézométrique	198
Graphique n° 49A : Variations du niveau piézométrique	199
Graphique n° 50A : Variations du niveau piézométrique	200
Graphique n° 51A : Variations du niveau piézométrique	201
Graphique n° 52A : Variations du niveau piézométrique	202
Graphique n° 53A : Variations du niveau piézométrique	203
Graphique n° 54A : Carte de la baisse des niveaux piézométriques observée de 1972 à 1975	204
Graphique n° 55A : Carte de la baisse des niveaux piézométriques observée de juillet 1974 à juillet 1975	205
Graphique n° 56A : Carte des remontées des niveaux piézométriques pour l'année 1974-1975	206

AVERTISSEMENT

C'est au sein du G.E.F.L.I.* et plus spécialement du G.E.R.S.A.R.**, en qualité de stagiaire hydrogéologue et dans le cadre de l'étude des ressources en eau de plusieurs zones en TRIPOLITAINE, que j'ai pu mener à bien cette étude.

Cependant, arrivé en LIBYE au début de l'été 1974, je n'ai fait que poursuivre un travail commencé par d'autres pendant la saison 1973-1974. C'est grâce à ce travail et à celui des équipes hydrogéologiques, hydrologiques et pédologiques que je peux aujourd'hui présenter cette thèse.

On comprendra que les impératifs d'une étude contractuelle peuvent ne pas coïncider exactement avec les exigences d'une étude de type universitaire. Toutefois le travail que j'ai pu effectuer, par son caractère de recherche proprement dit, était très proche d'une étude purement scientifique, c'est ce qui m'a permis de présenter les faits d'ordre scientifique et d'ordre général sous forme de thèse.

* G.E.F.L.I. : Groupement d'Etude Français en LIBYE

** G.E.R.S.A.R. : Groupement d'Etude et de Réalisation des Sociétés d'Aménagement Régional.

[Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side]

I - INTRODUCTION

I - INTRODUCTION

Dans les pays de type climatique aride ou désertique, l'alimentation contemporaine des nappes est un problème particulièrement irritant pour l'hydrogéologue. En effet, la faiblesse des précipitations amène à s'interroger sur le devenir des eaux météoriques: Sont-elles entièrement évapotranspirées ? S'infiltrent-elles jusqu'à la nappe ? Si oui, dans quelles conditions et dans quelles proportions ? Autant de questions auxquelles il n'est pas facile de donner une réponse, surtout en regard des connaissances actuelles sur les processus de transfert d'eau dans les milieux poreux non saturés et des difficultés d'expérimentation dans les conditions naturelles. De plus, l'évapotranspiration réelle est une donnée difficile à cerner dans ces régions où les formules classiques d'évapotranspiration potentielle ne donnent qu'une idée inexacte du phénomène. Aussi dans la présente étude me suis-je efforcé de répondre à ces questions dans la mesure des moyens mis à ma disposition.

Simultanément sur le terrain ont été menées deux campagnes de mesures. L'une consistait à observer les variations du niveau piézométrique des nappes par des relevés périodiques, l'autre à mesurer la teneur en eau du sol dans la tranche superficielle (0-5 m) à l'aide d'une sonde neutronique. A ces observations vient s'ajouter une analyse isotopique des différentes eaux rencontrées.

Après avoir situé la zone d'étude dans son contexte tant géographique qu'hydroclimatologique et géologique, on abordera successivement :

- les variations de la teneur en eau du sol,
- les variations piézométriques des nappes,
- l'analyse isotopique des eaux.

II - SITUATION

1 - Situation géographique

2 - Morphologie

II - SITUATION

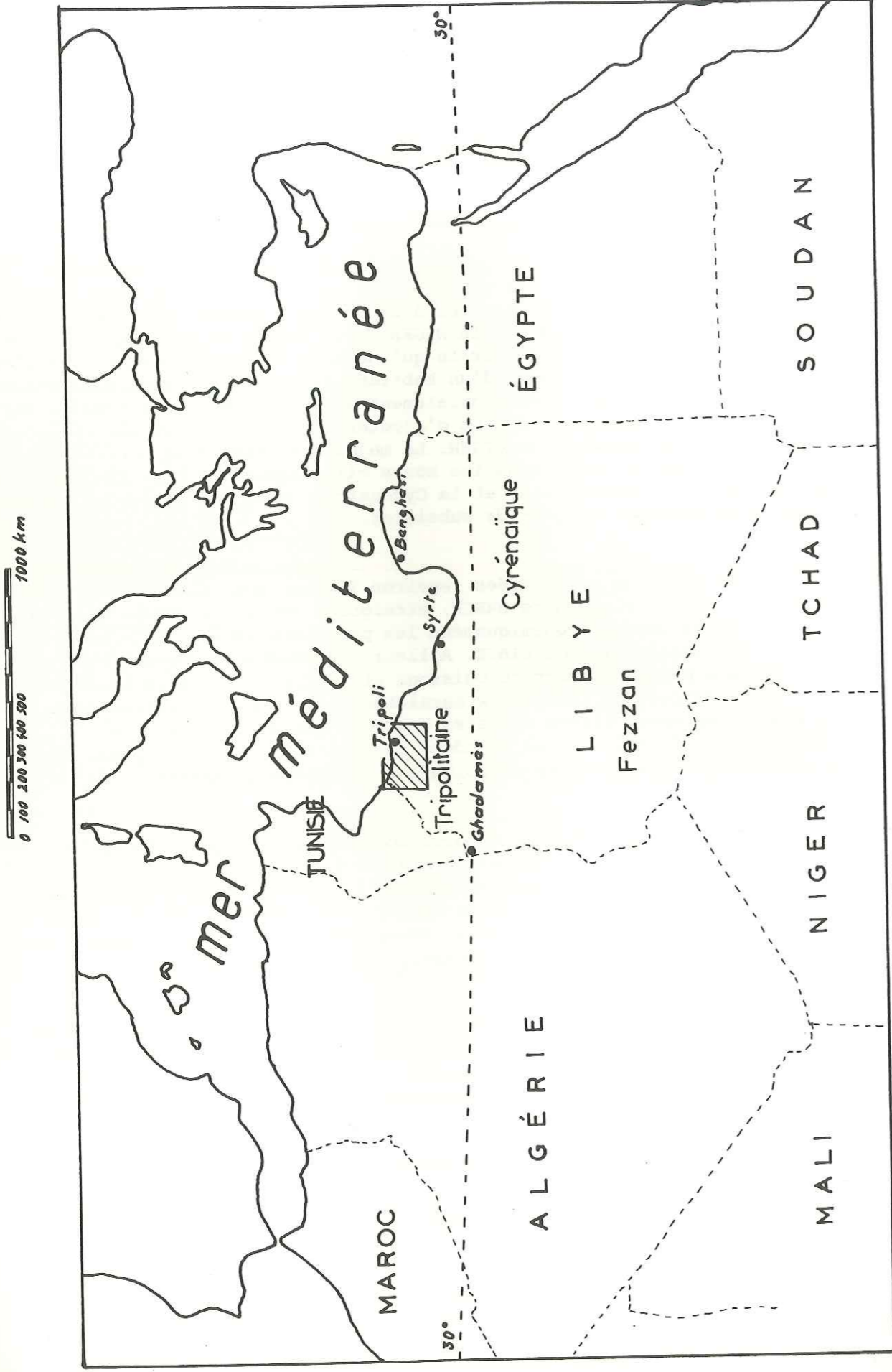
1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE

Vaste quadrilatère de quelque 1.700.000 km² de superficie, la LIBYE est bordée au nord par la MEDITERRANEE et se fond au sud dans l'immense désert saharien (carte n° 1). Limitée à l'est par l'EGYPTE, à l'ouest par la TUNISIE et l'ALGERIE, au sud par le NIGER et le TCHAD, ce pays, grand comme deux fois et demi la FRANCE, n'abrite qu'une très faible population : environ 1.500.000 habitants, soit moins d'un habitant au km². Deux ethnies vivent sur ces territoires : les berbères généralement agriculteurs et les nomades arabes. A ces deux groupes il convient d'ajouter les touareghs du sud libyen et les noirs venus du TCHAD et du NIGER. La majeure partie de la population (80 %) est concentrée sur la côte, dans les zones climatiques les plus favorables à l'agriculture : la Tripolitaine et la Cyrénaïque. Dans le Fezzan, seules quelques oasis permettent aux gens de subsister.

Les plus hautes contrées (environ 1200 m) sont situées dans le centre sud, mais le plateau de BARCE, atteignant 900 m, en Cyrénaïque constitue les hautes terres économiquement les plus importantes. On y trouve les seules forêts résiduelles de LIBYE. Ailleurs la végétation, quand elle existe, est constituée principalement de buissons et touffes clairsemés et de palmiers. Aux alentours de TRIPOLI le maraichage est en pleine extension mais généralement agrumes, olives et dates sont les seules cultures avec le blé et l'orge semés dans les zones inondées par les crues. Les troupeaux pâturent sur les grandes étendues steppiques à la limite du désert.

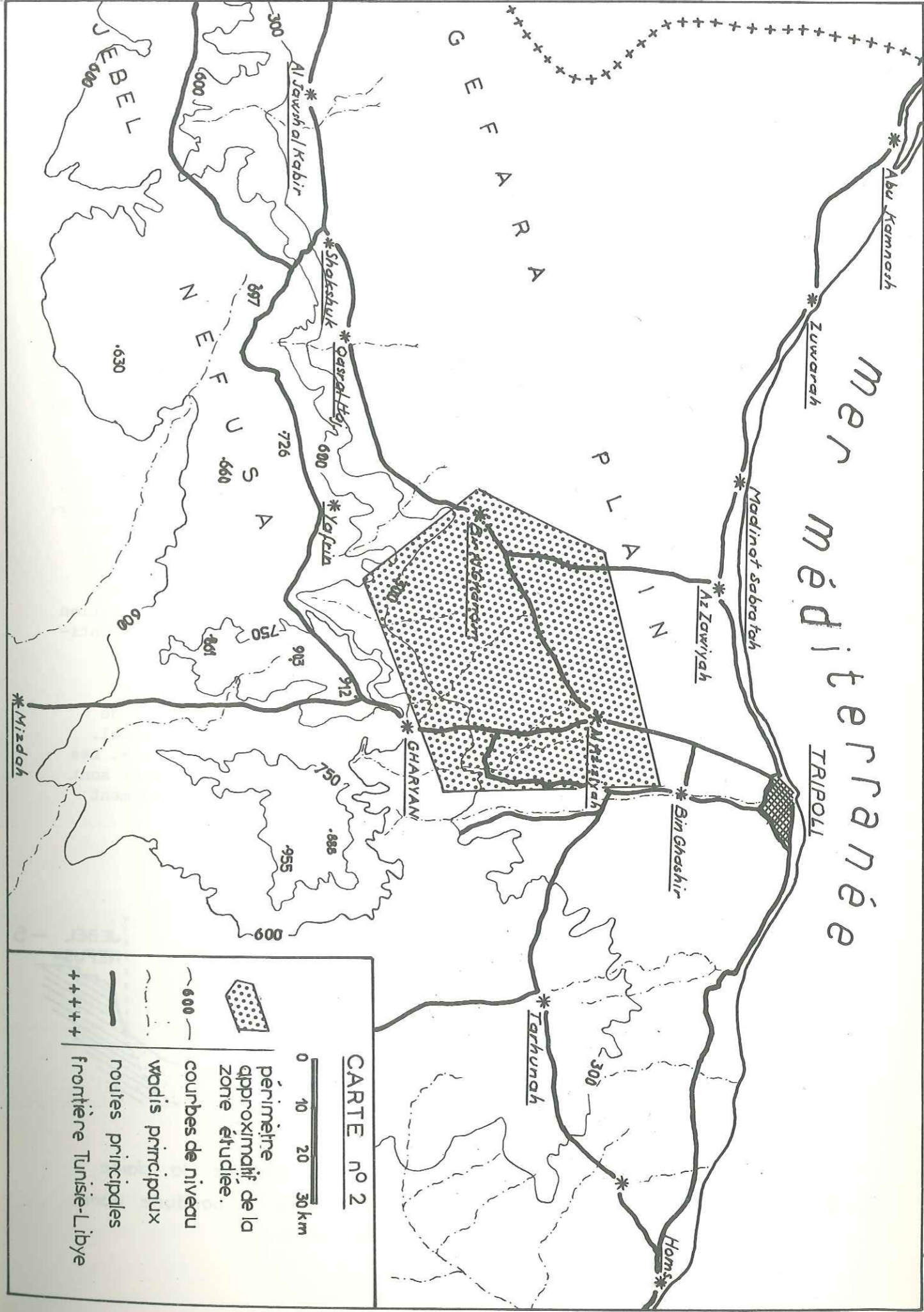
Le sel de l'intérieur du pays constituait une des principales exportation mais la découverte du pétrole, il y a quelques années, au sud de la Cyrénaïque, a complètement bouleversé l'économie traditionnelle libyenne. Cette nouvelle richesse permet entre autre, d'accélérer le développement agricole et de mettre en valeur certaines zones incultes ou habituellement réservées à la culture en sec ou à l'élevage.

C'est dans le cadre du développement agricole de la TRIPOLITAINE que la REPUBLIQUE ARABE LIBYENNE a fait appel au G.E.F.L.I. pour l'étude de périmètres agricoles irrigués. La zone concernée par la présente étude est donc située en Tripolitaine à 50 km au sud de TRIPOLI, au pied du jebel NEFUSA (carte n° 1 et n° 2). Elle couvre une superficie d'environ 2.000 km². AL AZIZIYAH, petite ville agricole, BIR AL GHANAM concentration de pasteurs établis autour d'un puits et GHARYAN ville agricole du jebel constituent les seules agglomérations de la zone.



Carte n° 1 - Situation générale -

: Carte n° 2



2 - MORPHOLOGIE

La Tripolitaine présente deux aspects morphologiques très différents : au sud, le jebel NEFFUSA, au nord, jusqu'à la côte, la plaine de la JEFFARA (carte n° 2).

Le jebel NEFFUSA se présente comme une zone montagneuse culminant à 900 m près de GHARYAN (point le plus haut du jebel NEFFUSA) profondément entaillée par les wadis. Dans sa partie sud, il perd son aspect montagneux pour devenir tabulaire avec une pente nord-sud : c'est le domaine des grands wadis du sud (Wadi SOFFEGIN) s'écoulant d'ouest en est vers le golfe de SIRTE. Au nord, le jebel NEFFUSA s'interrompt brusquement par un escarpement de direction WSW-ENE. C'est de cette falaise et de la partie montagneuse du jebel GHARYAN que naissent les wadis qui s'épandent dans la plaine.

L'origine de la falaise du jebel est sans doute tectonique. Dans la plaine de la JEFFARA il a été reconnu par forages et prospection géophysique une grande faille E-W, appelée faille d'AZIZIYAH, se prolongeant jusqu'en TUNISIE. Cette faille abaisse le compartiment nord de plusieurs centaines de mètres. Par le jeu de l'érosion régressive, le rejet de la faille aurait donné l'escarpement actuel. Des hypothèses plus anciennes considéraient l'escarpement actuel comme une falaise marine due à l'action des vagues ou simplement comme le retrait "normal" d'un escarpement continental.

La plaine de la JEFFARA succède, vers le nord, aux glacis de piémont faiblement inclinés qui la rattachent à l'escarpement du jebel. Elle constitue une surface très plane dont la pente n'excède pas 1 %. Les lits mineurs des wadis sont incrustés dans le glacis et la plaine et sont généralement très marqués. Mais leur largeur moyenne décroît rapidement de l'amont vers l'aval.

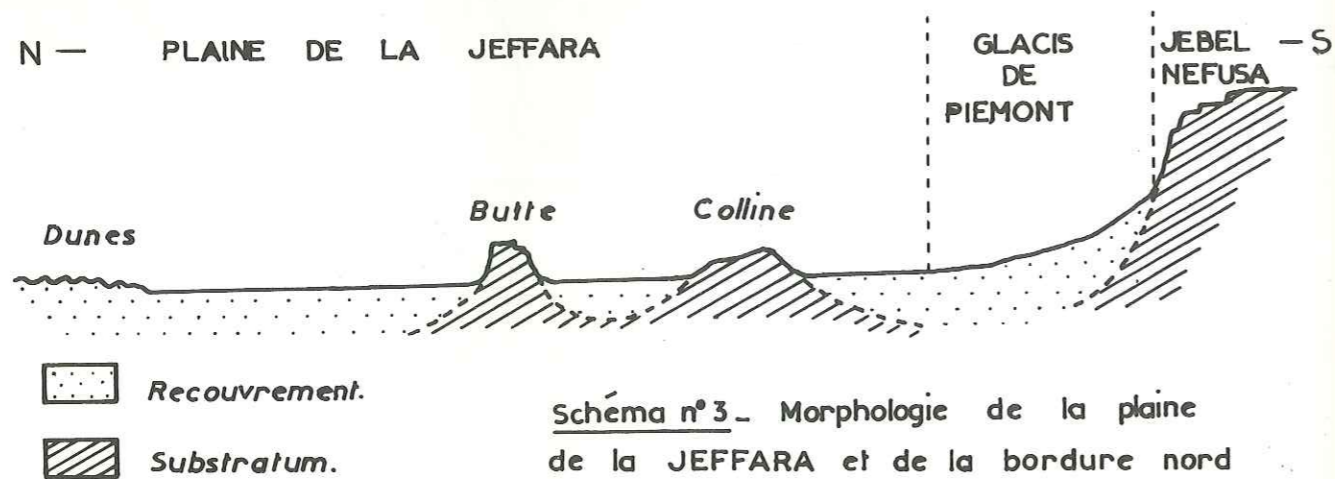


Schéma n° 3. Morphologie de la plaine de la JEFFARA et de la bordure nord du JEBEL.

La monotonie de la plaine est rompue par des reliefs correspondant à des collines plus ou moins arrondies ou à des buttes plus élevées et aux parois abruptes, correspondant à de réelles buttes témoins ou à des bombements de substratum encore non érodés (schéma n° 3).

Plus au nord, relayant les zones d'épandage, on trouve des massifs dunaires généralement fixés par une végétation de graminées et de genêts.

III - CLIMATOLOGIE

- 1 - Généralités
- 2 - La température atmosphérique
- 3 - Les précipitations
- 4 - L'humidité relative de l'air
- 5 - Les vents
- 6 - Evaporation
- 7 - Ensoleillement
- 8 - Classification climatique de la zone étudiée

III - CLIMATOLOGIE

1 - GENERALITES

Les données climatologiques auxquelles il sera fait référence pour caractériser la zone étudiée seront de deux types :

. des données ayant valeur de moyennes, établies sur une période suffisamment longue ;

. des données relevées pendant la durée de l'étude précisant les caractéristiques climatiques de la région.

Les premières sont fournies par les relevés de la météorologie nationale (le tableau n° 4 donne les périodes d'observation pour les différentes stations) ; les secondes, outre celles de la météorologie nationale pour les mêmes stations que précédemment, sont obtenues à partir d'observations effectuées dans deux stations climatologiques installées par le G.E.F.L.I. La carte n° 1A donne la situation de ces différents points de relevé, à savoir :

- Les stations du réseau météorologique national situées à AL AZIZIYAH au nord de la zone étudiée, à une altitude de 125 m, à BIR AL GHANAM à l'ouest à une altitude de 150 m et à GHARYAN au sud, à 725 m. Cette dernière étant citée à titre comparatif car elle est placée sous des conditions climatiques influencée par l'altitude. Elle donne toutefois une bonne idée des conditions climatiques régissant le bassin versant du wadi principal (le Wadi GHAN) débouchant dans la plaine ;

- Les stations climatologiques du G.E.F.L.I. L'une est située à mi-chemin entre AL AZIZIYAH et BIR AL GHANAM (station 105 de la carte I), l'autre se trouve sur la bordure nord du jebel NEFFUSA au Nord-Est de GHARYAN (station 302 de la carte 1A).

Il existe de plus un réseau de pluviomètres et de pluviographes mis en place par le G.E.F.L.I. dont on trouvera la position sur la carte n° 1A.

Stations	Précipitations	Température atm.	Humidité relative
AL AZIZIYAH	1920-1975	1913-1975	1926-1975
BIR AL GHANAM	1926-1973	1926-1973	1935-1938 et 1957-1973
GHARYAN	1924-1975	1924-1975	1926-1975

TABLEAU n° 4 : Durée d'observation des différents facteurs climatiques.

Les facteurs climatologiques pour lesquels on possède des données au moins pour les années 1973-1974 et 1974-1975 sont les suivants :

- . la température atmosphérique,
- . les précipitations,
- . l'humidité relative de l'air,
- . les vents,
- . l'ensoleillement journalier mensuel,
- . l'évaporation.

Dans la mesure du possible on étudiera ces différents facteurs tant dans leur répartition spatiale que temporelle.

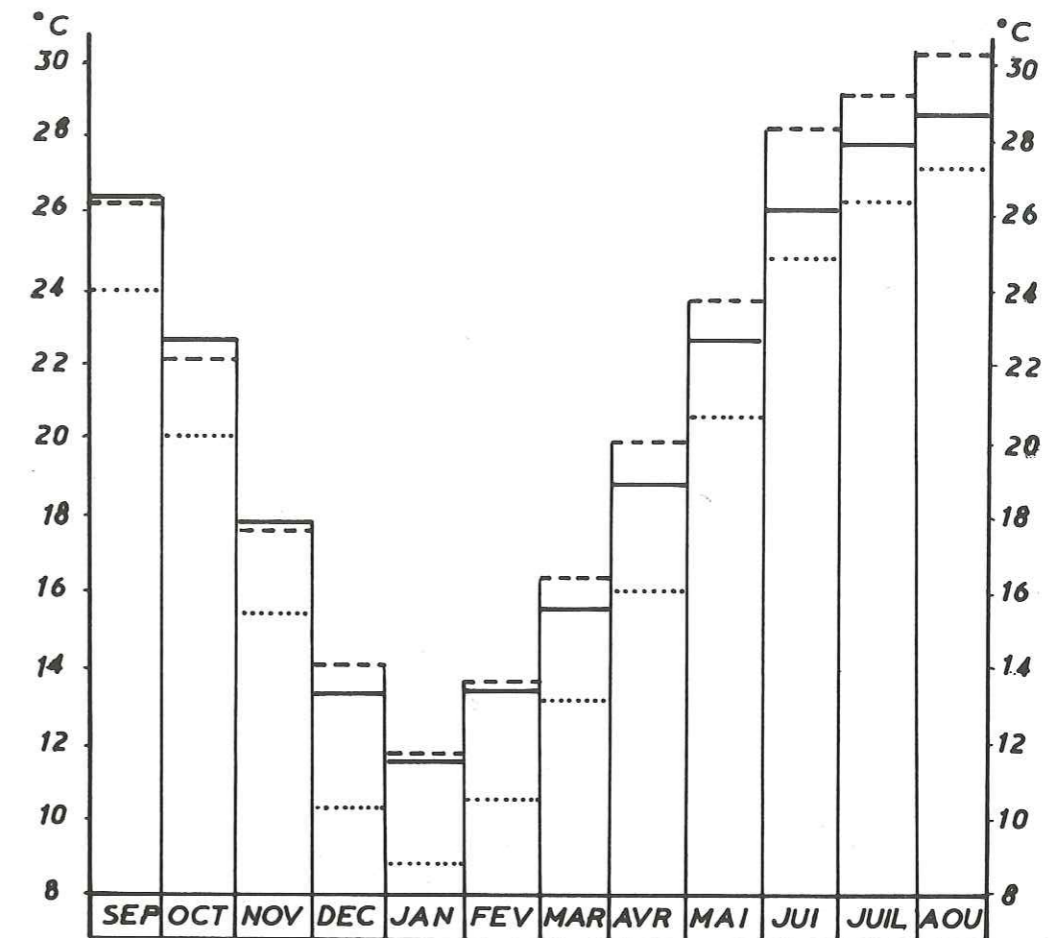
2 - LA TEMPERATURE ATMOSPHERIQUE

Les températures sont relativement homogènes sur toute la zone d'étude. Elles sont une fonction décroissante de l'altitude lorsqu'on atteint la bordure nord du jebel NEFFUSA. Les températures moyennes minimales sont relevées à la station climatologique de GHARYAN. A partir de cette station la température augmente vers le nord jusqu'à une température moyenne maximale aux alentours d'AL AZIZIYAH et vers le sud et sud-est en direction de MIZDAH.

La carte n° 2A représente les courbes d'isotherme ; dans l'ensemble elles suivent la topographie.

Le mois le plus chaud est le mois d'août, le mois le plus froid est le mois de janvier. L'écart entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est pratiquement le même sur toute la zone ; il est de 16°4 à la station de GHARYAN, de 16°9 à la station d'AL AZIZIYAH et de 20°5 à la station de BIR AL GHANAM (cet écart plus grand annonce déjà le caractère plus désertique de cette région).

Le graphique qui suit donne la répartition mensuelle des températures aux trois stations mentionnées (graphique n° 5) :



Graphique n° 5 - Répartition mensuelle des températures moyennes aux stations d'AL AZIZIYAH (—), de BIR AL GHANAM (---) et de GHARYAN (.....).

La température maximale observée a été de 57,3°C à la station d'AL AZIZIYAH et de 49,5°C à GHARYAN, la température minimale de - 3,2°C à AL AZIZIYAH et de - 6,6°C à GHARYAN.

Les variations de température d'une année à l'autre sont peu importantes. La différence des températures correspondant aux fréquences de dépassement 0,1 et 0,9 n'excède pas 4°C à BIR AL GHANAM et 2°C à AL AZIZIYAH et GHARYAN.

Pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle dans la zone d'épandage du wadi AL HIRA, il fallait disposer des températures moyennes par décades. Or pour la période 1973-1975 ces données n'existent pas. On ne possède les relevés de température que pour la saison 1970-71 à la station climatologique 204 (carte 1A). Aussi on a établi une corrélation entre les températures à la station de GHARYAN et à la station 204. La corrélation s'avère excellente (coefficient de corrélation $r = 0,995$). La droite de régression obtenue a pour équation :

$$\theta_G = 0,962 \theta_H - 2,5$$

où θ_G est la température à GHARYAN

et θ_H est la température à la station 204.

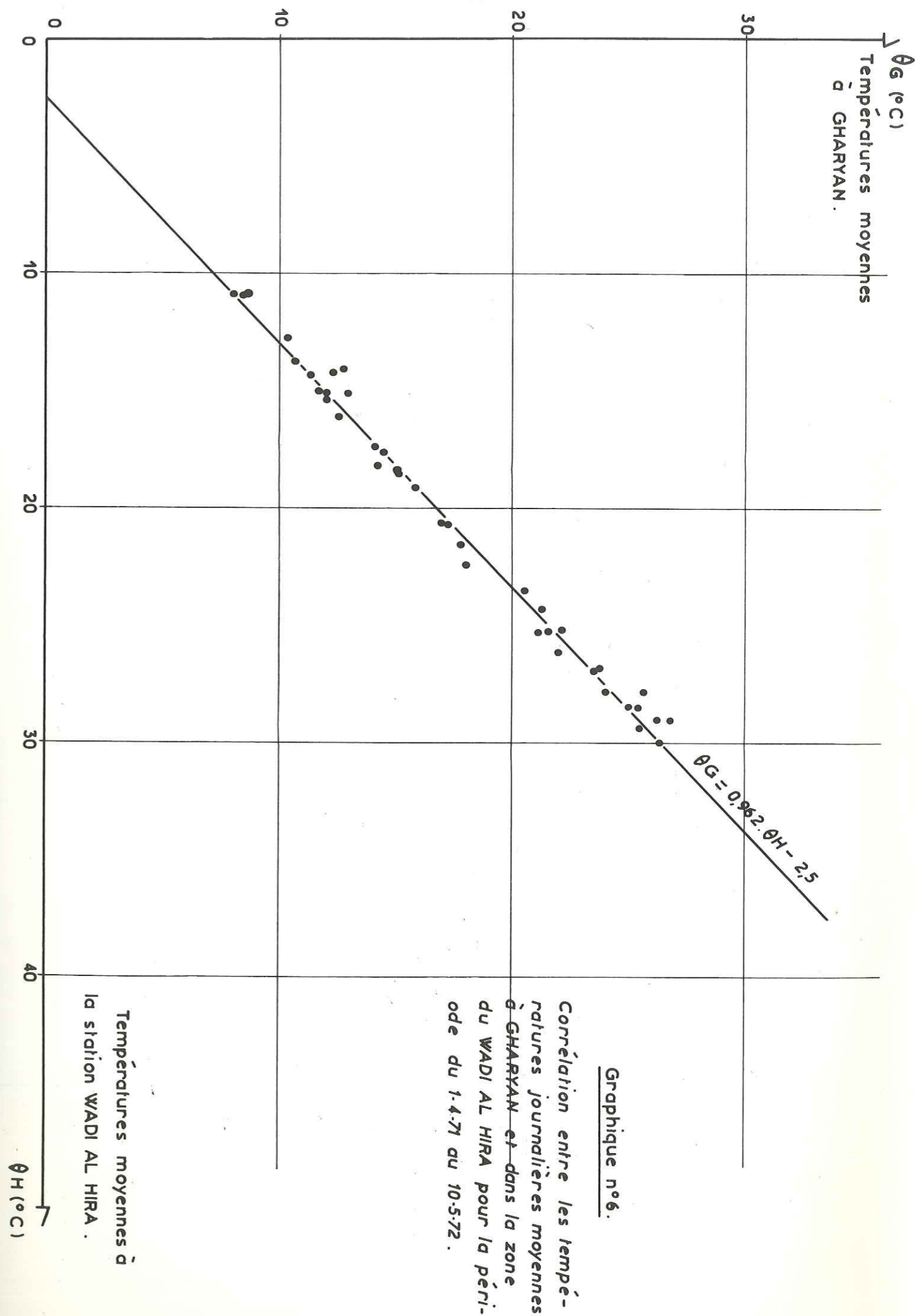
Elle est représentée sur le graphique n° 6.

On peut donc, connaissant les températures à GHARYAN, déduire les températures dans la zone du Wadi AL HIRA pour une période donnée.

Ainsi, dans le tableau suivant, on trouvera les températures moyennes décennales à GHARYAN pour la période allant de janvier 1974 à avril 1975, et les températures correspondantes à la zone du Wadi AL HIRA. Ces températures seront utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle.

	Températures moyennes décennales (en °C)					
	1ère décade		2ème décade		3ème décade	
	GHARYAN	AL HIRA	GHARYAN	AL HIRA	GHARYAN	AL HIRA
1974						
Janvier	9,8	12,8	8,0	10,9	7,5	10,3
Février	9,6	12,5	11,5	14,5	8,3	11,2
Mars	9,1	12,0	9,9	12,9	17,4	20,6
Avril	14,8	17,9	16,6	19,8	15,8	19,0
Mai	17,8	20,2	22,0	25,4	25,0	28,5
Juin	25,1	28,8	24,1	27,6	27,1	30,8
Juillet	22,6	26,1	24,7	28,3	22,7	26,1
Août	24,7	28,1	23,2	26,7	25,8	29,4
Septembre	26,6	30,1	21,0	24,4	22,0	25,4
Octobre	19,3	22,6	19,0	22,3	16,1	19,3
Novembre	12,2	15,2	14,0	27,1	11,6	14,6
Décembre	8,4	11,3	7,0	9,8	8,8	11,6
1975						
Janvier	6,3	9,1	8,6	11,5	7,9	10,8
Février	10,4	13,4	10,0	13,0	7,3	10,1
Mars	9,2	12,1	12,5	15,6	12,1	15,1

TABLEAU 7 : Températures moyennes décennales à GHARYAN et dans la plaine du WADI AL HIRA.



3 - LES PRECIPITATIONS

3.1 - Valeurs moyennes

Dans les pays arides les précipitations constituent le facteur climatique le plus important tant du point de vue de l'évaluation des ressources en eau que des problèmes agricoles.

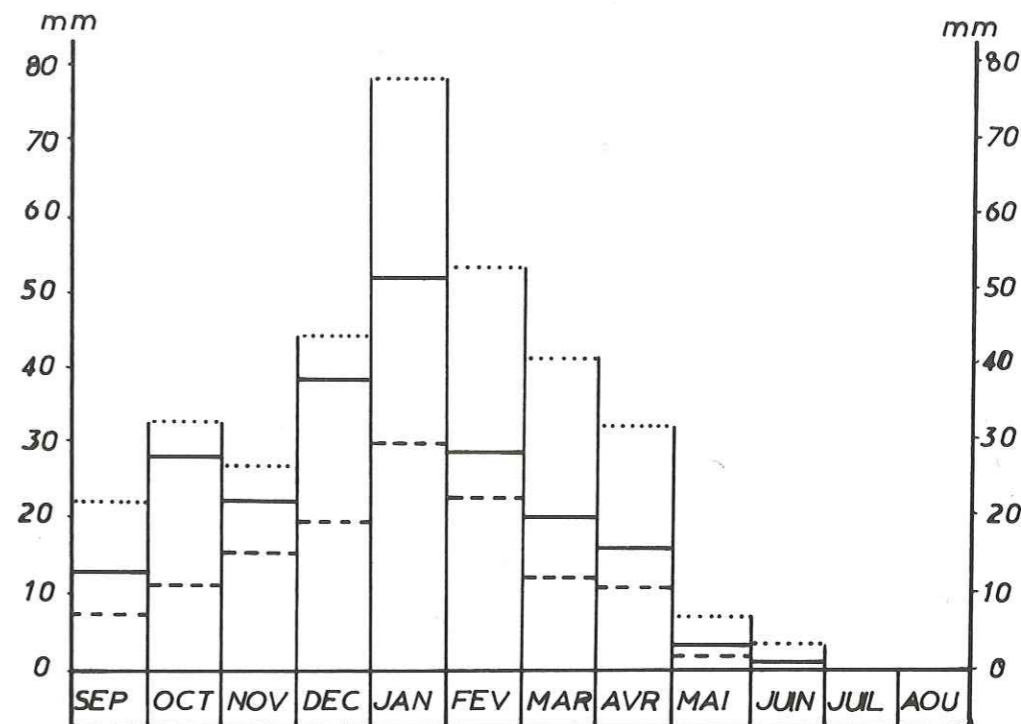
Les pluies dans cette partie de la Méditerranée sont liées au déplacement du front polaire vers le sud en hiver. Elles sont associées aux vents de secteur nord et ouest et sont de type dépressionnaire. Les pluies tombent sous forme d'orages ; localisées en automne, elles sont plus généralisées en hiver.

La grêle et la neige ne sont pas inconnues dans le jebel. En 1949, en trois jours il est tombé 1 m de neige dans le jebel de GHARYAN.

Les précipitations moyennes annuelles sont assez inégalement réparties dans l'espace. Ainsi à la station de BIR AL GHANAM on relève une moyenne annuelle de 130,5 mm alors qu'à GHARYAN la moyenne annuelle est de 341,6 mm ; elle est de 222,6 mm à AL AZIZIYAH. L'influence du relief est ici prépondérante, d'autant que la zone étudiée est située au pied de la partie la plus haute du jebel NEFFUSA. Les masses d'air saturées en vapeur d'eau, en provenance de la mer, se heurtent à l'escarpement du jebel et, en s'élevant, se refroidissent. La vapeur se condense et provoque des précipitations sur la bordure nord du jebel.

Il n'est donc pas étonnant de rencontrer les précipitations maximales aux alentours de GHARYAN. Plus au sud, les masses d'air s'étant déchargées de leur vapeur d'eau, les précipitations décroissent rapidement. La carte n° 3A, représentant les isohyètes moyennes annuelles, met bien en évidence l'influence du relief sur les précipitations.

Le graphique suivant (graphique n° 8) donne les précipitations moyennes mensuelles. Il montre clairement que la saison des pluies s'étend de septembre à mai et que le mois de janvier est le mois le plus humide. Les précipitations décroissent rapidement de janvier à mai.



Graphique n° 8 - Précipitations moyennes mensuelles (en mm) pour les stations de AL AZIZIYAH (—), de BIR AL GHANAM (- - -) et de GHARYAN (.....).

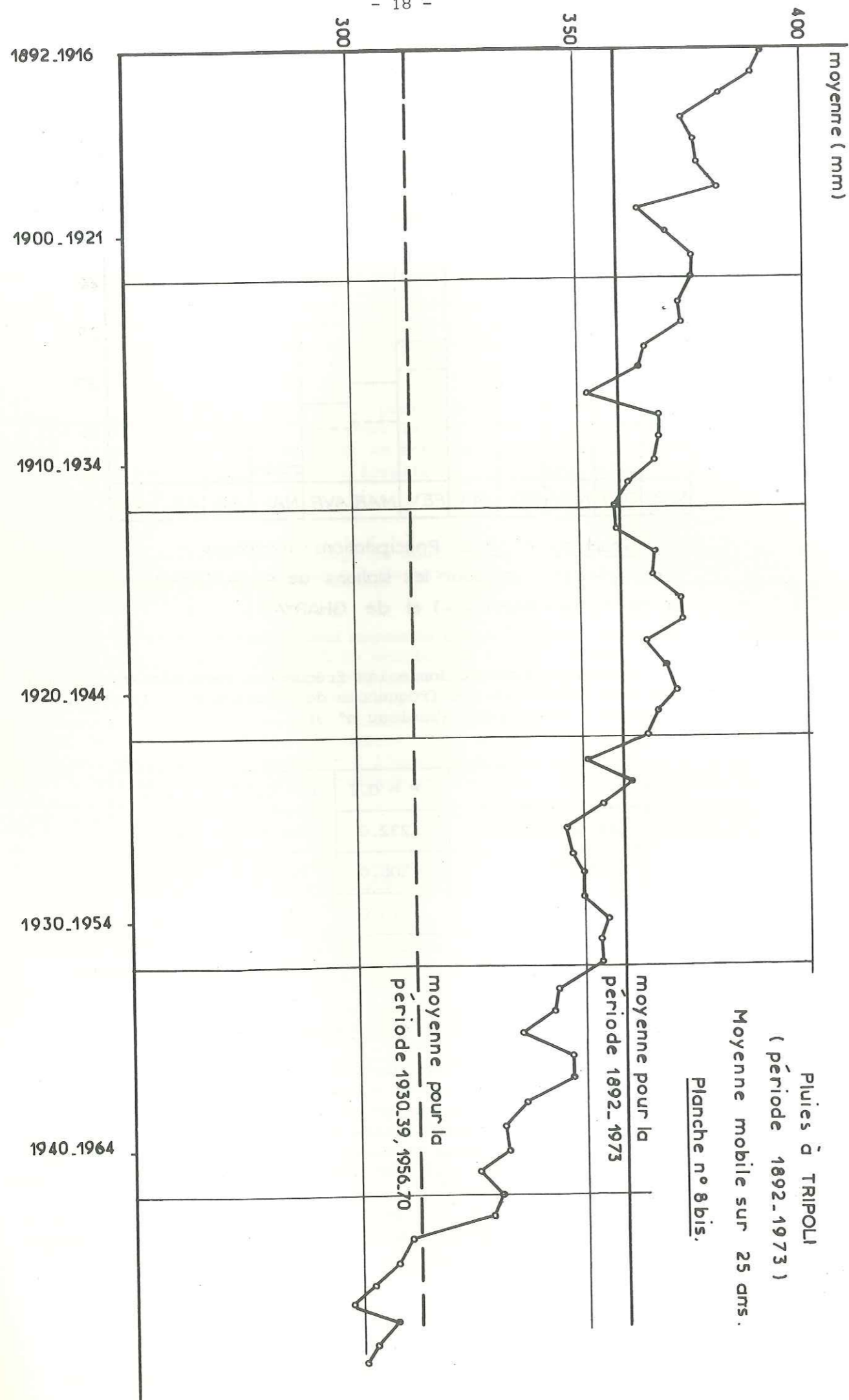
Le tableau suivant donne les fréquences caractéristiques des précipitations (il s'agit des fréquences de dépassement ; la fréquence 0,5 correspond à la moyenne) (Tableau n° 9).

	F = 0.1	F = 0.5	F = 0.9
BIR AL GHANAM	232.0	130.5	200.0
AL AZIZIYAH	306.0	222.6	120.0
GHARYAN	510.0	341.6	150.0

TABLEAU n° 9 : Fréquences de dépassement caractéristique.

3.2 - Evolution de la pluviométrie depuis 1892

La pluviométrie est enregistrée à TRIPOLI depuis 1892. Cette période d'observation de plus de 80 années permet d'apprécier l'évolution des précipitations. Pour ce faire, on utilise une moyenne mobile calculée sur 25 ans. Le graphique tracé à l'aide de ces données montre une nette décroissance des hauteurs d'eau enregistrées (graphique n° 8 bis). De 1892 à 1975, la pluviométrie passe de 390 mm à 300 mm par an. Ceci a sans doute provoqué une augmentation de l'aridité sur le pays avec pour corollaire une baisse des niveaux piézométriques des nappes, d'une part en diminuant la recharge, d'autre part en accélérant le processus de pompage pour l'irrigation.



3.3 - Données pour la période 1973-1975

Les précipitations mensuelles pour la zone d'étude sont obtenues à partir d'un réseau de pluviomètres et de pluviographes mis en place par le G.E.F.L.I. On en trouvera la localisation sur la carte n° 1A.

Le résultat des relevés est donné dans le tableau suivant (tableau n° 10).

	1973				1974				1975					
	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR
101	32.2	6.3	43.0	31.5	119.0	8.5	8.9	67.0	7.7	27.6	*	*	*	*
102	31.7	9.0	53.0	41.0	114.5	10.8	22.5	117.3	6.4	27.6	45.2	76.5	6.5	0.5
103	30.2	6.5	54.8	30.5	87.5	7.5	22.0	82.8	3.4	27.4	32.8	60.0	5.0	0.5
104	30.2	9.5	43.5	36.0	86.0	6.5	6.9	85.8	2.9	19.6	38.6	54.6	5.5	0.0
105	*	5.9	47.8	33.1	84.3	5.7	4.2	87.0	4.8	33.2	31.8	66.4	5.0	0.0
106	24.8	6.0	46.5	32.0	82.0	2.5	3.0	135.5	4.3	17.2	14.2	74.3	6.0	0.0
107	27.5	5.8	24.5	40.0	84.0	5.0	2.8	102.8	2.3	23.4	40.6	61.9	6.0	0.0
108	27.9	8.0	29.6	42.0	104.0	7.0	7.0	104.0	5.8	33.5	36.8	75.5	6.0	0.0
109	44.0	9.4	48.0	39.8	121.0	13.8	3.8	120.8	5.4	36.4	39.4	43.4	10.2	1.6
202	40.5	10.0	*	25.2	76.1	11.0	46.0	44.3	5.9	21.0	44.0	54.3	9.4	0.0
203	38.2	4.8	35.7	18.2	83.3	14.5	15.7	35.2	7.5	30.8	43.2	52.3	10.0	0.0
205	38.7	5.7	*	*	*	12.5	5.0	68.3	5.3	35.7	77.6	53.6	10.0	0.0

* valeurs incertaines ou non connues

TABLEAU n° 10 : Précipitations pour les années 1973-1974 et 1974-1975.

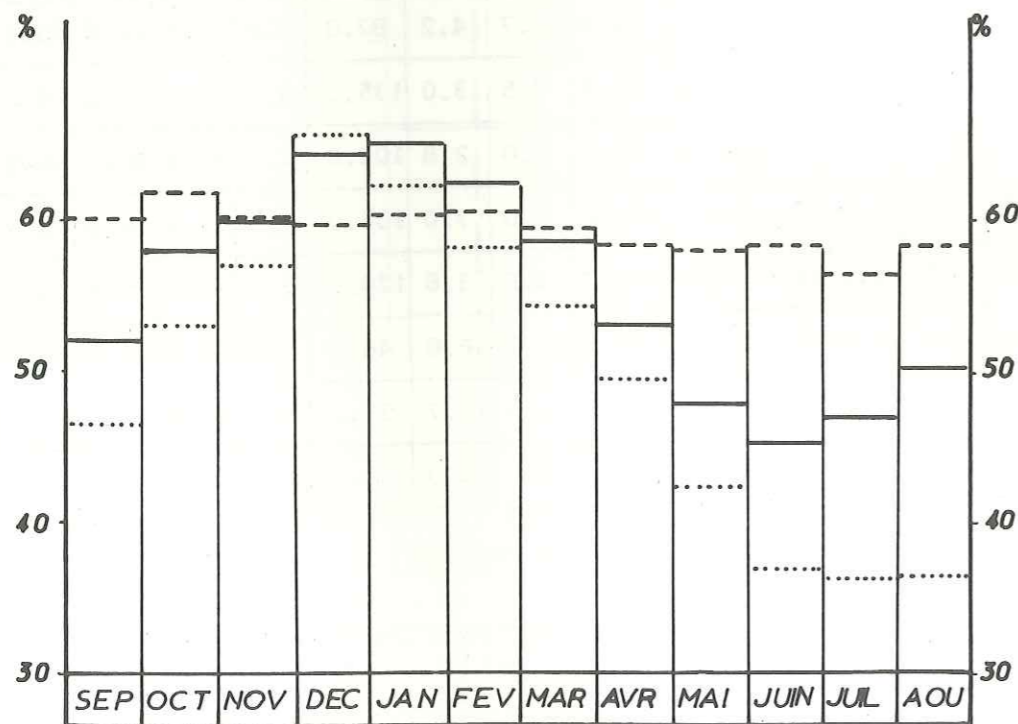
4 - L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR

L'humidité relative de l'air est mesurée à l'aide d'hygromètres enregistreur à cheveux.

Les stations de AL AZIZIYAH, BIR AL GHANAM et GHARYAN permettent de calculer l'humidité moyenne annuelle (graphique n° 11).

La carte n° 2A présente les courbes d'isohumidité moyenne annuelle. Les courbes sont pratiquement parallèles à la bordure nord du jebel. L'humidité relative diminue lorsqu'on s'éloigne de la mer. L'humidité relative dans la zone du Wadi AL HIRA est supérieure à 50 %, valeur qui peut paraître forte pour un climat aride, mais même en été l'humidité relative reste forte et il n'est pas rare de rencontrer d'épais brouillards au mois de juillet.

Les mois les plus humides sont évidemment les mois d'hiver (décembre, janvier) qui correspondent aux mois les plus pluvieux. Les mois les plus secs sont les mois d'été (juin, juillet, août). Le graphique suivant (graphique n° 11) donne la répartition temporelle des humidités relatives moyennes mensuelles aux stations de AL AZIZIYAH, de GHARYAN et de BIR AL GHANAM.



Graphique n° 11 - Humidité relative moyenne de l'air à AL AZIZIYAH (—), BIR AL GHANAM (---) GHARYAN (.....).

L'humidité relative de l'air est forte à BIR AL GHANAM et elle est constante tout au long de l'année. La moyenne annuelle est de 59,1 %, l'écart entre le mois le plus humide et le mois le plus sec est seulement de 5,4 %. Les stations de AL AZIZIYAH et de GHARYAN présentent au contraire des fortes variations entre la saison sèche et la saison humide, respectivement 20 et 30 % pour des moyennes annuelles de 56,0 % et 49,8 %. Les valeurs extrêmes ne sont pas exceptionnelles, l'état hygrométrique de l'air peut tomber très bas (moins de 10 %) pendant plusieurs jours, lorsque souffle le vent du sud.

Il faut toutefois remarquer que les écarts journaliers sont très importants : l'état hygrométrique de l'air passe par un minimum vers 4h00 et par un maximum vers 14h00. L'écart entre le minimum et le maximum est souvent très grand (de 60 % à 80 %), surtout en été pour les stations de AL AZIZIYAH et de GHARYAN. Il en résulte un phénomène de condensation non négligeable d'où une abondante rosée et même des brouillards matinaux.

5 - LES VENTS

Seule la station climatologique 105 du G.E.F.L.I. (carte n° 1A) était équipée d'un anémographe. Elle ne donne malheureusement de données anémométriques que pour l'année 1974-1975. Pour établir une moyenne, il faut prendre les données de la station climatologique de l'aéroport de BIN GASHIR. Cette station est située très au nord de la zone étudiée, assez loin de la bordure du jebel. Cependant, vu l'absence de relief sur la plaine de la JEFFARA, la répartition des vents doit être homogène sur toute la plaine.

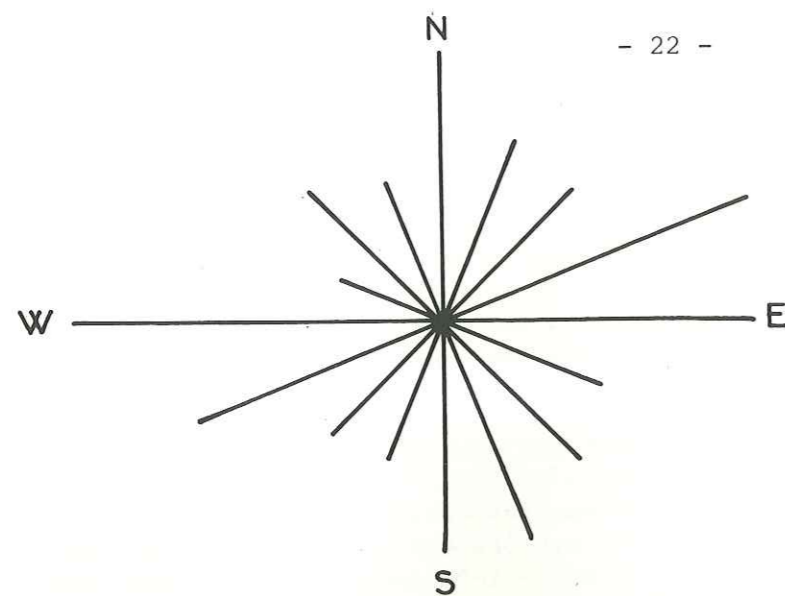
A l'aide des données de la station de BIN GASHIR, on a établi deux roses de vents pour les périodes de 1966 à 1970 et de 1971 à 1975. On peut mettre en évidence quatre secteurs à peu de chose près équivalents : W-WSW, E-ENE, S-SSE et N (planche n° 12).

La rose des vents construite à partir des données de la station 105 a un aspect totalement différent. Il n'existe qu'un secteur dominant : le secteur NW-N-NE. Les vents de secteur est et sud sont peu importants. Les périodes d'observation n'étant pas les mêmes, il est difficile de faire des comparaisons fructueuses entre les deux stations si ce n'est que les secteurs dominants peuvent sans doute varier d'une année sur l'autre.

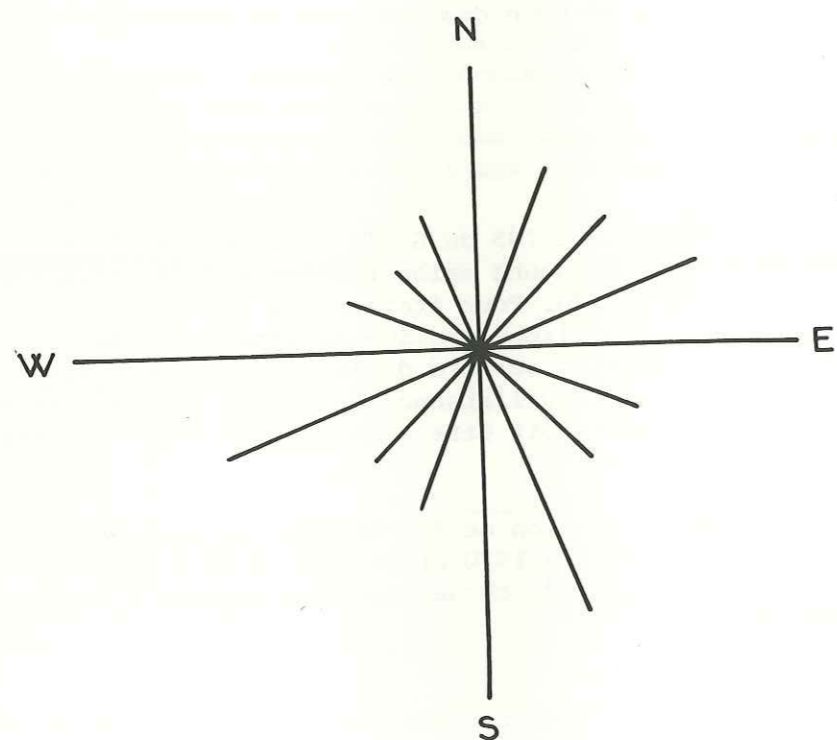
Les vents dominants sont :

- de secteur E-NE d'avril à septembre,
- de secteur S d'octobre à novembre,
- de secteur W-SN de décembre à mars.

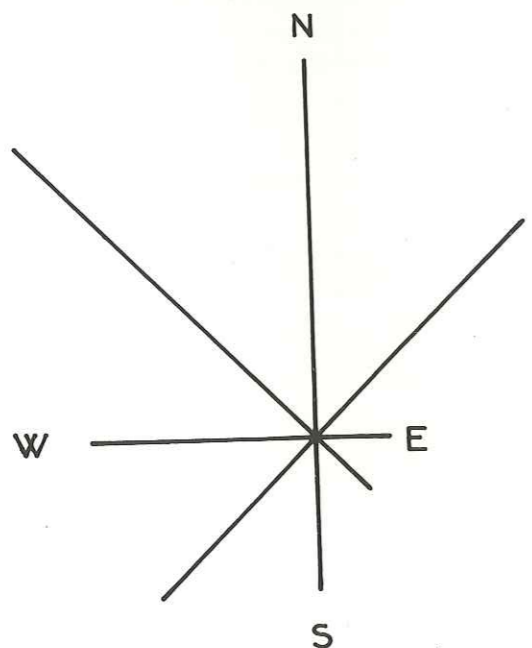
Les vents de secteur ouest sont frais et souvent pluvieux, ils soufflent de préférence l'hiver et sont liés au déplacement vers l'est des dépressions méditerranéennes.



Direction des vents à la station de l'aéroport de BIN GASHIR pour la période de 1961 à 1965.
(en nombre de jours pour cent)



Direction des vents à la station de l'aéroport de BIN GASHIR pour la période de 1966 à 1971.



Direction des vents à la station 105 pour la période de mai 1974 à avril 1975.

Les vents de secteur est sont secs, ils soufflent l'été.

Les vents de secteur sud ont une répartition assez homogène sur toute l'année, avec cependant une fréquence plus marquée au printemps et en automne. Le vent du sud, appelé GHIBLI, est un vent chaud et sec, souvent chargé de sable, aux conséquences désastreuses pour l'agriculture. Il est dû au passage des dépressions sahariennes qui provoquent l'advection de masses d'air en provenance du désert. Le GHIBLI s'installe pour des périodes plus ou moins longues, n'excédant pas, toutefois, 5 à 6 jours.

Le pourcentage des jours sans vents est très faible, à peine 7 %. Pour 55 % des jours de l'année, la vitesse moyenne des vents n'excède pas 3 m/s, pour 22 % elle est supérieure à 5 m/s et pour seulement 6 % des jours de l'année, elle dépasse 10 m/s.

6 - EVAPORATION

L'évaporation est sans doute l'une des données climatologiques la plus difficile à approcher. Les seules mesures en notre possession sont des relevés d'évaporation au bac COLORADO et à l'évaporimètre PICHE. Ces mesures ont été effectuées durant la saison 1971-1972 dans différentes stations climatologiques réparties de la frontière tunisienne au golfe de SIRTE. Le manque d'observateurs et l'ensablement rapide des bacs COLORADO n'ont pas permis de poursuivre les mesures pour l'année 1974-1975. Les seuls relevés dont on dispose pour cette période sont des mesures d'évaporation journalières au PICHE à la station 302 (carte IA) sur la bordure nord du jebel de mars à août 1974.

Les moyennes mensuelles relevées en 1971 et 1972 permettent d'établir des corrélations entre les mesures d'évaporation, la température et l'humidité relative :

- l'évaporation mesurée au PICHE est essentiellement liée à l'humidité relative de l'air (coefficient de corrélation $r = 0,70$), l'effet de la température est moindre ($r = 0,64$). La vitesse des vents n'intervient pas, les mesures étant faites sous abri ;

- l'évaporation mesurée au bac COLORADO, contrairement à celle mesurée au PICHE, est directement soumise à la température ($r = 0,89$), l'humidité relative de l'air n'intervient pas ($r = 0,33$).

La comparaison des évaporations mesurées au PICHE avec celles mesurées au bac COLORADO donne une relativement bonne corrélation ($r = 0,83$).

Les équations des droites de régression permettent d'établir des lois liant l'évaporation PICHE ou l'évaporation COLORADO à la température ou à l'humidité :

$$\begin{aligned} \text{Ev PICHE} &= - 4,47 H + 501,6 \\ \text{Ev COL.} &= - 16,6 \theta - 128,0 \\ \text{Ev PICHE} &= 0,78 \text{ Ev COL.} + 66,66 \end{aligned}$$

L'évaporation est donnée en mm/mois, l'humidité relative H en %, et la température θ en °C (H et θ sont les moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air et de la température);

Les mesures effectuées à la station 302 de mars à août 1974 donnent une assez bonne corrélation entre les évaporations journalières mesurées au PICHE et les humidités relatives journalières de l'air ($r = 0,82$). La droite de régression est de la forme :

$$\text{Ev PICHE} = - 0,38 H + 32,8$$

L'évaporation est exprimée en mm/jour.

En fait les lois données par des droites de régressions sont très empiriques et plus ou moins exactes selon le degré de corrélation existant entre les variables. De plus il est inexact de faire dépendre l'évaporation d'un seul facteur (humidité ou température) et les valeurs d'évaporation trouvées (évaporation d'une surface d'eau libre) sont loin de donner une bonne idée de l'évapotranspiration potentielle ou réelle sur un sol. La seule possibilité d'approche de l'ETP réside dans l'application de formules établies empiriquement. Dans le cas présent, compte-tenu des données en possession, seule la formule de TURC 1961 peut être utilisée. Elle fait intervenir la température moyenne mensuelle et l'ensoleillement journalier :

$$\text{ETP}_{\text{TURC}} = 0,40 (I_g + 50) \frac{t}{t + 15}$$

avec ETP en mm/mois

I_g en $\text{cal/cm}^2/\text{j}$ (radiation globale du mois considéré sur une surface horizontale).

t en °C (moyenne mensuelle) Pour $t = 0$, $\text{ETP} = 0$.

Pour le mois de février qui ne compte que 28 jours, il faut prendre 0,37 au lieu de 0,40. Si l'on considère des périodes décadaires, 0,40 doit être remplacé par 0,13.

$$I_g = I_{gA} (0,18 \cos \lambda + 0,62 \frac{h}{H})$$

où λ est la latitude du lieu,

h l'ensoleillement mensuel observé, en heures par mois,

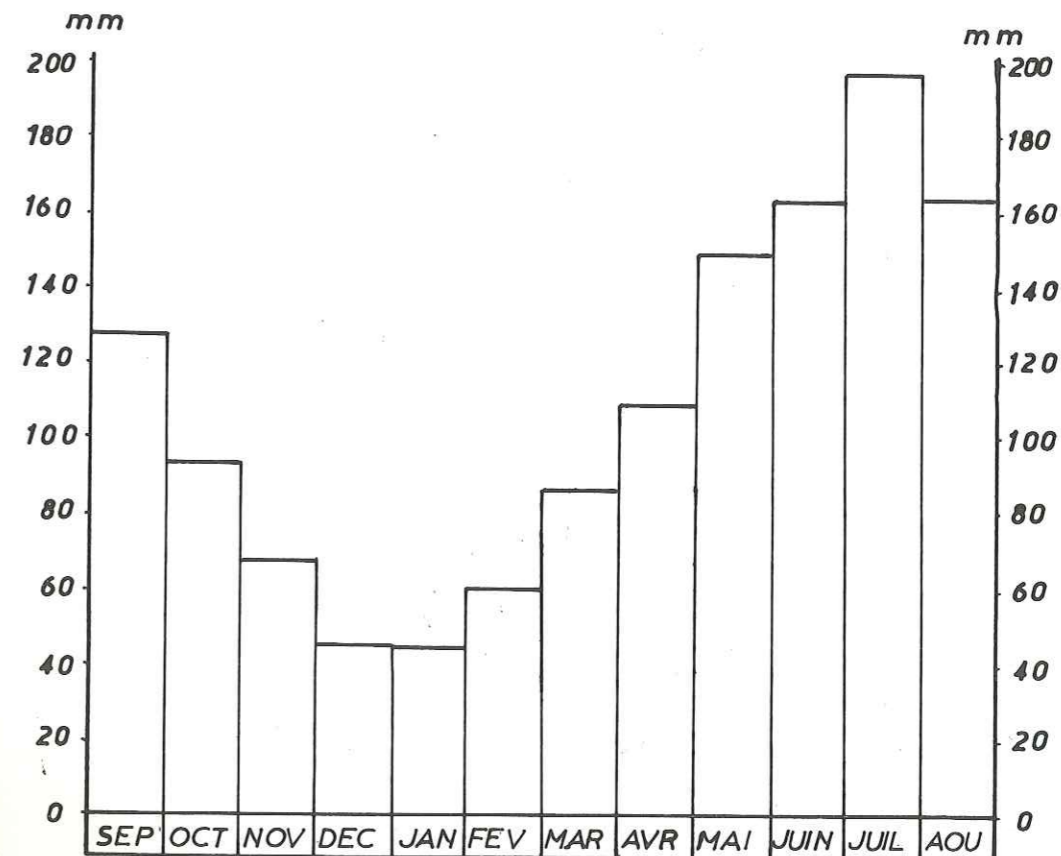
H la durée mensuelle du jour en heures par mois,

I_{gA} la radiation maximale donnée par les tables de ANGOT avec une transparence de l'atmosphère égale à 1.

I_{gA} et H ne dépendent que de la latitude et sont données par des tables.

Le graphique n° 13 donne l'évaporation potentielle mensuelle à la station de GHARYAN, calculée sur la période 1959-1975.

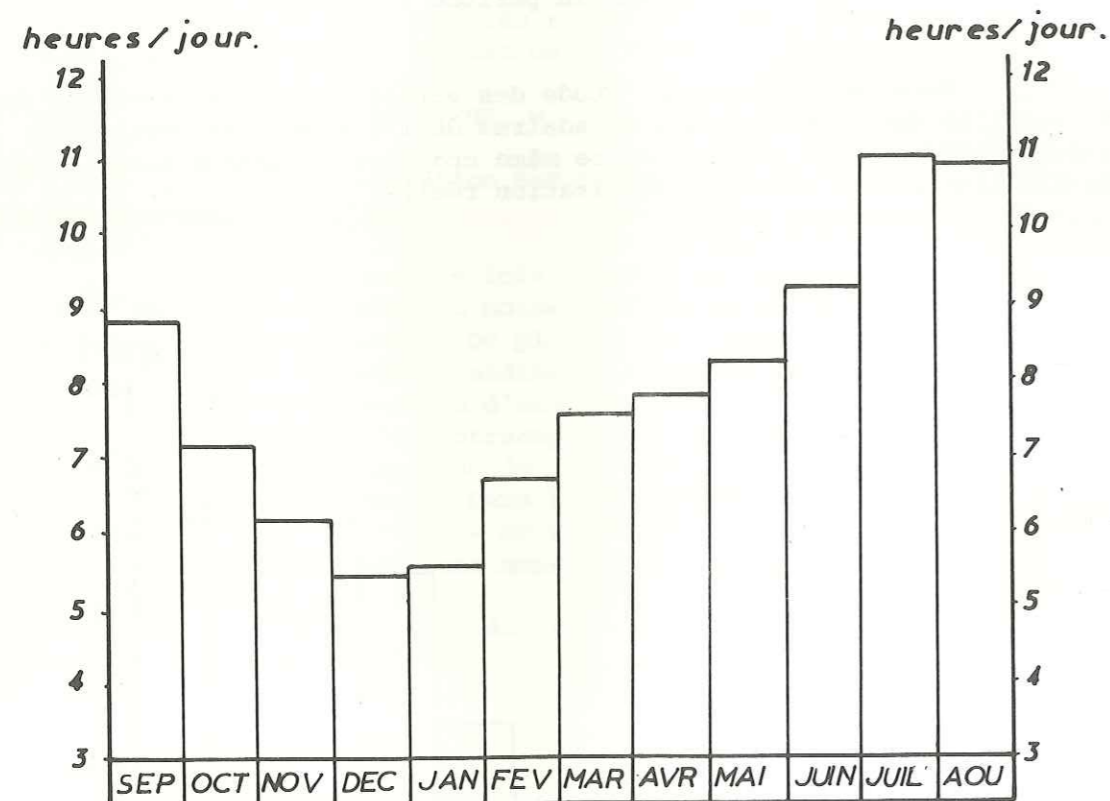
Dans le chapitre VI "Etude des variations de la teneur en eau du sol", on donne les valeurs décadaires de l'ETP pour la période de janvier 1974 à avril 1975. Dans ce même chapitre on aborde aussi le problème de l'évaluation de l'évapotranspiration réelle.



Graphique n° 13 - Evapotranspiration potentielle moyenne calculée par la formule de TURC à la station de GHARYAN.

7 - ENSOLEILLEMENT

La durée d'ensoleillement journalier a été mesurée à la station de GHARYAN à l'aide d'un héliographe CAMPBELL. Le graphique suivant donne la moyenne mensuelle de l'ensoleillement journalier calculée sur une durée de 15 ans, de 1956 à 1971 (graphique n° 14). La durée d'ensoleillement est de 5h30' environ, en décembre et janvier, de 11h00' en juillet et août, soit le double.



Graphique n° 14 - Ensoleillement journalier moyen à la station de GHARYAN.

8 - CLASSIFICATION CLIMATIQUE DE LA ZONE ETUDIEE

Les différents facteurs climatiques, en particulier les précipitations et la température permettent de définir une classification bioclimatique basée sur des observations empiriques.

DE MARTONNE (1923) définit un indice d'aridité, EMBERGER un quotient pluviométrique et LE HOUEROU des types et sous-types climatiques.

8.1 - Indice d'aridité de DE MARTONNE

L'indice d'aridité obéit à la formule :

$$I = \frac{P}{t + 10}$$

où I est l'indice d'aridité,
P la pluviométrie annuelle moyenne,
t la température annuelle moyenne en °C.

La classification basée sur cet indice s'établit de la façon suivante :

- I > 10 : climat maritime ou subhumide,
- 7,5 < I < 10 : climat steppique,
- 5,0 < I < 7,5 : climat prédésertique,
- i < 5,0 : climat désertique.

Ce qui donne pour les stations climatologiques de la zone étudiée :

Stations	Indice d'aridité I	Type de climat
GHARYAN	12,2	sub-humide
AL AZIZIYAH	7,3	prédésertique
BIR AL GHANAM	4,1	désertique

DE MARTONNE (1942) a essayé de préciser l'indice d'aridité en calculant l'indice mensuel des mois d'été et en faisant la moyenne arithmétique de l'indice annuel et de l'indice mensuel le plus faible.

L'indice mensuel est donné par la formule :

$$i = \frac{12 p}{t + 10}$$

où p est la pluviométrie mensuelle moyenne, et t la température mensuelle moyenne.

Dans les régions où il existe un mois dont la pluviométrie moyenne est nulle (ce qui est le cas pour la zone étudiée) l'indice i est nul. L'indice corrigé de DE MARTONNE a donc une valeur égale à la moitié de celle de l'indice annuel I.

Cet indice n'a pas de signification précise dans ses valeurs élevées ; ses valeurs faibles, par contre, constituent de bons tests des conditions climatiques. Les valeurs inférieures à 5 correspondent aux régions très arides et celles comprises entre 5 et 20 aux régions semi-arides.

En se basant sur cet indice les différentes stations climatologiques se placent dans la classification suivante :

Stations	Indice d'aridité I	Type de climat
GHARYAN	6,1	semi-aride
AL AZIZIYAH	3,7	aride
BIR AL GHANAM	2,0	aride

On constate que cet indice corrigé atténue l'optimisme du premier indice pour la station de GHARYAN et son pessimisme pour les stations d'AL AZIZIYAH et de BIR AL GHANAM, en regard des observations sur la végétation ou les possibilités culturelles.

8.2 - "Quotient pluviométrique" de EMBERGER

EMBERGER base sa classification sur le calcul d'un "quotient pluviométrique" (Q) obtenu par la formule :

$$Q = \frac{2000 P}{M^2 - m^2}$$

où P est la pluviométrie annuelle en mm,

M la température maximale moyenne du mois le plus chaud en degrés absolus,

m la température minimale moyenne du mois le plus froid en degrés absolus,

- si $Q < 35$ le climat est aride,
- $35 < Q < 65$ le climat est semi-aride,
- $Q > 65$ le climat est sub-humide.

Pour la station de GHARYAN $Q = 43$, soit un climat semi-aride,
 Pour la station de BIR AL GHANAM $Q = 13$, soit un climat aride.

Cette classification correspond à celle donnée par le deuxième indice de DE MARTONNE.

8.3 - Classement bio-climatique de LE HOUEROU

LE HOUEROU (Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux, hors série, 1971) propose, à partir d'observations dans les zones méditerranéenne, arides ou désertiques, une classification basée sur les précipitations annuelles et la moyenne des minima du mois le plus froid de l'année :

Types de climat

Types	Pluviométrie annuelle moyenne P en mm	Type de climat méditerranéen
A	$400 < P < 600$	Semi-aride
B	$300 < P < 400$	Aride supérieur
C	$200 < P < 300$	Aride moyen
D	$100 < P < 200$	Aride inférieur
E	$50 < P < 100$	Saharien supérieur
F	$20 < P < 50$	Saharien inférieur

Sous-types de climat

Sous-types	Moyenne des minima des mois les plus froids m en °C	Type d'hiver
a	$9 < m$	Très chaud
b	$7 < m < 9$	Chaud
c	$5 < m < 7$	Doux
d	$3 < m < 5$	Tempéré
e	$1 < m < 3$	Frais
f	$-2 < m < +1$	Froid

D'après cette classification la zone étudiée se situerait :

. d'après la pluviométrie dans le type D (100-200 mm) en limite du type C (200-300 mm).

. d'après la température hivernale :

-AL AZIZIYAH : m = 5,1

-BIR AL GHANAM : m = 4,8, soit dans les sous-types c et d.

Le climat est donc méditerranéen de type aride inférieur en limite du type aride moyen à hivers doux ou tempérés.

Quelle que soit la classification adoptée les caractéristiques climatiques de la zone étudiée montrent qu'il y règne, indiscutablement, un climat de type aride. L'hydrologie de la région en sera très fortement marquée.

IV - HYDROLOGIE

1 - Le réseau hydrographique

2 - Les crues

IV - HYDROLOGIE

Le régime pluviométrique de la région, pluies violentes de courte durée, implique un régime torrentiel des cours d'eau, appelés dans ce pays, wadis. L'écoulement n'existe que lors des pluies suffisamment intenses pour provoquer le ruissellement, il est généralement de courte durée. Aucun wadi n'est pérenne dans la zone étudiée. On note la présence de sources lorsque le lit du wadi entaille la formation ABU SHAYBAH jusqu'aux argiles basales (Wadi ZAQQUT et wadi ZARAT). Leur débit est faible (quelques litres/minute).

1 - LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

On ne prendra en considération que les wadis principaux pour lesquels des mesures de débit ont été effectuées. Ce sont pour la zone étudiée : les wadis GHAN, ZARAT, ZAQQUT et ABU SHAYBAH (TADWAT).

Tous les wadis présentent le même aspect schématique :

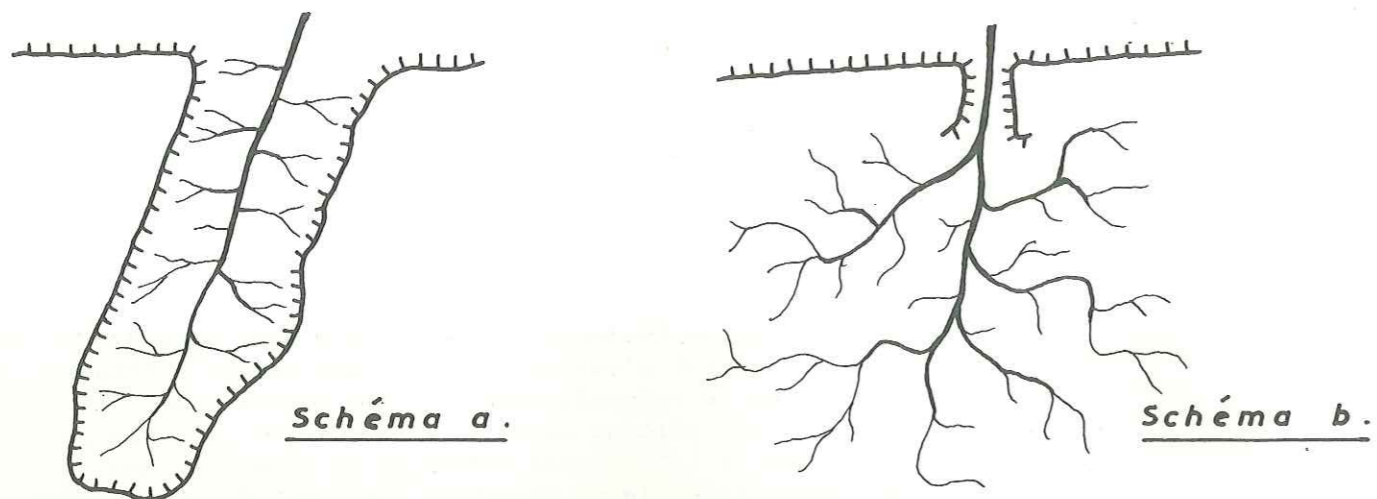
- . un bassin de réception, situé dans le jebel,
- . un chenal d'écoulement à la sortie du jebel, sur le glacis de piémont,
- . une zone d'épandage dans la plaine.

Aucun des wadis du secteur étudié n'a de débouché sur la mer : les eaux s'épandent dans la plaine et forment des lacs temporaires qui disparaissent très rapidement.

D'après l'allure générale du chevelu hydrographique on peut distinguer deux types de wadis :

- les wadis de bordure de jebel caractérisés par une vallée principale alimentée sur toute sa longueur par des affluents prenant naissance sur les flancs de cette vallée (schéma a). Ce sont les wadis ZAQQUT, ZARAT et ABU SHAYBAH pour les plus importants ;

- les wadis installés profondément dans le jebel avec un chevelu très dense d'affluents d'égale importance. Ce type de wadi est représenté par le wadi GHAN (schéma 6).



Le réseau hydrologique s'inscrit dans un bassin versant, qui, ici, est limité par la ligne de crête, les phénomènes de karstification étant absents. Le bassin versant peut être caractérisé par sa forme et par son relief.

Pour préciser la forme, on définira la surface, le périmètre et l'indice de compacité ou coefficient de GRAVELLIUS ; pour le relief on donnera l'altitude maximale, l'altitude minimale et moyenne, la courbe hypsométrique, l'altitude de fréquence 0,5 et le rectangle équivalent défini par sa longueur L et sa largeur l.

Le réseau hydrographique est caractérisé par son altitude maximale, sa longueur, sa pente moyenne et son profil longitudinal.

L'altitude minimale du bassin versant est celle de la station de jaugeage contrôlant le wadi. Pour le wadi GHAN, on donnera les caractéristiques des bassins versants correspondant à la station appelée wadi GHAN DAM et à celle appelée wadi AL HIRA située à la sortie du jebel.

L'indice de compacité ou coefficient de GRAVELLIUS est établi en comparant le périmètre du bassin versant, P, à celui d'un cercle ayant la même surface S. Le coefficient de GRAVELLIUS K est égal au rapport de ces deux valeurs :

$$K = \frac{P}{2\sqrt{S}} = 0,28 \frac{P \sqrt{S}}{S}$$

Plus le coefficient est voisin de 1, plus le bassin versant est compact, donc plus il réagit vite à une pluie provoquant un ruissellement.

La courbe hypsométrique d'un cours d'eau indique, à une altitude donnée, le pourcentage de surface du bassin versant dont tous les points sont à une altitude égale ou supérieure.

L'altitude de fréquence 0,5 est déduite de la courbe hypsométrique. C'est l'altitude pour laquelle on a 50 % de la surface du bassin versant à cette altitude ou au-dessus et 50 % au-dessous.

Le rectangle équivalent est une notion qui a été introduite il y a quelques années afin de pouvoir comparer plus facilement des bassins versants entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques morphologiques sur le ruissellement. On a montré qu'une crue pour un bassin versant donné est approximativement la même, sous des conditions climatologiques identiques, que pour un rectangle dans la même zone, ayant le même coefficient de GRAVELLIUS et la même distribution hypsométrique. Ce rectangle est appelé rectangle équivalent. Il consiste en une transformation du bassin versant en une figure géométrique ayant même périmètre et dont les courbes hypsométriques sont des droites parallèles au petit côté du rectangle. Il est caractérisé par sa longueur L et sa largeur l (en km).

Toutes ces caractéristiques sont données dans le tableau n° 15. Les courbes hypsométriques et les profils longitudinaux des réseaux hydrographiques sont représentés sur la planche n° 16.

BASSIN VERSANT PARTIEL DES WADIS	CARACTERISTIQUES DE RELIEF										CARACTERISTIQUES DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE		
	CARACTERISTIQUES DE FORME					CARACTERISTIQUES DE RELIEF					Altitude maximum N (m)	Longueur λ (km)	Pente (%)
BASSIN VERSANT DES WADIS	Surface du bassin A (km ²)	Périmètre P (km)	Indice de compacité	Altitude maximum M (m)	Altitude minimum m (m)	Altitude moyenne $\frac{M+m}{2}$	Altitude de fréquence 0,5	Longueur L (km)	Rectangle équivalent	Longueur l (km)			
HIRA	650	135	1,48	960	200	620,0	660	55,69	11,69	800	50	1,0	
ABU SHAYBAH	700	151	1,59	960	210	585,0	630	64,23	10,93	800	60	0,98	
ZAQQUT	7,7	13	1,31	862	340	551,1	450	4,92	1,56	700	5	7,2	
ZARAT	80	44	1,38	837	280	558,5	600	17,45	4,59	800	18	2,9	
	220	74	1,39	859	280	569,5	540	29,29	7,53	740	22	2,0	

TABLEAU N° 15 : Caractéristiques morphologiques des différents bassins versants étudiés.

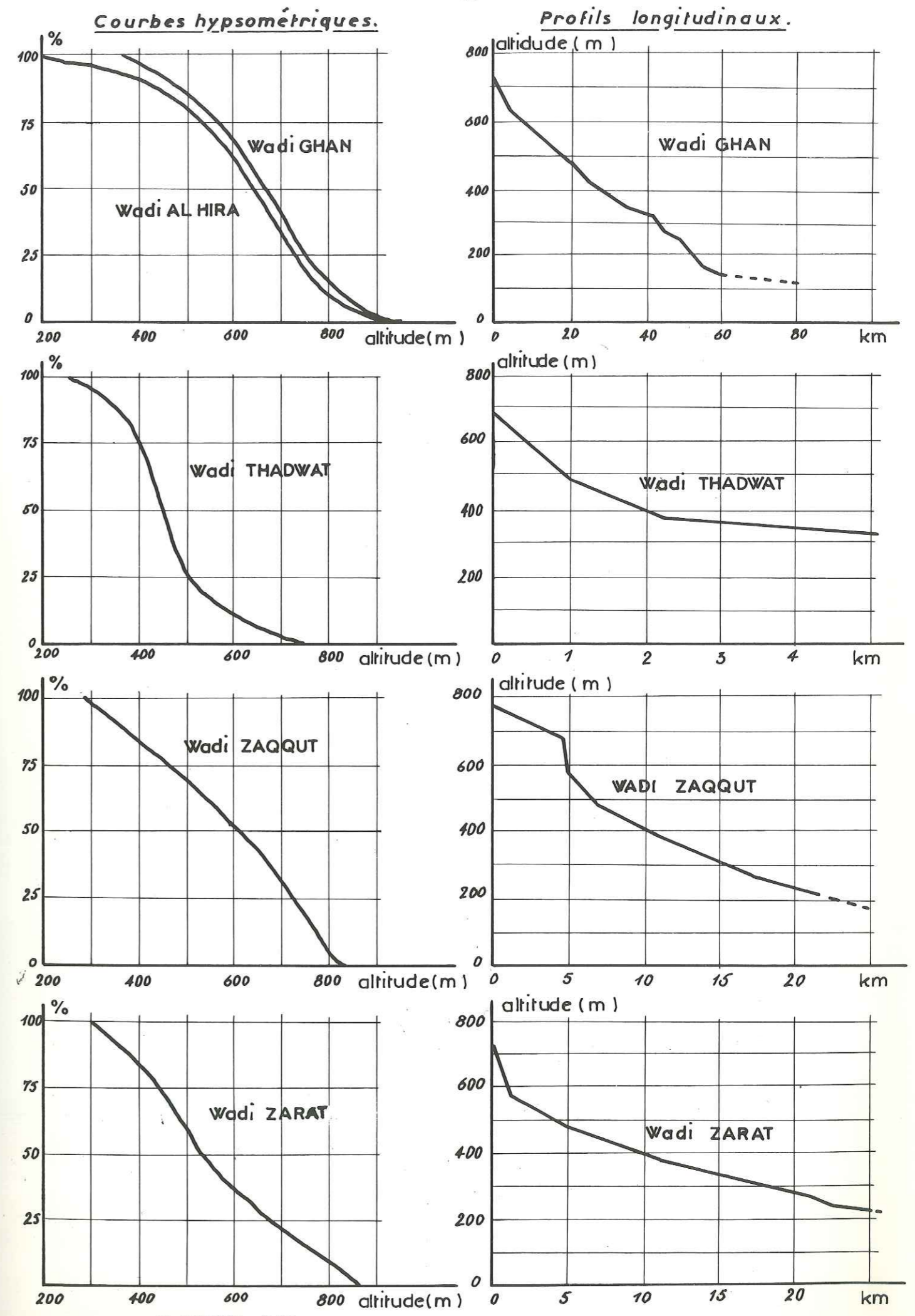


PLANCHE n° 16

2 - LES CRUES

Les crues sont violentes, soudaines et fugaces. On ne dispose que de très peu de données sur les volumes d'eau écoulés. Les mesures de débit n'existent que depuis 1970 pour le wadi GHAN et depuis 1973 pour les autres wadis du secteur étudié.

Deux types de limnigraphes sont utilisés pour les mesures des hauteurs d'eau : le limnigraphe à bulles et le limnigraphe à flotteur ; le premier a l'avantage de résister beaucoup mieux aux crues. Les mesures des vitesses sont effectuées par la méthode chimique ou par flotteurs. L'utilisation du moulinet ou du saumon n'est que rarement possible.

Les crues sont directement liées aux précipitations, elles correspondent donc aux mois les plus humides. Cependant, pour qu'il y ait une crue il faut une intensité de pluie suffisante pour déclencher le ruissellement. Une longue pluie de faible intensité ne provoquera pas de crue alors qu'un orage de courte durée mais de forte intensité suffira à déclencher le ruissellement.

On peut "grosso modo" distinguer deux types de crue : les crues d'automne, en septembre et octobre, liées aux orages (ces crues sont très importantes pour l'agriculture : c'est après leur passage que se font les semailles) ; les crues de printemps (février, mars) sont liées à des pluies plus régulières mais qui tombent sur un sol humide.

Pour palier au manque d'observations, il a fallu reconstituer les ruissellements à partir des précipitations. Pour cela on a utilisé un modèle mathématique donnant les ruissellements sur le bassin versant en fonction des précipitations, de leur intensité et de l'état de saturation du sol. Le modèle mathématique est calé sur les données recueillies depuis 1970. Grâce à cet artifice on dispose d'une série de ruissellement de 1945 à 1975 qui permet de faire une analyse statistique des crues.

A partir des volumes écoulés, ajustés à une loi de GALTON, on détermine, pour les fréquences caractéristiques, le volume des crues et les débits maxima. Les résultats sont consignés dans le tableau n° 17.

BASSIN VERSANT	SURFACE km ²	RUISSellement ANNUEL (Mm ³)				DEBIT MAXIMUM (m ³ /s)			
		1/1000	1/100	1/10	1/2	moyenne	1/1000	1/100	1/10
Wadi GHAN Dam	650,0	300	120,0	32,0	6,5	11,40	1.900	1.300	660
Wadi THADWAT	7,7	12	4,5	1,0	0,2	0,35	150	120	60
Wadi ABU SHAYBAH	60,0	40	18,0	7,0	1,5	2,30	870	480	120
Wadi ZAQQOUT	80,0	50	20,0	7,0	1,8	3,00	1.100	550	90
Wadi ZARRAT	220,0	56	30,0	13,0	4,5	6,30	1.400	700	270

TABLEAU N° 17 : Ruissellements annuels et débit maximum pour les fréquences caractéristiques et ruissellements annuels moyens.

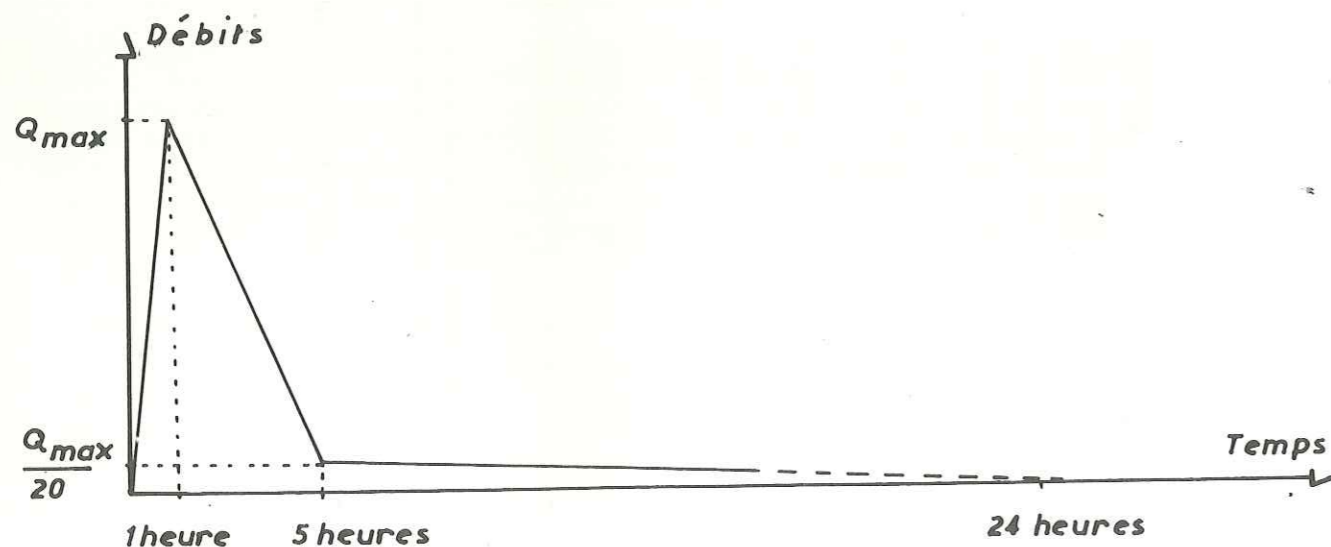
La fréquence F = 1/1000, par exemple, veut dire que l'événement a une chance de se produire une fois en 1.000 ans.

Le tableau n° 18 donne le volume des crues pour l'année 1973-1974 et l'année 1974-1975. Il montre clairement que de tous les wadis étudiés c'est le wadi ZARAT qui a le plus grand nombre de crues. Ceci est dû à la fois aux caractéristiques du bassin versant et aux conditions climatologiques. En effet, c'est un bassin versant qui a une part importante de sa superficie en "haute" altitude et dont la partie supérieure est située dans la zone la plus arrosée du jebel de GHARYAN. Les crues les plus importantes sont évidemment celles du wadi GHAN qui a le bassin versant le plus vaste.

Grâce à un ajustement des crues maximales à une loi de GALTON, on peut déterminer le volume de la crue maximale annuelle pour des temps de retour de 1, 100, 1000 et 5000 ans :

Temps de retour	Wadi GHAN (Mm ³)	Wadi ZAQQUT (Mm ³)	Wadi THADWAT (Mm ³)
5000 ans	60	16	3,5
1000 ans	50	14	2,8
100 ans	26	7,5	1,2
1 an	11	3,0	0,2

Les observations faites sur les crues de 1973-1974 et de 1974-1975 ont permis de définir un hydrogramme schématisé pour la crue millénaire, cet hydrogramme est valable en moyenne pour les différents wadis de la zone :



L'hydrogramme montre que la crue est un phénomène brutal et que le volume maximum s'écoule dans les 5 heures qui suivent le début de l'écoulement. On conçoit donc facilement l'aspect catastrophique de telles crues dans les secteurs habités et cultivés.

Wadis	Date	Volume écoulé (Mm ³)	Wadis	Date	Volume écoulé (Mm ³)
GHAN dam	1973-1974	0,391 0,246 0,011 2,779 6,692	ZAQQUT	1973-1974	0,270 0,051 0,022 0,211 1,657
	28 au 30 Octobre			28 au 31 Octobre	
	9 et 10 Novembre			9 au 11 Novembre	
	15 et 16 Janvier			15 Janvier	
	23 et 24 Février			23 et 24 Février	
	9 au 15 Mars			12 au 14 Mars	
1974-1975	2,514 10,523 0,178 1,430	ZARRAT	1974-1975	0,043 2,426 0,393	
13 au 18 Septembre			13 Septembre		
19 au 21 Octobre			19 et 20 Octobre		
1 et 2 Janvier			Février		
26 au 28 Février					
THADWAT	1973-1974	0,015 0,018 0,092 0,005 0,293	ZARRAT	1973-1974	0,454 0,151 0,152 0,069 0,158 0,156 4,273 0,012
	28 et 29 Octobre			28 au 31 Octobre	
	9 Novembre			9 au 12 Décembre	
	22 Février			14 et 15 Janvier	
	9 Mars			28 et 29 Janvier	
	12 et 13 Mars			15 et 16 Février	
1974-1975	0,154 0,013 0,079	ZARRAT	1974-1975	0,342 7,292 0,152 0,103 0,353	
19 et 20 Octobre			14 Septembre		
19 Mars			18 au 20 Octobre		
25 au 27 Mars			2 au 4 Décembre		
			19 et 20 Février		
			27 au 29 Février		

V - GEOLOGIE

- 1 - Les formations lithologiques
- 2 - L'histoire géologique régionale
- 3 - Caractères hydrogéologiques des formations
- 4 - Les zones hydrogéologiques

V - GEOLOGIE

Bien que les problèmes d'infiltration et d'évapotranspiration n'intéressent que la partie superficielle des terrains, il est important toutefois, de situer la région dans son contexte géologique et hydrogéologique, les possibilités aquifères d'un terrain étant directement liées à sa nature lithologique.

1 - LES FORMATIONS LITHOLOGIQUES

Les formations intervenant dans cette étude sont d'âges triasique, crétacé, tertiaire et quaternaire. Si toutes n'affleurent pas, elles ont cependant toutes été reconnues par les forages d'étude. La carte 4A représente la distribution des formations triasiques et crétacées, abstraction faite du recouvrement tertiaire et quaternaire.

1.1 - Les formations triasiques

Ce sont les plus fréquemment rencontrées dans la zone d'étude. Il s'agit, de bas en haut, de :

- la formation gréseuse OULED CHEBBI,
- la formation gréso-argileuse RAS HAMIA,
- la formation calcaréo-dolomitique AL AZIZIYAH,
- la formation gréso-argileuse ABU SHAYBAH.

1.1.1 - La formation OULED CHEBBI

Cette formation n'est pas connue en affleurements. Elle repose directement sur le socle granitique.

Du sommet à la base, on rencontre, dans le forage où elle a été traversée :

- une trentaine de mètres d'argiles rouges avec quelques intercalations gréseuses et dolomitiques,
- une cinquantaine de mètres de grès grossiers rouges parfois conglomératiques, bien cimentés et légèrement fissurés.

L'épaisseur de cette formation est variable, elle est comprise, pour la plaine de la JEFFARA, entre 80 m et 300 m.

La formation OULED CHEBBI est datée de la base du Trias moyen.

1.1.2 - La formation RAS HAMIA (Planche n° 19)

La formation RAS HAMIA affleure très peu dans le jebel au coeur du dôme de GHARYAN et en pied de jebel dans le coeur d'anticlinaux.

La formation RAS HAMIA est une formation argilo-gréseuse avec des niveaux dolomitiques à la base et au sommet. Les grès sont fins, friables ou consolidés, à ciment calcaire ou argilo-carbonaté. Les argiles sont indurées parfois silteuses, gréseuses et micacées, rouges, brunes, verdâtres, grises ou bariolées. Les dolomies sont gris sombre.

De haut en bas, on rencontre :

- une alternance d'argiles rouges et de bancs calcaires dolomitiques d'une épaisseur de 30 m environ ;
- une couche argileuse de 25 à 30 m ;
- une alternance argilo-gréseuse de 50 à 60 m ;
- des couches gréseuses et argileuses sur 60 à 160 m d'épaisseur ;
- des bancs dolomitiques, constituant la base de la formation, sur une épaisseur d'une vingtaine de mètres.

La puissance de cette formation serait comprise entre 200 m (GHARYAN) et 300 m (AL AZIZIYAH).

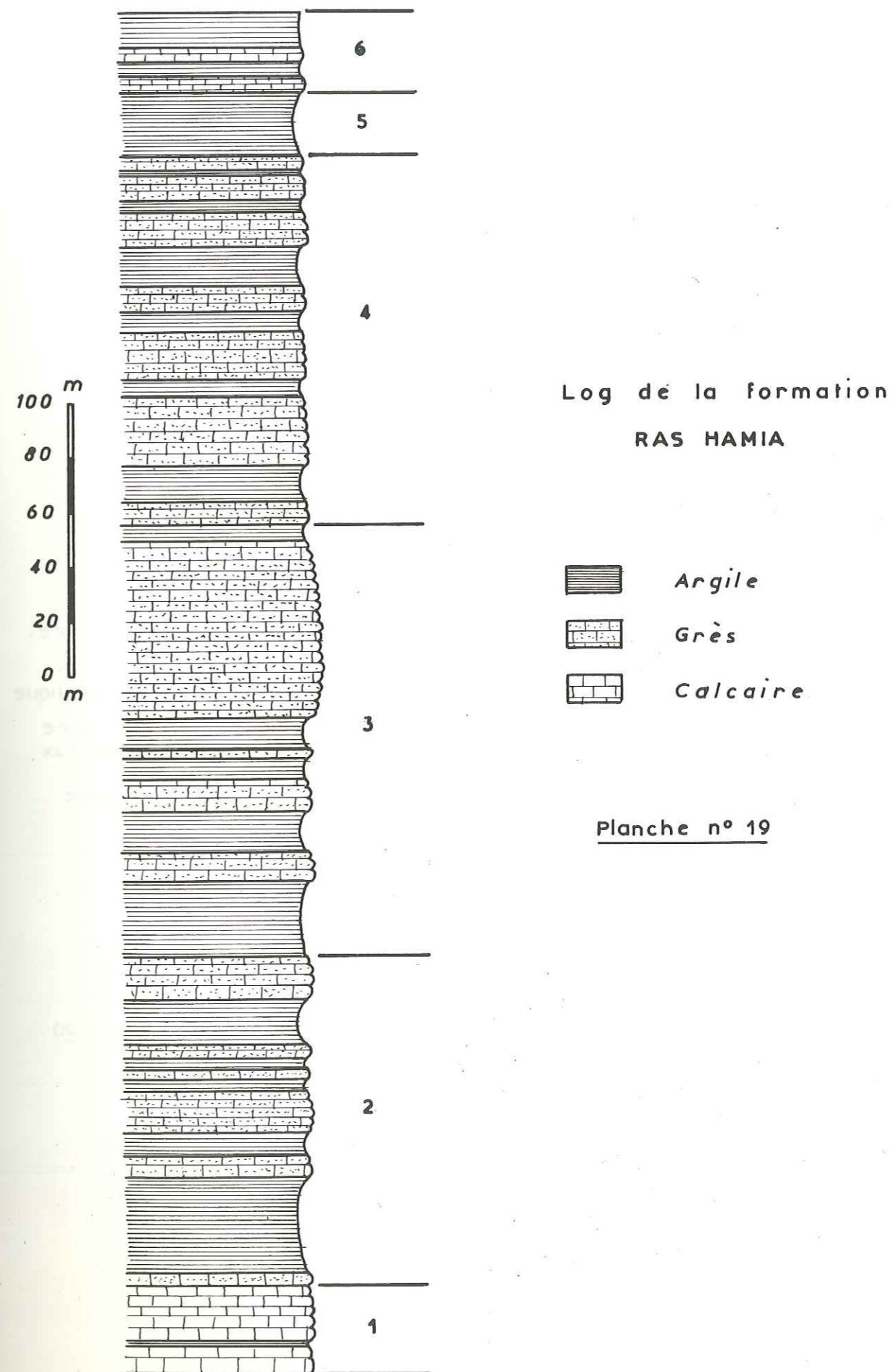
La formation est datée de Muschelkalk (Ladinien).

1.1.3 - La formation AL AZIZIYAH (Planche n° 20)

Cette formation affleure en de nombreux endroits. Elle constitue la plupart des buttes et collines de la plaine. Elle affleure aussi au pied du jebel de GHARYAN.

Elle se décompose en cinq ensembles lithologiques, à savoir, du sommet vers la base :

- 30 m de calcaires dolomitiques plus ou moins gréseux avec des intercalations argileuses ;
- un niveau argileux rouge (15 m) ;
- des calcaires dolomitiques et marneux passant progressivement à l'ensemble inférieur (120-140 m) ;
- une quarantaine de mètres de dolomies avec des passées argileuses ;
- des alternances de calcaires, de dolomie et de marnes noires (60 m).



Log de la formation AL AZIZIYAH

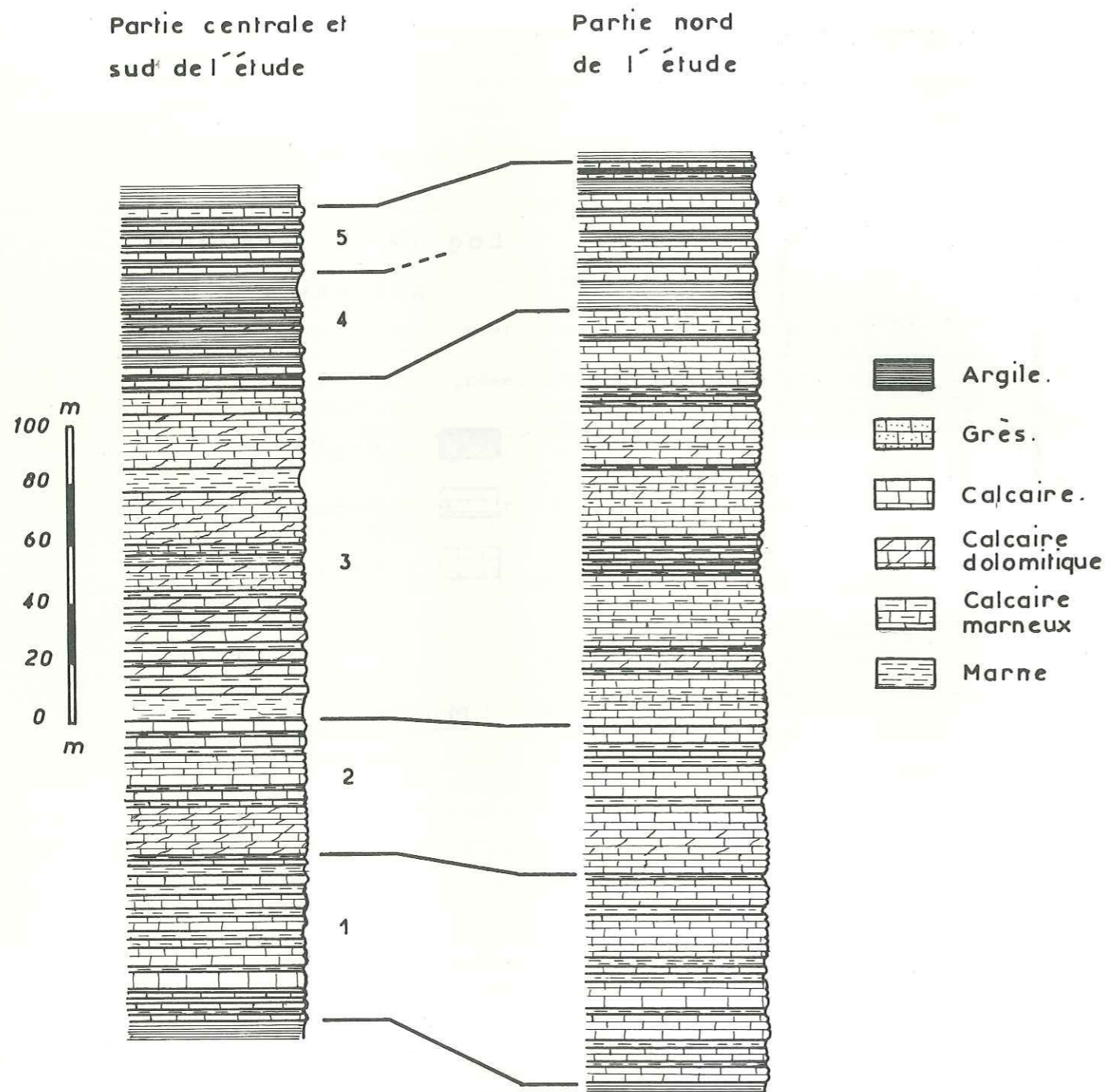


Planche n° 20

Il existe des variations latérales de faciès : au sud, à partir de la bordure du jebel, et à l'ouest du secteur étudié la totalité de la formation devient de plus en plus marneuse et gypseuse. Dans la plus grande partie de la plaine cette formation est karstifiée. La karstification est évidemment variable dans sa répartition spatiale et dans son intensité.

La puissance totale de la formation varie de 110 à 150 m au nord de GHARYAN à 300-320 m à la latitude de AL AZIZIYAH.

La formation a été datée du Keuper inférieur (Carnien)

1.1.4 - La formation ABU SHAYBAH (Planche n° 21)

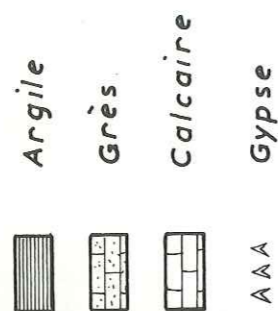
On rencontre cette formation en affleurements en pied de jebel et dans les points bas du jebel (vallée du wadi GHAN par exemple). Elle n'affleure en totalité que dans le dôme de GHARYAN où elle a une épaisseur de 160 à 170 m.

On a pu définir cinq ensembles lithologiques dans la formation. Ce sont du toit vers le mur :

- les argiles sommitales de la formation ABU SHAYBAH,
- un horizon gréseux pouvant atteindre plus de 100 m d'épaisseur, cet horizon passe à l'ouest de GHARYAN à des alternances de grès et d'argiles rouges,
- une couche argileuse de 10 à 15 m d'épaisseur,
- 20 à 25 m de passées gréseuses, gréso-argileuses et argileuses avec parfois du gypse,
- 40 à 50 m d'argiles rouges avec quelques bancs gréseux.

L'épaisseur maximale rencontrée est de 186 m.

La formation appartient au Keuper supérieur et au Lias inférieur (Norien, rhétien).



RDH 25
1989_4 / 80

Log de la formation ABU SHAYBAH

Est de GHARYAN

Ouest de GHARYAN

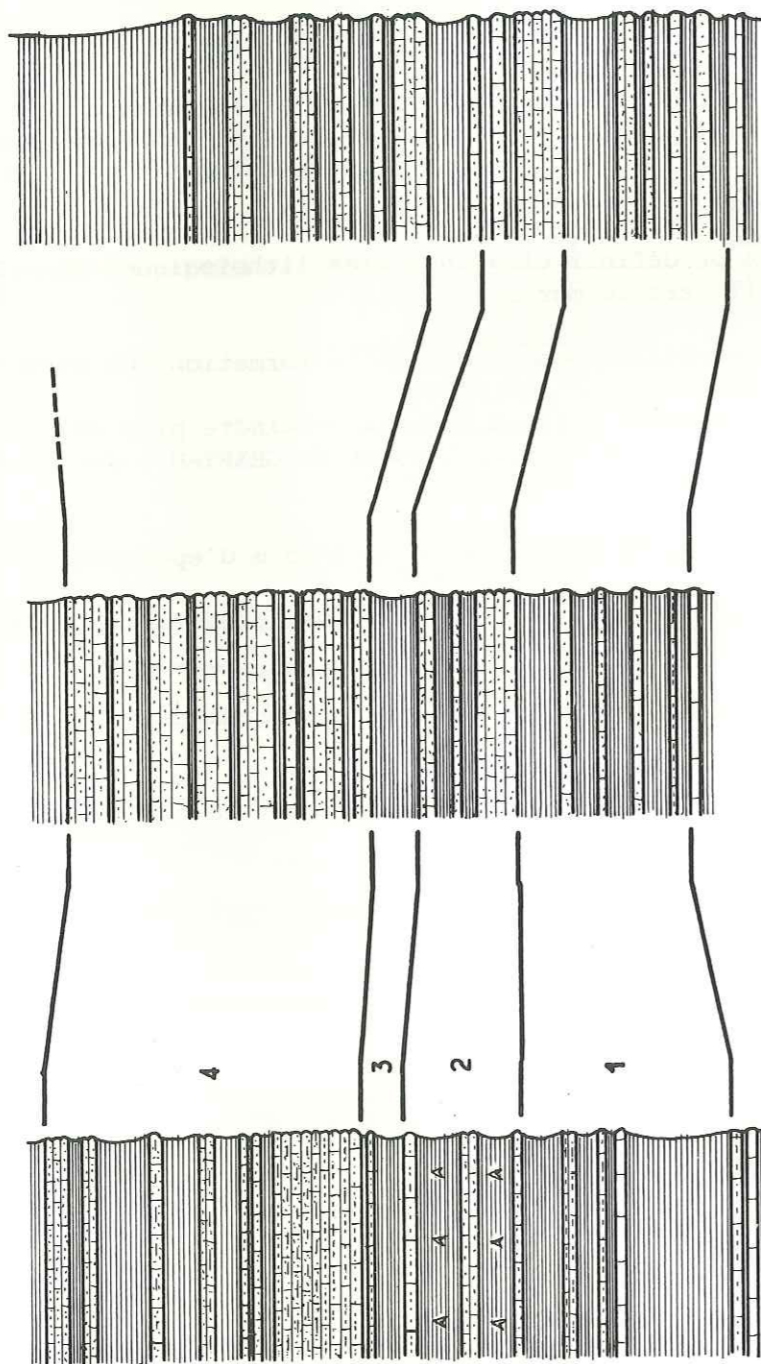


Planche n° 21

1.2 - Les formations jurassiques

Les seules formations d'âge jurassique représentées dans la zone étudiée sont :

- la formation BU GHEILAN,
- la formation des gypses de BIR AL GHANAM.

Ces formations surmontent directement la formation ABU SHAYBAH.

La formation BIR AL GHANAM est une formation gypseuse avec quelques intercalations calcaires. Elle passe latéralement vers l'Est aux dolomies et calcaires de la formation BU GHEILAN.

Ces deux formations affleurent sur le flanc nord de la falaise du jebel NEFUSA.

Les dolomies de la formation BU GHEILAN sont attribuées au Lias inférieur ; les gypses de BIR AL GHANAM sont vraisemblablement un ensemble compréhensif allant du sommet du trias jusqu'au bathonien.

1.3 - Les formations crétacées

Dans le cadre de l'étude les formations crétacées rencontrées sont :

- la formation KIKLAH,
- la formation AIN TOBI.

Elles apparaissent à la faveur d'un effondrement à l'est du secteur étudié.

1.3.1 - La formation KIKLAH

Cette formation affleure sur la bordure du jebel. Elle peut être absente : la formation AIN TOBI reposant directement sur la formation jurassique BU GHEILAN. Dans la zone étudiée elle repose en discordance sur la formation ABU SHAYBAH.

Cette formation est constituée de grès avec quelques intercalations argileuses.

La puissance de cette formation est de 80 à 90 m dans la zone étudiée.

Elle est datée de l'albien.

1.3.2 - La formation AIN TOBI

La formation affleure dans le jebel et dans la plaine sous la forme de collines à l'est du secteur étudié.

Elle est constituée de calcaires dolomitiques et de calcaires marneux avec des intercalations d'argiles plus nombreuses dans les 40 m de la base.

Son épaisseur varie de 120 à 140 m.

Elle est datée du cénomaniens moyen et inférieur.

1.4 - Les formations tertiaires et quaternaires

Les formations tertiaires et quaternaires sont appelés recouvrement. Le Tertiaire n'existe que dans le sud du secteur étudié.

1.4.1 - Le Miocène

On peut le subdiviser en quatre unités :

- une unité basale grés-sableuse, avec quelques intercalations d'argiles rouges, attribuée à l'Aquitaniens ;

- une unité argileuse et marneuse attribuée au Miocène moyen et appelée "argiles vertes" dont la puissance varie considérablement d'un point à un autre. (Les "argiles vertes" sont rarement vertes) ;

- une unité sablo-gréseuse avec quelques passées argileuses ;

- une unité sommitale argileuse (20-70 m) que l'on ne rencontre que très au nord de la zone d'étude.

Les deux dernières unités sont attribuées au Miopliocène.

Plus au sud, le Miocène se réduit en un conglomérat basal surmonté d'une série calcaréo-sableuse sans niveau argileux important.

1.4.2 - Le Pliocène

Il est constitué de grès et de conglomérats.

1.4.3 - Le Quaternaire

On peut distinguer deux sortes de formations quaternaires :

- les sédiments quaternaires anciens qui occupent les glacis de piedmont sur une largeur de 5 à 7 kilomètres,

- les sédiments quaternaires récents, formés d'alluvions fines et de sables éoliens.

Les sédiments anciens sont constitués de grès, poudingues et croûtes calcaires plus ou moins durcies. Les croûtes sont sub-affleurantes et elles surmontent le plus souvent des horizons à nodules, fortement enrichis au carbonates.

Les dépôts récents comprennent des alluvions généralement sableuses, rarement à sable grossier et très pauvres en argiles, et des sables fins éoliens.

C'est à une origine polygénique qu'est due la construction, au Quaternaire, de la plaine actuelle, en pied de jebel. Mais l'influence fluviale reste prépondérante comme l'attestent le relief plat et uniforme et l'interstratification fréquente des matériaux de granulométrie différente dans l'épaisseur du sédiment. Ces matériaux généralement sableux et dépourvus d'éléments grossiers ont reçu un colmatage de limon à l'occasion des épandages des crues dont la plaine constitue la zone de réception. Les limons se présentent en lentilles d'étendues généralement faibles et sous forme de niveaux intercalés en profondeur.

1.5 - Les formations granitiques et volcaniques

1.5.1 - Le granite

Ce type de roche n'est pas visible en affleurement. Il n'a été rencontré qu'en forage. Il s'agit d'un granite alcalin appartenant vraisemblablement au socle.

1.5.2 - Les roches volcaniques

On a mis en évidence deux époques de volcanisme, une triasique, l'autre s'échelonnant du tertiaire au quaternaire.

- le volcanisme triasique a été rencontré par forage dans la formation RAS HAMIA sous forme de roches de type rhyolitique, interstratifiées dans les sédiments,

- le volcanisme tertiaire et quaternaire.

En bordure sud de la région étudiée, il existe trois types de volcanisme :

- les basaltes des plateaux, au sud-est de GHARYAN, datés de l'Eocène au Pliocène par dosage K/Ar ;
- les basaltes des vallées mis en place après le creusement d'un réseau hydrographique. Leur âge serait oligocène à pliocène supérieur ;
- les roches phonolitiques et trachytiques qui se seraient mises en place durant l'Eocène et l'Oligocène. Ces roches forment des cônes de plus ou moins grande importance, répartis sur la bordure et en pied de jebel.

2 - L'HISTOIRE GEOLOGIQUE REGIONALE

L'histoire structurale du secteur étudié est celle du nord-ouest de la LIBYE. Toute la structure de cette région est liée à un grand axe TRIPOLI-TIBESTI orienté nord-ouest - sud-est dont la terminaison constitue le môle de GHARYAN.

Du Cambrien au Permien une série de transgressions et de régressions affecte la région du môle de GHARYAN entraînant l'érosion des dépôts antérieurs ou l'absence de dépôts.

Durant le Permien un mouvement tectonique intense apparaît au nord-est de la Tripolitaine occasionnant de grands accidents WNW-ESE et se traduisant sur le môle de GHARYAN par une érosion jusqu'au socle.

Le môle est légèrement recouvert par la transgression du Permien supérieur mais ce n'est qu'au Trias inférieur que se constitue la première formation rencontrée dans cette zone, reposant directement sur le socle : la formation gréseuse OULED CHEBBI. Cette formation amincie par une légère surrection du môle de GHARYAN repose sous la transgression du Muschelkalk (formation RAS HAMIA).

La sédimentation se poursuit durant tout le Trias supérieur et le Lias inférieur avec cependant une brève surrection du môle de GHARYAN. La région se stabilise et un important mouvement négatif vers l'ouest permet le dépôt des roches salifères du groupe de BIR AL GHANAM.

A la fin du Jurassique un mouvement tectonique important provoque l'érosion complète des dépôts jurassiques sur le môle de GHARYAN.

Au Crétacé inférieur un dernier soubresaut du môle de GHARYAN se traduira par l'absence de formations crétacées inférieures.

Au Crétacé moyen on observe la transgression des dépôts de la formation KIKLAH, et une légère subsidence de la plaine de la JEFFARA limitée par le môle de GHARYAN.

Puis l'envahissement de la région par une mer profonde au Crétacé supérieur provoque le dépôt d'une série comprenant dolomies, calcaires, grès, marnes, argiles et conglomérats des formations cénomaniennes et turoniennes GHARYAN (dolomies), AIN TOBI (calcaires) et YEFFREN (marnes).

Au Miocène inférieur, succédant à la régression de la mer crétacée, une forte tectonique conduit à des soulèvements et des dislocations qui ont sans doute déterminé le relief actuel. L'axe des fractures les plus nombreuses est, en gros, orienté SE-NW. C'est à travers ces failles que peuvent remonter, probablement au Tertiaire, les coulées de matériaux volcaniques, trachytiques et phonolitiques, dont on observe les pointements dans la plaine au pied du jebel. Dans la zone étudiée, cette tectonique donne naissance aux failles orientées NNW-SSE appelées D1 à D6 pour les plus importantes sur la carte n° 4A .

Durant le Tertiaire, la subsidence de la plaine se poursuit. Elle est attestée par l'épaisseur croissante du Miocène du sud vers le nord alimenté par la destruction des reliefs du jebel.

Après le retrait de la mer miocène les dépôts restent, au Quaternaire, en majorité d'origine continentale. Ils sont liés à l'érosion intense de la face nord du jebel et des buttes crétacées, jurassiques ou triasiques qui persistent dans la plaine.

Cette époque donne lieu à une redistribution alluviale en pied de jebel des matériaux arrachés à la montagne et à la construction des plaines d'épandages actuelles. Les dépôts éoliens s'ajoutent et se mêlent aux alluvions fluviales. Plus au nord des plaines alluviales ces sables deviennent prédominants et atteignent un grand développement et une forte épaisseur.

3 - CARACTERES HYDROGEOLOGIQUES DES FORMATIONS

Pour chaque formation on a essayé de dégager le caractère aquifère des différentes unités la constituant.

3.1 - Les formations triasiques

3.1.1 - La formation OULED CHEBBI

Seule la partie basale constituée de grès est susceptible d'être aquifère.

3.1.2 - La formation RAS HAMIA

Les horizons gréso-argileux de la formation ainsi que le niveau basal dolomitique peuvent constituer des aquifères.

Les niveaux argileux supérieurs peuvent jouer le rôle d'imperméables isolant la formation RAS HAMIA des formations supérieures.

3.1.3 - La formation AL AZIZIYAH

Les possibilités aquifères de la formation AL AZIZIYAH sont très variables suivant le degré de fissuration et de karstification des calcaires dolomitiques. De plus des variations latérales de faciès au sud et à l'ouest de la zone étudiée réduisent souvent à néant ces possibilités aquifères.

3.1.4 - La formation ABU SHAYBAH

Le caractère fortement détritique de cette formation la fait considérer comme aquifère sauf pour la partie argileuse basale qui est peu perméable.

3.2 - Les formations jurassiques

Leur position topographique fait qu'elles ne jouent aucun rôle dans l'hydrogéologie de la zone étudiée.

3.3 - Les formations crétacées

3.3.1 - La formation KIKLAH

De par son faciès à prédominance gréseuse cette formation constitue un aquifère intéressant.

3.3.2 - La formation AIN TOBI

La fracturation étant peu importante, la formation AIN TOBI pourrait jouer un rôle d'imperméable mais son extension est très faible dans la zone étudiée.

3.4 - Les formations tertiaires et quaternaires

Ces formations groupées sous le terme de "recouvrement" sont détritiques et peu consolidées, elles constituent donc un excellent aquifère. On peut distinguer deux régions :

- la région sud où le recouvrement est en relation directe sur toute son épaisseur avec la formation qu'il recouvre ;

- la région nord où l'existence d'un niveau argileux, dit des "argiles vertes", sépare le recouvrement en deux aquifères.

3.5 - Les formations granitiques et volcaniques

Ces formations ne sont pas aquifères. Les formations basaltiques pourraient l'être mais leur position topographique l'interdit.

L'étude des formations lithologiques, du point de vue hydrogéologique, permet de schématiser la série stratigraphique en faisant ressortir le caractère aquifère ou imperméable des différentes formations et leurs relations possibles entre elles.

4 - LES ZONES HYDROGÉOLOGIQUES

Les considérations hydrogéologiques ont amené à distinguer plusieurs zones dans la région étudiée :

- dans le jebel la formation AL AZIZIYAH est à prédominance argileuse et gypseuse, seules peuvent être aquifères la formation ABU SHAYBAH et les formations de recouvrements. La formation RAS HAMIA n'a pas été reconnue dans le jebel ;

- dans la plaine de la JEFFARA, du pied du jebel à la faille D3 (carte des formations sous recouvrement) la formation AL AZIZIYAH affleure largement, et elle est aquifère. On observe la formation RAS HAMIA qui apparaît à la faveur de failles ou de bombements du socle ;

Dans le sud de la zone étudiée, la formation ABU SHAYBAH recouvre la formation AL AZIZIYAH. Elle est aquifère ainsi que les formations de recouvrement.

A l'est et au nord de la limite d'extension de la formation ABU SHAYBAH (carte n° 1A) les formations de recouvrement surmontent directement la formation AL AZIZIYAH. Elles sont sèches dans le sud du secteur et deviennent saturées vers le nord ;

- entre la faille D3 et la faille D2 apparaissent les formations crétacées qui sont aquifères ;

- au nord de la faille D2, on retrouve la formation AL AZIZIYAH, qui s'enfonce de plus en plus vers le nord sous le recouvrement tertiaire.

Ces unités hydrogéologiques, à l'exception de la première unité citée, sont recoupées par la limite d'extension des "argiles vertes" qui permettent de définir deux régions suivant le type de recouvrement. Au nord de cette limite, le recouvrement peut être divisé en plusieurs niveaux aquifères. Au sud, le recouvrement constitue un unique aquifère qui est souvent assimilé à l'aquifère sous-jacent.

Un schéma lithostratigraphique (planche n° 22) résume à la fois la stratigraphie, la répartition et le caractère hydrogéologique des formations de la zone étudiée.

Si la connaissance des caractères hydrogéologiques d'une région est fondamentale lorsqu'on envisage l'exploitation des ressources aquifères souterraines il ne faut pas, cependant, négliger l'étude du renouvellement de ces ressources aquifères. L'une des méthodes permettant d'approcher les possibilités de renouvellement des eaux souterraines consiste à mesurer les variations de la teneur en eau du sol afin de connaître le devenir des eaux météoriques. Cette méthode est exposée dans la partie suivante de la présente étude.

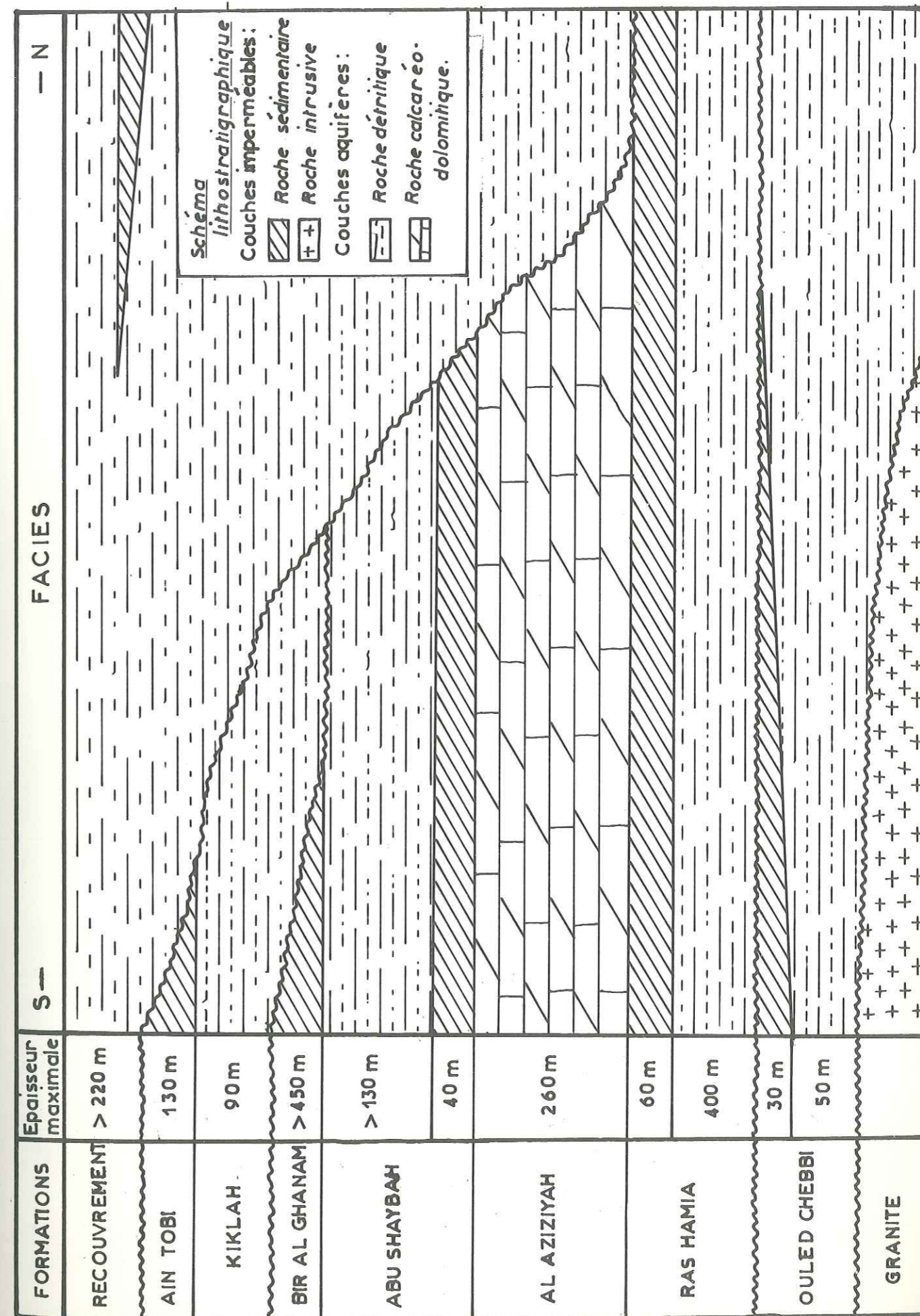


PLANCHE n°: 22

VI - VARIATIONS DE LA TENEUR EN EAU DU SOL

- 1 - But de l'étude
- 2 - Principe de la mesure
- 3 - Réalisation des postes de mesure
- 4 - Localisation des postes de mesure
- 5 - Le matériel utilisé et la mesure
- 6 - Détermination de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre
- 7 - Calcul des stocks
- 8 - Principe d'interprétation
- 9 - Commentaire sur les différents sites
- 10 - Evaluation de l'infiltration et mécanismes de l'alimentation des nappes
- 11 - Application au calcul de l'évapotranspiration
- 12 - Conclusion

VI - VARIATION DE LA TENEUR EN EAU DU SOL

1 - BUT DE L'ETUDE

Le principal objectif de cette étude était d'apporter une meilleure connaissance du devenir des eaux, tant météoriques que d'épandage, dans la plaine du Wadi AL HIRA, de mettre en évidence l'existence ou l'absence d'infiltration et de localiser les zones d'infiltration si elles existent. L'étude abordait donc le problème d'un point de vue purement qualitatif. Par la suite l'exploitation des résultats a été poussée plus à fond pour tenter de donner un caractère plus quantitatif à l'étude en essayant de chiffrer les infiltrations dans les zones où elles existent et d'évaluer l'évapotranspiration réelle.

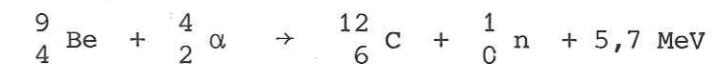
La mesure de la teneur en eau du sol a été effectuée à l'aide d'une sonde à neutrons.

2 - PRINCIPE DE LA MESURE

La sonde à neutrons comprend une source émettrice de neutrons rapides et un récepteur de neutrons lents.

2.1 - La source

Elle est constituée par un mélange d'américium et de béryllium. L'américium émet des particules α , le choc de ces particules sur le béryllium provoque l'apparition de neutrons pourvus d'une grande énergie (neutrons rapides) :

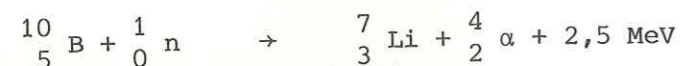


Lorsque ces neutrons rencontrent des atomes, leur choc dissipe de l'énergie. Lors d'un choc, plus les masses des particules sont voisines, plus la perte d'énergie est grande. Les neutrons rapides sont donc fortement ralentis lorsqu'ils rencontrent des atomes d'hydrogène. En première approximation ce ralentissement est directement proportionnel à la teneur en atomes d'hydrogène du sol. Après leur ralentissement un certain nombre de neutrons (neutrons lents) revient au détecteur.

Il existe des corps qui arrêtent les neutrons lents : ce sont le lithium, le bore, le chlore, le manganèse et le cadmium. Il convient donc de s'assurer que le sol testé ne contient pas en trop grande proportion ces corps absorbants.

2.2 - Le détecteur

Il contient du fluorure de bore, BF₃. La réaction entre un neutron lent et un atome de bore ¹⁰B produit une particule α dotée d'une énergie importante. La particule α ionise fortement le gaz ce qui provoque une décharge dans le compteur d'où la possibilité de compter les neutrons.



Donc, en résumé, la source émet des neutrons rapides qui lors de leur collision avec les atomes d'hydrogène, perdent une énergie importante. Un certain nombre de ces neutrons ralentis reviennent au détecteur et sont comptabilisés. Le nombre de neutrons lents détectés est proportionnel à la densité d'atomes hydrogène dans le sol.

Les atomes d'hydrogène du sol sont le plus souvent les atomes d'hydrogène de l'eau sauf dans le cas de la présence d'hydrocarbures. Le nombre de neutrons lents détectés est donc proportionnel à la teneur en eau du sol.

3 - REALISATION DES POSTES DE MESURE

Pour mesurer la teneur en eau du sol à l'aide d'une sonde à neutrons il est nécessaire d'avoir mis en place au préalable un tube d'accès dans lequel la sonde sera descendue.

3.1 - Le tube d'accès

Le tube d'accès est en alliage d'aluminium, matériau léger employé de façon à arrêter le minimum de radiation. Il faut éviter les matériaux absorbants les neutrons lents, comme le cadmium qui pourrait être utilisé pour la protection du tube.

Le diamètre intérieur du tube est fonction du diamètre de la sonde ; il convient de "serrer" la sonde au maximum pour que le sol soit le plus près possible de la sonde. Le diamètre extérieur doit être le plus proche possible du diamètre intérieur de façon à ce que les radiations aient le minimum de matière à traverser.

Dans le cas de l'étude le diamètre extérieur était de 45 mm et le diamètre intérieur de 41 mm.

Le tube doit être absolument étanche. A cette fin, il est muni à son extrémité inférieure d'un embout ovalisé favorisant la mise en place du tube. En dehors des mesures les tubes sont fermés par un bouchon de caoutchouc destiné à éviter les entrées d'eau ou d'humidité.

La profondeur d'investigation varie de 4 à 6 m en fonction des situations locales.

3.2 - Mise en place du tube d'accès

Le tube est enfoncé dans un trou vertical creusé dans le sol à l'aide d'une tarière. Il est très important d'éviter le remaniement du sol (compression, cisaillement) et d'assurer le meilleur contact tube-sol.

Le diamètre de la tarière sera donc égal ou légèrement inférieur au diamètre extérieur du tube. Un trou de diamètre trop grand laissera un espace interannulaire entre le tube et le sol où se développeront des infiltrations préférentielles qui modifieront artificiellement le taux d'humidité du sol. Tout vide entre le tube et le sol fausse aussi gravement les mesures.

4 - LOCALISATION DES POSTES DE MESURES

L'emplacement des postes de mesures a été déterminé en fonction des problèmes à résoudre.

Pour pouvoir étudier les infiltrations après les crues, il fallait réunir les conditions suivantes :

- placer le site de mesure là où la crue parviendrait ;
- pouvoir y accéder rapidement après la crue ;
- choisir des points d'observation représentatifs de l'ensemble de la zone.

Ces conditions furent souvent contradictoires car le centre d'une zone d'épandage est peu accessible avant ressuyage complet du sol.

On trouvera dans le tableau qui suit ainsi que sur la carte n° 1A la localisation des 10 postes de mesure.

EMPLACEMENT DES PROFILS HYDRIQUES MESURES PAR L'HUMIDIMETRE

SITE	COORDONNEES	DENOMINATION	OBJECTIF	REMARQUES
1	X = 3 - 18.4 Y = 35 - 98.0	Plaine de TALAT	Epandage de TALAT	Marginal, peu atteint par les eaux
2	X = 3 - 22.7 Y = 35 - 84.1	Méandre du WADI AL HIRA	Infiltration dans le lit du WADI AL HIRA	Implanté avant les crues Profondeur limitée par lit gravier à 470 cm
3	X = 3 - 20.5 Y = 35 - 84.0	SIDI AL GHARIB	Epandage dans ferme d'Etat. Complète le PZH3 Calcul de l'E.T.R.	Proche d'un brise-vent de jeunes eucalyptus marginal
4	X = 3 - 16.7 Y = 35 - 95.5	BIR BIN HAMADI	Infiltration de pluie connue. Pluviométrie 202 Evaporation réelle	Ne reçoit que la pluie
5	X = 3 - 19.3 Y = 35 - 95.5	Plaine de BIR AD DARDUR	Champs d'épandage de la plaine cultivée ; Complète PZH4	Marginal : submergé le 13.3.1974 et le 20.9.1974
6	X = 3 - 14.5 Y = 35 - 87.9	Wadi AL HIRA aval Ouest	Infiltration latérale du Wadi	A 25 m de la rive droite du Wadi AL HIRA Ouest, près d'une butte de jujubier qui ruisselle. Topographie modifiée pour la campagne 1974-1975
7	X = 3 - 08.5 Y = 35 - 96.3	AWLAD TANTUSH (route de BIR AL GHANAM)	Infiltration dans poche aval	Au centre de la poche ; implanté après submersion du 13.3.74
8	X = 3 - 22.9 Y = 36 - 00.2	BIR ALLAQ	Infiltration ; Epandage en poche ; Complété par le PZH5	Implanté après la submersion locale du 13.3.74
9	X = 3 - 19.6 Y = 35 - 95.0	BIR AD DARDUR	Champ d'épandage Variabilité de la texture. Représentativité	Dans l'axe du chenal principal de l'épandage Implanté tard
10	X = 3 - 21.8 Y = 35 - 84.4	Amont de la Ferme d'Etat	Méandre du Wadi AL HIRA. Variabilité de texture	Implanté tard ; Permet d'observer la progression du front d'humectation

5 - LE MATERIEL UTILISE ET LA MESURE

Pour la mesure neutronique de la teneur en eau du sol on a utilisé la sonde à neutrons HP 310 (humidimètre portatif) couplée à l'ictomètre portatif IC 310 fabriqué par CGEI-LEPAUTE (Compagnie Générale d'Electronique Industrielle).

La sonde proprement dit fonctionne suivant le principe développé dans le paragraphe précédent. Elle est reliée à l'échelle de comptage par un câble conducteur gradué tous les dix centimètres permettant de connaître la cote de la sonde dans le tube.

L'échelle de comptage est alimentée par batteries au cadmium - nickel. Un cadran donne le nombre de coups par seconde détectés par la sonde. Un commutateur permet de choisir le temps de comptage (de 1 à 30 s), un autre, la gamme de coups par seconde (de 100 à 10000 cps/s).

La mesure est effectuée en introduisant la sonde dans le tube et en faisant un comptage tous les 10 cm du haut vers le bas. On note la cote de la mesure sous le sol et le comptage correspondant.

Entre deux comptages à des cotes différentes, le temps de stabilisation du compteur est fonction de la constante de temps choisie et de l'amplitude de la variation entre deux mesures. On peut admettre que le temps est de l'ordre de trois fois la constante de temps, moins si l'écart entre deux mesures est faible.

L'échelle de comptage permet de choisir la constante de temps : 1s, 3s, 10s ou 30s. Pour une constante de temps très faible l'appareil va répondre quasiment au coup par coup alors que pour une constante de temps plus grande l'appareil intègre les fluctuations du comptage : l'incertitude de mesure est alors plus faible.

Pour connaître la teneur en eau d'un sol à partir d'un comptage N effectué à l'aide d'une sonde à neutrons, il est nécessaire d'établir la relation donnant l'humidité en fonction du comptage N. Il faut donc, avant d'entamer une campagne de mesure, déterminer la courbe d'étalonnage de la sonde à neutrons utilisée.

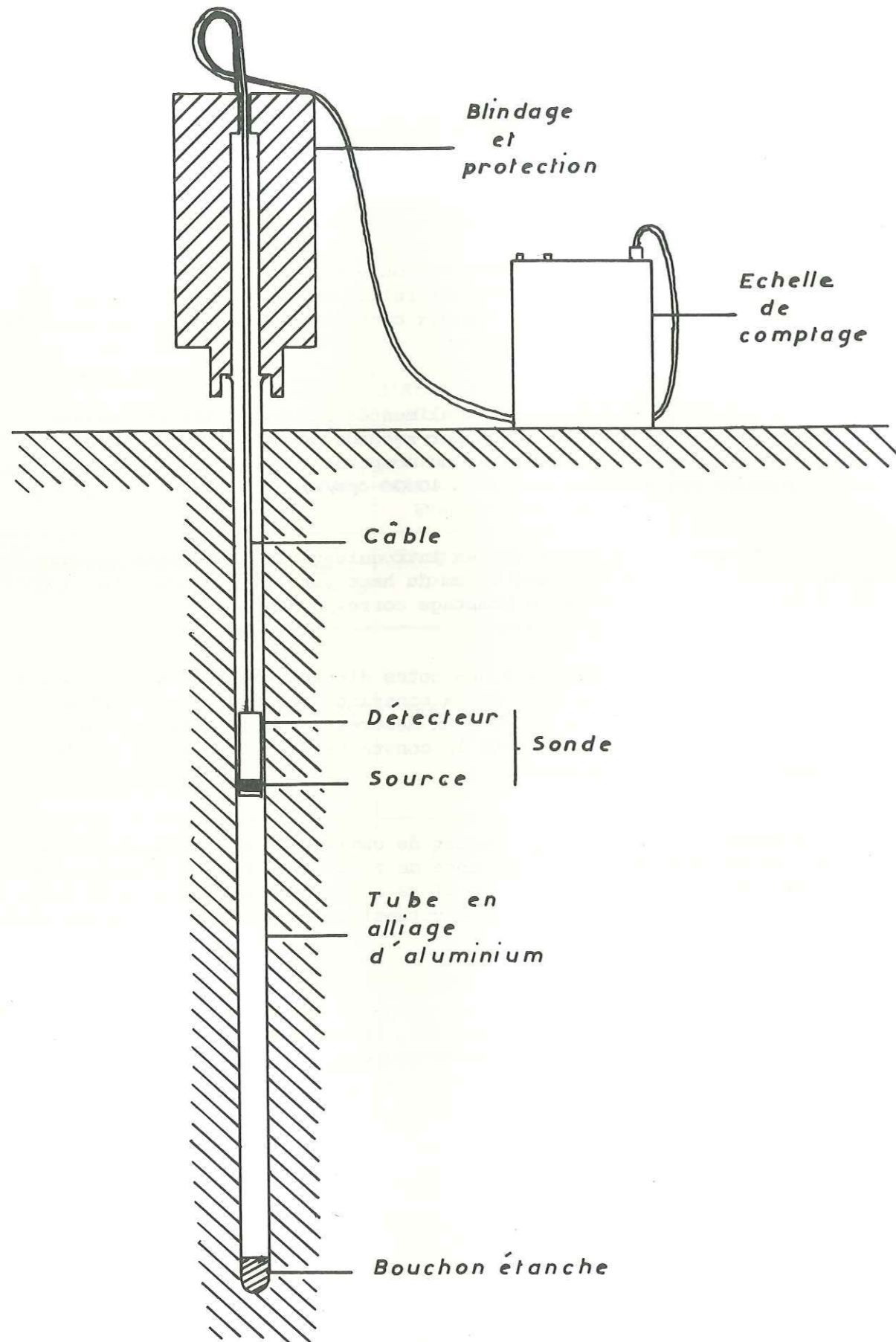


Planche n° 23 - Schéma de l'appareillage utilisé.

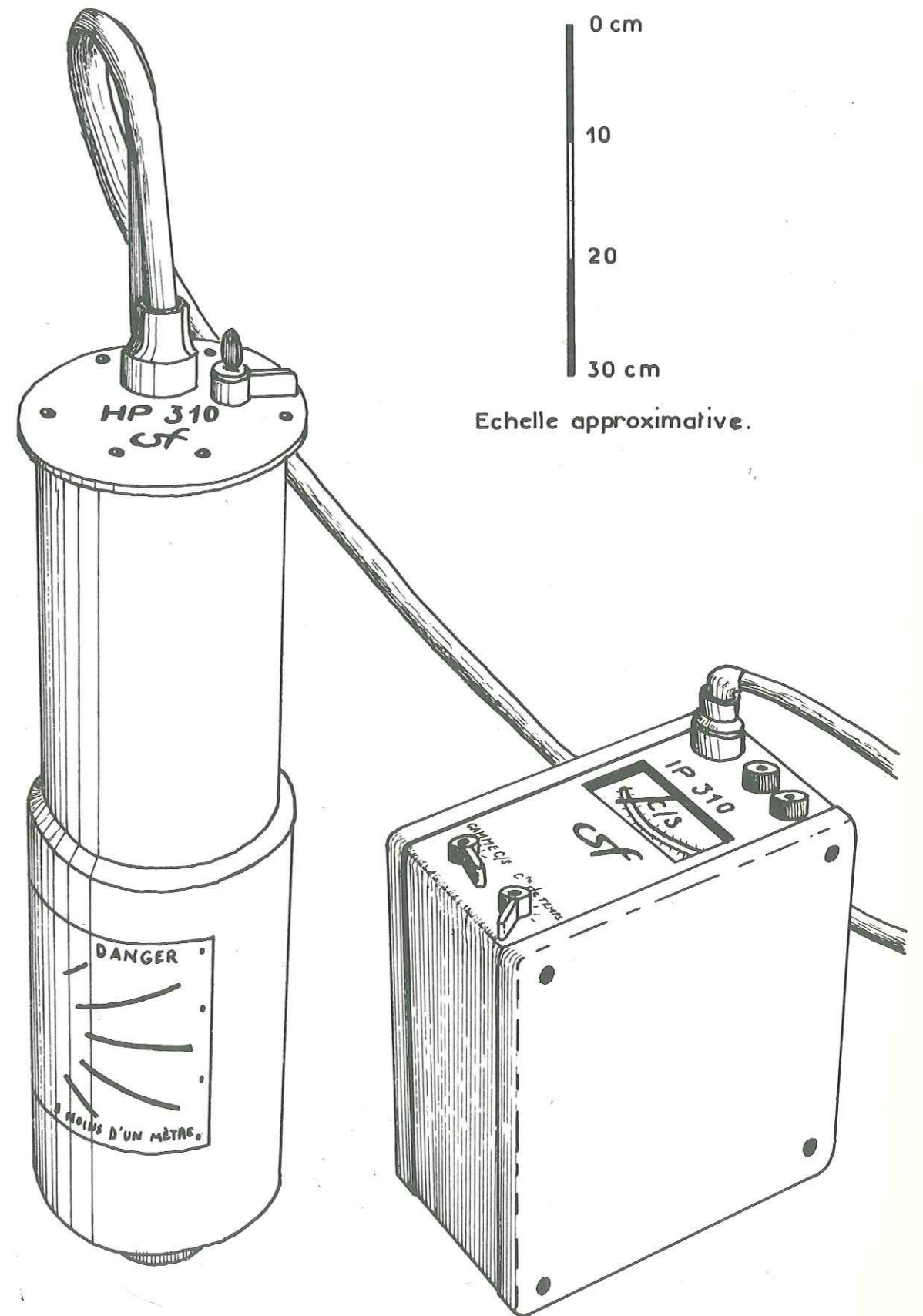


Planche n° 23 bis.

Humidimètre portatif HP 310 et icromètre portatif IC 310.

6 - DETERMINATION DE LA COURBE D'ETALONNAGE DE L'HUMIDIMETRE

L'humidimètre peut être étalonné à l'aide de deux méthodes. L'une procède de l'analyse chimique du sol, l'autre consiste à effectuer une corrélation entre le comptage N à une cote donnée et l'humidité d'échantillons de sol prélevés à la même cote.

Pour des raisons de rapidité et de coût, on a procédé à un étalonnage par pesée. Lors de l'installation des tubes, des échantillons cotés ont été prélevés à la tarière et mis en sacs étanches. Leur teneur en eau pondérale a été déterminée par étuvage à 105°C pendant 24 heures et pesée de l'échantillon avant et après étuvage. L'humidité pondérale HP est égale au rapport de la masse d'eau livrée par étuvage de la masse de l'échantillon sec. Aussitôt après l'installation du tube un profil de mesure à l'humidimètre a été établi (comptage N, en coups par seconde).

Les couples H_{Pi} et N_i ont été portés sur un même graphique (graphique n° 4). Pour l'humidimètre, l'humidité volumique HV est fonction linéaire du comptage N ; or en un point i dans le sol $H_{Vi} = H_{Pi} \times d_{si}$ (d_{si} est la densité sèche du sol en ce point). Ne connaissant pas les valeurs locales de la densité sèche, on les estimera uniformément par la valeur d ; l'expérience et le calage par la pluviométrie ont conduit à prendre $d = 1.5$.

Il s'agit donc d'estimer une relation linéaire entre N_i et H_{Pi} .

Les couples N_i/H_{Pi} amènent à formuler les remarques suivantes sur la précision des mesures :

1° - Au début le prélèvement de sol était de 30 g, ce qui correspondait à une incertitude absolue de 0,0015 sur les valeurs de l'humidité pondérale ; incertitude relativement forte pour des valeurs de HP comprises, le plus souvent, entre 0,02 et 0,09 ; l'incertitude a été réduite ensuite en pesant des échantillons de 200 g environ.

2° - Le prélèvement lui-même est mal défini ; on a constaté que les profils texturaux étaient très variables, les cinq premiers mètres du sol étaient souvent stratifiés en couches alternées de sable (éolien) et d'argile et limon (dépôts des crues anciennes, de 1 à 20 cm le plus souvent). Le prélèvement à la tarière a pu se faire à la limite de deux couches de texture et de teneur en eau très différentes.

3° - Le temps de comptage doit être tel qu'on ait le minimum d'incertitude sur le nombre de coups et que la durée de la mesure ne soit pas excessive. L'expérience a montré qu'en prenant 10 s, l'incertitude sur le nombre de coups est faible et la mesure pour un profil de 50 comptages dure environ 1 heure.

4° - La mesure de l'humidimètre intègre la teneur en eau volumique dans sa sphère d'influence, qui peut regrouper deux couches de texture et de teneur en eau très variables. Les pointes d'humidité sont cependant très marquées sur les profils hydriques.

5° - La référence de mesure dans l'eau a peu varié (390-400 coups par seconde) pendant toute la saison de mesure : il n'a pas été utile de faire une correction non significative.

On peut espérer qu'il y aura une certaine compensation dans les écarts aux valeurs réelles, pour le calcul des stocks. Il faut remarquer que l'on s'intéresse plus aux variations de profils hydriques consécutives aux pluies et aux épandages, qu'à des valeurs absolues de l'humidité dans le sol.

Il est évident que les densités peuvent varier quelque peu suivant la nature du matériau testé ; de plus la réponse de la sonde est fonction de la nature même de ce matériau. En toute rigueur on devrait établir une droite d'étalonnage par densité et par matériau rencontré (COUCHAT). En fait les densités varient trop peu pour que les droites d'étalonnage soient très différentes les unes des autres et la nature du matériau est globalement identique pour toute la zone étudiée. La gamme des teneurs en eau sur un même profil n'est pas assez large pour que l'on puisse établir une droite d'étalonnage par site, aussi une seule droite d'étalonnage a été tracée pour l'ensemble des sites (graphique n° 5A). Les incertitudes sur les mesures et l'hétérogénéité des densités du sol sur un même profil expliquent la dispersion des points sur le graphique.

Une étude granulométrique pourrait apporter des précisions quant à l'homogénéité ou l'hétérogénéité du sol. Malheureusement les seules granulométries dont on dispose ont été effectuées pour l'étude pédologique de la zone. Elles intéressent une tranche de terrain de 150 cm. Les granulométries dans cette tranche de terrain sont relativement homogènes ; la partie la plus grossière n'excède jamais 200 μ . La portion granulométrique la plus fréquemment rencontrée est la portion 20-200 μ ; elle correspond à des sables fins. La partie limoneuse ou argileuse est plus ou moins importante, elle ne dépasse que rarement 15 % du poids de l'échantillon analysé. La planche n° 24 donne les courbes granulométriques de profils effectués près de certains sites de mesures.

Plus profondément, les forages à la tarière, effectués lors de l'équipement des sites de mesure, ont révélé des couches argileuses pouvant parfois atteindre une épaisseur de l'ordre du mètre. Ces argiles restent toutefois très sableuses et il ne semble pas que la teneur en argile puisse dépasser 30 %.

La granulométrie dans la tranche 0-150 cm ne devrait pas introduire de différence notable entre les sites de mesure, du point de vue des transferts d'eau dans le sol. Seules les couches argileuses épaisses se présentant sous forme de lentilles introduisent un caractère de discontinuité dans le terrain pouvant affecter les déplacements verticaux de l'eau dans le sol. Ces couches argileuses sont facilement mises en évidence dans les profils hydriques par des pics de forte teneur en eau dus à l'eau d'adsorption des argiles.

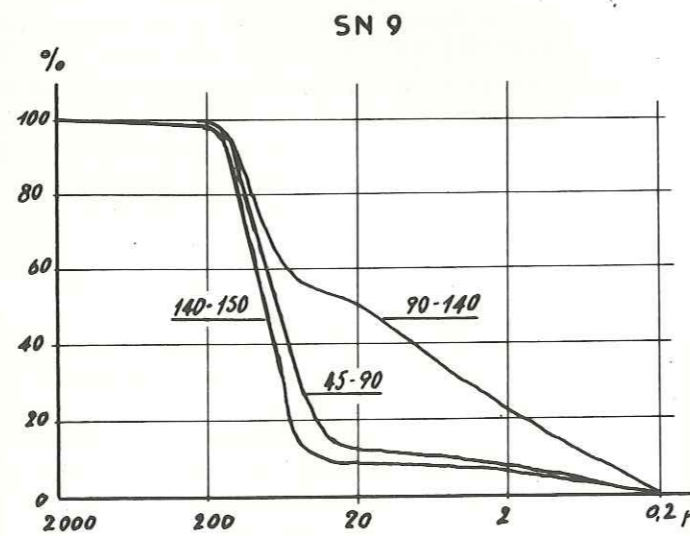
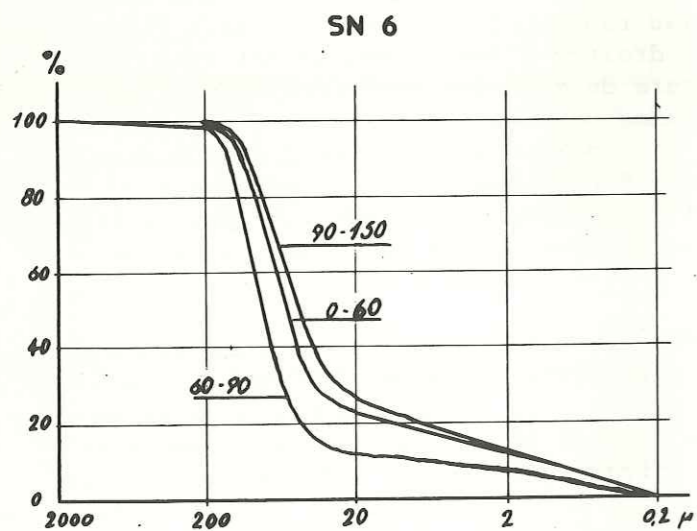
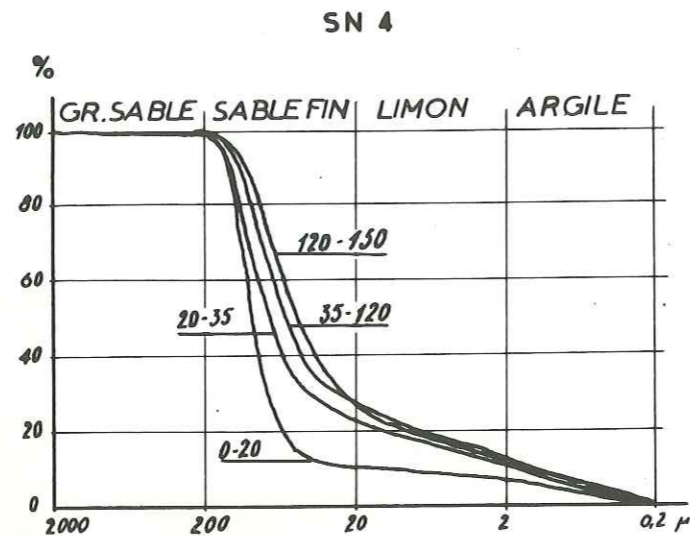
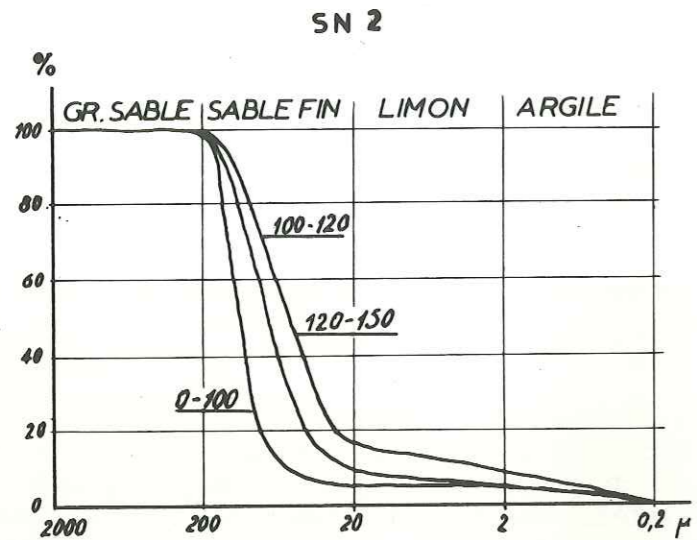
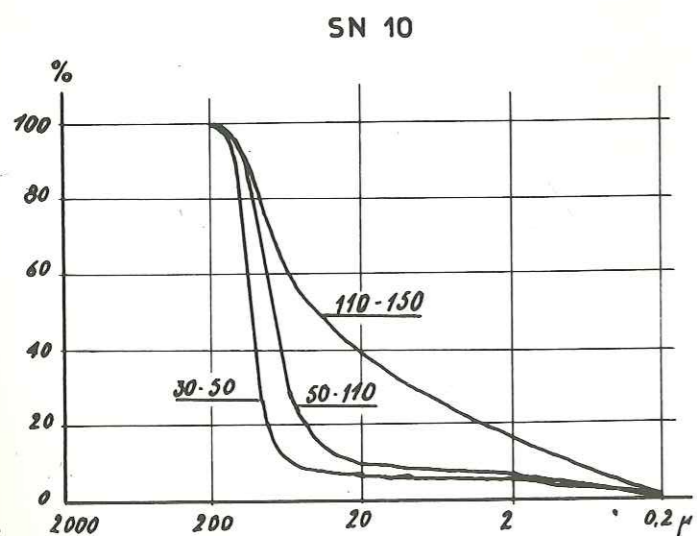


PLANCHE n° 24



Courbes granulométriques.
 (D'après les granulométries effectuées
 lors de l'étude pédologique).
 (profondeurs en cm)

Il est possible de vérifier le calage de la droite d'étalonnage par comparaison des variations de stocks calculés avec les pluies connues infiltrées. (Le calcul des stocks est traité dans le paragraphe suivant).

Le site 4 est situé à quelques pas du pluviomètre 202, en topographie plate. Pour la tranche de terrain 0-100 cm le stock d'eau est de 120 mm le 09-03-74, de 172 mm le 13-03-74 ; la variation de stock est donc de 52 mm à comparer à une pluie de 58 mm les 12-13 et 14-03-74, diminuée de l'évaporation en 5 jours soit 4 à 6 mm. L'infiltration est donc de 54 à 52 mm valeurs qui correspondent à l'augmentation de stock enregistrée.

Le site 3 est placé 4 km à l'est du site 4 ; le stock dans la tranche 0-120 cm passe de 88 mm à 136 mm, soit 48 mm de variation pour un apport net de 54 à 52 mm, sans doute surestimé, car les eucalyptus voisins interceptent une partie de l'apport.

En résumé, l'étalonnage a conduit au choix de la relation :

$$HV = d \cdot HP = d \cdot 0,0011 \cdot N = 0,00167 \cdot N$$

$$HV = 0,00167 \cdot N$$

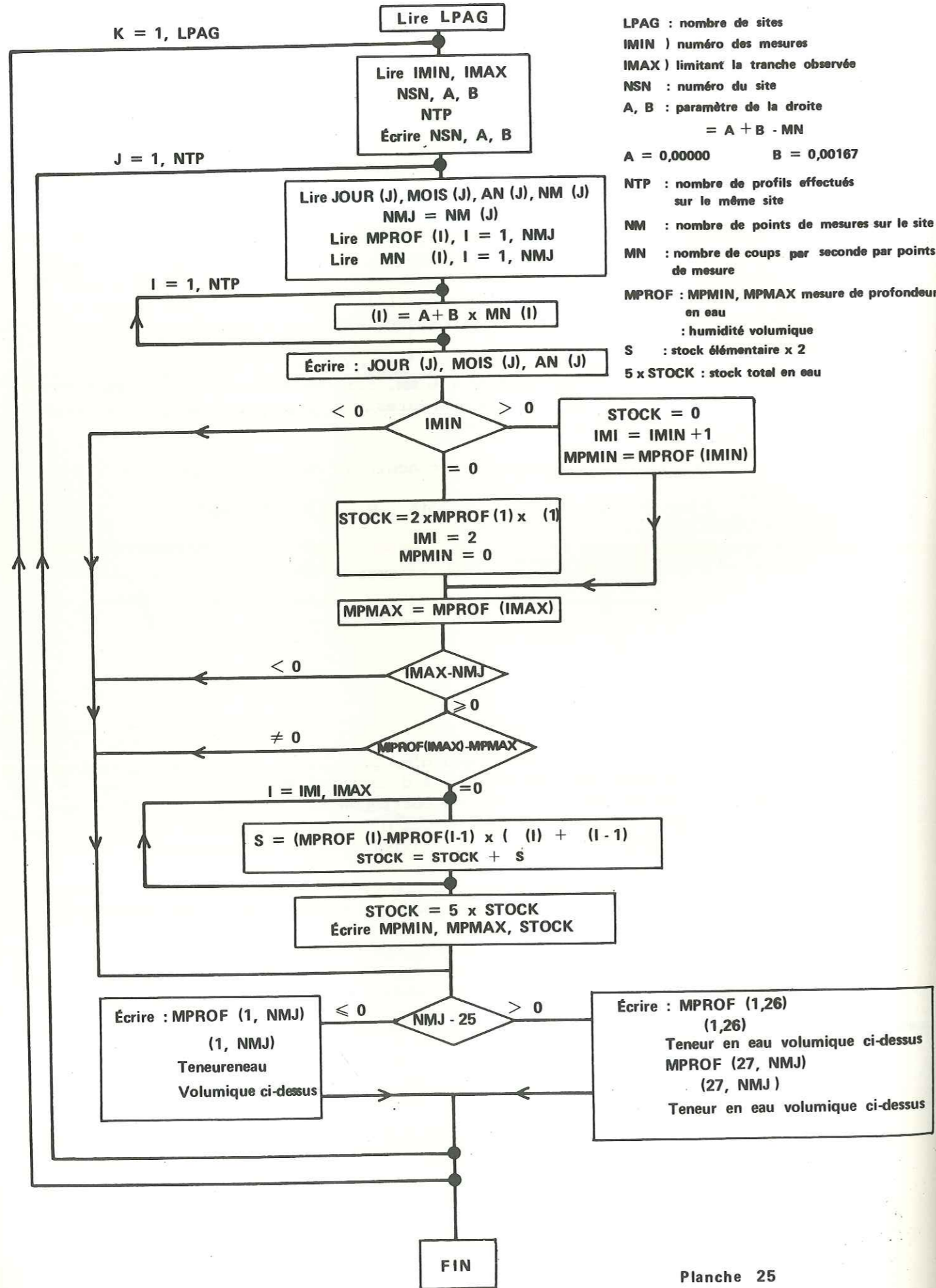
avec HV en %
 N en coups par seconde

7 - CALCUL DES STOCKS

On appellera "stock" d'eau d'un profil, la lame d'eau équivalente qui, en s'infiltrant dans un sol à 0 % d'humidité volumique, provoquerait une augmentation de la teneur en eau correspondant à l'humidité volumique mesurée sur le profil hydrique. Le stock d'eau est exprimé en mm, ce qui permet de le comparer aisément à la pluviométrie et l'évaporation.

Le traitement des données a été effectué par ordinateur. A chaque comptage en coups par seconde correspond une humidité volumique déterminée à l'aide de la relation $HV = 0,00167 \cdot N$. Le stock d'eau pour une épaisseur de terrain donnée est calculé en attribuant à chaque tranche de terrain élémentaire l'humidité volumique lui correspondant. Ainsi à une tranche élémentaire $z_i + 1 - z_i$ on affecte une humidité volumique égale à la moyenne des humidités volumiques mesurées en z_i et $z_i + 1$. Le produit "humidité x hauteur de la tranche de terrain" donne le stock d'eau dans cette tranche et la somme des stocks élémentaires donne le stock dans l'épaisseur de terrain considérée (Pour plus de détails voir l'organigramme de calcul, planche n° 25).

Il faut noter que la tranche 0-10 cm n'est pas prise en compte car fortement influencée par l'atmosphère.



LPAG : nombre de sites
 IMIN) numéro des mesures
 IMAX) limitant la tranche observée
 NSN : numéro du site
 A, B : paramètre de la droite
 $= A + B \cdot MN$
 A = 0,00000 B = 0,00167
 NTP : nombre de profils effectués sur le même site
 NM : nombre de points de mesures sur le site
 MN : nombre de coups par seconde par points de mesure
 MPROF : MPMIN, MPMAX mesure de profondeur en eau
 : humidité volumique
 S : stock élémentaire x 2
 5 x STOCK : stock total en eau

Planche 25

8 - PRINCIPE D'INTERPRETATION

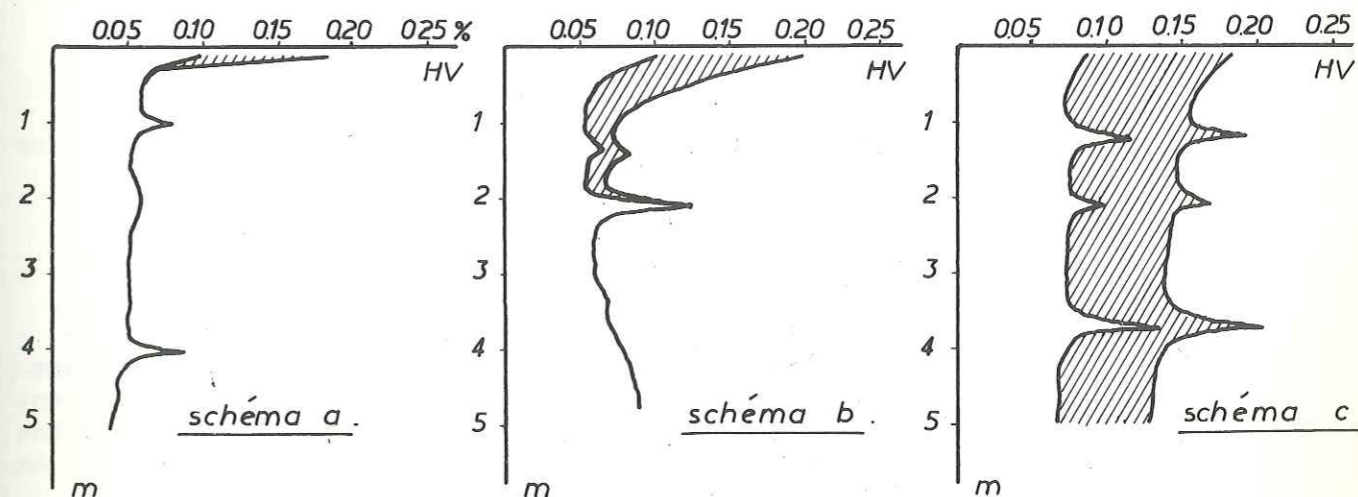
A partir des humidités volumiques calculées, on trace un profil hydrique indiquant les variations verticales de la teneur en eau. L'observation de l'évolution du profil hydrique dans le temps donne des indications sur le comportement du sol et le devenir de l'eau pouvant s'infiltrer dans le sol.

L'augmentation de la teneur en eau du sol après un événement pluvieux ou un épandage de crue est généralement très rapide, aussi difficilement observable, compte-tenu de la difficulté d'accès de certains sites après les crues et de la disparité des pluies. On s'intéressera donc aux diminutions de la teneur en eau des profils plutôt qu'au phénomène d'augmentation de l'humidité volumique après un apport d'eau.

A partir d'un événement pouvant provoquer une brusque augmentation de la teneur en eau du sol, l'évolution d'un profil humide vers un profil sec sera différente suivant le site.

Généralement on rencontre les trois cas suivant :

- 1er cas : il n'y a pas (ou très peu) d'infiltration superficielle (schéma a) ;
- 2ème cas : il existe une infiltration superficielle (schéma b) ;
- 3ème cas : il existe une infiltration profonde (schéma c).



Dans le premier cas, l'eau ruisselle sur le sol et ne pénètre que très peu (10 à 20 cm). L'eau infiltrée est très rapidement reprise par évaporation.

Dans le second cas, l'eau s'infiltré jusque vers 2 m de profondeur, elle est lentement reprise par l'évaporation et l'évapotranspiration.

Dans le troisième cas, l'eau pénètre profondément dans le sol (plus de 5 m) ; une partie sera reprise par évapotranspiration, une autre continuera sa migration vers le bas et sera susceptible d'alimenter les nappes. Dans ce cas, le problème est qu'il y a superposition de deux phénomènes : l'évaporation et l'infiltration profonde. En l'absence de capteurs de pression il est difficile de connaître exactement la position du plan de flux nul séparant les deux phénomènes. Aussi suivant la nature des profils, on procédera à une approximation de la position du plan de flux nul. (Le plan de flux nul est le plan séparant la zone où le mouvement de l'eau est ascendant de la zone où le mouvement de l'eau est descendant).

En plus des profils hydriques, il est intéressant de tracer des graphiques donnant la variation du stock d'eau en fonction du temps. Cette représentation permet de visualiser les variations de la teneur en eau du sol pour un site donné et dans une tranche de terrain déterminée.

9 - COMMENTAIRE SUR LES DIFFERENTS SITES

9.1 - Sans infiltration

Seul le site 1 (Plaine du TALAT) rentre dans cette catégorie.

De haut en bas du profil, on rencontre :

- 0-30 cm : couche argilo-limoneuse correspondant à l'épandage actuel ;
- 30-120 cm : couche de sable (humidité volumique : 4 %) ;
- 120-160 cm : couche argilo-limoneuse (H.V. : 17 %) qui confirme l'ancienneté de la zone d'épandage ;
- 160-500 cm : sable d'humidité volumique allant de 3 à 5 %.

Le stock d'eau contenu dans le sol reste constant pendant toute la durée de l'observation du site. Seuls les vingts premiers centimètres du profil sont affectés de variations d'humidité volumique. Le champ étant en jachère, la couche argilo-limoneuse de surface favorise le ruissellement lors des crues et empêche toute infiltration. La totalité de l'eau apportée par les précipitations est reprise par évapotranspiration (graphiques n° 6A et 7A).

9.2 - Infiltration superficielle

Rentrent dans cette catégorie les sites 3, 4, 5 et 6.

9.2.1 - Site 3 - SIDI AL GHARIB (Graphiques n° 8A, 9A, 10A, 26 et 27)

Le profil 3 traverse un ensemble sablo-limoneux avec une couche argilo-limoneuse (H.V. = 16 %) à 190 cm. Cette couche confirme l'ancienneté de la zone d'épandage.

Durant la saison 1973-1974 le site n'a pas été atteint par les crues et les augmentations du stock d'eau ne sont dues qu'aux précipitations (Graphique n°8A).

Lors de la crue d'Octobre 1974 le site a été submergé par quelque 20 cm d'eau et l'humectation du sol a été beaucoup plus importante que l'année précédente (Graphique n° 9A).

En 1973-1974 les variations du taux d'humidité n'ont affecté que la tranche 0-100 cm alors que pour l'année 1974-1975 elles se font sentir jusqu'à 190 cm.

La couche d'argile (à 190 cm) empêche tout déplacement d'eau vers le bas et le reste du profil (190-540 cm) est sec. Il n'y a pas d'infiltration appréciable au-dessous de 2 m de profondeur.

Le sol sec peut absorber environ 150 mm de pluie ou d'épandage sur 2 m de profondeur. Toute cette eau sera reprise par évapotranspiration.

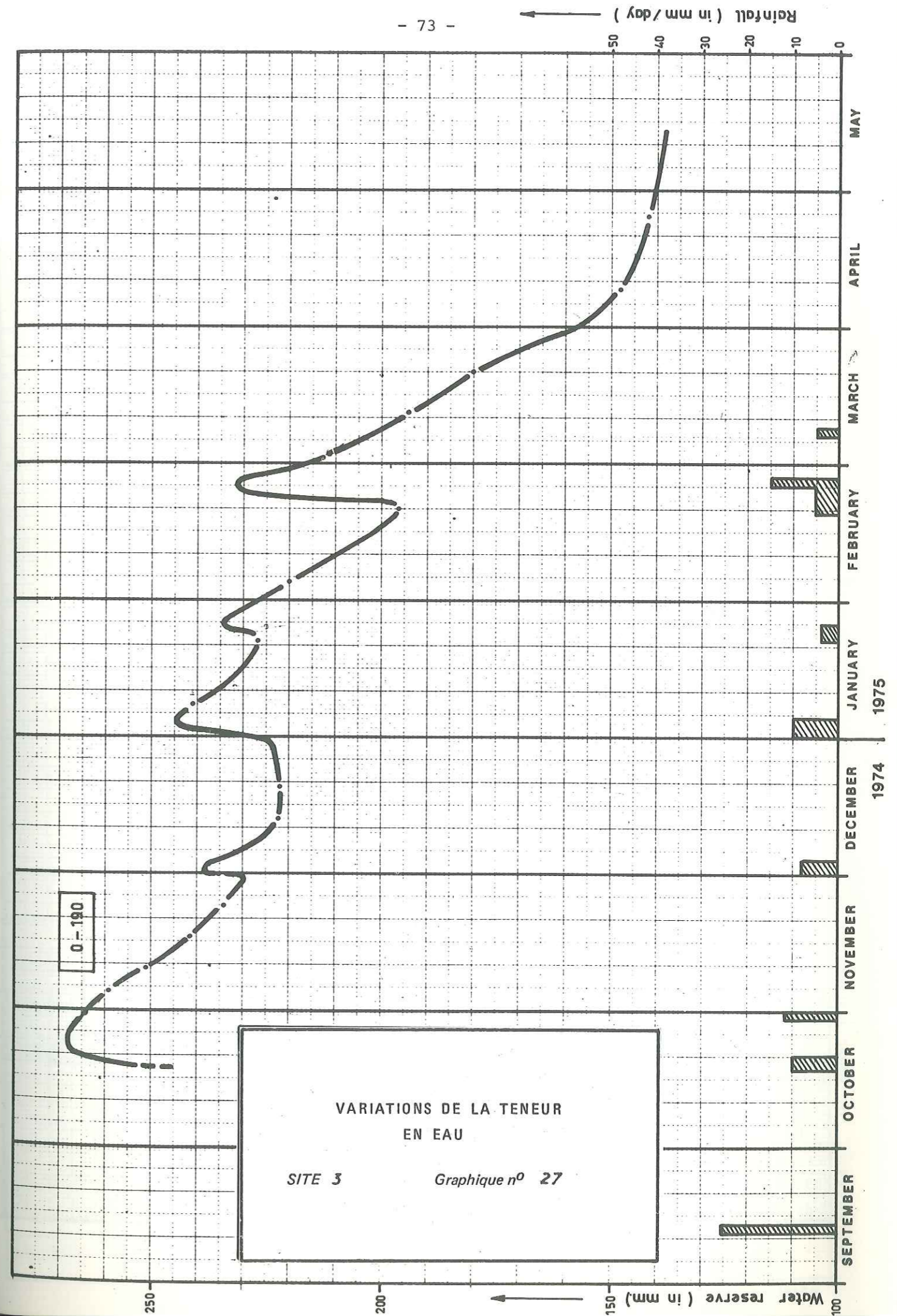
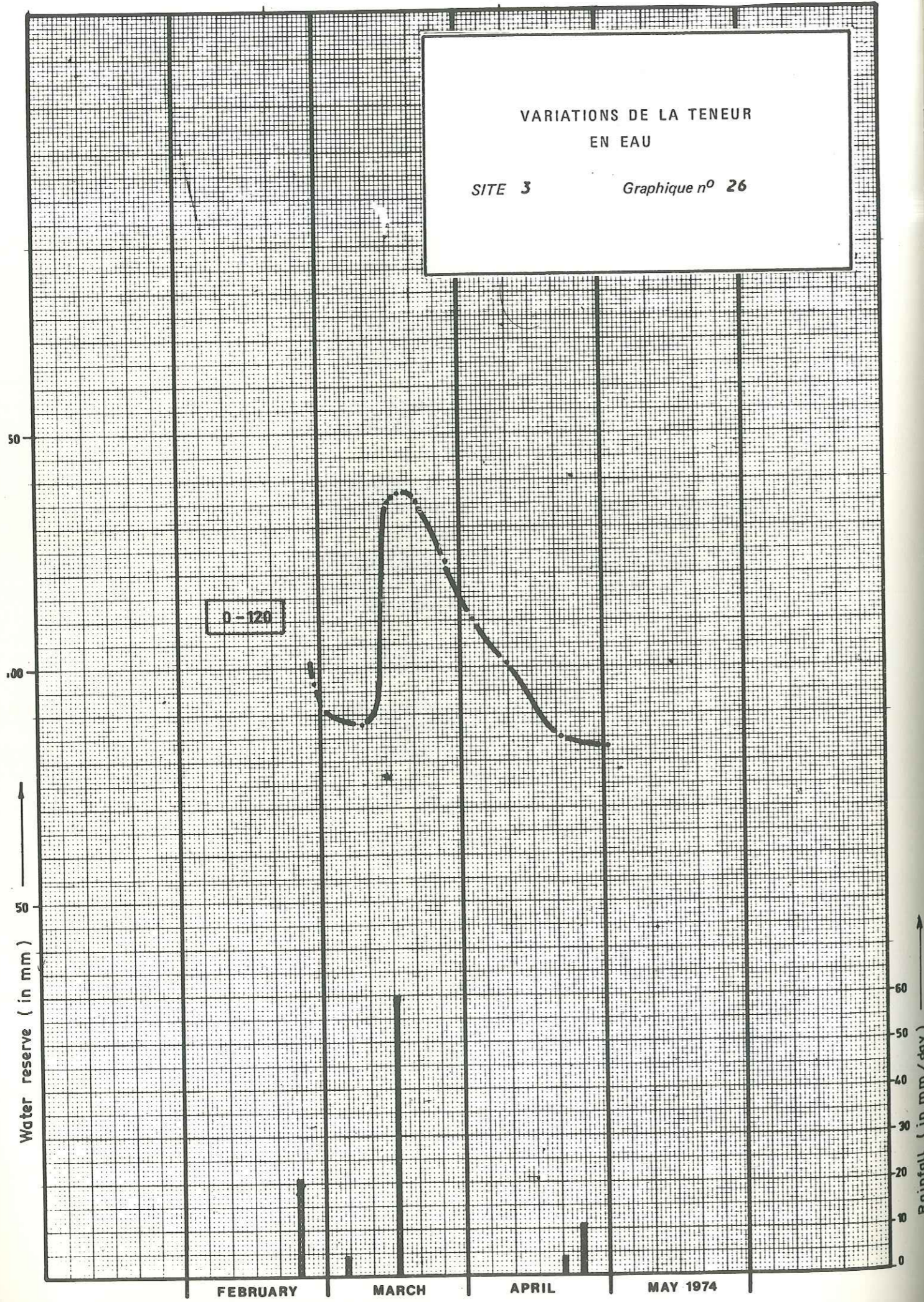
L'évolution du stock d'eau contenu dans la tranche à-190 cm sera étudiée en détail dans la partie consacrée à l'évapotranspiration.

9.2.2 - Site 4 - BIR BIN HAMADI (Graphiques n° 11A, 12A, 13A, 28 et 29)

C'est un profil dont la texture est peu différenciée. Il est composé d'un ensemble sablo-limoneux avec des passées plus argileuses.

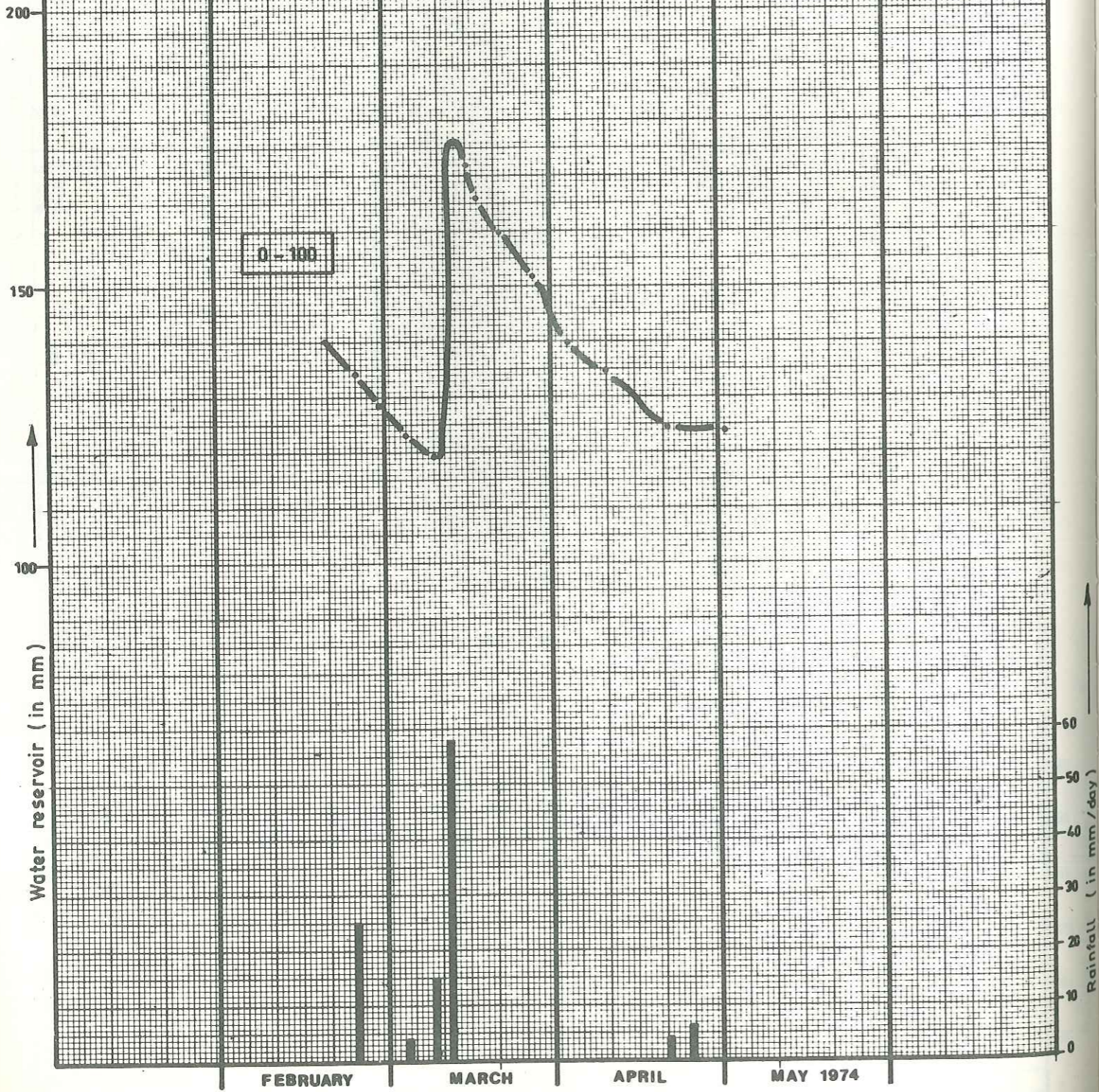
La forte valeur de l'humidité volumique rencontrée en profondeur (15 à 20 %) est difficilement explicable si ce n'est par l'absence de végétation à enracinement profond aux environs du site.

Les variations du taux d'humidité ne dépassent pas, en profondeur, la cote 120 cm. Au-dessous le stock d'eau contenu dans le sol varie peu et semble protégé de l'évapotranspiration par une couche plus argileuse située à 120 cm. De 0 à 120 cm le sol peut passer de 11 % à 20 % d'humidité volumique, soit un apport de 90 mm d'eau. Toute cette eau sera reprise par évapotranspiration.



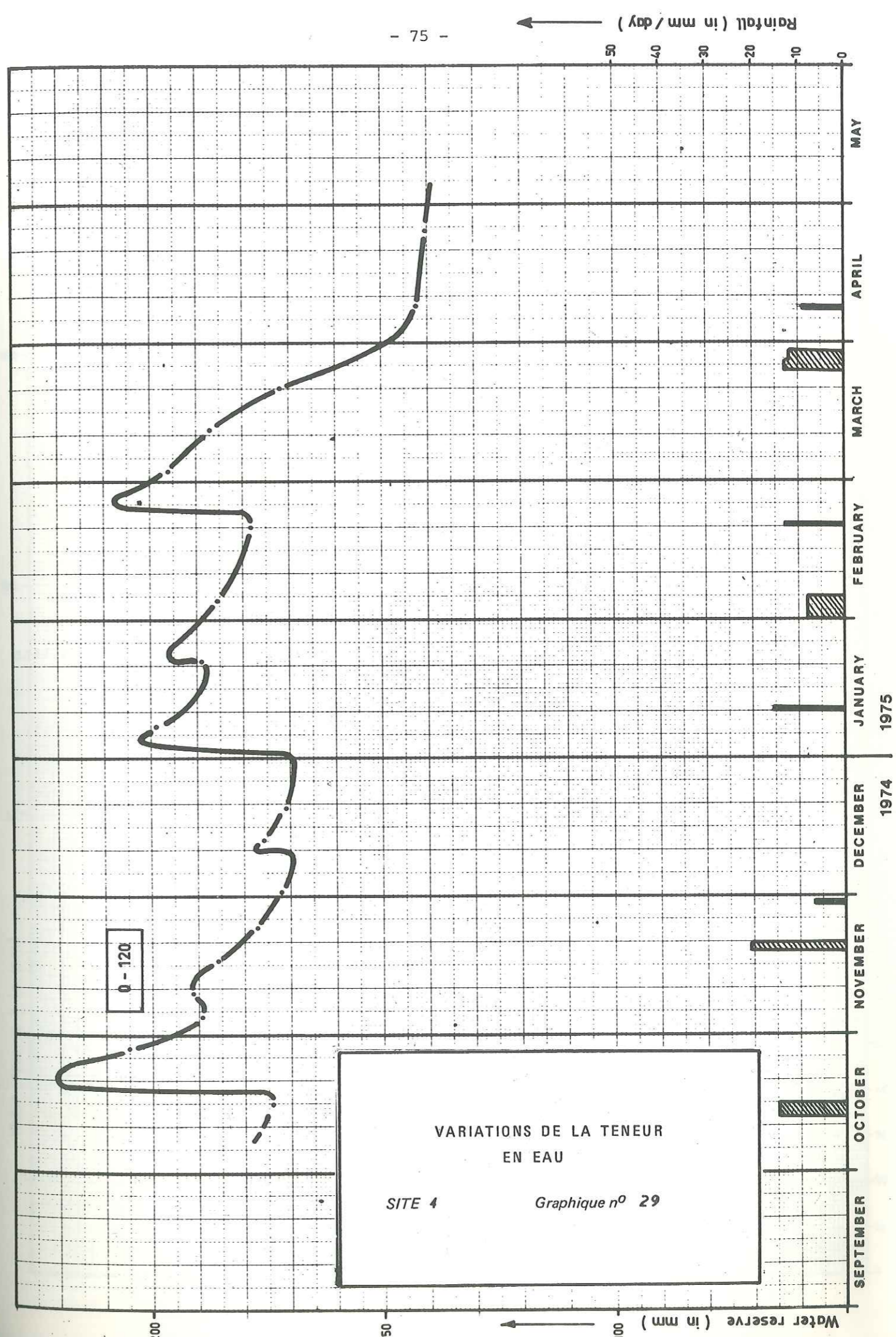
VARIATIONS DE LA TENEUR EN EAU

SITE 4 Graphique n° 28



VARIATIONS DE LA TENEUR EN EAU

SITE 4 Graphique n° 29



9.2.3 - Site 5 - Plaine du BIR AD DARDUR
(Graphiques n° 14A, 15A, 30 et 31)

Le profil est de composition homogène sur tout son ensemble ; il est constitué par des sables limoneux d'humidité volumique comprise entre 3 et 5 %.

La crue de mars 1974 permet de calculer la vitesse d'avancement du front d'humectation :

- . du 15 au 17.03.74 : 120 mm soit 50 mm/j
- . du 17 au 21.03.74 : 110 mm soit 27 mm/j
- . du 21 au 27.03.74 : 100 mm soit 17 mm/j
- . du 27 au 05.04.74 : 80 mm soit 10 mm/j

Le front d'humectation se stabilise à 180 cm de profondeur, le haut du profil étant desséché par évapotranspiration.

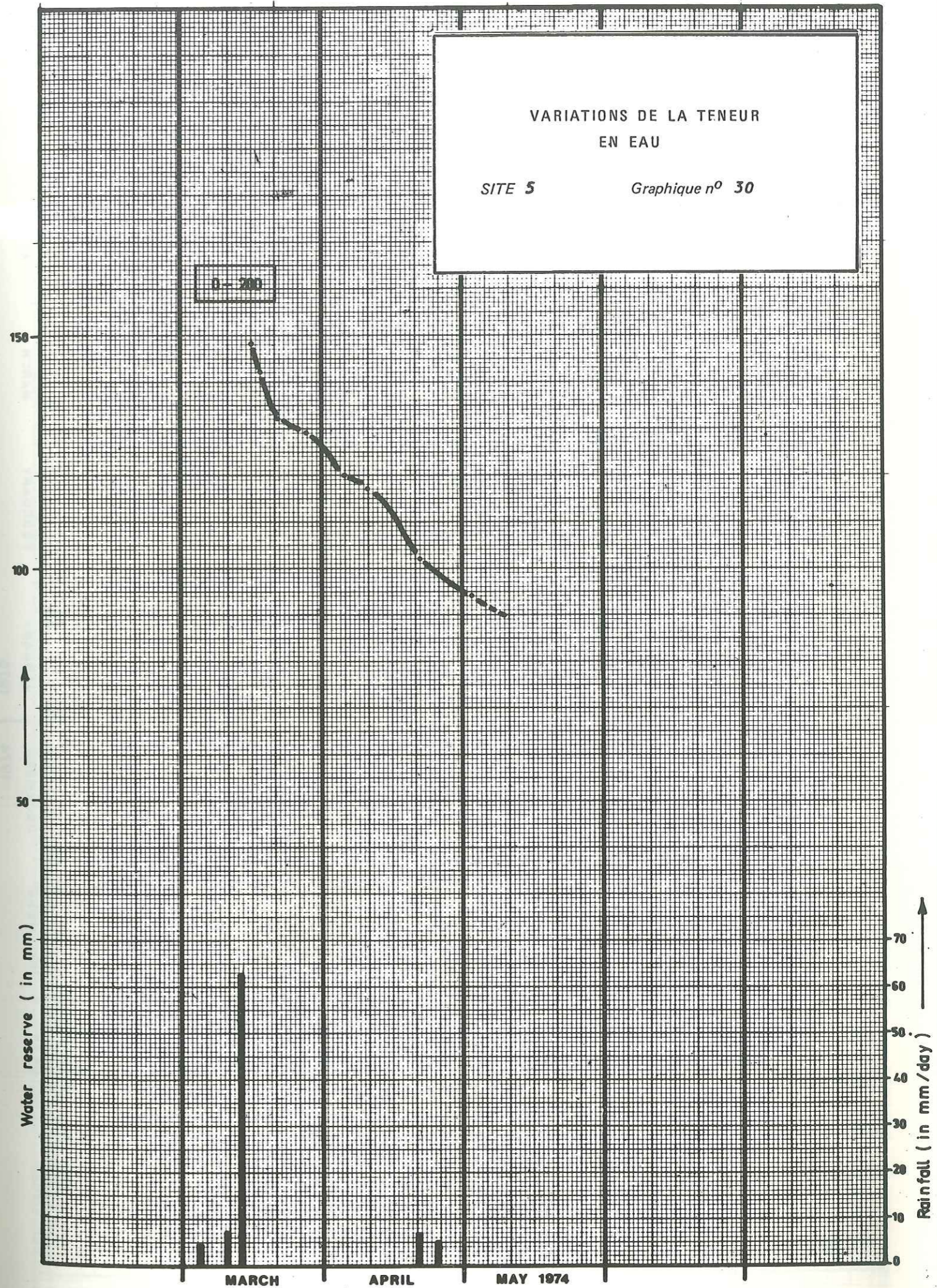
9.2.4 - Site 6 - WADI AL HIRA aval branche ouest
(Graphiques n° 16A, 17A, 18A et 32)

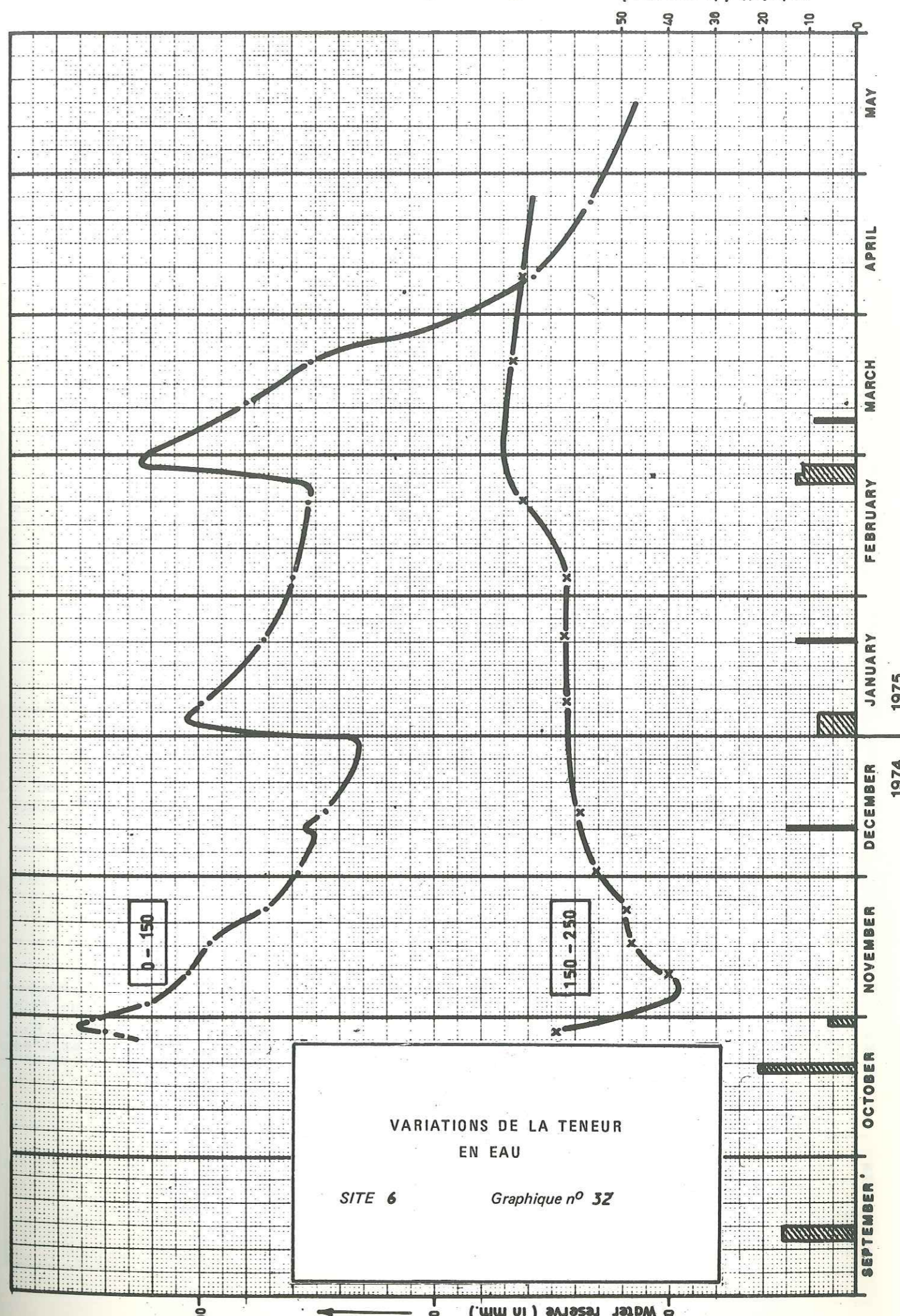
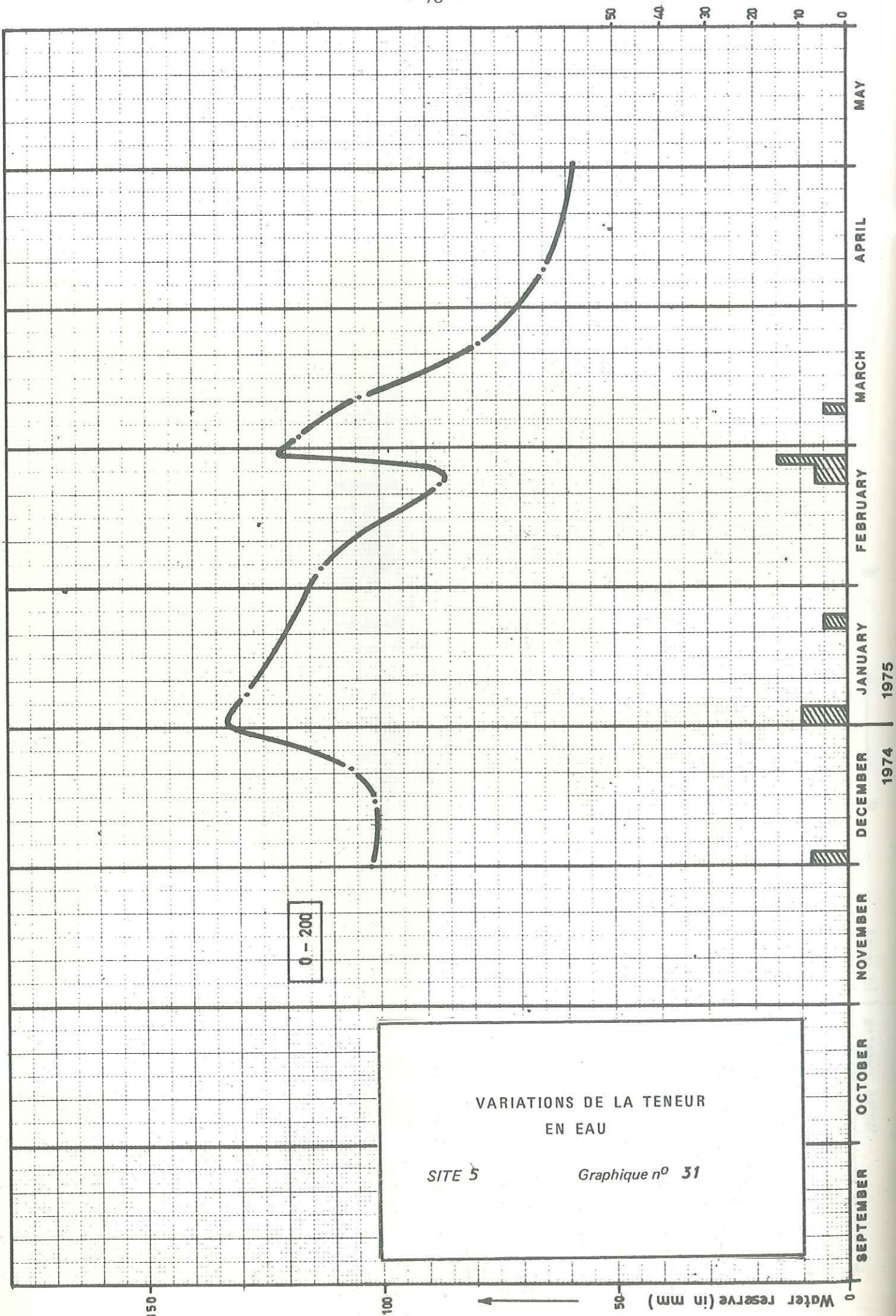
Dans cette plaine constituée anciennement par les épandages du WADI AL HIRA à l'aval des collines, on retrouve la stratification en lits argilo-limoneux.

L'évolution du stock dans la tranche 0-230 cm semble prouver qu'il y a un apport latéral entre les cotes 170 et 230 cm (Graphique n° 32).

En effet, si on compare la diminution du stock d'eau dans la tranche 0-150 cm à l'augmentation du stock dans la tranche 150-250 cm, pour la période du 17.03.74 au 10.04.74, on constate que la diminution est équivalente, à quelques millimètres près, à l'augmentation. Or la diminution de stock dans la tranche 0-150 cm est due en grande partie, sinon en totalité, à l'évapotranspiration.

	17.21/3	21.27/3	27/3-3/4	3-10/4	Total
0-150 cm	-14,8 mm	-20 mm	-12,8 mm	-8,2 mm	-55,8 mm
150-240 cm	+11,2 mm	+20 mm	+16,6 mm	+11,0 mm	+58,8 mm





En prenant 1,5 mm/j pour l'ETR, on arrive à 36 mm d'eau évaporée. Il faut donc qu'il y ait un apport latéral pour expliquer l'augmentation de stock dans la tranche 150-240 cm, puisque le transfert d'eau de la tranche supérieure vers la tranche inférieure n'y suffit pas.

Cet apport latéral est fort plausible car le WADI AL HIRA a longuement coulé à 25 m du site, dans un lit profond de 1,50 m environ ; l'infiltration a dû former un bulbe d'humectation axé sur le lit du wadi et ce bulbe alimente la tranche 150-250 cm du site 6.

La même constatation peut être faite pour la période du 09.11.74 au 30.12.74 (Graphiques n 17A et 32). La diminution du stock dans la tranche 0-150 cm est de 40 mm ce qui correspond à l'évapotranspiration (0,8 mm/j pour le site 4 pendant cette période). L'augmentation dans la tranche 150-240 cm est de 20 mm ; elle correspond à l'apport latéral du wadi.

Le profil est sec au-dessous de 250 cm. Cette limite correspond à une couche argileuse (HV = 15 %). Toute l'eau infiltrée sera reprise par l'évapotranspiration. Le fait qu'il n'y ait pas d'infiltration efficace au niveau du site 6 ne prouve pas l'absence d'infiltration le long du wadi ; un site plus proche du wadi aurait, sans doute, montré des couches profondes plus humides où une part de l'infiltration serait efficace.

9.3 - Infiltration profonde

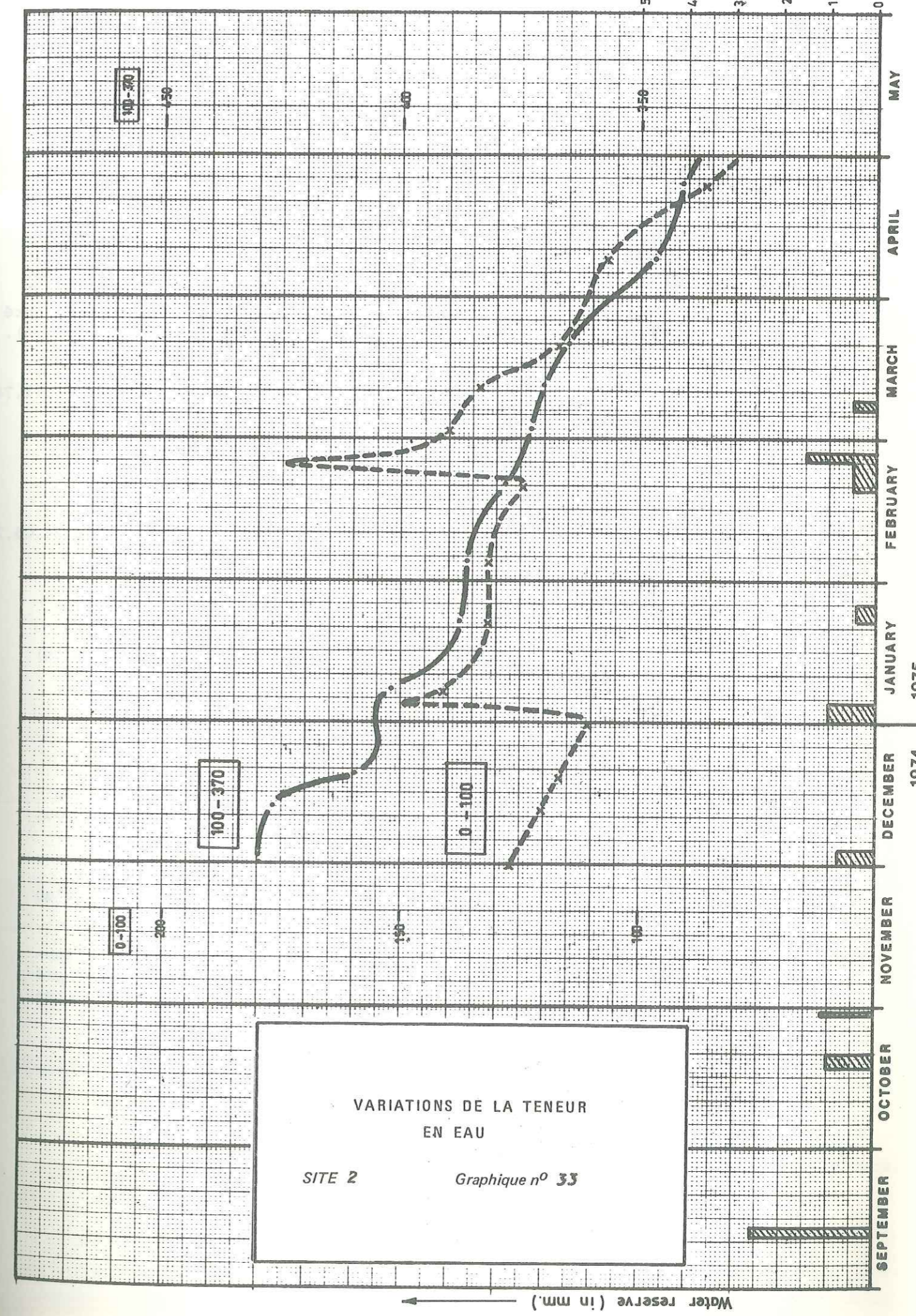
Les sites dans lesquels on peut mettre en évidence une infiltration au-delà de 5 m sont les sites 2, 7, 8, 9 et 10.

9.3.1 - Site 2 (Méandres du WADI AL HIRA) Graphiques n° 19A, 20A, 21A et 33.

Dans cette zone de méandres les types de sols en surface sont très variables. L'alluvionnement dépose graviers, sables ou limons plus ou moins en aval ou en amont suivant la force de la crue. Au site 2, on a trouvé de haut en bas :

- . 0- 80 cm : sable,
- . 80-130 cm : limon,
- . 130-210 cm : sable,
- . 210-360 cm : sables et limons en stratification,
- . vers 400 cm: lit de gravier.

Le site a été submergé par 75 cm d'eau le 23.02.74 et par 90 cm le 13.03.74. Pendant la saison 1974-1975 le site n'a été submergé qu'une fois lors de la crue du 20.10.74. La hauteur d'eau sur le site a dû dépasser 1 m. Ces hauteurs d'eau ne sont pas représentatives des volumes infiltrés car l'eau ne reste pas sur le site, elle s'écoule.



Le profil après la crue de Février 74 semble indiquer à la fois :

- l'humectation jusqu'à 150 cm au 09.03.74 par un stock infiltré de 120 mm ;

- un ressuyage, au-delà de 250 cm, de l'humectation attribuable à la crue précédente (Graphique n° 19A).

Le profil après la crue de Mars 1974 indique une augmentation de stock de 200 mm dans la tranche 0-350 cm, sans préjuger de ce qui a pu s'infiltrer profondément pendant la submersion, le profil étant presque saturé le jour de la première mesure après la crue (le 15.03.74). (Graphique n° 19A).

Les observations effectuées pendant la saison 1974-1975 n'ont pu commencer que tard après la crue du 20.03.74. Le profil hydrique du 30.11.74 ne donne pas le stock d'eau maximum (Graphique n° 20A).

La couche argilo-limoneuse 80-130 cm semble isoler le terrain situé au-dessous et le soustraire à l'influence de l'évapotranspiration.

Le ressuyage des sables de 130 à 160 cm est mis en évidence par le parallélisme de l'évolution des profils hydriques du 30.11.74 au 24.04.75.

Le flux moyen à la cote - 370 cm est de 0,6 mm/j.

La capacité d'absorption d'un profil sec dans la tranche 0-100 cm est de 200 mm d'eau. Cette valeur n'est atteinte qu'au passage d'une crue et la diminution rapide du stock d'eau dans les sables (0-70 cm) au-dessus de la couche d'argile semble indiquer un drainage latéral vers la limite de la couche d'argile. Les précipitations, à elles seules, ne permettent pas d'atteindre une augmentation de 200 mm des réserves d'eau dans la tranche 0-70 cm, aussi ne constate-t-on pas de drainage latéral (ou s'il existe, il est peu important) en dehors du passage des crues.

Les précipitations n'intéressent que la partie superficielle du sol (0-100 cm) (Graphique n° 33). L'apport n'étant pas assez important pour permettre le transit de l'eau vers le bas, à travers la couche d'argile.

L'évolution des profils hydriques de l'année 1973-1974 montre une avance du front d'humectation de 50 mm/jour, soit 1,5 m/mois, plus d'un mois après la submersion du site (Graphique n° 20A et 21A).

De l'observation de ce site, il ressort que seules les crues submergeant le site permettent une infiltration au-delà de 3,70 m, que les précipitations ne peuvent s'infiltrer au-delà de 1 m et qu'elles sont réduites par évapotranspiration (graphique n° 33).

9.3.2 - Site 7 - Poche d'AWLAD TANTUSH
(Graphiques n° 22A, 23A, 24A et 34)

Le profil textural de ce site est caractéristique des poches du WADI AL HIRA. Il montre une stratification de couches argilo-limoneuses et de couches sableuses. Les couches argilo-limoneuses, principalement à 90-110 cm et 190-250 cm montrent une humidité volumique élevée variant entre 20 et 30 %. Les sables séparant les couches argilo-limoneuses sont sans doute éoliens comme l'indiquent les formes dunaires de surface, alentour. L'humidité volumique maximale des sables varie de 12 à 20 % et la capacité de rétention de 4 à 8 % environ.

Le site est submergé par 1,70 m d'eau lors de la crue de Mars 1974. L'eau disparaît en 8 jours, soit une vitesse d'infiltration de 210 mm d'eau/jour ou 8,75 mm/h (Graphique n° 22A).

Le stock après la crue atteint 880 mm d'eau. Il est rapidement réduit par ressuyage, notamment dans les sables, comme le montre le parallélisme dans l'évolution des profils hydriques.

La crue du 20 Octobre 1974 a submergé le site par 1,14 m d'eau qui a disparu en 6 jours ; soit une vitesse d'infiltration de 190 mm d'eau/jour (ou 8 mm/h).

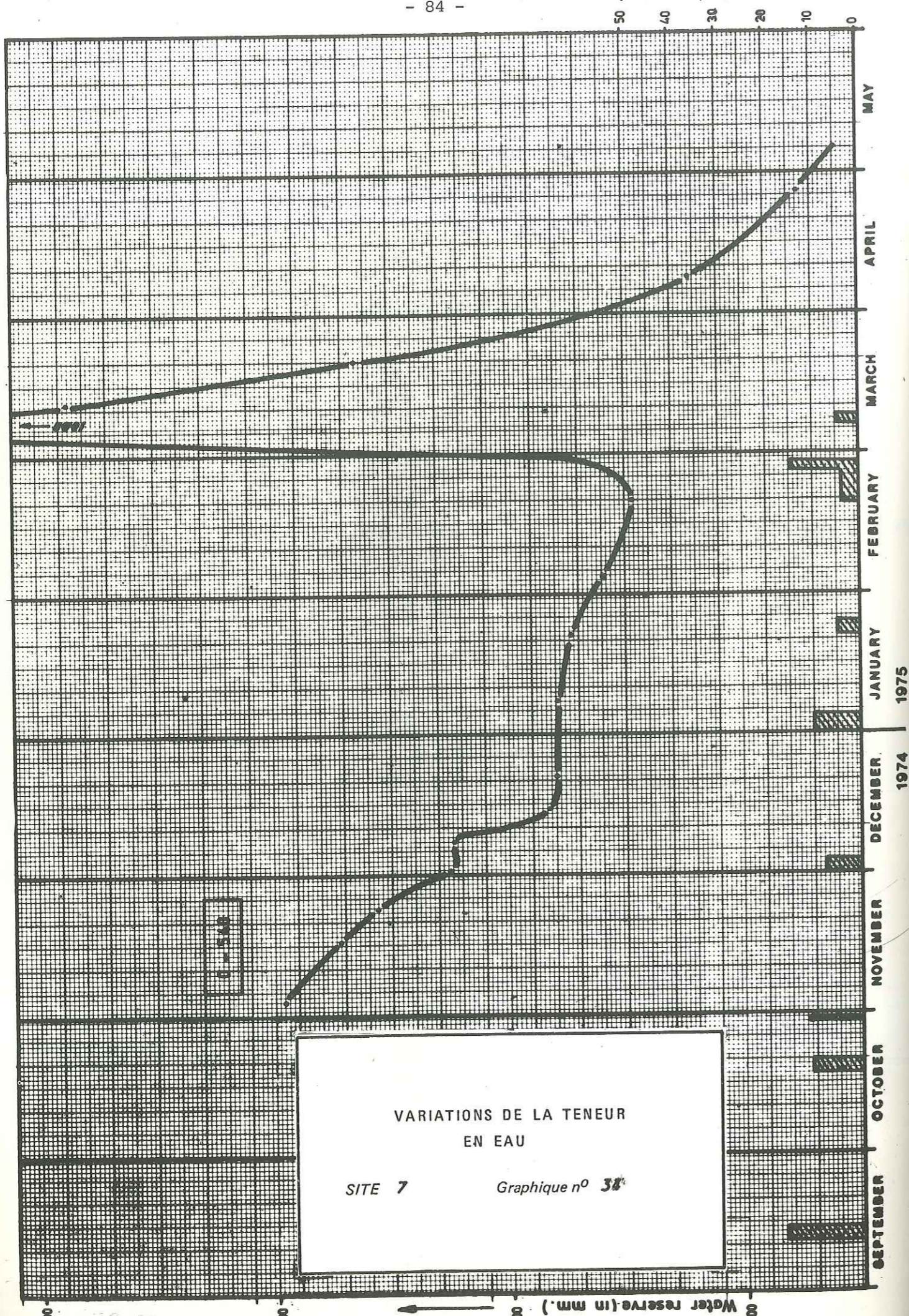
La première mesure effectuée, après la crue du 20.10.74 le 03.11.74, donne un stock d'eau de 900 mm alors que le profil du 04.09.74 donne un stock de 500 mm. L'apport de la crue s'élève donc à 400 mm, au 03.11.74.

La mesure du 16.11.74 montre que le front d'humectation n'avait pas atteint le bas du profil le 03.11.74 (il était à la cote -420 cm) (graphique n° 23A). Au 16.11.74 le front d'humectation a dépassé la cote la plus basse du profil et le profil commence à se ressuyer au-dessus de la cote -420 cm.

Il faut 13 jours au front d'humectation pour atteindre la cote -420 cm, soit une vitesse d'avance de $420/13 = 32,3$ cm/j ou 320 mm/j.

La vitesse d'infiltration de l'eau ne correspond pas, sur le site 7, à la vitesse de propagation du front d'humectation.

En effet, le stock d'eau au 3.11.74 est de 900 mm, le stock résiduel au 04.09.74 de 500 mm, soit 400 mm d'eau emmagasinés dans le sol, sur la profondeur du profil, alors que le front d'humectation n'a pas atteint le bas du profil. Sur les 1 140 mm d'eau infiltrés seuls 400 mm apparaissent liés à l'humectation du sol. Les 700 mm restant se sont pourtant infiltrés. Il peut exister des zones d'infiltration préférentielle dans la cuvette comme il peut y avoir une infiltration latérale dans les sables éoliens bordant la cuvette. L'infiltration rapide dans certaines zones augmente l'infiltration efficace alors que les infiltrations latérales dans les sables favorisent l'évapotranspiration différée et diminuent de ce fait l'infiltration efficace.



Cependant il faut tenir compte du fait qu'il existe une infiltration de macroporosité. L'eau profite de conduits et s'infiltré avant d'humecter le sol (POURRUT, 1968 et FEODOROFF, 1964). Ceci pourrait expliquer les 700 mm d'eau infiltrés que l'on ne retrouve pas dans les variations du stock.

La crue de Février 75 a atteint la poche des AWLAD TANTUSH. L'eau est passée à proximité du site sans le submerger. Il est difficile de chiffrer l'apport de cette petite crue mais le stock d'eau mesuré sur le profil est nettement plus important que celui mesuré lors de la crue d'Octobre 1974. Le stock avant la crue était de 747,4 mm, après la crue il est de 1 080,8 mm soit un gain de 333,4 mm qui pourrait correspondre à l'apport de la crue (Graphique n° 24A).

Le flux d'eau à travers la surface situé à 540 cm de profondeur, au niveau du site, après la crue de Février, a été de 4 mm d'eau/j (240 mm d'eau en 2 mois), en considérant que l'eau contenue dans la tranche 120-540 cm ne peut que s'égoutter vers le bas. Lors de la crue d'Octobre 74 le flux était beaucoup plus faible. Il n'a atteint que 0,7 mm d'eau/jour (82 mm en 4 mois). La différence de flux constatée est explicable par l'augmentation de la perméabilité. En Octobre la perméabilité du sol est très faible, le sol étant sec, alors qu'en Janvier la perméabilité est considérablement augmentée par l'humectation du sol due à la crue d'Octobre.

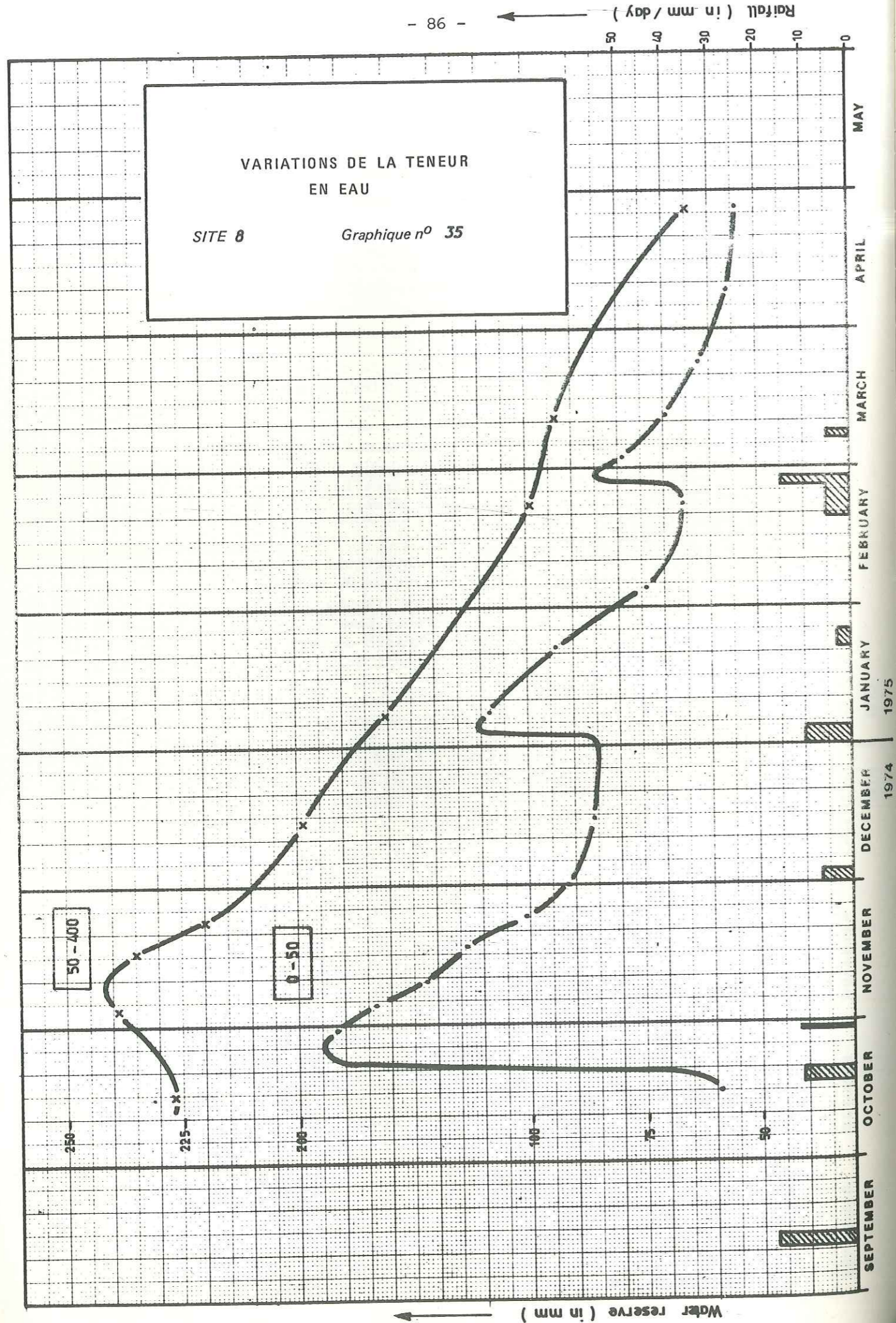
La comparaison des profils hydriques relevés après la crue de Février 1975 et ceux relevés après la crue de Mars 1974 montre une parfaite similitude dans leur évolution pour la tranche 0-120 cm (Graphiques n° 22A et 24A). Cette similitude n'est pas valable pour les profils hydriques effectués après la crue d'Octobre 1974. Les premiers ont été relevés au début de la saison chaude alors que les seconds l'ont été pendant la saison humide.

L'humidité volumique dans les 40 premiers centimètres reste constante pendant les mois d'hiver (Novembre, Décembre, Janvier, Février) alors qu'elle diminue rapidement pendant les mois de Mars-Avril. Cela est dû à des températures plus élevées, à l'absence de précipitations et au développement de la végétation durant les mois de Mars et Avril, autant de facteurs qui font que le stock d'eau n'est pas renouvelé et qu'il s'épuise rapidement.

9.3.3 - Site 8 - BIR ALLAQ (Graphiques n° 25A, 26A, 27A et 35)

Le profil montre une couche argilo-limoneuse en surface (30-50 cm) dominant un sable assez uniforme. Sur un profil voisin de quelques mètres apparaissent en plus deux autres couches argilo-limoneuses (à 110 et 230 cm). Ceci indique que les couches sont en fait des lentilles (couches à extension horizontale limitée). Aussi la perméabilité verticale d'ensemble doit être beaucoup accrue par la possibilité de déversement latéral dans ce système multicouche.

Les profils effectués durant la campagne 1973-74 montrent une humidité volumique générale plus élevée que les profils de la campagne 1974-1975. L'installation du site pendant une crue, le terrain étant immergé, explique les fortes humidités volumiques relevées lors des mesures de la saison 1973-74. Aussi il ne sera pas tenu compte de ces profils (Graphique n° 25A).



Le profil du 04.09.74 donne vraisemblablement l'humidité volumique minimale du site ; à savoir : 2 % pour les sables et 14 % pour la couche argilo-limoneuse de surface.

Le profil du 15.10.74 donne l'humidité maximale pour les sables dans la tranche 160-400 cm. La crue d'Octobre n'augmente pas le stock d'eau dans cette partie du profil.

La couche argilo-limoneuse de surface atteint une humidité volumique de 30 % lors de la crue d'Octobre. En un mois, l'humidité volumique de cette couche est ramenée à 20 % par évapotranspiration.

Une augmentation du stock d'eau apparait dans la zone 100-160 cm, qui correspond à un apport latéral lié au système multicouche mis en évidence précédemment (Graphique n° 26A).

Le parallélisme des différents profils après la crue d'Octobre indique un égouttage progressif des sables. La diminution du stock d'eau dans les sables est linéaire ; elle est de 0,7 mm/j (tranche 50-400 cm) (Graphique n° 35).

La crue d'Octobre 1974 a recouvert le site de 30 cm d'eau environ. De ces 300 mm d'eau infiltrés, il est difficile de connaître la partie évapotranspirée et la partie réellement infiltrée.

Bien que 70 % de l'eau apportée par la crue se soient infiltrés à plus de 4 m, on ne peut affirmer que ces 70 % constituent l'infiltration efficace. En effet, les eucalyptus et autres arbres et arbustes à enracinement profond entourant le site interceptent sans doute une partie de cette eau.

Les précipitations n'affectent que la tranche superficielle du profil (0-50 cm) ; elles ne contribuent en rien à l'augmentation du stock en profondeur, elles sont rapidement reprises par évapotranspiration. (Graphique n° 27A).

9.3.4 - Site 9 - BIR AD DARDUR (Graphiques n° 28A, 29A et 36)

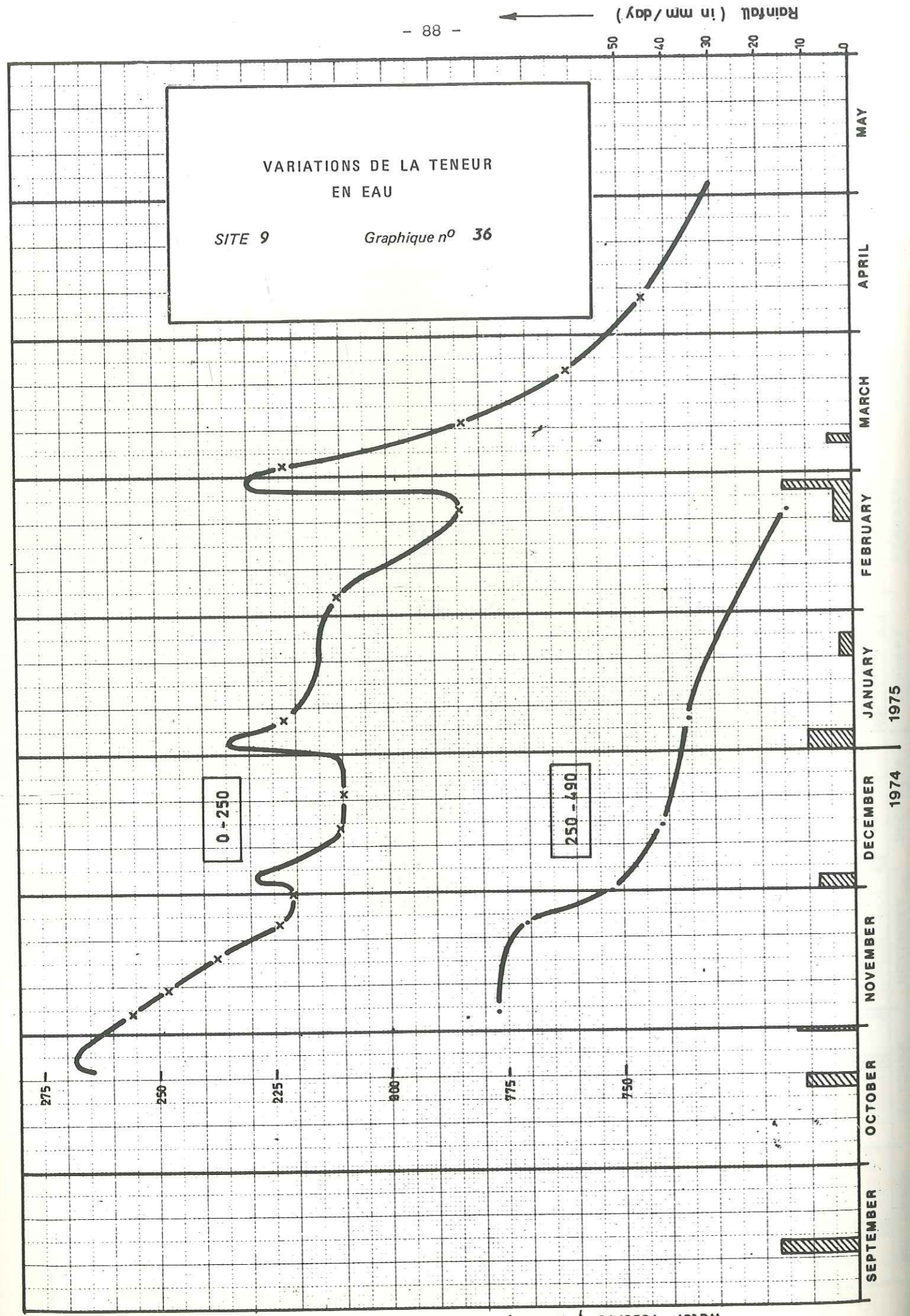
Le profil a été implanté dans l'axe du chenal d'écoulement de la plaine inondable.

Le profil textural se compose d'une couche de sables limoneux dominant une épaisse couche d'argile compacte.

Le site ayant été équipé tard, les mesures de la campagne 1973-1974 n'ont pas donné de résultats (Graphique n° 28A).

Les mesures de la campagne 1974-1975 montrent qu'il existe une infiltration en profondeur malgré la présence de l'épaisse couche argileuse à 3 m (Graphique n° 29A).

- 88 -



L'examen des profils hydriques permet de déterminer l'avance du front d'humectation. Le front était à 5 m le 4.11.74 soit 14 jours après la crue, ce qui représente une avance de 360 mm/j ; valeur comparable à celle trouvée au site 7 (320 mm/j).

Considérant les variations du stock d'eau dans la tranche 250-490 cm (afin de réduire les variations imputables à l'évapotranspiration), on constate une diminution de 72 mm d'eau en 4 mois soit un flux, à travers la surface située à 490 cm de profondeur, de 0,6 mm/j (Graphique n° 36) ; valeur qui rejoint celle trouvée au site 7 pour la crue d'Octobre 1974 (0,7 mm/j).

Bien que le site 9 ne soit pas situé dans une poche, on peut le considérer comme tel lors des grosses crues, l'eau pouvant stagner assez longtemps, car dans cette zone l'écoulement est lent. Une infiltration de l'eau est donc possible. Elle est malheureusement impossible à chiffrer.

9.3.5 - Site 10 - Amont de la ferme d'Etat
(Graphiques n° 30A, 31A, 32A et 37)

La stratification en couches argilo-limoneuses (H.V. = 20 à 30 %) et sableuses alternées (H.V. = 8 à 12 %) montre l'ancienneté du caractère hydraulique du site (zone de ralentissement dans les "méandres" du WADI AL HIRA, le terme "méandre" correspond en fait à une zone de divagation du wadi, encaissée dans des formations loessiques tendres).

Les mesures de la campagne 1973-1974 ont commencé tardivement, le site ayant été équipé un mois après la dernière crue.

L'évolution des profils hydriques pour l'année 1974-1975 est similaire à celle de l'année précédente.

Le graphique n° 31A permet d'observer très nettement l'avance du front d'humectation dans le sol.

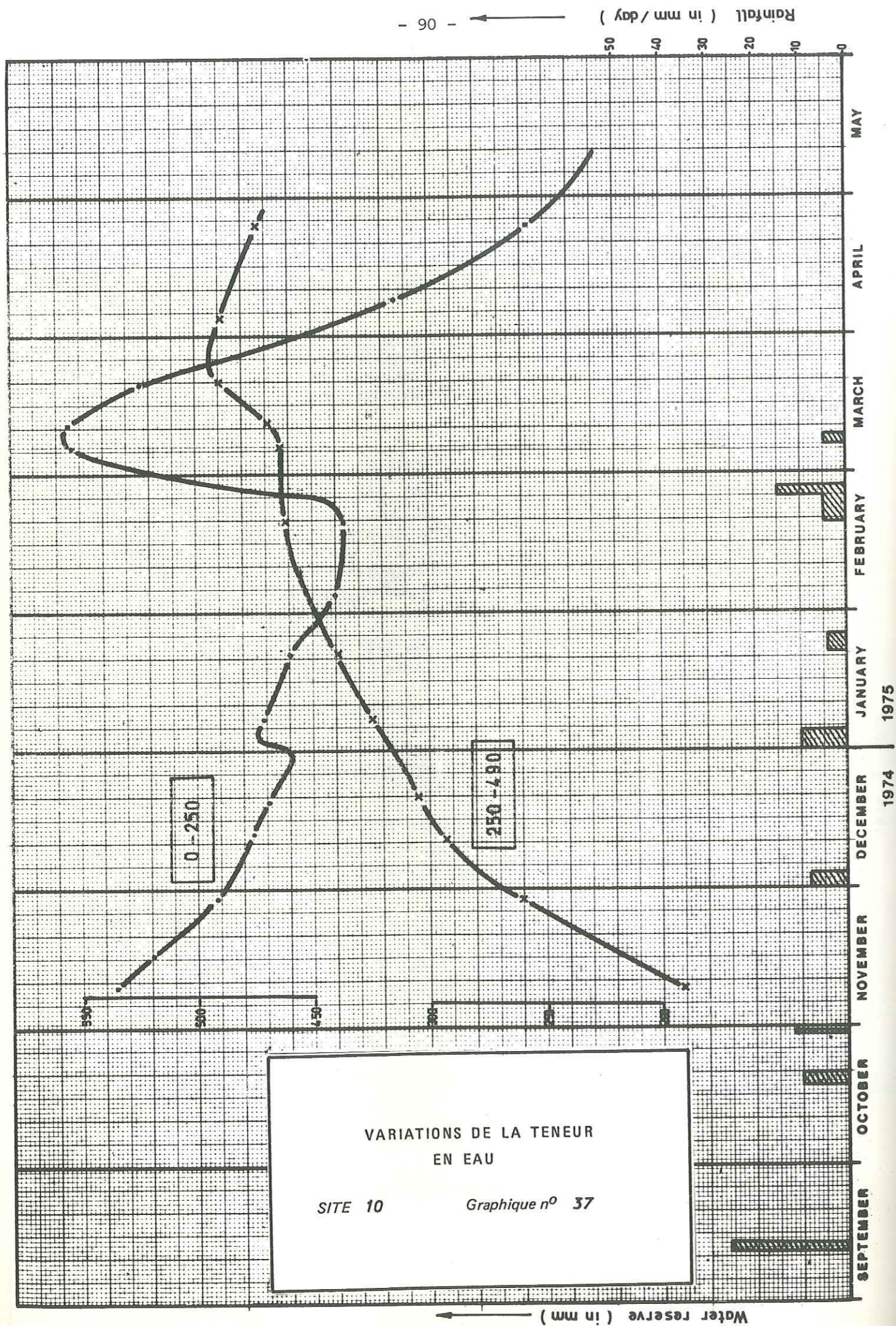
Le front d'humectation met 19 jours pour atteindre la profondeur de 270 cm à travers une alternance de couches sableuses et argilo-limoneuses ; soit une avance moyenne de 140 mm/j (valeur comparable à celle trouvée lors de la campagne 1973-1974 qui est de 130 mm/j).

De 250 à 350 cm l'eau humecte un banc de sable fin (H.V. = 7 %) ; les vitesses d'avance du front sont variables :

- . du 09.11 au 16.11 : 260 mm soit 37 mm/j,
- . du 16.11 au 28.11 : 280 mm soit 23 mm/j,
- . du 28.11 au 19.12 : 240 mm soit 11,4 mm/j.

De 350 à 490 cm le front d'humectation atteint un banc plus grossier (ou moins limoneux) (H.V. = 4 %). La vitesse d'avance du front croît de 12,2 mm/j à 23 mm/j :

- . du 19.12 au 07.01 : 220 mm soit 12,2 mm/j,
- . du 07.01 au 21.01 : 220 mm soit 15,7 mm/j,
- . du 21.01 au 20.02 : 700 mm soit 23,3 mm/j.



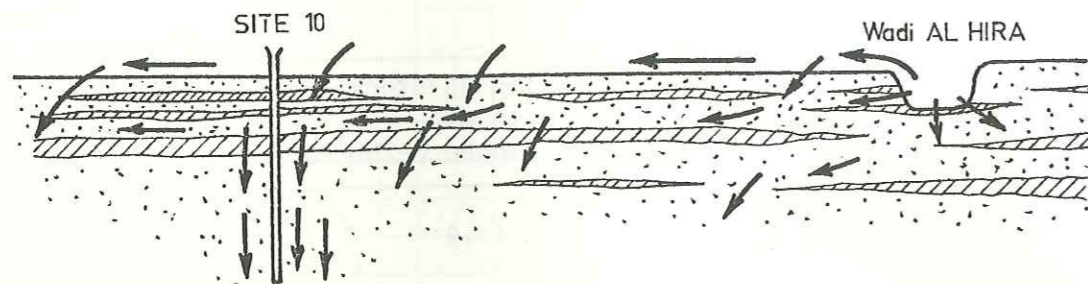
La vitesse d'avance du front d'humectation n'est pas constante : elle varie avec la profondeur et avec la texture (ou la granulométrie) du terrain traversé. De quelques 300 mm/j dans les premiers décimètres, la vitesse tombe à 20 mm/j aux environs de 3 m de profondeur.

La courbe des variations du stock d'eau dans la tranche 250-490 cm (Graphique n° 37) montre une constante augmentation du stock. Il y a donc un apport latéral qui alimente la couche sableuse 250-590 cm, la diminution du stock dans la tranche 0-250 cm ne compensant pas l'augmentation dans la tranche 250-490, compte-tenu de l'évapotranspiration (Tableau n° 38).

Date	Evolution du stock (en mm) dans la tranche 0-250 cm	Evolution du stock (en mm) dans la tranche 250-490 cm
Du 09.11 au 28.11.74	- 43,4	+ 69,9
Du 28.11 au 12.12.74	- 15,6	+ 34,1
Du 12.12 au 19.12.74	- 8,3	+ 11,1
Du 19.12 au 07.01.75	+ 2,2	+ 19,9
Du 07.01 au 21.01.75	- 10,3	+ 15,5
Du 21.01 au 20.02.75	- 23,6	+ 21,5
Du 09.11.74 au 20.02.75	- 99,0	+172,0
R.E.T. du 09.11.74 au 20.02.75	100 mm	

TABLEAU n° 38 : Variations des réserves dans les tranches 0-250 cm et 250 -490 cm (Site 10).

L'apport latéral se fait au-dessus de la couche sableuse à travers la couche argileuse située à 200 cm de profondeur. L'eau se déverse à travers celle-ci dans la couche sableuse où elle progresse verticalement (Schéma ci-après).



Ce système complexe du transit de l'eau dans le sol expliquerait la différence trouvée dans les vitesses d'avance du front d'humectation dans les couches 0-250 cm et 250-490 cm.

L'augmentation du stock d'eau dans la tranche 250-490 cm est de 200 mm pour la saison 1974-1975. Cette eau est protégée de l'évapotranspiration par la couche argileuse sus-jacente, elle continuera à transiter vers la nappe par égouttage des sables.

10 - EVALUATION DE L'INFILTRATION ET MECANISME DE L'ALIMENTATION DES NAPPES

Le site 7 permet une bonne évaluation de l'infiltration dans les poches.

On considèrera que sur ce site, seule la tranche 0-120 cm est influencée par l'évapotranspiration, pendant la période considérée.

- Crue d'Octobre 1974 (Graphique n° 23A)

Sur les 1 300 mm d'eau infiltrée d'Octobre à Février (crues + précipitations) 100 mm ont été évapotranspirés. L'infiltration efficace est donc égale à 1 200 mm soit 90 % des apports ; ceci, dans le cas où l'infiltration des apports se ferait sur le site par percolation verticale.

- Crue de Février 1975 (Graphique n° 24A)

La hauteur d'eau infiltrée est évaluée à 350 mm. L'évapotranspiration réduit le stock d'eau apportée par la crue de 90 mm (dans la tranche 0-120 cm).

L'infiltration peut être estimée à 75 % dans le cas de cette petite crue ; valeur faible qui peut s'expliquer par une évapotranspiration forte à cette période de l'année et par une surface mouillée relativement importante pour un apport de cet ordre.

- Crue de Mars 1974 (Graphique n° 22A)

Cette crue est à rapprocher de la crue de Février 1975 pour l'évolution des profils hydriques qu'elle entraîne. 1 700 mm se sont infiltrés, dont une certaine quantité a été reprise par l'évapotranspiration. Dans la tranche 0-120 cm, 200 mm sont susceptibles d'être évapotranspirés. L'infiltration efficace est donc de 1 500 mm soit 88 % des apports.

Il est possible d'évaluer l'infiltration efficace par une autre méthode. La surface mouillée de la poche pour un volume d'eau de 74.10^4 m^3 (apport de la crue) est environ 60 hectares (6.10^5 m^2) ; l'évapotranspiration est estimée à 200 mm, ce qui correspond à un volume d'eau de 12.10^4 m^3 ($6.10^5 \times 0,2$). 62.10^4 m^3 d'eau se sont infiltrés, soit 84 % des apports.

On peut donc vraisemblablement estimer l'infiltration efficace à 85 % des apports, dans la poche d'AWLAD TANTUSH. Ceci en supposant qu'il n'existe pas de percolations latérales importantes.

Les sites 2, 6, 8, 9 et 10 ont montré qu'il existait une infiltration dans le lit du wadi (sites 2 et 6) et dans certaines zones de débordement du wadi, là où la durée d'écoulement est suffisamment longue (sites 9 et 10). Il n'est cependant pas possible de chiffrer l'infiltration dans ces zones, soit parce que la valeur des apports n'est pas connue, soit parce qu'il intervient des transferts latéraux au niveau du site.

On a vu que la vitesse d'avance du front d'humectation pouvait être très variable selon les sites et selon la profondeur. De 400 mm/j, elle peut retomber à 50 mm/jour ou moins. De toute façon, cela implique une très longue durée de transit de l'eau dans le sol jusqu'à la nappe (plusieurs dizaines de mois).

L'étude des variations piézométriques montre que la nappe réagit au plus tard trois mois après la crue. Le temps de réaction de la nappe n'a donc pas de rapport direct avec la durée de propagation du front d'humectation. Il peut exister, comme il l'a été dit au paragraphe 8.3.2, une infiltration de macroporosité par des conduits qui permettraient à l'eau une progression rapide vers le bas avant que le sol ne soit humecté entièrement. Ce phénomène a été mis en évidence, entre autres, par Pierre POURRUT durant la saison 1966-1967 sur le bassin versant de la TAPAINA (République Malgache). Malheureusement la profondeur d'investigation n'excède pas trois mètres. Sur le site 7 on a pu montrer que ce phénomène pouvait dépasser 5 m de profondeur. Malgré tout rien ne prouve que le processus se poursuive vers le bas jusqu'à la nappe, qui, dans la zone étudiée, est située entre 50 et 90 m sous la surface du sol.

Si le processus ne se poursuit pas jusqu'à la nappe il faut imaginer un autre mode de propagation de l'eau. On peut penser que le front d'humectation se stabilise en profondeur quelques temps après l'apport d'eau dû à la crue. Lorsque survient une nouvelle crue le nouveau front d'humectation se propage vers le bas et rompt l'équilibre précédent. Tout se passe en fait comme si le dernier front d'humectation poussait les fronts antérieurs vers la nappe. Lorsque le dernier front d'humectation se stabilise, l'équilibre détruit se rétablit et le processus d'alimentation de la nappe s'arrête.

L'eau infiltrée mettrait donc plusieurs années pour rejoindre la nappe. La durée du transit serait directement liée à la fréquence et à l'importance des crues se succédant sur les zones d'infiltration.

Date	Station 201 Pluviométrie (mm)	Station 202 Pluviométrie (mm)	Station 203 Pluviométrie (mm)	Volume écoulé (Mm ³)	Wadi Ghan Pluviométrie moyenne (mm)
23.02.74	20,0	25,0	17,5	2,8	4,1
04.03.74	4,5	3,8	5,0		
09.03.74	7,5	15,0	17,0	0,5	
12.03.74	63,0	58,0	62,0	6,2	97,1
20.04.74	7,0	4,5	3,0		
24.04.74	5,0	6,5	11,5		
12/14.09.74	52,0	45,0	15,0	2,5	22,0
15/30.09.74	0,1	1,0	0,7		
18/20.10.74	34,5	42,0	30,0	10,2	84,8
29.10.74	12,0	7,0	9,5		
01/03.12.74	23,0	16,0	22,0		
01/05.01.75	40,0	40,5	44,0	0,2	
21/25.01.75	15,5	13,5	11,5		
19/26.02.75	27,0	26,0	26,0	*	27,9
26/28.02.75	31,0	24,0	26,0		
07/08.03.75	9,5	0,5	10,0		

TABLEAU n° 39 : Données pluviométriques et volumes de crues pour le WADI AL HIRA.
* Valeur inconnue.

11 - APPLICATION DE L'ETUDE AU CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR)

Pour l'estimation de l'ETR ne pourront être retenus que les sites pour lesquels l'examen des profils hydriques a montré qu'il n'existait ni percolation ni apport latéral. Ce sont les sites 3, 4 et 5.

On pourra cependant utiliser des sites ne répondant pas à ces critères si l'apport d'eau lié aux précipitations n'intéresse que la zone superficielle du sol (0-50 cm) et ne transite pas vers le bas (site 6).

11.1 - Pluviométrie et crues

La pluviométrie est donnée par trois pluviomètres installés par le GEFLI dans la zone d'épandage du WADI AL HIRA. Ce sont les pluviomètres 201, 202 et 203.

Le volume des crues (en Mm3) est celui observé à la station de jaugeage du "WADI GHAN dam".

Ces données sont consignées dans le tableau n° 39.

11.2 - Site 3 - SIDI AL GHARIB (Graphiques n° 26 et 27)

La variation du stock d'eau dans la tranche 0-120 cm pour l'année 1973-1974, dans la tranche 0-190 cm pour l'année 1974-1975 permet d'évaluer l'évapotranspiration réelle moyenne pendant une période déterminée (Tableau n° 40).

Dates	Reserves en mm	Diminution des réserves + pluies mm	Intervalle (jours)	E.T.R. mm/jour
27.02.74	96,8	44,0	1,1	4,0
28.02.74	92,4	4,6 (+3,8)	8,8	1,0
09.03.74	87,8			
15.03.74	135,4		2,3	
17.03.74	137,3		3,5	
21.03.74	135,3	12,6	5,9	2,1
27.03.74	122,7	12,4	7,0	1,8
03.04.74	110,3	9,5	6,9	1,6
10.04.74	100,8	15,5	11,0	1,4
21.04.74	85,3	20,0 (+11,0)	10,2	1,3
01.05.74	83,3			
04.09.74	113,6			
29.10.74	264,1			
04.11.74	258,7	5,4	6,2	0,9
09.11.74	251,3	7,4	5,1	1,5
16.11.74	241,4	9,9	7,0	1,4
23.11.74	233,8	7,6	7,0	1,1
30.11.74	235,6			
12.12.74	222,1	13,5 (+23,0)	12,0	(3,0)
19.12.74	221,9	0,2	7,0	0,0
07.01.75	240,8			
21.01.75	227,0	13,8	13,5	1,0
04.02.75	219,9	7,1 (+15,5)	13,0	(1,7)
20.02.75	196,3	23,6	16,1	1,5
02.03.75	210,7			
11.03.75	193,9	16,8 (+ 9,5)	9,2	(3,1)
20.03.75	180,2	13,7	9,2	1,5
08.04.75	148,5	31,7	18,5	1,7
24.04.75	143,1	5,4	16,0	0,3

TABLEAU n° 40 : Site 3 : Variation des réserves et évapotranspiration réelle dans la tranche 0-120 cm du 27.02 au 01.05.74 ; dans la tranche 0-190 cm du 04.09.74 au 24.04.75.

Ainsi durant les mois de Mars et d'Avril 1974 l'ETR moyenne a été de 2,0 mm/j.

La campagne de mesures 1974-1975 montre que l'ETR varie suivant les périodes de l'année :

- . pour les mois de novembre-décembre : 1,3 mm/j
- . pour les mois de janvier-février : 0,8 mm/j
- . pour les mois de mars-avril : 1,8 mm/j

L'augmentation de l'ETR est liée au développement de la végétation sur le site et à l'accroissement de la température.

Lorsque le stock d'eau dans la tranche 0-100 cm est réduit à son minimum, c'est-à-dire, généralement au début du mois d'Avril, l'ETR diminue brutalement et devient inférieure à 0,5 mm/j.

Il faut noter que la diminution du stock d'eau dans la tranche 50-190 cm est régulière durant toute la période où le stock dans la tranche 0-50 cm n'est pas à son minimum. Lorsque la tranche 0-50 cm est sèche le stock diminue rapidement dans la tranche 50-190 cm. L'évapotranspiration dans la tranche 0-50 cm n'étant plus compensée par les précipitations, c'est la réserve constante dans la tranche 50-190 cm qui alimente l'évapotranspiration.

De cette observation il ressort que, pendant les 6 mois d'hiver, les racines des plantes ont à leur disposition une réserve d'eau non négligeable, mais cette réserve est rapidement réduite dès que cessent les précipitations.

Dans le cas du site 3 il faut tenir compte de la rétention des précipitations par les eucalyptus et la végétation entourant le site. Il s'ensuit une majoration de l'ETR dans certains cas (valeurs entre parenthèses dans le tableau).

Dates	Réserves en mm	Diminution des réserves + pluies mm	Intervalle (jours)	E.T.R. mm/jour
23.02.74	134,4	5,8	3,7	1,6
27.02.74	128,5	5,1	4,6	1,1
04.03.74	123,4	3,8 (+ 3,8)	5,1	1,5
09.03.74	119,6			
15.03.74	172,0	6,1	2,5	2,4
17.03.74	165,9	5,9	3,5	1,7
21.03.74	160,0	8,2	5,9	1,4
27.03.74	151,8	11,5	7,0	1,6
03.04.74	140,3	5,4	6,9	0,8
10.04.74	134,9	10,5	11,0	1,0
21.04.74	124,4	0,7 (+11,0)	10,0	1,2
01.05.74	123,7			
04.09.74	118,1			
15.10.74	173,8			
27.10.74	204,9			
04.11.74	189,6	15,3 (+ 7,0)	7,6	2,9
09.11.74	191,2			
16.11.74	185,6	5,6	7,0	0,6
23.11.74	176,8	8,8	7,0	1,3
01.12.74	171,9	4,9	7,7	0,6
12.12.74	175,4			
19.12.74	170,5	4,9	7,0	0,7
07.01.75	198,6			
21.01.75	189,2	9,4	14,0	0,7
04.02.75	185,6	3,6 (+13,5)	14,0	1,4
20.02.75	178,4	7,2	16,0	0,5
02.03.75	196,1			
11.03.75	186,8	9,3 (+ 9,5)	9,0	2,1
20.03.75	171,6	15,2	9,2	1,7
08.04.75	142,5	29,1	17,5	1,7
24.04.75	140,4	2,1	16,0	0,1

TABLEAU n° 41 : Site 4 : Variation des réserves et évapotranspiration réelle dans la tranche 0-100 cm du 23.02 au 01.05.74 dans la tranche 0-120 cm du 04-09.74 au 24.04.75.

11.3 - Site 4 - BIR BIN HAMADI (Graphiques n° 28 et 29)

Les variations du stock n'affectent que la tranche superficielle du sol, de 0 à 100 cm pour l'année 1973-1974 et de 0 à 120 cm pour l'année 1974-1975 (Tableau n° 41).

Le sol est humecté dès les premières pluies sur 1 m à 1,20 m de profondeur. La campagne de mesures de l'année 1974-1975 montre qu'un stock de 50 mm reste disponible en permanence pendant les 6 mois d'hiver, l'évaporation n'affectant que la partie très superficielle du sol (0-70 cm). Lorsque ces 70 cm de sol sont desséchés, la réserve d'eau diminue rapidement dans la partie plus profonde du profil.

La campagne de 1973-1974 donne une ETR moyenne de 1,3 cm/j pour les mois de Mars et d'Avril. La campagne de 1974-1975 donne une ETR moyenne de 1,3 mm/j pour les mois de Novembre, Décembre, 0,8 mm/j pour les mois de Janvier, Février et 1,8 mm/j pour les mois de Mars et d'Avril.

11.4 - Site 5 - Plaine du BIR AD DARDUR (Graphiques n° 30 et 31)

La campagne 1973-1974 donne une ETR moyenne de 1,4 mm/j pour les mois de Mars et d'Avril.

La campagne de 1974-1975 donne une ETR moyenne de 1,3 mm/j pour les mois de Janvier et Février et de 2,5 mm/j pour le mois de Mars (Tableau n° 42).

Le site 5 a la particularité d'être homogène sur toute sa hauteur et l'évapotranspiration n'est pas perturbée par l'hétérogénéité du sol. Cette particularité facilite l'étude de l'évolution de l'ETR à partir d'un événement pluvieux.

L'ETR est très forte quelques jours après la pluie (ou la crue) (supérieure à 5 mm/j) et elle diminue rapidement au fur et à mesure que la partie superficielle du profil se dessèche (Graphique n° 31).

Dates	Réserves en mm	Diminution des réserves + pluies mm	Intervalle (jours)	E.T.R. mm/jour
15.03.74	148,1			
17.03.74	141,9	6,2	1,5	4,1
21.03.74	132,3	9,6	4,1	2,3
27.03.74	129,3	3,0	6,0	0,5
05.04.74	120,3	9,0	8,5	1,1
10.04.74	116,7	3,6	5,4	0,7
21.04.74	102,0	14,7	10,8	1,4
02.05.74	93,9	- 8,1 (+ 12,0)	10,9	1,8
30.11.74	101,7			
14.12.74	101,2	- 0,5	13,8	
21.12.74	105,9			
07.01.75	128,4			
04.02.75	112,4	-16,0 (+15,5)	28,1	1,1
22.02.75	86,7	-25,7	17,5	1,5
02.03.75	118,0		8,3	
11.03.75	104,3	-13,7 (+ 9,5)	9,4	2,5
22.03.75	77,6	-26,7	10,3	2,6
08.04.75	64,5	-13,1	14,3	0,9

TABLEAU n° 42 : Site 5 - Variations des réserves et évapotranspiration réelle dans la tranche 0-200 cm.

11.5 - Site 6 - WADI AL HIRA aval branche ouest (Graphique n° 32)

En estimant nulles les percolations vers le bas, l'évolution du stock d'eau dans la tranche 0-150 peut donner une idée de l'ETR sur ce site. (Tableau n° 43).

La campagne 1973-1974 donne une ETR moyenne de 2,3 mm/j pour les mois de Mars-Avril ; celle de 1974-1975 donne une ETR moyenne de 1,4 mm/j pour les mois de Novembre-Décembre, 0,8 mm/j pour les mois de Janvier-Février et 1,7 mm/j pour les mois de Mars-Avril.

11.6 - Détermination d'une ETR moyenne

L'étude des différents sites de mesure a montré que l'ETR variait selon les sites et selon la période d'observation (Tableau n° 44).

Les différences constatées pour l'ETR sur les différents sites sont liées à la fois à la granulométrie et la texture du profil, et à la végétation plus ou moins développée et à enracinement plus ou moins profond qui croît sur le site. L'influence de ces différents facteurs est difficilement chiffrable.

La campagne 1974-1975 a montré que l'ETR peut varier du simple au double selon la période de l'année. Pendant les mois de Novembre, Décembre, Janvier et Février (mois généralement pluvieux et températures relativement basses) l'ETR moyenne constatée varie de 0,8 à 1,3 mm/j. Pendant les mois de Mars et d'Avril (début de la saison sèche et températures élevées) elle varie de 1,5 à 2,5 mm/j suivant les sites.

Il est bien évident qu'il ne peut y avoir d'évapotranspiration que dans la limite des réserves disponibles dans le sol. Ainsi l'ETR des mois d'été sera quasiment nulle (inférieure à 0,5 mm/j). Il en sera de même pour les mois d'hiver s'il ne pleut pas ou s'il pleut insuffisamment pour maintenir une réserve d'eau dans le sol.

Les valeurs d'ETR données sont des valeurs moyennes applicables à des périodes relativement longues (2 mois). En réalité à partir d'un événement pluvieux l'ETR n'est pas constante.

Une précipitation est rapidement réduite de moitié par évaporation durant les premiers jours. La fraction évaporée les premiers jours correspond à l'eau saturant les premiers centimètres du sol. Le processus d'évaporation est similaire à celui de l'évaporation sur une surface d'eau libre. L'autre partie de la précipitation qui a pu s'infiltrer plus profondément, sera évapotranspirée plus lentement. L'évaporation est alors alimentée par des transferts d'eau de type capillaire et thermique, transferts qui se font de plus en plus difficilement au fur et à mesure que la partie superficielle du sol se dessèche.

Dates	Réserves en mm	Diminution des réserves + pluies mm	Intervalle (jours)	E.T.R. mm/jour
17.03.74	223,0			
21.03.74	205,0	18,0	4	4,5
27.03.74	182,9	22,1	6	3,7
03.04.74	168,4	14,5	7	2,1
10.04.74	157,6	10,8	7	1,5
01.05.74	128,6	29,0 (+11,0)	21	1,9
27.10.74	219,7			
29.10.74	222,4	(- 2,7)	1,5	
03.11.74	211,1	11,3	5,6	2,0
09.11.74	201,9	9,2	5,7	1,6
16.11.74	197,3	4,6	5,8	0,8
23.11.74	185,4	11,9	7,2	1,7
01.12.74	178,8	6,6	7,7	0,9
14.12.74	172,8	6,0 (+16,0)	13,3	1,7
07.01.75	199,4		7	1,0
21.01.75	186,0	13,4 (+13,5)	14,1	1,9
04.02.75	179,9	6,1	13,5	0,5
20.02.75	176,4	3,5	16,0	0,2
11.03.75	189,4			
20.03.75	176,0	13,4	9,1	1,5
08.04.75	128,5	48,5	18,5	2,6
24.04.75	116,5	12,0	16,0	0,8

TABLEAU n° 43 : Site 6 - Variation des réserves et évapotranspiration dans la tranche 0-140 cm pour la période du 17.03 au 01.05.74 ; dans la tranche 0-150 cm pour la période du 27.10 74 au 24.04.75

Ainsi une pluie faible (inférieure à 15 mm) n'a pas le temps de s'infiltrer profondément, elle est rapidement réduite par évaporation, alors qu'une pluie forte aura le temps de s'infiltrer, du moins en partie, et sera protégée plus longtemps de l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration liée aux plantes vivaces (arbres et arbustes) est constante et régulière, les végétaux possèdent un système régulateur d'évapotranspiration (les stomates). Mais l'évapotranspiration peut devenir importante avec le développement d'une végétation saisonnière qui accélère le dessèchement de la tranche superficielle du sol.

Sites	Mars - Avril 74	Nov. - Déc. 74	Janv. - Fév. 75	Mars - Avril 75
4	1,3	1,3	0,8	1,8
3	2,0	1,2	0,9	1,5
5	1,4		1,3	2,5
6	2,3	1,4	0,8	1,7

TABLEAU n° 44 : Valeurs de l'ETR observée sur les différents sites, en mm par jour.

L'évapotranspiration potentielle, ETP calculée à partir de la formule de TURC (cf. Climatologie) est donnée, pour la période intéressée, dans le tableau suivant :

	ETP calculée en mm et en (mm/jour)			
	1er décade	2ème décade	3ème décade	ETP mensuelle
1974 Janvier	18,9 (1,9)	11,4 (1,1)	13,0 (1,2)	44,7 (1,4)
Février	28,9 (2,9)	26,5 (2,7)	20,2 (2,5)	71,9 (2,6)
Mars	28,7 (2,9)	27,9 (2,8)	37,2 (3,4)	95,8 (3,1)
Avril	39,0 (3,9)	46,0 (4,6)	36,5 (3,6)	123,6 (4,1)
Mai	53,5 (5,4)	59,3 (5,9)	62,8 (5,7)	181,3 (5,8)
Juin	60,5 (6,0)	52,1 (5,2)	59,7 (6,0)	176,7 (5,9)
Juillet	62,0 (6,2)	65,0 (6,5)	60,1 (5,5)	187,2 (6,0)
Août	56,0 (5,6)	58,2 (5,8)	54,2 (4,9)	176,8 (5,7)
Septembre	53,6 (5,4)	44,5 (4,4)	42,7 (4,3)	144,5 (4,8)
Octobre	37,9 (3,8)	22,5 (2,3)	31,8 (2,9)	96,4 (3,1)
Novembre	20,8 (2,1)	26,4 (2,6)	23,5 (2,4)	73,1 (2,4)
Décembre	*	*	*	* (1,5)
1975 Janvier	*	*	*	* (1,6)
Février	20,8 (2,1)	23,5 (2,4)	13,9 (1,7)	58,1 (2,1)
Mars	26,5 (2,7)	38,1 (3,8)	37,4 (3,4)	104,6 (3,5)
Avril	46,7 (4,7)	32,7 (3,3)	42,3 (4,2)	(124,7) (4,2)

* L'absence des durées d'ensoleillement pour ces deux mois ne permet pas de calculer l'évapotranspiration potentielle. Les valeurs données pour l'ETP mensuelle sont approximatives.

TABLEAU n° 45 : Evapotranspiration potentielle calculée à partir de la formule de TURC pour la zone du WADI AL HIRA.

Le calcul du rapport $\frac{ETR}{ETP}$ devrait permettre de généraliser les résultats obtenus pour l'évaluation de l'ETR.

Il apparaît que ce rapport n'est pas constant. Il diffère selon la période de l'année considérée et il évolue à partir d'un évènement pluvieux ou d'un apport d'eau ponctuel (crue ou arrosage par exemple).

On a pu établir que le rapport $\frac{ETR}{ETP}$ était de 0.7 pour les mois de Novembre et Décembre et de 0.5 pour les mois de Janvier à Mai. Ceci à condition qu'il reste dans le sol un stock d'eau, permanent ou renouvelé, suffisant pour alimenter l'ETR.

L'évolution du rapport $\frac{ETR}{ETP}$ à partir d'un évènement augmentant brusquement le stock d'eau du sol d'une quantité non négligeable, est donnée dans le tableau suivant :

Semaines	1	2	3	4	5 et plus
$\frac{ETR}{ETP}$	1	0,5	0,4	0,4	0,3

12 - CONCLUSIONS

Les mesures de la teneur en eau ont permis de préciser le devenir des précipitations et des eaux d'épandage du WADI AL HIRA. On a pu, ainsi, mettre en évidence des zones d'infiltration devant permettre la recharge de la nappe. Ces zones sont le lit du wadi, les dépressions fermées constituant la terminaison des épandages, et les zones de ralentissement des eaux de crues se comportant, pendant quelques jours, comme des poches. Les infiltrations dans ces zones atteignent 80 à 90 % des apports.

Les mesures de teneur en eau du sol ont mis en évidence une infiltration dite de macroporosité. En effet, une partie des eaux infiltrées se propage vers le bas plus vite que le front d'humectation. De plus, le déséquilibre existant entre la vitesse d'infiltration des eaux et le temps de réaction de la nappe donne à penser que le processus de transit n'est pas simple. On peut imaginer que le dernier front d'infiltration "pousse" les fronts antérieurs qui atteignent ainsi la nappe et provoquent la remontée du niveau piézométrique.

Les épandages, proprement dits, ne contribuent pas à la recharge de la nappe. Les eaux s'infiltrent peu profondément (2 à 3 m) et sont reprises par l'évapotranspiration. Aussi le taux d'infiltration global est ramené à environ 35 % du volume des apports.

Les précipitations sont entièrement reprises par l'évapotranspiration. Cependant les épandages et les précipitations contribuent à maintenir dans le sol un stock d'eau qui est utilisé par la végétation pendant les 6 mois "humides". Il ne semble pas que les eaux d'irrigation puissent s'infiltrer jusqu'à la nappe.

Dans les zones où il n'existe pas d'infiltration profonde, l'ETR annuelle correspond à la hauteur d'eau apportée par les crues ou les précipitations puisque cette eau est évapotranspirée en totalité. Mais, à partir d'un évènement provoquant une brusque augmentation de la teneur en eau du sol, l'ETR journalière n'est pas constante ; importante les premiers jours, elle diminue par la suite très rapidement. Le rapport ETR/ETP passe de 1, la première semaine, à 0,3 dès la 5ème semaine.

VII - OBSERVATION DES VARIATIONS DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

- 1 - But de l'étude
- 2 - Généralités
- 3 - Présentation des différents points d'observation
- 4 - Variations interannuelles de la piézométrie
- 5 - Variations saisonnières de la piézométrie
- 6 - Variations piézométriques selon l'aquifère observé
- 7 - Les marées de nappes
- 8 - Conclusion

VII - OBSERVATION DES VARIATIONS DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

1 - BUT DE L'ETUDE

L'étude des variations de la piézométrie devrait permettre :

- de connaître l'évolution générale d'une nappe dans une région donnée afin de savoir si le niveau piézométrique est stable, en baisse ou en remontée ;
- de connaître les variations saisonnières de la nappe, afin de pouvoir conclure à une éventuelle recharge, due à la pluie ou aux crues, ou à une remontée liée à la diminution ou l'arrêt des pompages dans la zone d'observation ;
- d'évaluer la recharge de la nappe, si la recharge existe.

2 - GENERALITES

Lors de l'étude d'une nappe aquifère deux méthodes peuvent être envisagées. L'une consiste à poser des questions précises, habituellement à l'aide d'essais de pompage, l'autre à observer le comportement naturel de la nappe sous l'effet des phénomènes variés qu'elle subit. Dans le premier cas on provoque un phénomène dont on observe les conséquences, dans le deuxième cas on observe les conséquences de phénomènes multiples et variés qui ne sont pas toujours faciles à isoler. L'observation du comportement naturel des nappes, contrairement aux essais de pompage est essentiellement qualitative. Malgré tout elle offre un intérêt certain pour les prévisions de l'évolution des variations piézométriques, les conséquences de pompage et les effets d'une recharge éventuelle.

Les phénomènes pouvant provoquer des variations du niveau piézométrique peuvent être d'ordre très variés : géologiques, géomorphologiques, climatiques, anthropiques, météorologiques, hydrologiques, mécaniques... (DEGALLIER, 1968), par exemple :

- les régressions, transgressions et mouvements eustatiques des océans,
- l'augmentation d'aridité,
- les captures de cours d'eau,
- les modifications du sol et de son couvert tels que le défrichement ou des travaux de conservation des sols,
- les séries d'années exceptionnellement sèches ou pluvieuses,

- les crues des cours d'eau,
- les saisons des pluies,
- les averses groupées ou isolées,
- les marées marines ou terrestres,
- les variations de pression barométriques,
- l'évapotranspiration,
- les ondes sismiques,
- et surtout, l'exploitation des nappes et leur écoulement naturel.

Lorsqu'on dispose d'un nombre suffisant de mesures, il est intéressant de tracer des graphiques de variation en fonction du temps. Plusieurs types de courbes peuvent se présenter :

- courbes descendantes qui traduisent un tarissement avec une recharge nulle ou au moins inférieure à l'écoulement ou au volume extrait ;
- courbes montantes qui indiquent une recharge devenue prédominante ;
- courbes fluctuantes qui correspondent à un phénomène lui-même fluctuant ou à la succession de phénomènes ayant un effet contraire.

Pour mener à bien cette étude on dispose d'un réseau de puits répartis dans la JEFFARA centrale, de BIR AL GHANAM à l'est à SUQ AL KHAMISH à l'ouest (carte n° 1A).

3 - PRESENTATION DES DIFFERENTS POINTS D'OBSERVATION

3.1 - Nature des points d'observation

Les points d'observation de la piézométrie sont de deux types : ce sont, soit des puits excavés, soit des puits forés.

Les puits excavés ne captent que l'aquifère superficiel. Selon les puits, l'aquifère pourra être quaternaire (dépôts éoliens ou alluvions de wadi), tertiaire, ou triasique (ABU SHAYBAH ou AZIZIYAH). Bien que creusés sans l'aide de machines, ces puits peuvent être très profonds (jusqu'à 80 m dans la zone étudiée) ; la profondeur moyenne étant 30 m. Il est évident que ces puits ne descendent pas profondément dans la nappe (1 à 2 m), aussi, lors du puisage, le niveau d'eau baisse rapidement et ne revient au niveau initial que très lentement. Il convient donc d'aborder avec prudence les mesures de piézométrie de ces puits.

Les puits forés peuvent être exécutés soit par battage soit par "rotary". Les puits forés par battage sont généralement les puits utilisés par les paysans pour les cultures irriguées. Ils captent le premier aquifère rencontré. Les puits forés par la méthode "rotary" sont des sondages de reconnaissance ou des piézomètres. L'aquifère capté varie selon les puits. Tous les forages et piézomètres exécutés pour le GEFLI, dans la zone étudiée, sont de ce type.

Dans la présente étude, le terme "puits" est employé dans un sens très large. Il englobe tous les ouvrages permettant de mesurer le niveau statique d'une nappe, qu'il s'agisse de puits excavés ou de puits forés (forages d'exploitation, de reconnaissance ou piézomètres).

3.2 - Code des numéros d'inventaire des puits

Le document de base étant la carte topographique au 1/50000, la numérotation des puits a été établie en fonction de ces cartes : ainsi le numéro d'un puits sera constitué par le numéro de la carte (par exemple, 1989-4) suivi du numéro du puits sur cette carte (par exemple : 26), ce qui donne pour le numéro complet : 1989-4/26.

Lorsque le puits a une appellation courante, elle suivra en général le numéro du puits. Cette appellation pourra être le nom arabe du puits (BIR AJAJ par exemple) ou une autre numérotation couramment usitée (RDH10, PZH6, PWH9 ou GWA19). Certains puits n'ont pas de numéro d'inventaire, ils seront dénommés par le numéro de la carte suivie de l'appellation courante.

3.3 - Durée d'observation

Il a été retenu 76 puits permettant de tracer un graphique de variation de la piézométrie en fonction du temps. Ces puits sont localisés sur la carte n° I. La durée d'observation des puits est variable. On peut distinguer 2 catégories de puits selon le nombre d'années d'observation.

- Les puits observés depuis un grand nombre d'années (au moins depuis 1967).

Ce sont des puits du réseau du G.W.A. (General Water Authority) équipés de piézographes. Sept puits entrent dans cette catégorie. On peut en ajouter un huitième qui, bien que n'ayant été observé qu'épisodiquement, peut donner une idée de l'évolution de la piézométrie (il s'agit du puits D1-K5 de la carte 1890.2).

- Carte 1889.4 : puits 1889.4/109 ou GWA 19, observé de 1959 à 1975, puits 1889.4/22 ou GWA 83, observé de 1959 à 1975 ;
- Carte 1889.1 : puits GWA 25, observé de 1963 à 1975 ;
- Carte 1989.4 : puits 1989.4/90 ou GWA 8, observé de 1955 à 1975, puits 1989.4/26 ou GWA 7, observé de 1959 à 1975 ;
- Carte 1990.3 : puits GWA 6, observé de 1956 à 1975 ;
- Carte 1890.2 : puits GWA 24, observé de 1963 à 1975, puits D1-K5, observé en 1967, en 1972 et de 1973 à 1975.

- Les puits observés depuis 1971 au plus

On peut les subdiviser en 3 groupes :

. les puits observés en 1971 et 1972 par le GEFLI lors de son étude de la "Western Zone" et qui ont été observés à nouveau par le GEFLI en (1973) - 1974 - 1975 ;

. les puits observés par le GEFLI pendant la période 1973-1975 et pour lesquels on possède une mesure en 1972 ou 1971 ; cette mesure permettant d'apprécier l'évolution générale de la piézométrie ;

. les puits observés par le GEFLI pendant la période 1973-1975. Ce sont les plus nombreux.

La première catégorie de puits permettra de mettre en évidence l'évolution générale de la piézométrie pendant les deux dernières décennies ; la deuxième catégorie montrera l'évolution saisonnière du niveau statique de la nappe et, pour les puits observés depuis 1971, elle donnera une idée des variations interannuelles de la nappe pour la période 1971-1975.

Dans un but d'homogénéité et pour faciliter les comparaisons entre puits, il a été retenu deux échelles de temps pour les représentations graphiques en fonction de la durée d'observation. L'échelle de la cote piézométrique est variable pour les puits de la première catégorie, elle est la même pour tous les puits de la deuxième catégorie.

Tous les puits observés ne font pas l'objet d'un graphique des variations piézométriques, soit par manque de mesures, soit parce qu'un seul puits a été choisi pour représenter les variations piézométriques d'une zone déterminée (les autres puits montrant les mêmes variations piézométriques).

Pour la plupart des graphiques, on a essayé de faire apparaître les précipitations et les crues pouvant influencer les puits. Les valeurs données sont à prendre à titre indicatif, elles ne sont pas rigoureuses. Pour les précipitations, il a été pris les valeurs relevées au pluviomètre le plus proche de la zone considérée ; quant aux volumes des crues, ils correspondent aux volumes mesurés à la station de jaugeage du wadi risquant d'influencer le ou les puits observés.

Les pluviomètres, pluviographes et limnigraphes sont localisés sur la carte n° 1A.

4 - VARIATIONS INTERANNUELLES DE LA PIEZOMETRIE

4.1 - Interprétation des graphes

4.1.1 - Evolution générale du niveau piézométrique

. Région de BIN GHASHIR ; carte 1990.3 puits GWA 6. Ce puits est équipé d'un piézographe et le niveau piézométrique est suivi depuis 1955 avec toutefois une interruption de 1969 à 1972 (Graphique n° 33A). L'aquifère capté est tertiaire.

De 1955 à 1965 la baisse est linéaire. Ce niveau baisse de 6 m en 10 ans soit une baisse de 0,6 m/an. De 1965 à 1975 la baisse s'accélère de plus en plus à tel point qu'elle atteint 5 m/an pour la période 1973-1974.

. Région de AL AZIZIYAH et de SUQ AL KHAMISH. On possède 4 points d'observation dans cette zone (Graphique n° 34A) :

- . carte 1890.2 : puits GWA 24 et D1-K5 (captant le tertiaire) ;
- . carte 1989.4 : puits 90 et puits 26 (captant la formation AL AZIZIYAH).

La baisse de niveau statique peut être considérée comme linéaire jusqu'en 1966. Elle s'accélère ensuite rapidement. De 0,12 m/an elle passe à 1,20 m/an pour les puits 1989.4/90 et 1989.4/26. Comme dans le cas de BIN GHASHIR la vitesse de baisse a décuplé en 10 ans.

Pour les autres puits, la baisse était moins rapide jusqu'en 1969 (0,10 m/an pour le puits GWA 24) mais depuis 1969 la vitesse de baisse croît et tend à prendre la même valeur pour tous les puits de cette région (1 à 1,2 m/an).

. Région de BIR AL GHANAM (Graphique n° 36A). Il s'agit des puits 1889.4/109 et 1889.4/22 et GWA 25 (carte 1889.1). Pour ces trois puits, la vitesse de baisse du niveau piézométrique est linéaire. Elle est beaucoup plus faible que dans les deux zones précédentes. Ceci est dû à l'absence, ou la faible importance des pompages.

puits 1889.4/22 : 8 cm/an
 puits 1889.4/109 : 20 cm/an
 puits 1890.2, GWA 25 : 13 cm/an

Ces puits captent les formations plio-quadernaires.

4.1.2 - Recharge et pompages

Les graphes des variations piézométriques des puits de la région de AL AZIZIYAH et de SUQ AL KHAMISH présentent en 1964 une brusque discontinuité. Cette discontinuité correspond à la crue exceptionnelle de 1964 (Graphiques n° 34A et 36A).

On peut noter, pour les puits 1989.4/90 et 1989.4/26, d'autres discontinuités de moindre importance, correspondant à des remontées du niveau statique après les crues.

Puits	Date	Remontée du N.S. en cm
1989.4/90	1956-57	10
	1960-61	5
	1961-62	20
	1962-63	5
	1963-64	30
	1965-66	20
1989-4/26	1960-61	35
	1961-62	40
	1963-64	120
	1964-65	25
1890.2/GWA 25	1963-64	35

Indiscutablement il s'agit là d'une recharge de la nappe, liée aux crues. Le puits GWA 6 de la carte 1990.3 situé au Nord des zones d'épandage, à BIN GHASHIR, ne montre pas de recharge bien que la pluviosité soit identique sinon supérieure à celle relevée dans la zone des puits précédents (Graphique n° 33A).

La recharge entraîne un relèvement du niveau statique mais elle ne modifie pas la vitesse de baisse de la nappe, qui s'accroît rapidement dès 1966.

Dans la région de BIR AL GHANAM, on note aussi l'effet de la crue de 1964 sur les puits 1890.2/GWA 25 et 1889.4/109. La recharge a été de 35 cm pour le premier (la remontée de la nappe s'est étalée sur 2 ans) elle a été de 20 cm pour le deuxième (la remontée s'est aussi étalée sur 2 ans, elle a été soutenue par l'apport des crues de 1965-1966 jusqu'à la fin 1967). La lenteur de la remontée est due, d'une part à l'importance de la crue, d'autre part à la mauvaise transmissivité de l'aquifère (graphique n° 36A).

L'accentuation rapide de la baisse du niveau piézométrique dans les régions de BIN GHASHIR et de AL AZIZIYAH est liée à l'accroissement des pompages, correspondant au développement des cultures irriguées, et à la détérioration des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère en profondeur. Ceci explique les rabattements de plus en plus importants observés dans ces zones. La baisse du niveau piézométrique entraîne fatalement une diminution de la transmissivité ($T = K.e$ où e est l'épaisseur de la nappe, T la transmissivité et K la perméabilité ; si e décroît, T décroît). De plus, la perméabilité est plus faible dans la partie inférieure de l'aquifère que dans la partie supérieure, qu'il s'agisse du mio-plio-quadernaire de BIN GHASHIR ou de la formation AL AZIZIYAH à AL AZIZIYAH.

L'effet des pompages sur la nappe est très nettement visible sur le graphe des variations piézométriques du puits GWA 6 (carte 1990.3) (Graphique n° 33A) où l'amplitude des oscillations est de plus en plus forte au fur et à mesure que baisse le niveau piézométrique.

De ces observations, il ressort que les précipitations sont sans influence directe sur le niveau piézométrique. Elles interviennent, indirectement, par l'arrêt des pompages en hiver et par les crues qu'elles provoquent.

Pour que la recharge de la nappe soit sensible et durable, il faut une crue importante, au moins 4.10^6 m^3 pour la région du WADI AL HIRA. La fréquence de non dépassement d'une telle crue est 0,55. La recharge n'est donc pas un événement exceptionnel puisqu'un an sur deux, il y a une crue qui provoque une recharge de la nappe.

Actuellement dans les régions où l'exploitation de la nappe est intense, il est peu probable qu'une recharge puisse être mise en évidence. L'amplitude des mouvements saisonniers de la nappe, créés par les pompages atteint plusieurs mètres à BIN GHASHIR, 40 à 50 cm dans la région de AL AZIZIYAH, il est donc peu probable qu'une recharge puisse être mise en évidence.

4.2 - Cartes des baisses de la nappe (Cartes n° 54A et 55A)

Deux cartes des baisses du niveau piézométrique ont été tracées. La première (carte n° 54A) représente la baisse du niveau piézométrique établie pour les trois dernières années, donc, seuls les puits pour lesquels on possède des mesures remontant au moins à 1972 ont été pris en considération. La seconde carte (carte n° 55A) représente la baisse établie de Juillet 1974 à Juillet 1975.

La première carte risque d'être optimiste dans les régions de forte baisse car, la baisse s'accroissant d'année en année, la moyenne établie sur trois ans ne représentera pas la baisse annuelle réelle. Par contre, la seconde carte risque de masquer une baisse générale de la nappe qui peut être compensée, pour l'année 1974-1975, par une recharge saisonnière, ou au contraire d'accroître la baisse saisonnière par rapport à une baisse générale plus lente.

Ces réserves montrent que les deux documents sont complémentaires, le premier généralisant le phénomène de baisse, le second actualisant le phénomène à l'année 1974-1975.

Les deux cartes mettent en évidence des zones où la baisse de la nappe est très rapide et d'autres zones où la baisse est nulle ou très faible. Les zones de forte baisse du niveau piézométrique correspondent aux régions de pompages intenses, à savoir les agglomérations et les zones de cultures irriguées :

BIN GHASHIR	: 5 m/an
AL AZIZIYAH et SUQ AL KHAMISH	: 1,50 à 2 m/an
BIR AL GHANAM	: 0,70 m/an
ferme d'Etat de BIR AL GHANAM	: 0,20 m/an

Les zones où la baisse est nulle ou très faible sont les zones hors de l'influence des pompages, c'est à dire des zones éloignées des lieux de pompages, des zones à transmissivité très faible (10^{-5} à 10^{-3} m²/s) ou des zones où l'aquifère observé est différent de l'aquifère influencé par les pompages.

Le premier cas correspond au sud de la région étudiée, c'est-à-dire aux zones d'épandage du WADI ABU SHAYBAH, du WADI ZAQQUT et du WADI ZARAT, le deuxième cas est représenté par la zone des collines située au Sud et au Sud-Ouest de AL AZIZIYAH où les transmissivités mesurées sont de l'ordre de 10^{-5} m²/s, le troisième cas est illustré par la zone à baisse nulle à l'Ouest de AL AZIZIYAH. Dans cette zone en effet, les seuls points d'observation sont des puits excavés, et l'aquifère capté est isolé de l'aquifère influencé par les pompages de AL AZIZIYAH par le niveau des "argiles vertes" du MIOCENE.

5 - VARIATIONS SAISONNIERES DE LA PIEZOMETRIE

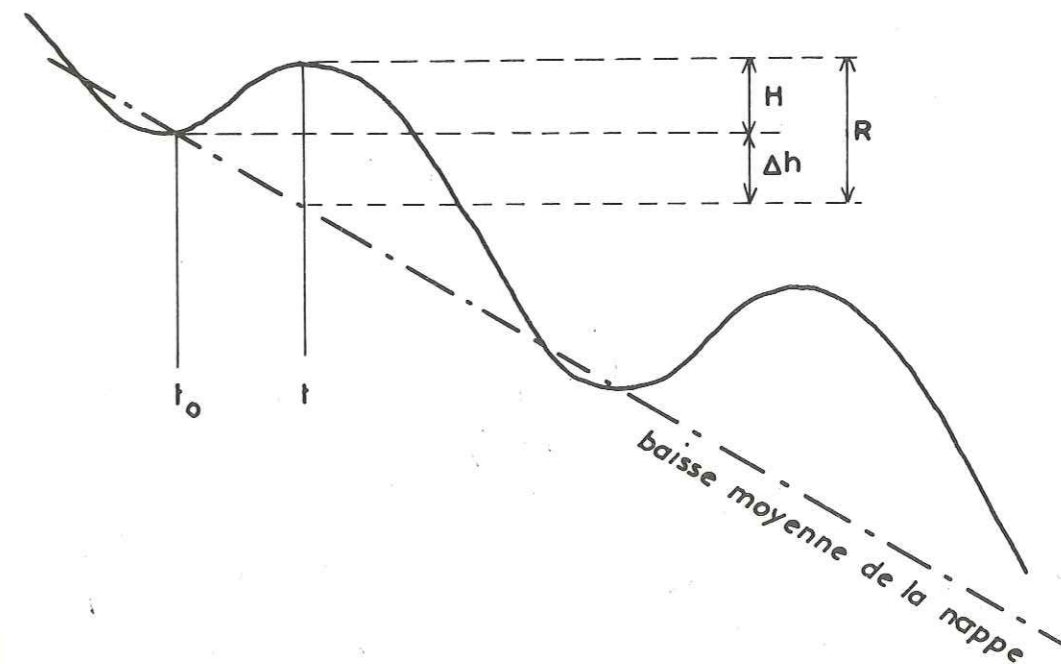
5.1 - Carte des remontées de nappe (Carte n° 56A)

La carte des remontées a été tracée à partir des observations faites sur les puits durant la période 1974-1975.

La remontée de la nappe correspond à la différence entre le point bas (observé généralement en Septembre) et le point haut du niveau piézométrique (observé généralement en Février-Mars), augmentée de la baisse moyenne de la nappe qui se serait produite, durant le temps écoulé entre le point bas et le point haut, s'il n'y avait pas eu de remontée.

$$R = H + \Delta h$$

- avec :
- R : remontée réelle
 - H : remontée observée de t_0 à t
 - Δh : baisse moyenne de t_0 à t



Il importe de ne pas confondre remontée avec recharge de la nappe et remontée nulle avec niveau statique stable. En effet, l'arrêt des pompages peut provoquer une remontée de niveau piézométrique sans qu'il y ait une recharge de la nappe, et une remontée nulle peut correspondre à une nappe en baisse.

De plus, la remontée de la nappe, pour l'année considérée, n'est pas un phénomène durable, c'est un phénomène saisonnier qui correspond à une oscillation d'amplitude plus ou moins forte, selon l'importance des apports d'eau et l'emplacement du puits.

L'examen de la carte des remontées permet de définir plusieurs zones dans la région étudiée :

- . AL AZIZIYAH et ses environs ;
- . Amont de la zone d'épandage du WADI AL HIRA ;
- . Les zones d'épandage des wadis ABU SHAYBAH, ZAQQUT, ZARAT ;
- . BIR AL GHANAM et la route de AZ ZAWIYAH ;
- . La région s'étendant au Sud de JORDANI jusqu'à la route AL AZIZIYAH - BIR AL GHANAM ;
- . Le lit des wadis dans le Jebel ou à leur sortie du Jebel.

5.2 - Interprétation des graphes des variations de la piézométrie

5.2.1 - AL AZIZIYAH et ses environs (Graphiques n° 35A, 37A, 49A, 40A)

La nappe captée est généralement celle de la formation AL AZIZIYAH qui, dans cette région, est une nappe à surface libre. Le niveau piézométrique dans cette région présente pour l'année 1974-1975 une évolution commune à tous les puits observés. A savoir :

- . de Mai à Septembre une baisse continue de la nappe ;
- . de Septembre à Novembre une stabilisation du niveau statique ;
- . de Novembre à Mars une remontée du niveau statique ;
- . à partir de Mars, de nouveau, une baisse de la nappe.

La remontée hivernale (variable selon les puits) ne compense pas la baisse estivale de la nappe. Certains puits (D5 - H4 et AW 1 par exemple) ne présentent pas de remontée, la baisse de la nappe est seulement ralentie (Graphique n° 38A).

Le graphique n° 35A représente les variations piézométriques observées sur le piézographe 1989-4/26 pour l'année 1974-1975. Il permet de situer les puits de AL AZIZIYAH dans l'évolution générale de la piézométrie représentée sur le graphique n° 34A.

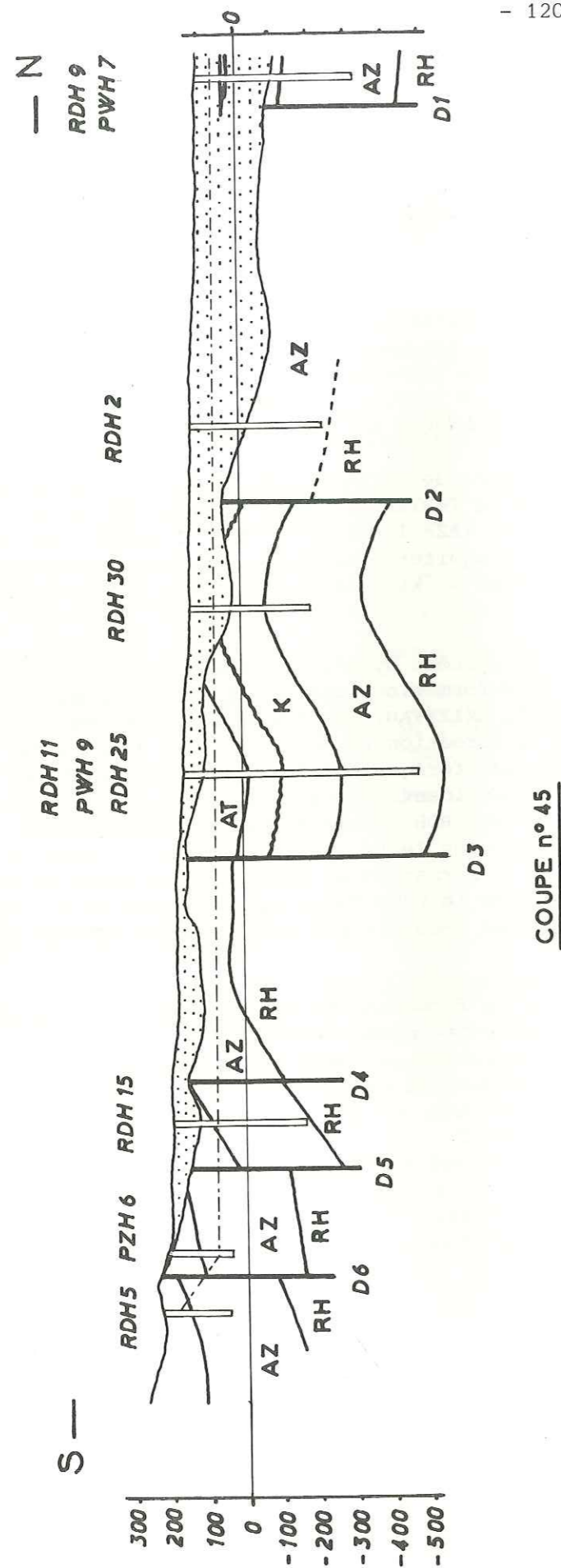
La remontée dans cette zone n'a rien à voir avec une recharge de la nappe par les crues ou les précipitations. La remontée est simplement due à l'arrêt ou au ralentissement des pompages. Les puits où la nappe remonte le plus sont situés au coeur du cône de rabattement (RDH 1) ; les puits éloignés remontent peu ou pas du tout : RDH 2, PZH 5 à l'Est de AL AZIZIYAH, AZ DW2, D5, AW 1, D 4 à l'Ouest. (Graphiques n° 37A, 38A, 40A).

La comparaison des graphiques de variation du niveau piézométrique des puits captant le QUATERNAIRE et le TERTIAIRE (D1, D2, D3, D4) et de ceux captant la formation AL AZIZIYAH (AZP 1, AZ DW 3, RDH 1) montre que ces formations forment un seul et unique aquifère (Graphique n° 38A), contrairement à ce que l'on observe une dizaine de kilomètres à l'Ouest de AL AZIZIYAH (cf. fin du paragraphe 4.2).

Au Sud-Est de la zone, le système hydrogéologique est plus complexe. On rencontre en effet deux formations crétacées, AIN TOBI et KIKLAH, au-dessus de la formation AL AZIZIYAH. Ces formations sont aquifères et relativement indépendantes de la formation AL AZIZIYAH. Les graphiques des variations piézométriques dans les forages RDH 11 et RDH 25 (Graphique n° 39A) font apparaître des variations identiques à celles observées dans la région de AL AZIZIYAH pour le forage RDH 25 alors que le forage RDH 11 indique une baisse estivale beaucoup plus lente. Le forage RDH 11 capte la formation KIKLAH, le forage RDH 25 la formation AL AZIZIYAH. La nappe de la formation KIKLAH ne réagit donc pas de la même façon que la nappe de la formation AL AZIZIYAH. Cependant elles ne semblent pas complètement isolées l'une de l'autre.

La coupe n° 45 montre que la formation AL AZIZIYAH dans le compartiment affaissé est en relation avec cette même formation au nord de la faille D2. Les pompages de la région d'AL AZIZIYAH se répercutent dans la formation AL AZIZIYAH du compartiment affaissé dont la transmissivité est supérieure à la transmissivité de la formation KIKLAH, ce qui explique la baisse plus importante dans la formation AL AZIZIYAH.

Au Nord-Est de AL AZIZIYAH les forages PWH 7 et RDH 9 (Graphique n° 37A) montrent que l'aquifère "tertiaire-ABU SHAYBAH" (RDH 9) est indépendant de l'aquifère AL AZIZIYAH (PWH 7). Le premier (RDH 9) accuse une baisse plus importante que le second (PWH 7) qui indique une baisse estivale comparable à celle des puits de la formation AL AZIZIYAH (Graphique n° 37A).



L'examen détaillé d'un graphique de variation du niveau piézométrique dans un puits de la région de AL AZIZIYAH, forage RDH 1 par exemple (Graphique n° 37A) permet de mettre en évidence l'étroite liaison existant entre l'évolution du niveau piézométrique et la pluviométrie. La pluviométrie, dans ce cas n'intervient que par son incidence sur les cultures, et par là, sur l'intensité des pompages. Chaque épisode pluvieux entraîne un arrêt ou un ralentissement des pompages qui provoque une remontée du niveau piézométrique. Une période sèche détermine la reprise des pompages donc une baisse du niveau piézométrique.

En définitive, dans cette zone s'il y a une recharge réelle due aux crues, elle est masquée par la remontée de la nappe due à la diminution des pompages pendant la période hivernale. La recharge doit cependant exister car au Sud-Ouest et à l'Est de AL AZIZIYAH fonctionnent des poches d'infiltration. L'infiltration a été mise en évidence par la campagne de mesures de la teneur en eau du sol. De plus, le puits 1889.1/25 a montré une remontée de la nappe de plus de 50 cm entre le 30 Octobre et le 18 Novembre 1974 (Graphique n° 47A)

Au Sud-Ouest de AL AZIZIYAH, à la limite de la zone, le puits 1889-1/11 (Graphique n° 47A) montre une remontée du niveau statique indépendante des pompages. La remontée est due à l'infiltration des précipitations dans un impluvium de collines. La nappe intéressée correspond à la couverture quaternaire et à l'aquifère inférieur de la formation AL AZIZIYAH qui affleure à la faveur d'un bombement. Cette nappe se raccorde à la nappe de l'aquifère moyen de la même formation.

5.2.2 - Wadi AL HIRA - Zone d'épandage, piémont et Jebel

Dans cette zone les pompages sont peu intenses et les points d'observation suffisamment éloignés de la zone de AL AZIZIYAH pour que l'on puisse tenir pour négligeable l'interférence des pompages dans les variations saisonnières (mais non dans la baisse générale de la nappe). L'aquifère capté dans la zone d'épandage présente les mêmes caractéristiques que dans la région de AL AZIZIYAH.

On constate que les remontées maximales sont axées sur les abords du lit du WADI AL HIRA.

. Le forage 1989.4/65 ou PWH 5 se trouve à proximité du barrage dit des "Italiens", petite retenue maçonnée qui stocke quelques centaines de mètres cube d'eau lors des crues. Il accuse une remontée de 60 cm.

. Le piézomètre 1989.4/57 ou PZH 3 est situé dans une zone de débordement du WADI AL HIRA à la sortie des méandres amonts. Le niveau statique remonte de 50 cm (Graphique n° 41A).

Plus à l'écart du WADI AL HIRA, la remontée du niveau statique est moins importante. Elle est comprise entre 10 et 30 cm. On l'observe sur les puits 1989.4/55 ou PZH 1, 1989.4/56 ou PZH 2, 1989.4/46 et 1989.4/39 (Graphiques n° 41A et 42A).

La remontée du niveau statique ne s'étend que très peu vers l'Est du WADI AL HIRA : le puits 1989.4/36 situé à 1 km à l'Est du puits 1989.4/39 n'indique pas de remontée.

Vers l'Ouest, la remontée s'étend beaucoup plus loin. Elle se fait sentir dans le piézomètre 1989.4/55 ou PZH 1 et le forage 1989.4/14 (Graphique n° 41A) qui sont les points les plus à l'Ouest de la zone. La remontée est d'environ 20 cm.

La remontée du niveau statique dans la plaine du WADI AL HIRA s'étale, en général, sur 6 mois (de Novembre à Avril), cette remontée débute 20 à 30 jours après la crue.

A l'amont de la plaine du WADI AL HIRA plusieurs puits permettent d'observer les réactions des nappes, au niveau du lit du wadi, après le passage des crues, soit au pied du Jebel soit dans le Jebel même.

Ces observations doivent permettre de montrer s'il existe ou non une infiltration à partir du wadi provoquant une recharge des nappes, la construction d'un barrage sur le WADI GHAN risquant de perturber l'alimentation naturelle des nappes.

Au niveau de la future retenue du WADI GHAN, on dispose de plusieurs piézomètres situés plus ou moins loin du wadi et captant des aquifères plus ou moins profonds. Les variations du niveau statique observées sur ces piézomètres ont été reportées sur le graphique n° 43A. L'analyse de ces variations a été condensée dans le tableau suivant :

Crue	Piézomètre	Remontée	Temps de réaction	Formation captée
Mars 1974 6,2 Mm ³	D4	16 cm	10 jours	ABU SHAYBAH
	G4	14 cm	10 jours	ABU SHAYBAH
	G3	7 cm	20 jours	ABU SHAYBAH
	R2 PZ1	5 cm	20 jours	ABU SHAYBAH profond
	R2 PZ2	0	-	AL AZIZIYAH
Octobre 1974 10,5 Mm ³	PZ7	20 cm	-	AIN TOBI
	D4	36 cm	-	ABU SHAYBAH
	G4	50 cm	-	ABU SHAYBAH
	G3	19 cm	-	ABU SHAYBAH
	R2 PZ1	20 cm	10 jours	ABU SHAYBAH profond
	R2 PZ2	12 cm	40 jours	AL AZIZIYAH

Ces observations montrent que :

. la remontée dans les piézomètres G4 et D4, situés près du wadi est plus importante et plus rapide que dans le piézomètre G3, plus éloigné du wadi ;

. les crues provoquent une recharge non seulement des nappes superficielles mais aussi, de façon indirecte (peut-être par des phénomènes de drainance), des nappes plus profondes, puisque les piézomètres R2 PZ1 et R2 PZ2 sont influencés ;

. seules les crues longues et importantes sont efficaces. Les crues inférieures à 3 Mm³ ne provoquent pas de remontée décelable du niveau statique.

A l'aval de la retenue, au débouché du Wadi GHAN dans la plaine, les piézomètres 1989.4/71 et 89 (ou PZH 6 et PZH 6 A) et le forage RDH 5 1989.4/68 indiquent une remontée du niveau statique non négligeable pour la crue d'Octobre 1974 (Graphique n° 44A). Les piézomètres PZH 6 et PZH 6 A sont implantés à quelques mètres du WADI AL HIRA. Le premier capte la formation AL AZIZIYAH et indique une remontée du niveau statique de 30 cm. Le second capte la formation AL AZIZIYAH supérieure, la remontée est de 40 cm. Le forage RDH 5 capte la même formation que le piézomètre PZH 6 A, la remontée est de 80 cm, bien que ce puits soit plus éloigné du wadi.

La recharge des nappes par les crues ne fait donc aucun doute. Le volume de la recharge moyenne annuelle est évalué dans le paragraphe suivant :

- Estimation de la recharge

L'aire d'influence de la recharge due au WADI AL HIRA est estimée à 300 km². Soit A cette surface. La remontée moyenne de la nappe, due à la recharge, dans cette aire, peut être estimée à 15 cm. Soit h cette remontée. Les transmissivités calculées d'après les essais de pompage ont des valeurs comprises entre 10⁻² et 10⁻¹, ce qui peut correspondre dans les calcaires karstiques de la formation AL AZIZIYAH à des coefficients d'emmagasinement compris entre 5 et 10 %.

La crue du 20 octobre 1974 a été jaugée au site du barrage du Wadi GHAN ; son volume est de 10.5.10⁶ m³. La valeur de 12.10⁶ m³ sera prise pour tenir compte des affluents du Wadi AL HIRA après la station de jaugeage et des petits wadis de piémont s'épendant dans la plaine.

Soit ΔV le volume infiltré :

- avec S = 10 %

$$\Delta V = h \cdot S \cdot A = 0.15 \times 0.1 \times 300 \cdot 10^6 = 4.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

- avec S = 5 %

$$\Delta V = h \cdot S \cdot A = 0.15 \times 0.05 \times 300 \cdot 10^6 = 2.25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

On en déduit le taux d'infiltration :

$$I = \frac{\Delta V}{12 \cdot 10^6} = 0.37 \text{ soit } 37 \% \text{ ou } 0.19 \text{ soit } 19 \%$$

$$\underline{19 \% < I < 37 \%}$$

Ceci est évidemment une approximation grossière, les paramètres A et h étant le résultat d'une estimation très aléatoire. La valeur 37 % peut paraître forte mais il faut remarquer qu'il n'existe pas d'exutoire aux zones d'épandages toute l'eau ruisselée dans la plaine est, soit infiltrée, soit évapotranspirée.

Cette méthode donne une infiltration moyenne pour une crue donnée. Il n'est pas possible de détailler le taux d'infiltration pour chaque zone d'infiltration. De même la mesure de la teneur en eau du sol n'a pas permis l'évaluation du taux d'infiltration dans ces zones sauf pour les poches aval (AWLAD TANTUSH et BIR ALLAQ).

Une autre approche du taux d'infiltration, procédant à partir d'observations faites pendant les crues sur les différentes zones d'infiltration, aboutit à une valeur de 37 % des volumes annuels ruisselés. En prenant I = 35 % on devrait avoir une bonne estimation du taux d'infiltration.

La carte de la baisse du niveau piézométrique de Juillet 1974 à Juillet 1975 (carte n° 54A) permet d'évaluer la diminution du stock d'eau de l'aquifère dans la zone influencée par les infiltrations du WADI AL HIRA. (Cette diminution est due tant aux pompages sur la zone même qu'à l'écoulement de la nappe vers l'aval). La superficie de cette zone est estimée à 300 km². Par planimétrie, on détermine des surfaces d'égale baisse. En leur appliquant un coefficient d'emmagasinement moyen de 0,1 on obtient une diminution du stock d'eau de 25 Mm³.

L'apport moyen annuel, calculé à partir des crues reconstituées pour les trente dernières années, est d'environ 12 Mm³ ce qui correspond à environ 3 ou 4 Mm³ d'eau infiltrée, soit 1/8 à 1/6 de la diminution actuelle du stock. Seul un événement exceptionnel du type de celui de 1963-1964 pourrait compenser une telle diminution.

Il apparaît donc qu'on ne peut compter sur une infiltration naturelle, même exceptionnelle, pour compenser la diminution du stock d'eau de l'aquifère.

5.2.3 - Wadi ABU SHAYBAH, WADI ZAQQUT et WADI ZARAT

Jebel et zone d'épandage

Ces wadis peuvent alimenter une nappe dans les alluvions de leur lit dans le Jebel s'il existe un niveau imperméable sous ces alluvions. Le niveau imperméable est constitué par les argiles de la formation ABU SHAYBAH. Les nappes se déversent dans la nappe de formation AL AZIZIYAH, à la limite nord, d'extension de la formation ABU SHAYBAH.

Les forages PWH 8 ou 1889.1/30 et RDH 21 ou 1889.1/27 implantés près du WADI ZAQQUT ne montrent pas de variations significatives du niveau statique.

Le forage RDH 8 A ou 1989.3/26 indique que les alluvions du WADI ABU SHAYBAH sont sèches. Le forage RDH 8 est en effet implanté dans une zone où la formation ABU SHAYBAH est absente (voir la carte de localisation des puits : carte n° 1A).

Plus à l'Ouest, la limite d'extension de la formation ABU SHAYBAH prend une direction générale Nord-Sud. Le WADI ZARAT ne dépasse cette limite que loin dans sa zone d'épandage ; ceci explique la nappe que l'on trouve dans les alluvions quaternaires du wadi.

La recharge de cette nappe est mise en évidence par l'observation des variations piézométriques sur le forage RDH 22 et le piézomètre PZH 7 ou 1889.2/28 et 29. Le premier capte la formation ABU SHAYBAH ; il réagit tardivement à la crue d'Octobre 1974 (2 mois après) et indique une remontée de 27 cm (Graphique n° 45A).

Plus à l'aval le puits 1889.2/20 situé à proximité du wadi indique une remontée de 250 cm lors de la crue d'Octobre 1974 (Graphique n° 46A). Par contre le puits 1889.2/16 plus éloigné du wadi indique une remontée de 4 cm seulement (Graphique n° 45A).

Dans la zone d'épandage des wadis, du piémont à la route AL AZIZIYAH - BIR AL GHANAM, la recharge de la nappe est peu sensible. On observe une remontée de quelques centimètres 3 à 4 mois après la crue d'Octobre 1974, cela peut correspondre à une légère recharge qui est d'autant moins marquée que la transmissivité du terrain est bonne (de l'ordre de $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$).

- Graphique n° 47A : 1889.1/33, 34, 35 et 37.
- Graphique n° 48A : 1889.1/31 et 41.
- Graphique n° 49A : 1889.1/4, 6 et 9.
- Graphique n° 50 : 1889.1/5.

Le puits 1889.1/4 (Graphique n° 49A), situé juste en-deçà de la limite d'extension de la formation ABU SHAYBAH, semble indiquer une remontée de 40 cm environ, mais cette remontée correspond plus à l'arrêt du puisage de l'eau pour l'abreuvement des troupeaux, qu'à une recharge de la nappe.

Le forage 1989.1/30 ou RDH 4 (Graphique n° 48A) indique une remontée de 80 cm du niveau piézométrique. Cette remontée ne correspond pas à une recharge de la nappe. La formation captée est la formation RAS HAMIA. Le puits est influencé par les pompages effectués sur le forage 1889.1/1 ou T 3 : l'arrêt des pompages provoque la remontée du niveau piézométrique, leur reprise est marquée par la chute brutale du niveau piézométrique.

5.2.4 - Nord de la route AL AZIZIYAH - BIR AL GHANAM

Dans cette zone les puits n'indiquent pas de remontée significative. Le niveau statique est stable ou en baisse, mais cette baisse est lente (10 cm/an environ). Les formations captées sont quaternaires ou tertiaires.

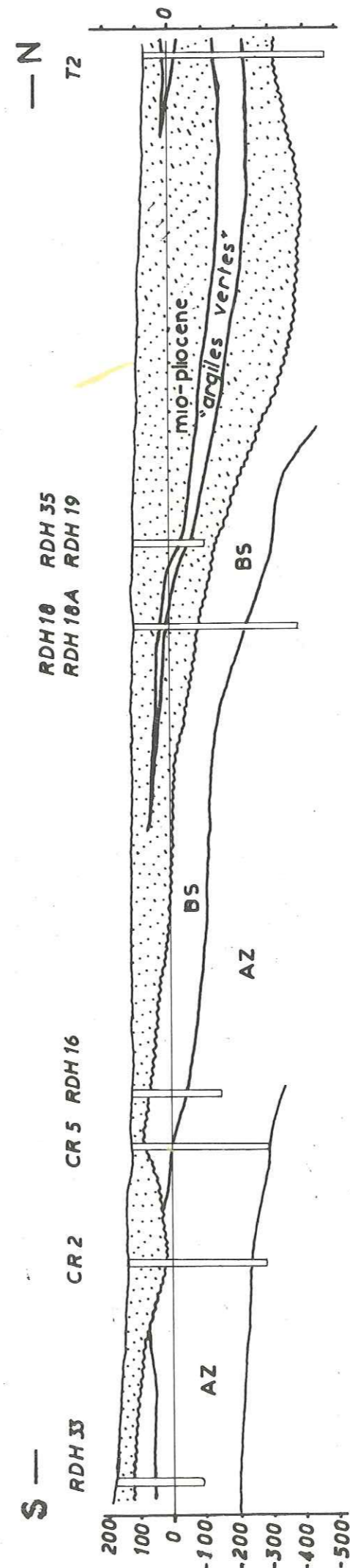
- Graphique n° 50A : 1889.1/10, 16 et 20.
- Graphique n° 36A : 1890.2/GWA 25.

5.2.5 - Région de BIR AL GHANAM et route de AZ ZAWIYAH

Les remontées observées sont importantes (supérieures à 50 cm en général).

Au puits 1889.4/6, on observe une remontée du niveau statique de 190 cm. Cette recharge est due à l'infiltration des eaux d'un petit wadi dans sa zone d'épandage (Graphique n° 51A). La nappe observée est installée dans des alluvions quaternaires.

Le puits 1889.4/25 indique une recharge de 170 cm. Dans ce cas la recharge est due au ruissellement dans un impluvium de dunes. Elle alimente un aquifère quaternaire. (Graphique n° 52A).



COUPE n° 45 bis

Ces deux cas illustrent une recharge ponctuelle, c'est-à-dire qu'elle n'intéresse qu'une portion très limitée de la nappe. Le graphique des variations piézométriques du puits 1889.4/25 montre une brusque remontée du niveau statique lors des pluies du mois d'Octobre 1974, créant une recharge bien localisée qui, ensuite, s'étale : le niveau statique baisse.

La région nord et nord-est de BIR AL GHANAM est, hydrogéologiquement, très complexe. Il existe dans cette région plusieurs nappes superposées dont les niveaux statiques sont très voisins. (Coupe n° 45bis).

Les puits excavés captent l'aquifère superficiel qui, dans tous les cas, est constitué par le Plio-quaternaire ; les puits forés peuvent capter des aquifères très différents. Ainsi le forage RDH 16 A capte la formation AL AZIZIYAH supérieur et la formation ABU SHAYBAH inférieur ; le forage RDH 18 A capte le Miocène, le forage RDH 18 la formation AL AZIZIYAH supérieur, le forage RDH 19 la même formation que le forage RDH 18 A ; le forage RDH 35 capte le Quaternaire et le Tertiaire. Les puits forés utilisés pour l'agriculture captent sans doute le premier aquifère rencontré.

Les variations piézométriques de ces différentes nappes montrent qu'elles sont indépendantes les unes des autres.

Les puits à l'Ouest de la route de AZ ZAWIYAH et au Nord de BIR AL GHANAM (1889.4/6, 9, 12, 25, 63) correspondent à l'aquifère quaternaire le plus haut. On a vu que le niveau statique variait différemment suivant les puits et que, s'il y avait recharge, elle était ponctuelle (Graphiques n° 51A et 52A).

Les puits à l'Est de la route de AZ ZAWIYAH (1889.4/30, 68, 13, 16) captent sans doute un Quaternaire différent du précédent. La nappe semble être la même que celle captée par le forage RDH 16 A. Ces puits indiquent une remontée de la nappe de plus de 70 cm. C'est cette remontée qui est mise en évidence dans les forages RDH 18 A et RDH 19. Le forage RDH 35 n'indique aucune remontée alors qu'il capte un aquifère situé plus haut. Les deux aquifères sont donc indépendants (ceci est confirmé par les essais de pompage). C'est l'aquifère inférieur qui bénéficie de la recharge, l'aquifère supérieur n'existant pas dans la zone d'infiltration (Graphiques n° 52A et 53A et coupe n° 45bis).

La zone d'infiltration se situe au niveau du croisement de la route de AL AZIZIYAH avec celle de AZ ZAWIYAH. Elle bénéficie des apports du WADI ZARAT, du WADI ZAQQUT et d'une partie des apports du WADI ABU SHAYBAH. Toutefois cette zone n'est atteinte que par des crues exceptionnelles (fréquence 0,1).

Ainsi les variations piézométriques montrent que selon l'aquifère observé les réactions ne sont pas les mêmes. En fait cela dépend moins de l'aquifère que de sa position dans l'ensemble lithostratigraphique et de la situation géographique de la zone d'observation.

6 - VARIATIONS PIEZOMETRIQUES SELON L'AQUIFERE OBSERVE

6.1 - Les formations quaternaires

Ces formations sont toujours aquifères, elles peuvent contenir une nappe dans deux cas :

1° - s'il existe un niveau imperméable à leur base et si elles ont la possibilité d'être alimentées. C'est le cas des formations quaternaires reposant sur le niveau sommital argileux de la formation ABU SHAYBAH. La nappe n'existe cependant que dans les alluvions de wadis (Wadi GHAN, Wadi ZAQQUT, Wadi ZARAT). La piézométrie est influencée par chaque crue.

2° - si les formations quaternaires reposent sur une autre formation aquifère sans niveau imperméable entre elles et si le niveau statique se trouve dans la formation quaternaire. Les variations piézométriques peuvent être dues à n'importe quel phénomène (crues, pompages, marée, etc..).

6.2 - Les formations tertiaires (Mio-Pliocène)

Suivant le degré de complexité du système hydrogéologique, il peut y avoir une seule nappe ou plusieurs nappes superposées indépendantes les unes des autres. La complexité augmente avec l'épaisseur de la formation du sud vers le nord (voir coupe n° 45bis). Au nord de la zone il n'y a généralement pas de recharge possible des nappes sauf si la formation observée est en relation au sud avec une zone d'infiltration (cf. paragraphe 3.4.2 c).

6.3 - Les formations AIN TOBI et KIKLAH

Dans la zone étudiée ces formations ne sont présentes que dans un compartiment effondré (cf. paragraphe 3.4.2 a). La nappe qu'elles contiennent est la nappe superficielle commune à toute la région de AL AZIZIYAH. Les variations piézométriques sont influencées par les pompages mais la transmissivité plus faible que celle de la formation AL AZIZIYAH fait que les variations piézométriques sont amorties.

6.4 - La formation ABU SHAYBAH

La formation ABU SHAYBAH ne s'étend guère au sud de la bordure du jebel sauf à l'ouest de la zone où sa limite d'extension prend la direction sud-nord. Il y a toujours une nappe dans les niveaux gréseux. Cette nappe se déverse dans d'autres formations à la limite d'extension vers le nord (limite d'érosion). Lorsque cette formation est entaillée par un wadi, il y a généralement une source. Les crues des wadis provoquent une recharge de la nappe si les niveaux gréseux ne sont pas isolés par la partie supérieure argileuse de la formation (Wadi GHAN, paragraphe 5.2.2).

6.5 - La formation AL AZIZIYAH

La nappe existant dans cette formation est une nappe à surface libre dans la majeure partie de la zone étudiée. Vers le sud, elle passe sous la formation ABU SHAYBAH et vers le nord sous les formations tertiaires lorsqu'apparaissent les "argiles vertes". Entre ces deux limites le niveau statique peut se situer dans les formations tertiaires ou quaternaires recouvrant les calcaires AL AZIZIYAH.

Les variations piézométriques dans la région de AL AZIZIYAH sont dues essentiellement aux pompages. Il faut noter cependant l'effet de marées terrestres. La recharge se fait sentir au sud de AL AZIZIYAH dans la zone d'épandage du Wadi AL HIRA. La diminution de la transmissivité au sud-ouest de AL AZIZIYAH fait que l'influence des pompages est rapidement réduite. D'autre part dans la zone d'épandage des wadis ABU SHAYBAH et ZAQQUT la bonne transmissivité des terrains masque l'effet d'une recharge éventuelle mais faible.

6.6 - Les formations RAS HAMIA et OULED CHEBBI

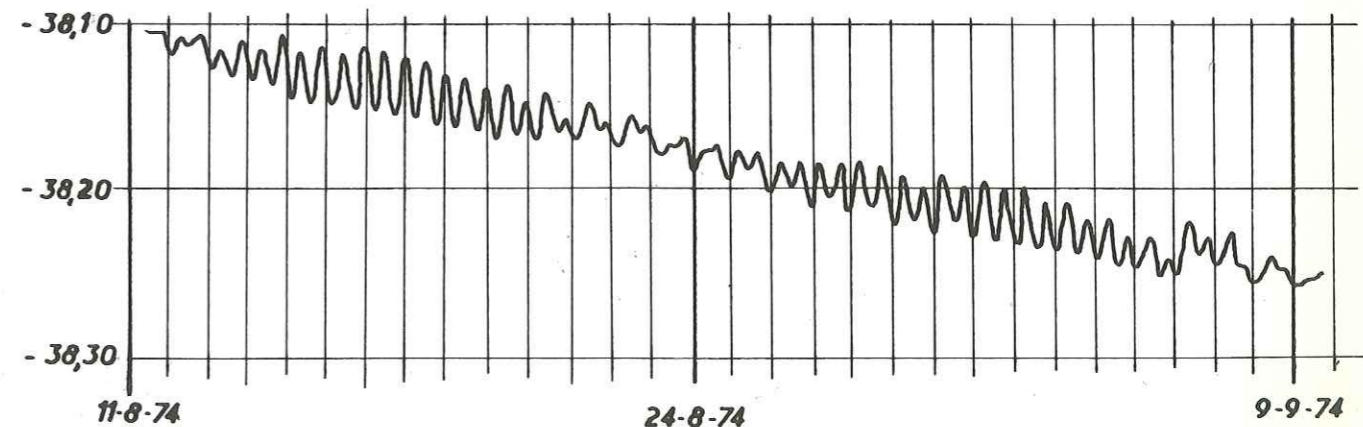
Les nappes dans ces aquifères profonds n'ont pas de communications possibles avec le milieu extérieur, elles ne sont donc pas réalimentées. La seule variation de niveau piézométrique mise en évidence l'a été sur le forage 1989.1/30 ou RDH4, elle est due à un pompage effectué à proximité dans la même formation du RAS HAMIA.

7 - LES MAREES DE NAPPES

Deux enregistrements piézographiques des variations de niveau, l'un dans la formation de recouvrement tertiaire et quaternaire surmontant la formation AL AZIZIYAH, l'autre dans la formation AL AZIZIYAH, montrent un phénomène d'oscillation du niveau piézométrique dont la période est semi-diurne. L'amplitude de l'oscillation atteint 4 cm dans le piézomètre captant la formation AL AZIZIYAH, elle est plus faible dans la formation de recouvrement. Ces variations ne peuvent être mises en relation avec les variations barométriques. L'influence des marées océaniques ne peut non plus être invoquée dans ce cas. Ces oscillations semi-diurnes sont en relation avec les effets de la marée terrestre (graphique n° 46).

"La marée terrestre est un phénomène bien connu. Elle dérive d'un potentiel qui met en jeu des forces de direction radiale (marée gravimétrique) et des forces de direction tangentielle (marée clinométrique). L'action combinée de ces forces détermine une déviation de la verticale par rapport à la croûte terrestre, une variation dans l'intensité de la pesanteur, une déviation de la verticale par rapport à l'axe de la terre, une déformation linéaire (extension), une dilatation cubique et des fluctuations dans la vitesse de rotation de la terre. C'est à la dilatation cubique que l'on rapporte les variations observées dans les aquifères" (MANGIN 1975).

Ce phénomène était à signaler pour les enregistrements piézographiques caractéristiques qu'il occasionne mais il n'a pas d'influence majeure sur la variation générale de la nappe.



Graphique n° 46 - Marée terrestre observée sur le puits n° 1890/178 (AZP 1).

8 - CONCLUSIONS

L'étude des variations des niveaux piézométriques a permis de mettre en évidence des zones privilégiées où la recharge des nappes est possible. Ce sont :

- . les poches d'infiltration où s'accumule l'eau des grands wadis ;
- . les lits des wadis ;
- . les impluvium de collines sans exutoire, où l'accumulation d'eau est suffisante pour qu'il y ait une infiltration efficace.

On a pu aussi montrer que les infiltrations pour la crue d'Octobre 1974, dans la plaine du WADI AL HIRA, correspondaient à 37 % du volume de la crue, donc que la recharge de la nappe était réelle et non négligeable ; qu'une crue inférieure à 3 Mm³ dans le Jebel, à 4 Mm³ dans la plaine, ne provoque pas de remontée décelable du niveau piézométrique (ce qui n'exclut pas une recharge éventuelle).

La longue période d'observation du niveau piézométrique dans certaines zones a permis de mettre en évidence un phénomène récent, lié au développement des pompages dans la nappe, à savoir la chute brutale du niveau piézométrique, phénomène qui risque d'avoir des conséquences catastrophiques si rien n'est fait pour enrayer la baisse de la nappe.

VIII - ANALYSE ISOTOPIQUE

- 1 - Généralités
- 2 - Le Carbone-14
- 3 - Le Tritium
- 4 - Les isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène
- 5 - Conclusions

VIII - ANALYSE ISOTOPIQUE

1 - GENERALITES

Les techniques isotopiques en hydrogéologie représentent des méthodes de corrélation et d'interprétation des concentrations en isotopes naturels ou artificiels mesurées dans des échantillons d'eau prélevés en divers points d'une zone étudiée.

Dans le cas présent, on ne s'intéressera qu'aux isotopes naturels contenus dans l'eau. Les traceurs naturels utilisés dans cette étude sont :

- les isotopes 13 et 14 du carbone (^{13}C et $^{14}\text{C}^*$) contenus dans les carbonates ou bicarbonates dissous (le carbone $^{14}\text{C}^*$ est l'isotope radioactif) ;
- l'oxygène 18 (^{18}O), isotope stable de l'oxygène ;
- les isotopes naturels de l'hydrogène : le tritium ($^3\text{H}^*$), isotope radioactif et le deutérium (^2H ou D), isotope stable.

Le dosage des isotopes du carbone, vue la période longue de l'élément radioactif, permet une datation absolue des eaux analysées, si elles sont anciennes. Pour des eaux récentes on emploie le tritium dont la période est beaucoup plus courte. Quant à l'oxygène 18 et au deutérium, ils apportent des précisions sur les conditions d'infiltration des eaux et permettent de distinguer des eaux d'origines différentes.

2 - LE CARBONE-14

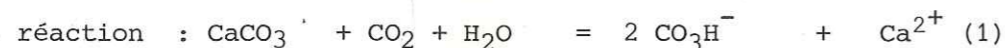
2.1 - Principe de la méthode

Le carbone-14 est un radio-élément naturel produit par la composante neutronique du rayonnement cosmique agissant sur les constituants gazeux de l'atmosphère. Sa période est voisine de 5.600 ans (5.568 ans par convention), c'est à dire que l'âge de l'échantillon contenant 50 % de ^{14}C par rapport à la concentration en ^{14}C à l'origine est de 5.568 ans. On admet que la concentration du CO_2 atmosphérique n'a pas varié jusqu'en 1950 (année de référence des datations du ^{14}C). La concentration en ^{14}C à l'origine est donc de 100 %. Depuis 1950 la teneur actuelle en ^{14}C a été considérablement modifiée par les explosions thermonucléaires.

Le dosage du ^{14}C s'effectue sur les bicarbonates dissous dans l'eau. Compte tenu de la décroissance radioactive, la teneur en ^{14}C permet de déterminer l'âge de l'eau. Cependant il peut se produire des échanges isotopiques avec du calcaire, ceci a pour effet de diminuer la teneur en ^{14}C et de "vieillir" l'eau, ou avec du CO_2 provenant de l'oxydation de matières organiques ce qui "rajeunit" l'eau.

Il est possible de se rendre compte de ces échanges en mesurant le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. La teneur en carbone-13 s'exprime en $\delta^{13}\text{C}^*$ ou part pour mille de différence par rapport au standard PDB (Belemnite of the Peedee Formation) qui a un rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ plus ou moins égal au rapport moyen des calcaires de sédimentation marine ($\delta^{13}\text{C} = 0 \text{ ‰}$).

Dans la zone saturée de la nappe on a la réaction globale suivante :



origine : minérale biogénique

^{14}C	:	0 ‰	100 ‰	50 ‰
^{13}C	:	0 ± 3 ‰	-25 ± 5 ‰	- 12,5 ‰

La teneur en ^{14}C de départ du bicarbonate de l'eau, soit Co , peut s'écrire ainsi :

$$^{14}\text{Co} = ^{14}\text{C}_{\text{bio}} \times F + ^{14}\text{C}_{\text{min}} \times (1-F) \quad (2)$$

Le facteur F représente la proportion de carbone biogénique qu'il y a dans le bicarbonate de l'eau. Si l'équilibre précédent a bien lieu, ce facteur F est égal à 0,5 :

$$^{14}\text{Co} = 100 \text{ ‰} \times 0,5 + 0 \text{ ‰} (1-0,5) = 50 \text{ ‰}$$

En réalité, à la suite d'échanges entre le CO_3H^- et le CO_2 , F est généralement supérieur à 0,5. Un des moyens pour déterminer F consiste à mesurer la teneur en ^{13}C du bicarbonate.

On peut écrire comme en (2) :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3\text{H}^-} = \delta^{13}\text{C}_{\text{bio}} \times F + \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3 \text{ Ca}} \times (1-F) \quad (3)$$

Dans le cas où l'équilibre (1) est réalisé, on a :

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3\text{H}^-} = - 25 \times 0,5 + 0 \times (1-0,5) = - 12,5 \text{ ‰}$$

* $\delta = \left(\frac{\text{Rapport isotopique de l'échantillon}}{\text{Rapport isotopique du standard}} - 1 \right) \times 1000$

Pour $- 12,5 < \delta < 0$, il y a échange avec le calcaire de l'aquifère et pour $- 25 < \delta < - 12,5$, l'échange a lieu avec le CO_2 de l'humus des sols.

Le facteur F est donc égal à :

$$\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3\text{H}^-}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{bio}^*}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3\text{H}^-}}{- 25} \quad (4)$$

Aux phénomènes d'échange entre CO_3H^- et CO_2 s'ajoute un fractionnement isotopique ϵ d'environ 7 ‰ : le CO_3H^- est enrichi de 7 ‰ par rapport au CO_2 biogénique. La relation (4) devient alors :

$$F = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3\text{H}^-}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{bio}} + \epsilon} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_3\text{H}^-}}{- 18} \quad (5)$$

L'âge des eaux est donné par la relation :

$$t = 8033 \text{ Ln } (\text{Co}/\text{Ct}) = 8033 \text{ Ln } (100/\text{Ct}) \quad (6)$$

Ct étant la concentration en ^{14}C au moment de la mesure,
Co la concentration en ^{14}C à l'origine.

La relation (6) donne l'âge apparent de l'eau. Pour obtenir l'âge corrigé il faut tenir compte du facteur de correction F :

$$t = 8033 \text{ Ln } (F \cdot \text{Co}/\text{Ct}) = 8033 \text{ Ln } (100 \cdot F/\text{Ct}).$$

2.2 - Analyse des résultats

Dans le cadre de l'étude, trois échantillons ont été analysés auxquels il faut ajouter les résultats obtenus lors d'une précédente étude effectuée en 1972. Les résultats sont portés dans le tableau n° 47.

Les âges sont dispersés entre le subactuel et 30.000 ans. On peut remarquer que l'âge subactuel correspond à l'eau d'un aquifère quaternaire. L'eau de l'aquifère tertiaire est plus récente que celle des aquifères triasiques. Les eaux des aquifères triasiques, qu'ils appartiennent à la formation AL AZIZIYAH ou à la formation RAS HAMIA, donnent des âges allant de 13.000 à 29.000 ans.

Numéro du puits	Nom du puits et localisation	Formation captée	Zone captée sous le niveau du sol	Date du prélèvement	Activité en ¹⁴ C % NBS (1)	δ ¹³ C ‰ USA PDB (2)	"Age brut" en année	"Age corrigé" en année
1990.3/223	RDH 1 AL AZIZIYAH	AL AZIZIYAH	200 - 212 286 - 335	18.01.74	4,5 ± 0,4	- 5,7 ± 0,1	24 900	15 700
1890.2/177	AZDW1 AL AZIZIYAH	AL AZIZIYAH	195,5-225 285 - 314 326 - 345	04.74	10,8 ± 0,6	- 9,9 ± 0,1	17 900	13 100
1890.2/167	RDH 3 Nord de AL AZIZIYAH	RAS HAMIA	535 - 593	23.05.75	2,6 ± 0,3	- 5,2 ± 0,1	29 300	19 400
1989.4/1	T 11 Plaine du WADI AL HIRA	AL AZIZIYAH	? - 130	1972	6,5	* (-10)	21 900	17 200
1990.3/2	OPDL22 AL AZIZIYAH	AL AZIZIYAH	323 - 328	1972	1,5 ± 1	* (-10)	33 700	29 000
3238.1247/53	DW NASSERIA	TERTIAIRE	265 - 310	1972	13,9	* (-10)	15 000	11 000
3246/1241/51	AZ ZAWIYAH	QUATERNAIRE	? - 64	1972	57,9	* (-10)	4 400	Actuel

(1) N.B.S. : National Bureau of Standards (U.S.A.)

(2) P.D.B. : Belemnite of the Peedee Formation (U.S.A.)

* : valeur incertaine, donne un δ¹³C maximum, δ¹³C = 10 ‰ étant le maximum rencontré dans les eaux de ces régions (Ph. OLIVE, communication personnelle, 1975).

TABLEAU n° 47

Malgré tout, les informations apportées par le dosage du ¹⁴C devront être abordées avec une extrême prudence. En effet la dispersion des âges d'eaux provenant d'un même aquifère peut être due à d'autres causes qu'à des âges réellement différents :

- la zone captée dans la formation n'est pas la même pour tous les échantillons ;

- les prélèvements étant effectués au cours de pompage de longue durée (72 H) il se produit des mélanges d'eau, les apports peuvent se faire aussi bien latéralement que verticalement ;

- il peut y avoir des contaminations lors des prélèvements d'échantillons d'eau.

De plus pour les nappes à surface libre, si les âges donnés par le ¹⁴C ne sont pas entachés d'erreur, les eaux, du fait de leur mélange avec des eaux contemporaines ou d'âge récent, sont encore plus anciennes qu'elles ne paraissent.

Aucune de ces eaux ne peut être reportée au dernier pluvial (8000 à 9000 ans B.P.) Elles sont antérieures à cet événement. Des études menées dans le sud du territoire français des AFARS et des ISSAS par M. FONTES J.Ch., Mme MOUSSIE C., MM. POCHAN P. et WEIDMANN M. ont mis en évidence trois phénomènes climatiques humides majeurs qui auraient pu alimenter les nappes :

- un groupement très net d'âges entre 4500 et 9500 ans BP,
- un groupement plus modeste entre 2000 et 3500 ans BP,
- un témoin nettement plus ancien à 23000 BP.

C'est ce dernier témoin qui pourrait expliquer l'âge ancien des eaux analysées. Il est unique mais précis. Il correspond à la fin du WURM III dans l'hémisphère nord. Il existe en effet une puissante extension lacustre au pléistocène supérieur. Elle est encore fort mal connue en Afrique mais elle a été démontrée au TCHAD (M. SERVANT, 1973) et attribuée à un épisode antérieur à 20000 ans B.P. dans les régions des lacs de l'Est africain (K.W.BUTZER, G.L. ISAAC, J.L. RICHARDSON et C. WASHBOURN - 1972).

3 - LE TRITIUM

3.1 - Principe de la méthode

Comme le carbone-14, le tritium (³H) est le résultat du rayonnement cosmique. Mais depuis les essais thermonucléaires aériens la production naturelle de cet isotope de l'hydrogène est masquée par les apports artificiels.

La teneur en tritium des eaux est exprimée en unité tritium (U.T.) Une unité tritium (1 U.T.) correspond à 1 atome de tritium pour 10¹⁸ atomes d'hydrogène.

La période de l'isotope radioactif de l'hydrogène est de 12,26 ans. Elle permet donc de dater des eaux très récentes (âge inférieur à 50 ans) et surtout de mettre en évidence les apports d'eaux contemporaines dans les nappes.

3.2 - Analyse des résultats

Il a été effectué 34 mesures de l'activité en tritium des eaux de différents aquifères. Les résultats sont représentés dans le tableau n° 48.

Mis à part une valeur à 105 U.T., toutes les activités en tritium des eaux analysées sont voisines ou inférieures à 5 U.T. Une telle activité correspondrait à des eaux d'âge compris entre 15 et 50 ans. La valeur à 105 U.T. provient d'une eau d'un aquifère quaternaire rechargé très rapidement par les eaux de crue. L'âge de l'eau dans ce cas est inférieur à 5 ans.

La faible teneur en tritium des eaux analysées peut être due à plusieurs causes :

- 1° - les eaux de pluie ont elles-mêmes une faible teneur en tritium,
- 2° - les prélèvements sont effectués au cours d'essais de pompage de longue durée et les zones captées ne sont pas les zones supérieures de la nappe, il y a mélange des eaux de la nappe au cours du pompage,
- 3° - Les apports contemporains sont très faibles et dilués dans un très grand volume d'eau,
- 4° - La recharge est très lente et entre le moment où l'eau s'infiltré et le moment où l'eau atteint la nappe l'activité en tritium a considérablement diminué.

En conclusion, les faibles teneurs en tritium des eaux indiquent qu'il existe bien une recharge contemporaine malgré l'épaisseur considérable du terrain au-dessus de la nappe. La recharge actuelle est très faible et fortement diluée dans un grand volume d'eau. Ces résultats sont confirmés par une récente étude de CONRAD G., MARCE A. et OLIVE Ph. (1975) effectuée dans la zone aride saharienne d'ALGERIE, étude qui met en évidence, par le tritium, la recharge des nappes à surface libre dans des régions où pourtant les conditions climatiques ne sont guère favorables.

Numéro du puits	Nom du puits	Zone captée	Formation aquifère captée	Date de l'échantillonnage	Oxygène-18 en %	Deutérium en %	Tritium en U.T.
1889.2/16	(Dug well)	19 - 20,5	Quaternaire	1972	- 5,6	- 34,9	105 ± 3
1889.2/20	(Dug well)	92 - 175	Quat. ou BS	1972	- 6,4	- 39,8	1,5
1889.1/1	T3	44 - 57	AZ	1972	- 6,2	- 40,2	(1,7)
1889.1/22	T11	136 - 155	Quaternaire	1972			(4,2)
1889.4/1	OPDL 22	323 - 328	AZ	1972			6,7 ± 3
1990.3/2	OPDL 22	323 - 328	AZ	7.7.75			4,9 ± 4
							5 ± 2
1989.4/67	RDH2	278 - 338	AZ	16.4.75	- 6,1 ± 0,1	- 39,5 ± 0,5	2 ± 1
/68	RDH5	60 - 84	AZ	17.4.75			3 ± 1
/59	RDH11	175 - 263	AZ	20.08.74			< 1
/72	RDH13	600 - 654	Kiklah	16.09.74			
/73	RDH15	103 - 181	Ouled Chebbi	3.02.75	- 6,9 ± 0,1	- 55,0 ± 0,5	2 ± 1
		130 - 140	AZ		- 5,9 ± 0,1	- 37,3 ± 0,5	4 ± 1
		247 - 308	AZ		- 6,0 ± 0,1	- 38,8 ± 0,5	< 1
/70	RDH20	0 - 140	Q-AZ	1.04.75	- 5,4 ± 0,1	- 35,8 ± 0,5	4 ± 1
/80	RDH25	0 - 140	Ain Tobli	2.04.75	- 5,9 ± 0,1	- 36,8 ± 0,5	2 ± 1
		453 - 489	AZ	3.07.75	- 6,0 ± 0,1	- 39,7 ± 0,5	3 ± 1
/81	RDH32	125 - 252	AZ	4.07.75	5,9 ± 0,1	38,4 ± 0,5	< 1
/91	RDH31	166 - 317	AZ	28.04.75	6,1 ± 0,1	40,4 ± 0,5	< 1
/78	RDH26	116 - 268	AZ	16.12.74	6,1 ± 0,1	38,0 ± 0,5	< 1
/82	RDH26A	280 - 350	RH	12.04.75	- 7,2 ± 0,1	- 57,7 ± 0,5	< 1
/65	PWH9	613 - 691	Ouled Chebbi	19.05.75	- 7,6 ± 0,1	- 56,8 ± 0,5	< 1
/79	PWH5	90 - 120	AZ + RH	21.05.75	- 6,5 ± 0,1	- 52,4 ± 0,5	< 1
	RDH36	175 - 286	Kiklah	4.05.75	- 6,1 ± 0,1	- 52,4 ± 0,5	< 1
		50 - 100	AZ	29.06.75			7 ± 2
			AZ	21.06.75			
			AZ	29.11.74			
			AZ	10.03.75			

TABEAU N° 48

Numéro du puits	Nom du puits	Zone captée	Formation aquifère captée	Date de l'échantillonnage	Oxygène-18 en %	Deutérium en ‰	Tritium en U.T.
1889.1/30	RDH4	328 - 431	Ras Hamia	06.12.74	- 7,7 ± 0,1	- 58,6 ± 0,5	< 1
/34	RDH28*	40 - 85	AZ	15.12.74			
/36	RDH14	174 - 218	AZ	23.04.75	- 6,6 ± 0,1	- 38,2 ± 0,5	3 ± 1
/33	RDH27		AZ	03.09.74			4 ± 1
/39	RDH24	0 - 119	AZ	11.09.74	- 6,0 ± 0,1	- 37,4 ± 0,5	< 1
		0 - 255	AZ	17.12.74	- 6,2 ± 0,1	- 37,7 ± 0,5	
		100 - 253	AZ	03.03.75	- 7,6 ± 0,1	- 59,0 ± 0,5	
		285 - 500	Ras Hamia	13.05.75			
1889.2/27	RDH21	78 - 150	Abu Shaybah	14.05.75	- 6,5 ± 0,1	- 42,1 ± 0,5	2 ± 1
/28	RDH22		Abu Shaybah	13.02.75	- 6,5 ± 0,1	- 41,9 ± 0,5	< 1
	PWH8	65 - 207	Abu Shaybah	12.02.75	- 6,5 ± 0,1	- 42,1 ± 0,5	< 1
1889.4/75	RDH19	171 - 207	Tertiaire	7.02.75	- 5,9 ± 0,1	- 40,9 ± 0,5	< 1
/77	RDH34	155 - 190	Tertiaire	28.01.75	- 6,0 ± 0,1	- 42,6 ± 0,5	4 ± 1
/76	RDH35	265 - 350	AZ	30.01.75	- 4,8 ± 0,1	- 32,8 ± 0,5	< 1
1990.3/221	RDH9	92 - 166	Quat. - Tert.	06.01.75	- 5,9 ± 0,1	- 37,0 ± 0,5	8 ± 2
/222	PWH7	332 - 362	Quat. - Tert. + Kiklah	07.01.75	- 6,0 ± 0,1	- 39,5 ± 0,5	< 1
		380 - 408	AZ	22.06.75			
				27.06.75			
				Avril 1974			19 ± 4
				Jan. 1975			18
				22.07.74			16 ± 3

TABLEAU N° 48 (suite)

4 - LES ISOTOPES STABLES DE L'HYDROGENE ET DE L'OXYGENE

4.1 - Principe de la méthode

Le deutérium (²H ou D) est l'isotope stable de l'hydrogène. L'oxygène-18 (¹⁸O) un des isotopes stables de l'oxygène. Les teneurs en ¹⁸O ou D sont exprimées (comme pour les ¹³C et le ¹²C) en δ, c'est à dire en part pour mille de différence par rapport au standard international de référence, le SMOW (Standard Mean Ocean Water), dont le δ est, par définition, égal à zéro (1 δ correspond environ à 2 ppm de ¹⁸O et 0,3 ppm de ²H).

Les pressions de vapeurs des trois molécules d'eau, HD¹⁶O, H₂¹⁸O et H₂¹⁶O sont différentes. Lors du processus d'évaporation la vapeur d'eau s'appauvrit en isotopes lourds. Ce fractionnement est aussi valable pour ³H mais compte tenu de la précision des mesures, il est à peine décelable. Lorsque la vapeur d'eau est soumise, à la suite de refroidissements, à des condensations successives, les isotopes lourds se condensent préférentiellement et la vapeur résiduelle est de plus en plus appauvrie en ¹⁸O et D. Les précipitations successives sont donc de plus en plus pauvres en isotopes lourds (c'est l'effet de continentalité).

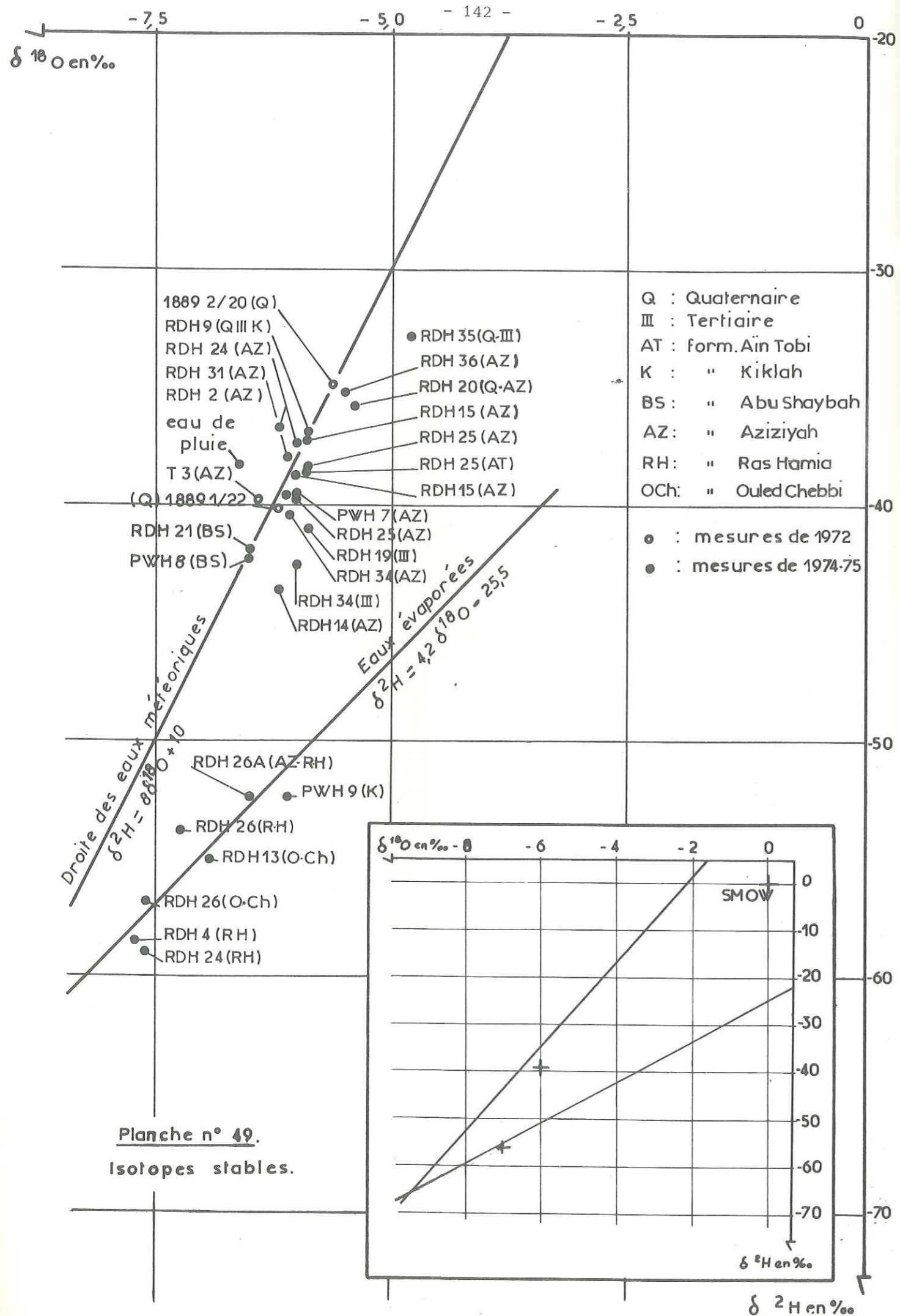
Les eaux de pluie sont caractérisées par leur teneur en ¹⁸O et D. La relation entre ces deux isotopes est une relation linéaire d'équation : δD = 8 δ¹⁸O + 10, représentée par une droite appelée droite de DANSGAARD.

La teneur en isotopes stables des eaux souterraines est normalement proche de la teneur moyenne des précipitations qui les alimentent par infiltration.

Si les eaux souterraines sont alimentées par des eaux de surface, leur composition isotopique peut être affectée par l'évaporation partielle à laquelle ces eaux peuvent avoir été soumises avant infiltration. Dans ce cas, les eaux seront enrichies en isotopes lourds et leurs valeurs δD et δ¹⁸O ne suivront pas l'équation de la droite de DANSGAARD.

De plus pour des eaux souterraines dont l'âge est supérieur à quelques milliers d'années, les teneurs en isotopes lourds peuvent être sensiblement différentes de celles des eaux d'alimentation actuelle : cela à cause des variations climatiques intervenues et notamment des changements de température et d'humidité.

La composition isotopique d'une eau souterraine nous permet donc de retrouver son origine.



4.2 - Analyse des résultats

Dans le secteur étudié, 30 mesures de la teneur en deutérium et oxygène-18 ont été effectuées. Ces mesures intéressent tous les aquifères rencontrés.

Le résultat des analyses est porté dans le même tableau que les teneurs en tritium.

La représentation graphique des couples ^{18}O et D a permis de mettre en évidence deux types d'eau. Le premier type est représenté par un groupe de points situés sur la droite de DANSGAARD ($\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$), le deuxième type s'écarte de la droite de DANSGAARD et se place sur une droite d'équation : $\delta D = 4,25 \delta^{18}\text{O} - 25,5$ (Graphique n° 49).

Le premier groupe caractérise les eaux de l'aquifère superficiel, qu'il soit quaternaire, tertiaire ou triasique (formation AL AZIZIYAH). La grande homogénéité des valeurs de la teneur en ^{18}O ($-6 \pm 0,5 \text{ ‰}$) indique un très bon mélange des eaux. La position de ces eaux sur la droite de DANSGAARD montre qu'elles n'ont pas été soumises à l'évaporation avant leur infiltration.

Le deuxième groupe représente les eaux d'aquifères profonds (nappes captives). De telles eaux sont évaporées, elles n'ont donc pas bénéficié des mêmes conditions d'infiltration que les eaux des aquifères superficiels. La relation $^{18}\text{O} - \text{D}$ de ces eaux est de la forme $\delta D = 4,2 \delta^{18}\text{O} - 26,5$. La droite représentant cette équation coupe la droite de DANSGAARD et donne ainsi la composition isotopique originelle des eaux : $\delta^{18}\text{O} = -9,5 \text{ ‰}$ et $\delta D = -66 \text{ ‰}$. A partir de cette composition originelle les eaux évoluent par enrichissement en isotopes lourds en suivant la droite $\delta D = 4,2 \delta^{18}\text{O} - 25,5$. L'écart entre les teneurs actuelles et la teneur originelle des eaux des aquifères profonds ne s'explique que par une évaporation des eaux avant leur infiltration. La composition isotopique originelle des eaux des aquifères profonds est très différente de celle des eaux actuelles et des eaux des aquifères superficiels. Deux processus peuvent expliquer cette divergence de composition isotopique :

1° - Les eaux des aquifères profonds sont très anciennes et elles proviennent d'eaux infiltrées sur place mais sous des conditions climatiques différentes de celle régnant actuellement. La teneur originelle en isotopes lourds donne une température moyenne de 6°C ($\delta^{18}\text{O} = 0,7t - 13,6$ et $\delta D = 5,6t - 100$). La température moyenne donnée par les mêmes relations pour les eaux actuelles ou les eaux des aquifères superficiels est de 11°C , température qui correspond à la moyenne des températures minimales des mois pluvieux.

2° - Les eaux des aquifères profonds proviennent d'eaux infiltrées beaucoup plus au sud et la faible teneur en isotopes lourds est due à un effet de continentalité et d'altitude qui appauvrit les eaux en ^{18}O et D. Il faut alors admettre une pluviométrie différente de la pluviométrie actuelle qui est quasi nulle dans ces régions méridionales.

Dans le cas de la 1ère hypothèse, il conviendrait de mettre en évidence des zones d'infiltration favorables, c'est à dire, suffisamment importantes et permettant aux eaux météoriques d'atteindre la formation RAS HAMIA. Or la formation RAS HAMIA n'affleure que très peu et, cela, dans des zones impropres à l'infiltration. On voit donc mal comment pourrait s'effectuer l'alimentation de l'aquifère RAS HAMIA au niveau de la plaine de la JEFFARA.

Par contre la 2ème hypothèse faisant intervenir une alimentation par le sud ou le sud-ouest paraît très plausible. En effet, au sud du jebel NEFFUSA les formations triasiques sont d'origines continentales et constituent un ensemble indifférencié de grès et de conglomérats affleurant très largement. Ainsi, lors d'épisodes pluvieux anciens, aurait pu s'effectuer l'alimentation de l'aquifère RAS HAMIA. Ces eaux ont pu subir une évaporation avant de s'infiltrer, soit dans des lacs temporaires, soit au cours même de leur précipitation sous forme de pluie. Ceci expliquerait leur position par rapport à la droite de DANSGAARD.

Les eaux des aquifères superficiels ont les mêmes caractéristiques isotopiques que les eaux actuelles. Toutefois, la recharge contemporaine par les eaux météoriques ne suffit pas, et de beaucoup, à alimenter ces aquifères. Leur alimentation a dû se faire antérieurement (comme l'attestent les dosages du carbone-14), et sous des conditions climatiques peu différentes des conditions climatiques peu différentes des conditions actuelles.

5 - CONCLUSIONS

Les dosages du carbone-14 des eaux ont montré que, exception faite des nappes quaternaires d'extension réduite, toutes les eaux souterraines sont très anciennes (20000 ans environ). Les résultats de ces dosages sont toutefois à aborder avec prudence. L'alimentation ne semble pas avoir été la même selon qu'il s'agisse d'un aquifère profond ou d'un aquifère superficiel. Le dosage des isotopes lourds des eaux montre en effet deux groupes d'eaux très distincts : l'un représentant les eaux des aquifères superficiels, l'autre les eaux des aquifères profonds. Il paraît incontestable que les eaux profondes sont sans relation avec le milieu extérieur donc non renouvelées actuellement. Par contre les nappes de surface bénéficient d'une recharge contemporaine attestée par la présence de tritium dans les eaux, mais la faiblesse de la teneur en tritium montre aussi l'importance réduite de cette recharge.

IX - CONCLUSIONS GENERALES

IX - CONCLUSION GENERALE

La mesure de la teneur en eau du sol, l'interprétation des variations piézométriques des nappes et l'analyse isotopique des eaux ont permis de préciser les relations entre les eaux souterraines et le milieu extérieur.

Ainsi les résultats obtenus prouvent qu'il existe une infiltration efficace contribuant à la recharge des nappes. Mais seules les eaux de ruissellement lors de leur accumulation, dans les lits de wadi, les dépressions fermées des zones d'épandage ou les impluviums de dunes participent à l'infiltration. Les précipitations ou les épandages sur la plaine sont entièrement repris par l'évapotranspiration. La recharge des nappes est donc directement liée à la fréquence et l'importance des crues.

Dans les dépressions fermées des zones d'épandages, le taux d'infiltration atteint 85 %. Mais, pour la totalité des apports, le taux est d'environ 35 %.

Seul l'aquifère superficiel est intéressé par l'infiltration des eaux de surface. Les aquifères profonds ne bénéficient pas de la recharge et ils peuvent être considérés comme fossiles. Les eaux des aquifères profonds comme celles des aquifères superficiels sont très anciennes (15000 à 30000 ans). Cependant leur teneur en isotopes lourds indique des origines différentes. Il semblerait que les eaux des aquifères profonds se soient infiltrées très au sud de la zone étudiée alors que l'alimentation de l'aquifère superficiel se serait faite quasiment sur place.

Il a été possible, grâce aux mesures des variations de la teneur en eau du sol, de donner, pour la saison 1974-1975, une relation liant l'ETR à l'ETP. L'évapotranspiration réelle est en effet variable. Elle est très importante pour un sol humide mais elle décroît rapidement lors du dessèchement du sol. Elle est étroitement liée à l'état de saturation des premiers décimètres du sol. Le tableau qui suit donne une idée de la variation du rapport ETR/ETP :

Semaines	1	2	3	4	5 et plus
$\frac{ETR}{ETP}$	1	0,5	0,4	0,4	0,3

L'étude des variations piézométriques a mis en évidence le caractère dangereux, sinon catastrophique, de l'exploitation anarchique et intensive d'une nappe dont la recharge est très faible. En effet dans certaines zones agricoles où les pompages sont intenses, la baisse atteint plus de 5 cm par an. Les conclusions de la campagne de mesures de la teneur en eau du sol montrent le caractère improbable, voire illusoire, d'un éventuel retour à la nappe des eaux d'irrigation. L'économie de toute une région risque, ainsi, d'être gravement atteinte. Divers procédés doivent être envisagés afin de limiter la baisse brutale du niveau piézométrique :

- une réglementation et un contrôle du forage des puits,
- une meilleure connaissance des besoins en eau des plantes,
- des systèmes d'irrigation appropriés à ce type de climat,
- des barrages stockant les eaux de ruissellements, pour permettre leur utilisation rationnelle : irrigation contrôlée et injection des eaux dans la nappe, afin d'éviter les pertes par évapotranspiration.

Il est évident que pour mener à bien un tel programme, il faut plus que des observations qualitatives. Une expérimentation plus poussée, au niveau de la teneur en eau du sol, complétée par la pose de capteurs de pression, devrait permettre une approche encore plus précise des phénomènes d'évapotranspiration et d'infiltration. Un plus grand nombre de dosage du carbone-14 léverait sans doute l'incertitude reposant sur l'âge absolu exact des eaux. De même, des prélèvements à l'avancement dans un forage apporteraient certainement des précisions quant à l'existence possible d'une stratification des eaux des nappes grâce au dosage du tritium.

Toutefois, malgré les lacunes que présentent nos recherches, lacunes liées en grande partie à l'expérimentation en vraie grandeur et dans un cadre relativement vaste, nous espérons que cette étude soit une contribution à une meilleure connaissance de l'infiltration des eaux et de l'alimentation des nappes dans les zones arides.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- BAKALOWICZ M. (1974) - L'évapotranspiration réelle. Recherche d'une méthode opérationnelle d'évaluation journalière. Centre technique du génie rural des eaux et forêts. Etude n° 2 Août 1974 - Groupement d'Antony - Division Hydrologie.
- BELLAIR P. (1945) - Hydrologie de la cuvette Fezzanaise. Institut de recherches sahariennes de l'université d'ALGER. Mission scientifique du FEZZAN (1944-1945).
- B.R.G.M. (1969) - Les mouvements d'eau dans les sols non saturés. Bulletin du B.R.G.M. (2ème série), Section III, n° 4, 1969, Hydrogéologie.
- B.R.G.M. (1972) - La station expérimentale d'études des mouvements de l'eau dans la zone non saturée au Service géologique nationale à Orléans-la-Source. 72-SGN-295-AME (Rapport interne).
- B.R.G.M. (1973) - Détermination "in-situ" des transferts d'eau en zone non saturée à la station expérimentale d'Orléans-la-Source. Département géologie de l'aménagement - Hydrogéologie - 73-SGN-275-AME (Rapport interne).
- B.R.G.M. (1974) - Mouvements de l'eau dans les sols non saturés. Bulletin du B.R.G.M. (2ème série), Section III, n° 2, 1974, Hydrogéologie, géologie de l'ingénieur.
- CASTANY G. (1962) - Méthode d'étude et de recherche des nappes aquifères. B.R.G.M.
- CONRAD G., MARCE A., OLIVE Ph. (1975) - Mise en évidence par le tritium, de la recharge actuelle des nappes libres de la zone aride saharienne (ALGERIE). Journal de l'hydrologie, t 27, pp. 207, 227, 1975.
- COUCHAT Ph. (1967) - La méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols Rapport CEA - R 3298 Centre d'études nucléaires de CADARACHE.
- COUCHAT Ph. (1974) - Mesure neutronique de l'humidité des sols. Thèse présentée à l'Université Paul SABATIER de TOULOUSE en vue de l'obtention du grade de Docteur ès-Sciences.

- DAIAN J.F. (1971) - Etude in-situ des transferts d'eau dans la zone non-saturée. Application à une méthode d'estimation du bilan hydrique. Thèse de docteur-ingénieur présentée à l'université scientifique et médicale de GRENOBLE.
- DAIAN J.F. et VACHAUD (G) (1971) - Méthode d'évaluation du bilan hydrique in-situ à partir de la mesure des teneurs en eau et des pressions intersticielles. Communication aux "séminaires sur l'étude des infiltrations dans les sols en milieu non saturés". XIV^e Congrès AIRH Paris, Septembre 1971.
- DEGALLIER R. (1965) - Réflexions et questions sur l'alimentation des nappes d'eau souterraines. Chronique d'Hydrogéologie du B.R.G.M. n° 5, mars 1965.
- DEGALLIER R. (1965) - Mécanisme de l'alimentation des nappes souterraines. Chronique d'Hydrogéologie du B.R.G.M. n° 8, décembre 1965.
- DEGALLIER R. (1968) - Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Secrétariat permanent pour l'étude des problèmes de l'eau. Décembre 1968.
- DE MARTONNEE (1957) - Traité de géographie physique. Tome 1 : Notions générales de climatologie et d'hydrographie - Librairie Armand Colin (1957).
- DERRUAU M. (1962) - Précis de géomorphologie - 3ème édit. PARIS, Masson et Cie (1962).
- DERVIEUX F. (1959) - Renouveau de la nappe phréatique du Souf. Réunion d'information sur l'eau dans les corps poreux (St-Rémy de Chevreux, 22-23 Juin 1959).
- DUBREUIL P. (1974) - Initiation à l'analyse hydrologique - Masson et Cie, édition ORSTOM (1974).
- DUCHAUFOR Ph. (1970) - Précis de pédologie - Masson et Cie (1970).
- EMSELLEM Y. (1965) - Les transferts de pression entre nappes et la drainance dans les ensembles aquifères hétérogènes - Chronique d'hydrologie du B.R.G.M., n° 11, Juin 1965.
- FEODOROFF A. (1964) - Remarques sur le mécanisme de l'infiltration de l'eau non saturante sur un sol initialement sec. Compte-rendu de l'Académie des Sciences, PARIS, 259, pp. 4320-4322.

- FONTES J. CH., MOUSSIE C., - Phases humides au pléistocène supérieur et à l'holocène dans le sud de l'AFAR (TFAI). POUCHAN P. et WEIDMANN M. (1973) - Compte rendu de l'Académie des Sciences, PARIS, 277, pp. 1973-76, 12 novembre 1973.
- LEVEQUE P. (1969) - Emploi des traceurs radioactifs naturels et artificiels en hydrologie souterraine. La Houille Blanche n° 8, pp. 833, 846.
- MAILLAND-ROSSET G. (1976) - Etude d'un aquifère profond hétérogène en zone aride. Plaine du WADI AL HIRA et du WADI ABU SHAYBAH - LIBYE. Thèse de docteur de spécialité présentée à l'Université scientifique et médicale de GRENOBLE.
- MANGIN A. (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de doctorat ès-sciences présentée à l'Université de DIJON.
- MUTIN P. (1969) - Etude des mouvements de l'eau dans un sol argileux (Bassin versant représentatif du Miélan) Bulletin du B.R.G.M., 2ème série, section III, n° 4, 1969.
- MUTIN P. et CARRIERE A. (1974) - Simulation du rôle du sol en hydrologie de surface en pays aride. Bulletin du B.R.G.M., 2ème série, section III, n°2, 1974, pp. 187-192.
- MUTIN P. et SOEIRO F.A. (1969) - Infiltration en milieu naturel argileux. Interprétation physique des phénomènes. La Houille Blanche, n° 8, pp. 897, 906.
- OLIVE Ph. (1973) - Interprétation à l'hydrogéologie isotopique. Centre de recherches géodynamique de THONON (Cours 3^e cycle - PARIS VI).
- PEGUY Ch-P. (1961) - Précis de Climatologie Masson et Cie Editeurs.
- PILOT J. (1974) - Les isotopes en géologie (Méthodes et applications) Doin.
- POURRUT P. (1968) - Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques. Premiers résultats obtenus sur le Bassin de la Tapaina. Cahier ORSTOM - Série hydrologie - Vol. V, n° 2, 1968.
- REMIERAS G. (1972) - L'hydrologie de l'ingénieur. Collection du Laboratoire national d'hydraulique. Eyrolles - Ed. PARIS - 1972.
- ROYER J.M. (1974) - Détermination directe de l'évaporation et de l'infiltration sur bassin versant. Thèse de docteur-ingénieur présentée à l'université scientifique et médicale de GRENOBLE.

- SIWERTZ E. (1973) - Etude expérimentale par le tritium et l'oxygène-18 de l'infiltration sur les lysimètres et le bassin de THONON.
Thèse présentée à l'Université de PARIS VI pour l'obtention du doctorat de 3ème cycle.
- SMITH O.B. et RICHARDS H.J. (1974) - Les techniques à base de tritium naturel.
Bulletin du B.R.G.M. (2ème série). Section III, n° 2 1974, pp. 217-220.
- S.P.E.P.E. (1972) - Etude des mouvements de l'eau dans les sols non saturés.
Secrétariat permanent pour l'étude des problèmes de l'eau. Réunion de Versailles - 20-21 Janvier 1972
- TEHEL J. (1975) - Détermination in-situ de l'évapotranspiration réelle par les méthodes du bilan hydrique et du bilan d'énergie. Etude critique.
Thèse présentée à l'Université scientifique et médicale et à l'Institut Politechnique de GRENOBLE pour obtenir le titre de docteur ingénieur - 1975.
- TRIPET J.P. (1973) - Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse (Jura neuchâtelois).
Matériaux pour la Géologie de la Suisse.
Hydrologie, 1973, n° 21.

ANNEXE

Carte de localisation des points d'observation
Carte d'isotempérature et d'isohumidité
Carte des isohyètes moyennes annuelles
Carte des formations sous recouvrement
Courbe d'étalonnage de la sonde à neutrons
Profils hydriques
Graphiques des variations des niveaux piézométriques
Carte de la baisse des niveaux piézométriques observée de 1972 à 1975
Carte de la baisse des niveaux piézométriques observée de juillet 1974 à juillet 1975
Carte des remontées des niveaux piézométriques pour l'année 1974-1975.

Carte de localisation
des
points d'observation

Carte n° 1A

LEGEND

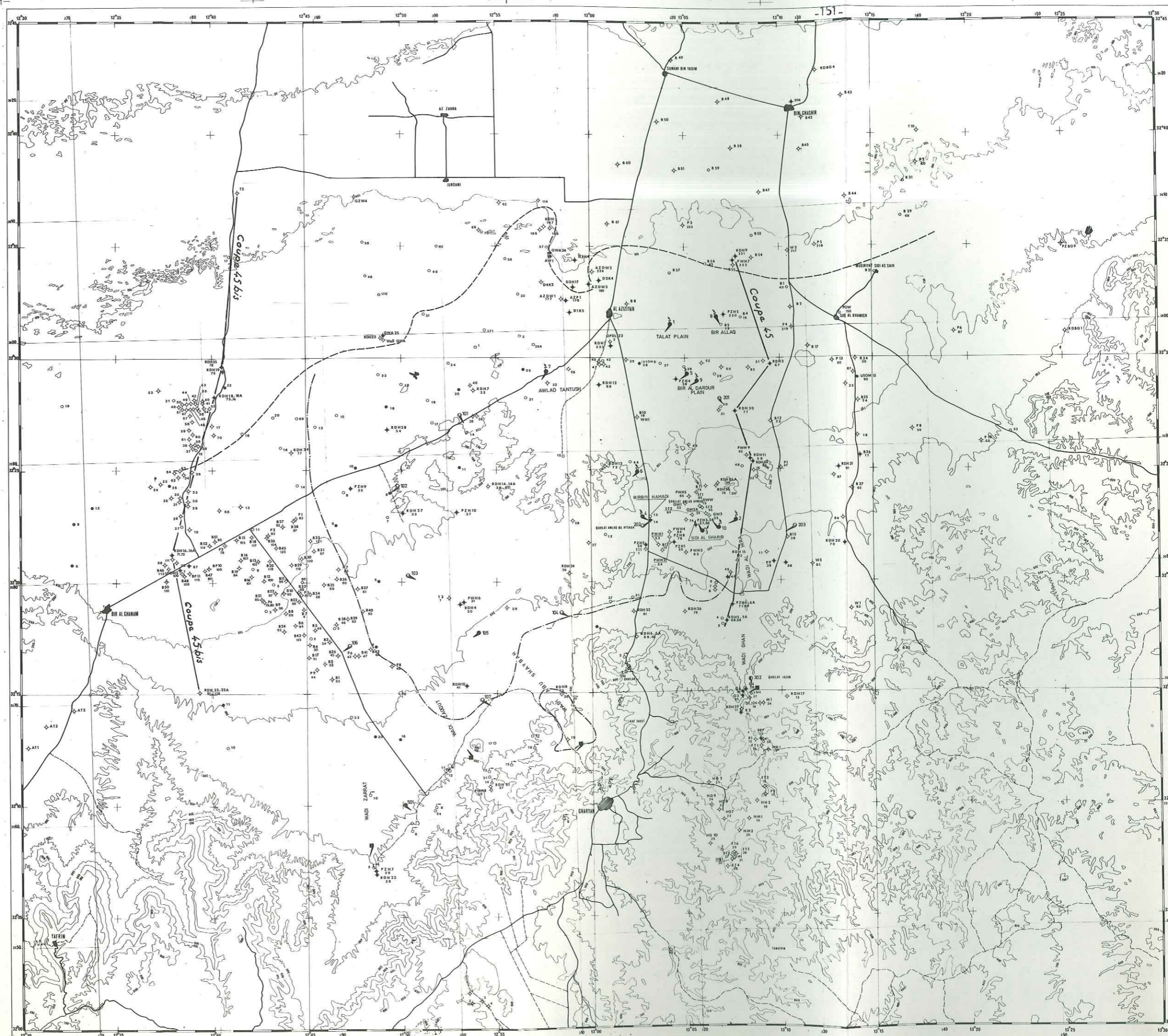
- Well - Puits
- ⊕ Non artesian drilling - Forage non artésien
- ⊕ Artesian drilling - Forage artésien
- ⊕ Spring - Source
- ⊕ Well name - Nom du puits
- ⊕ Well number in WRI system - Numéro du puits dans le système WRI (Water Resources Inventory)
- Water point 32 belongs to the 1/50,000 map 1989 I, its number in the WRI system will be 1989 I 32
Le point d'eau 32 appartient à la carte au 1/50 000 1989 I, son numéro dans le système WRI sera 1989 I 32
- ⊕ Wells or drillings for which a piezometric level variation graph has been drawn up
Puits ou forages pour lesquels il a été tracé un graphique de variation du niveau piézométrique
- ⊕ Soil water content measurement site
Site de mesure de la teneur en eau du sol
- ⊕ Rain gauge - Pluviomètre
- ⊕ Rain gauge recorder - Pluviographe
- ⊕ Climatological station - Station météo
- ⊕ Water level recorder - Limnigraphe
- Northern limit of extension of the Abu Shaybah formation
Limite d'extension Nord de la formation de l'Abu Shaybah
- Southern limit of extension of the green clays
Limite d'extension Sud de la formation des argiles vertes

Assemblage of the 1/50,000 scale maps
Assemblage des cartes au 1/50 000

1989 II	1990 II	1990 III	1990 II
1989 IV	1989 I	1989 IV	1989 I
1989 III	1989 II	1989 III	1989 II

Equivalence of the curves: 100 metres except in the plain 50 metres
Équivalence des courbes: 100 mètres sauf en plaine 50 mètres

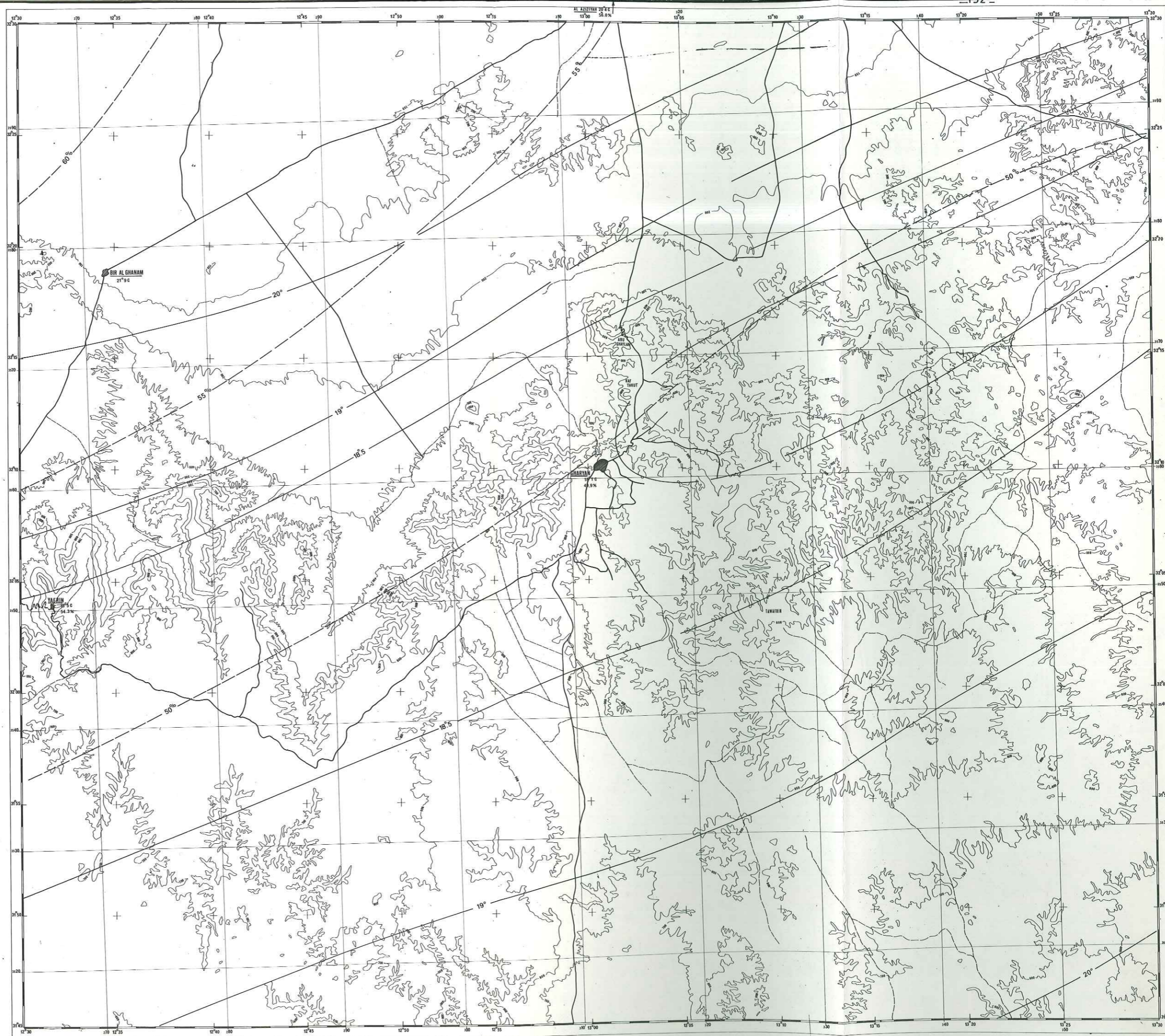
Scale: 1/100,000



CARTE CLIMATOLOGIQUE

Courbes d'isotherme
et d'isohumidité
tracées à partir des
moyennes annuelles.

Carte n° 2A



— 20°C Iso-temperature curve 20°C — Courbe isotherme 20°C
 - - - 50% Iso-humidity curve 50% — Courbe isohumidité 50%
 Harar 14.8°C
 Yaerin 20.5°C
 Bir al Ghanam 21.9°C



Mean values of humidity and temperature calculated from the sequences of data 1930, 1940, 1956, 1971
 Valeur moyenne des humidités et des températures calculées à partir des séries de données 1930, 1940, 1956, 1971

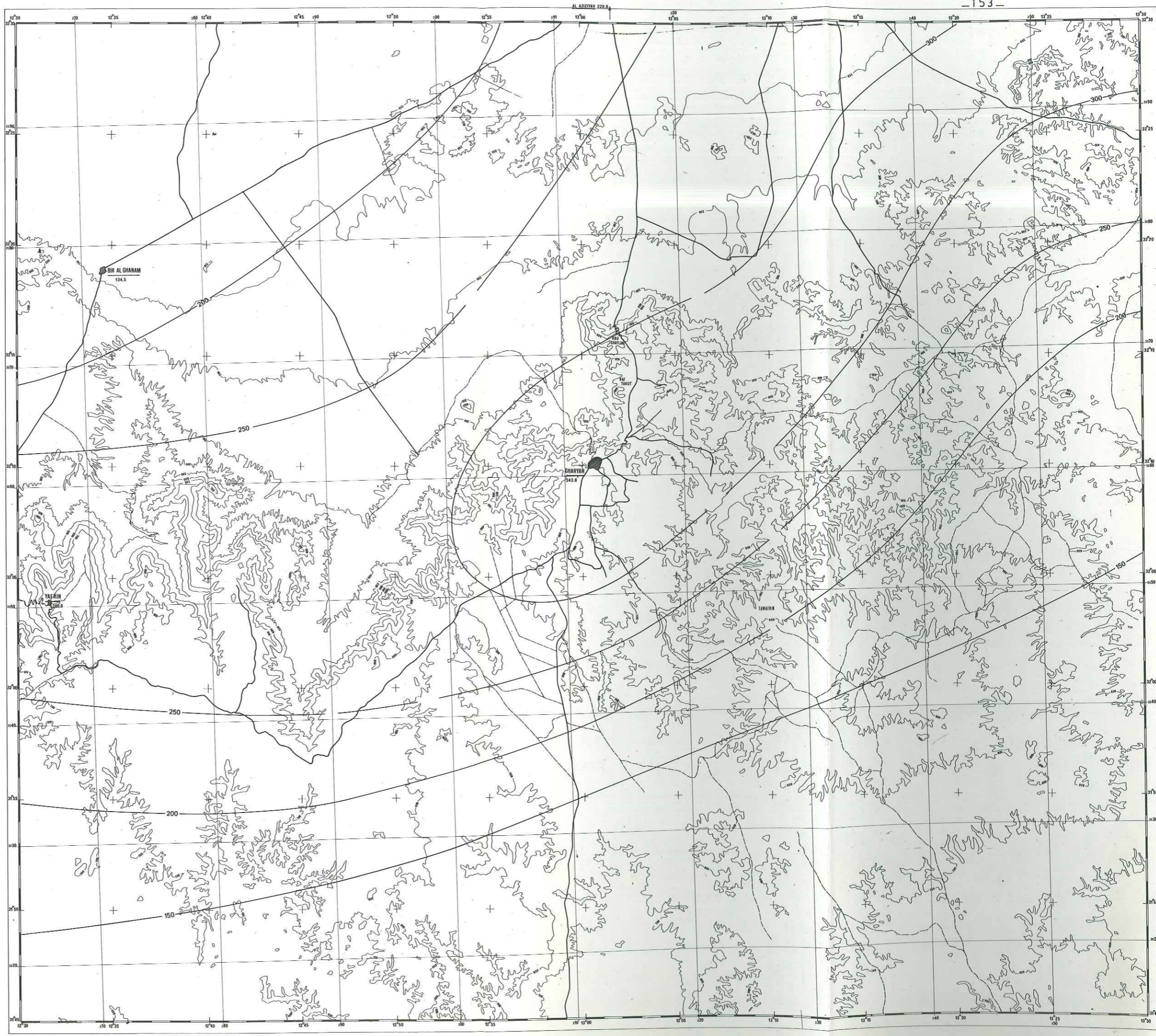
Assemblage of the 1:50,000 scale maps
 Assemblage des cartes au 1/50 000

1989 IV	1889 I	1989 IV	1989 I
1989 III	1889 II	1989 III	1989 II
1888 IV	1888 I	1988 IV	1988 I

Equidistance of the curves: 100 metres except in the plain 50 metres
 Equidistance des courbes: 100 mètres sauf en plaine 50 mètres

Carte des
isohyètes moyennes
annuelles.











Carte n° 3A



Carte n° 4A

ECORCHE GEOLOGIQUE
SOUS LE RECOUVREMENT

— LEGEND —

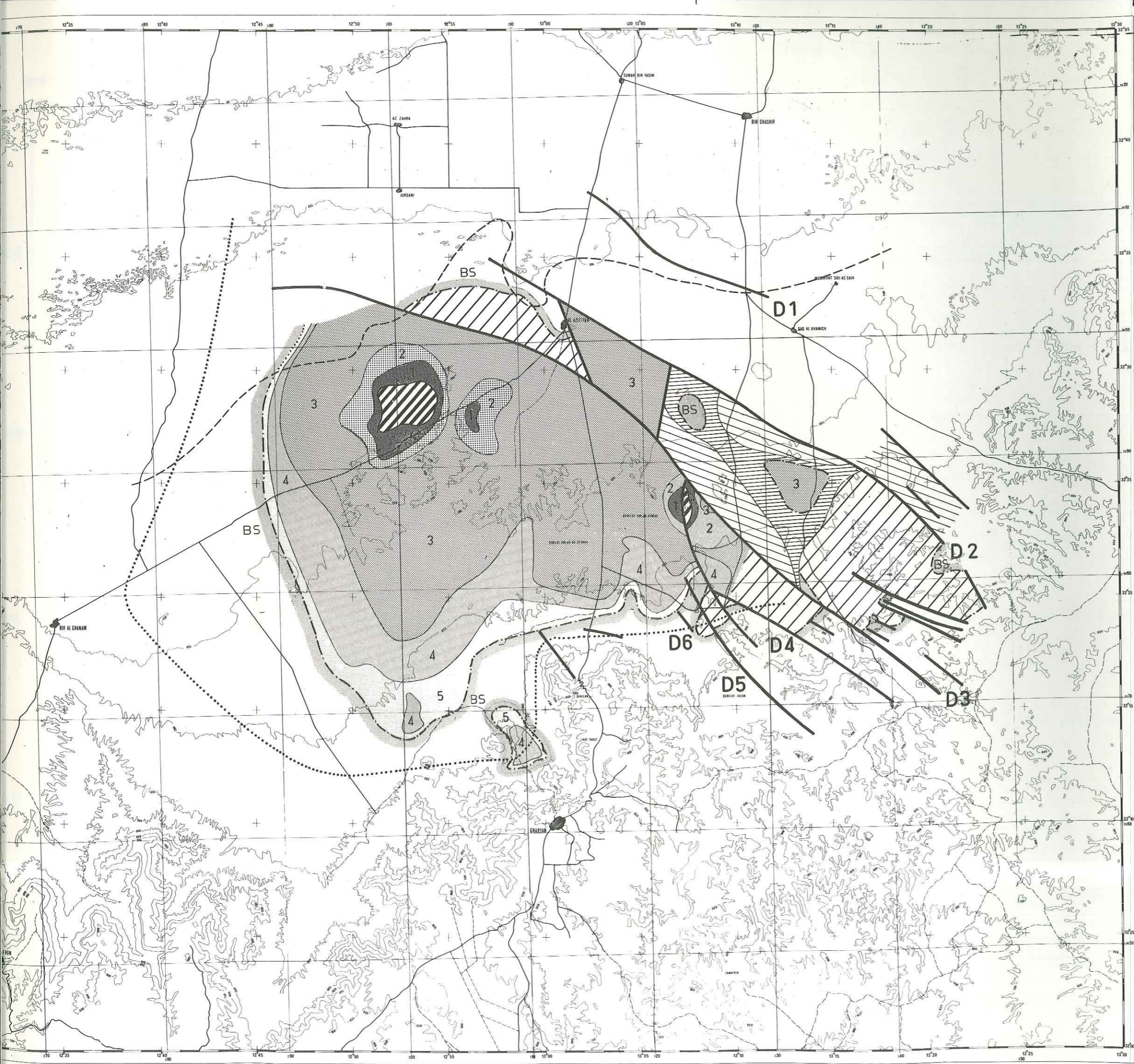
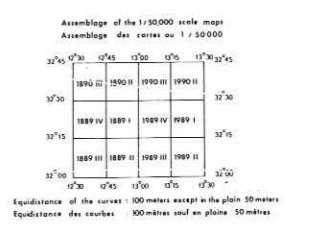
-  Ain Tobi Fm.
-  Kiklah Fm.
-  Abu Shaybah Fm.
-  Al Aziziyah Fm. { indifférencié
indifferentiated
-  Al Aziziyah Fm. horizon 5
-  Al Aziziyah Fm. horizon 4
-  Al Aziziyah Fm. horizon 3
-  Al Aziziyah Fm. horizon 2
-  Al Aziziyah Fm. horizon 1
-  Ras Hamia Fm.

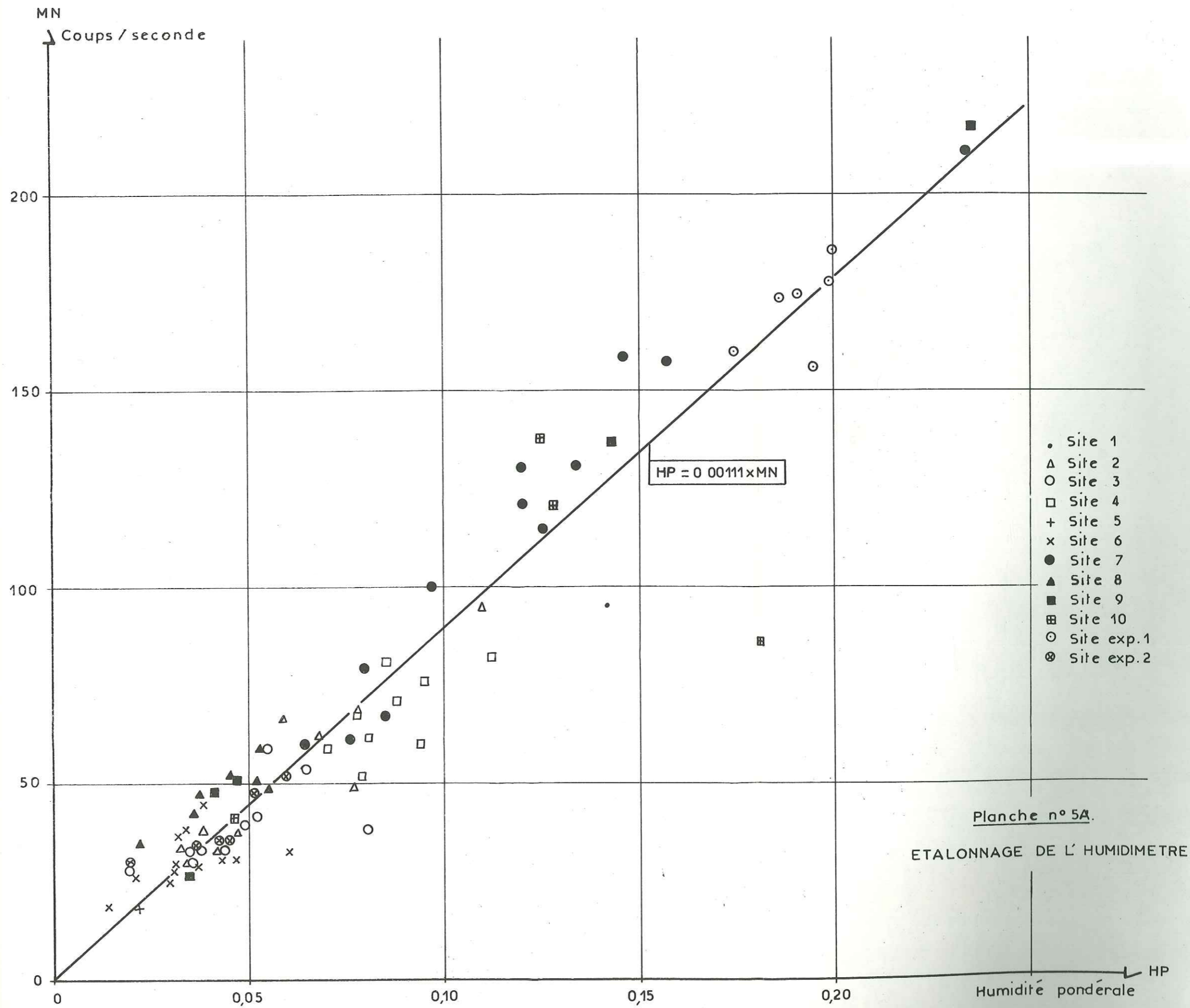
..... Southern and Western limit of the dolomitic limestone facies of the AL AZIZIYAH Fm. - Limite sud et ouest d'extension des facies calcaireodolomitiques de la formation AL AZIZIYAH.

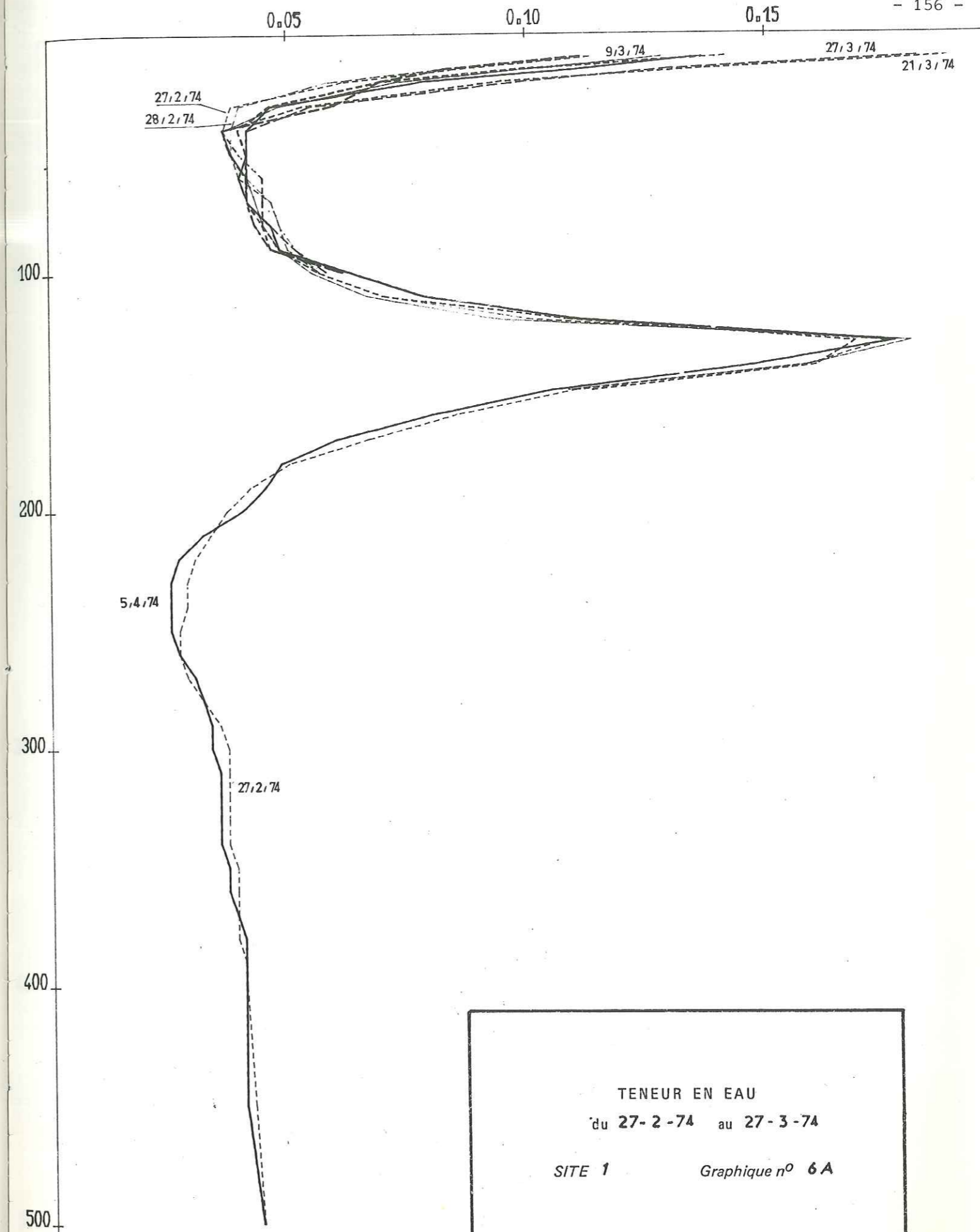
- - - - - Limit of total erosion of ABU SHAYBAH formation
Limite d'érosion totale de la formation ABU SHAYBAH

- - - - - Southern limit of extension of the "green clays"
Limite sud d'extension des "argiles vertes"

— Fault - Faille

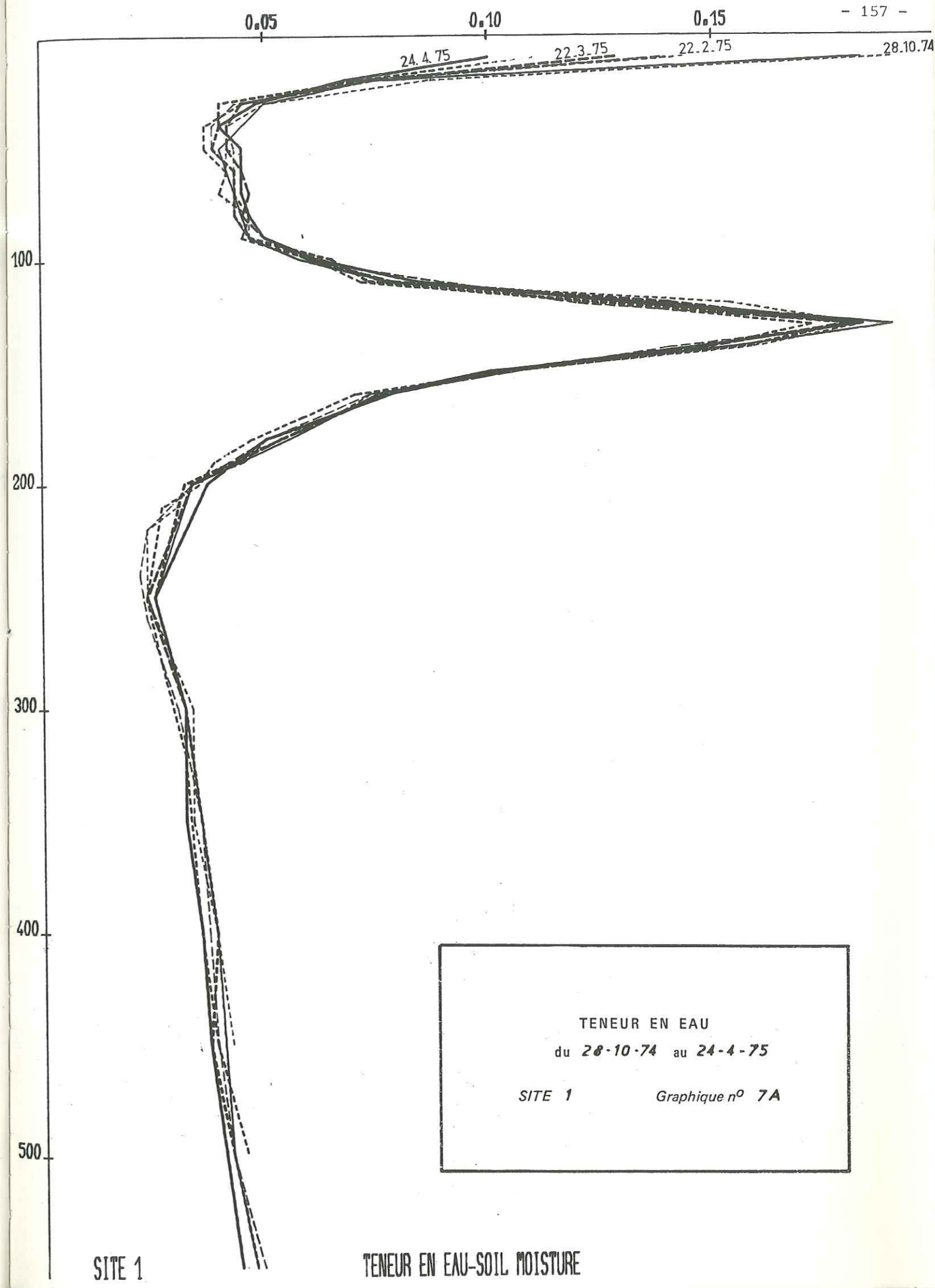


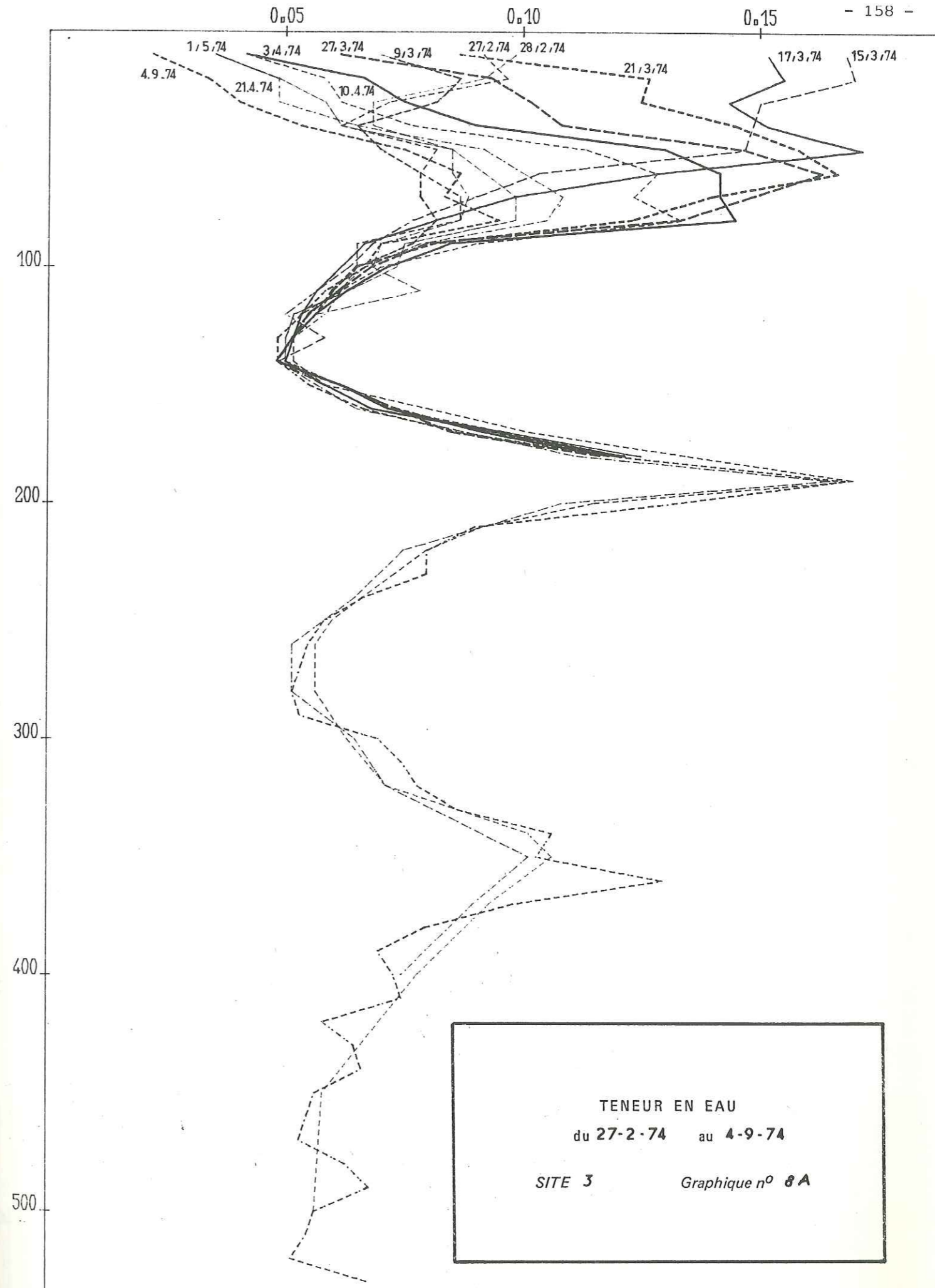




SITE 1

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

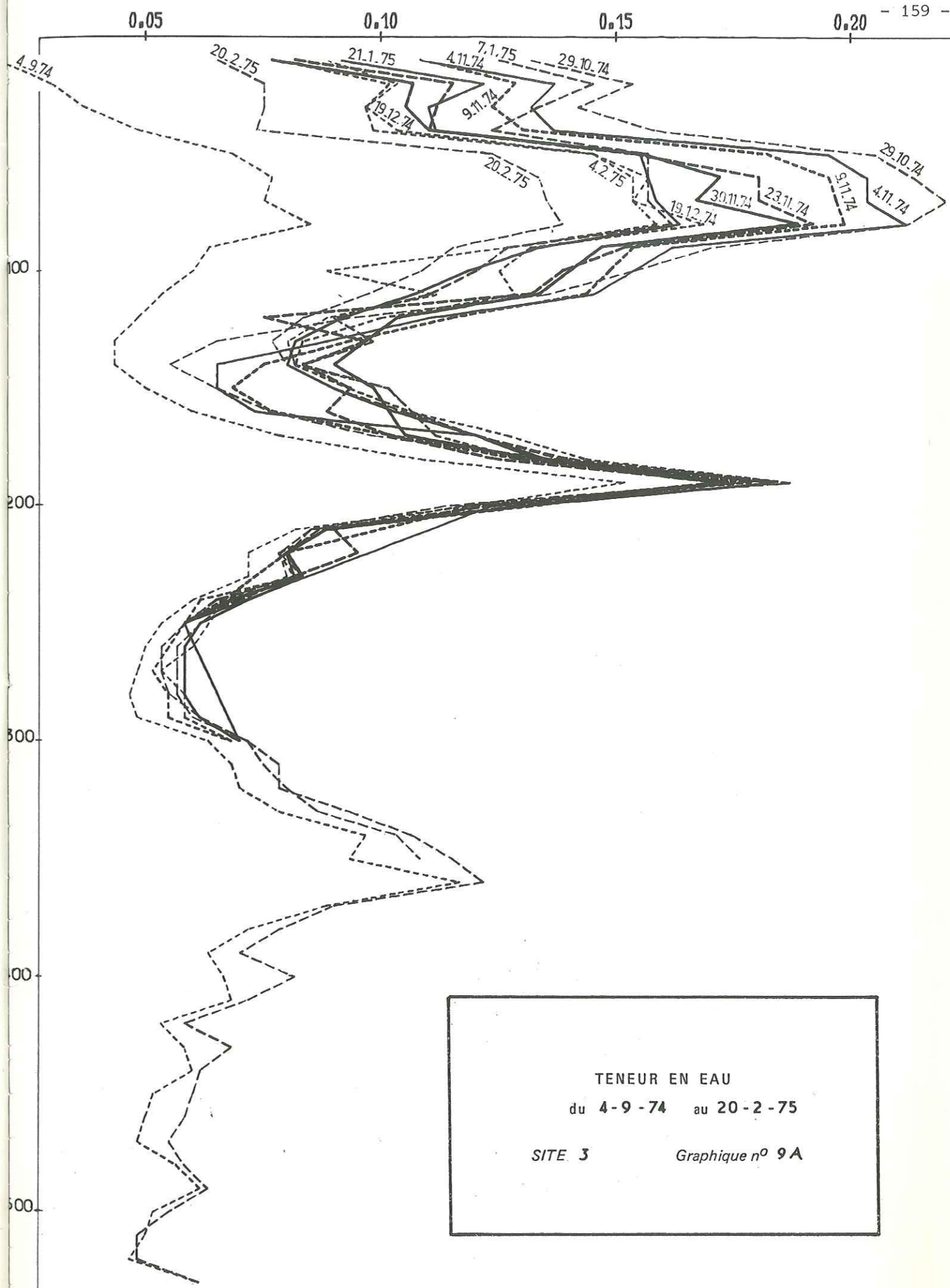




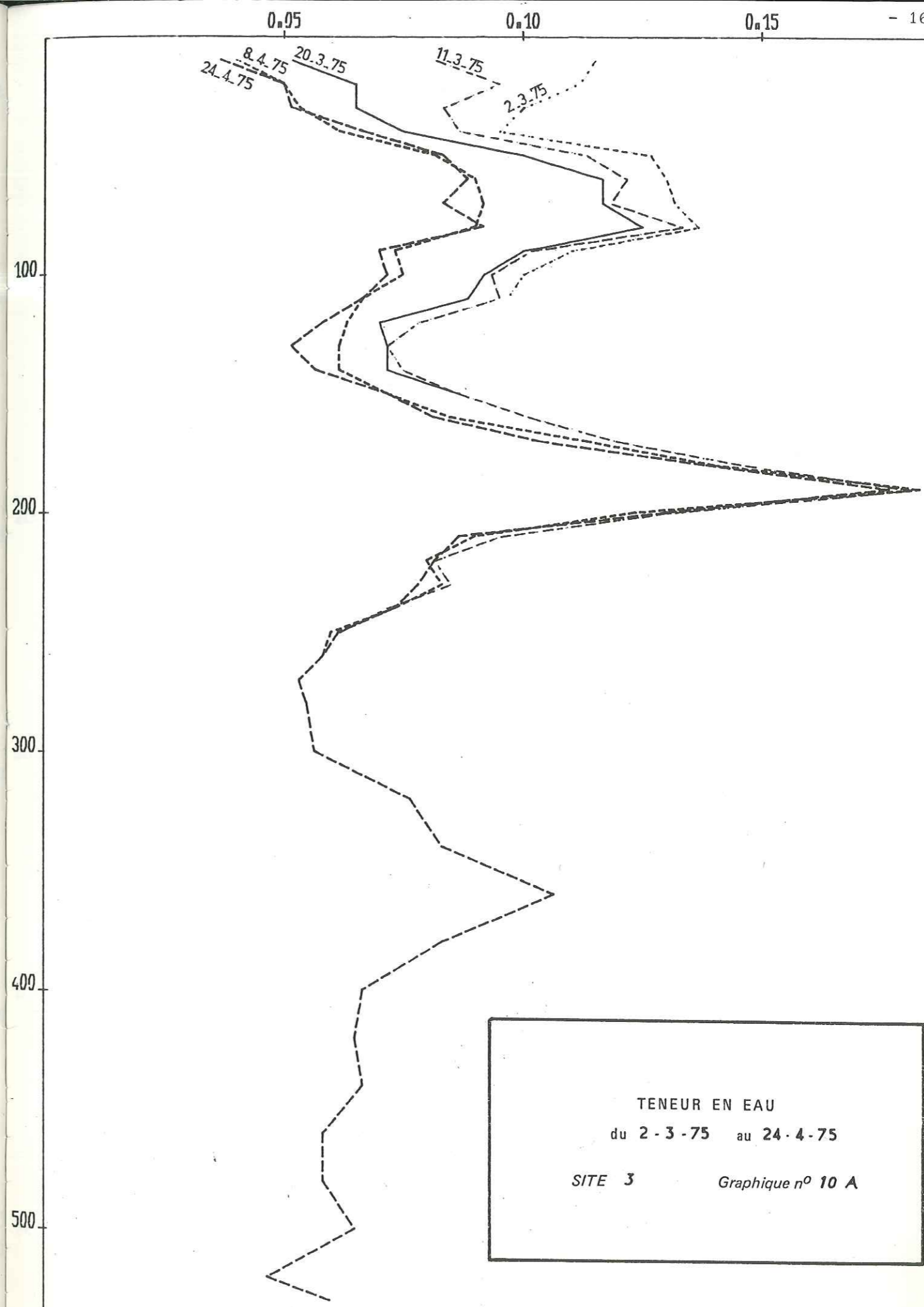
TENEUR EN EAU
 du 27-2-74 au 4-9-74
 SITE 3 Graphique n° 8A

SITE 3

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



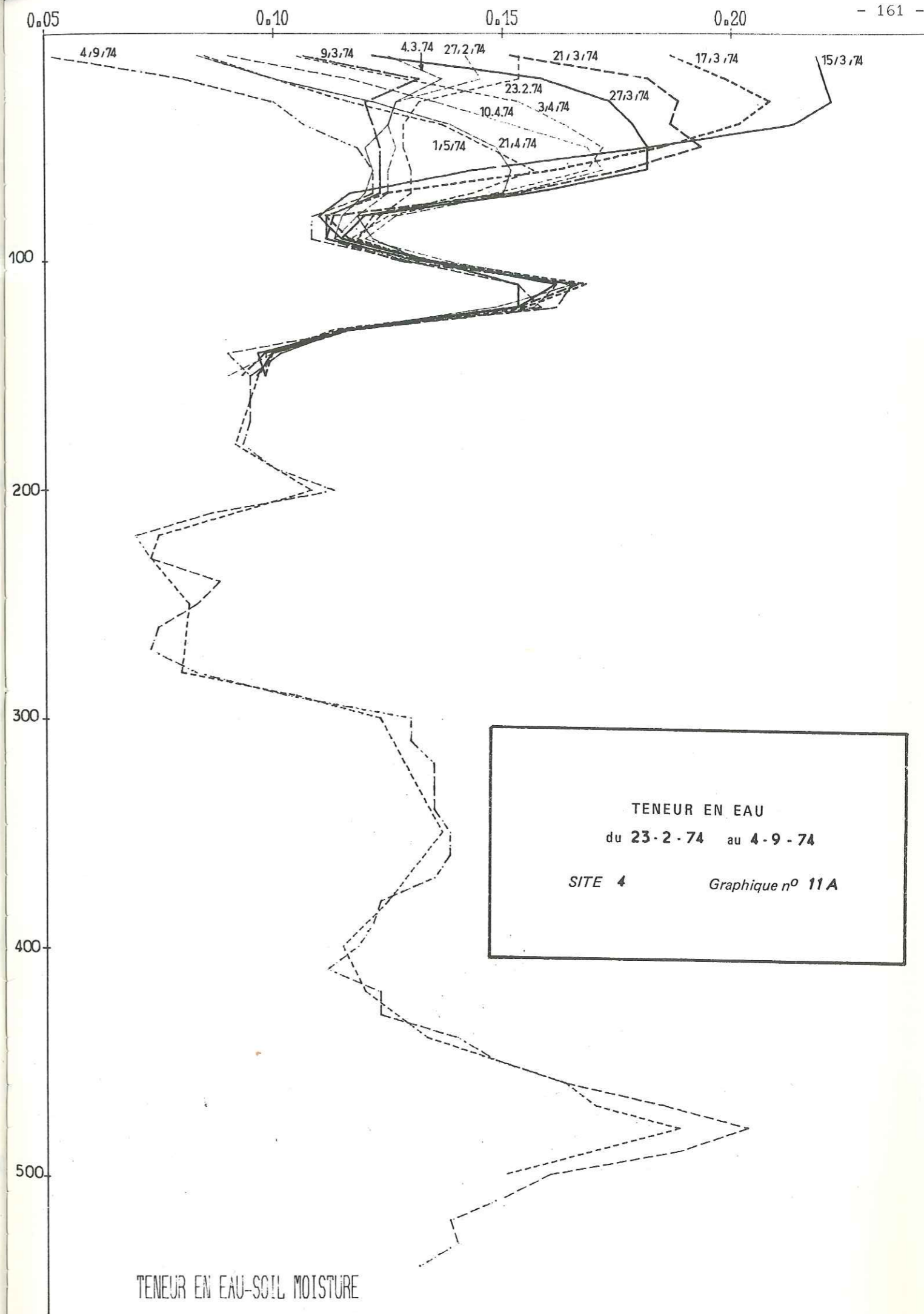
TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



TENEUR EN EAU
du 2-3-75 au 24-4-75
SITE 3 Graphique n° 10 A

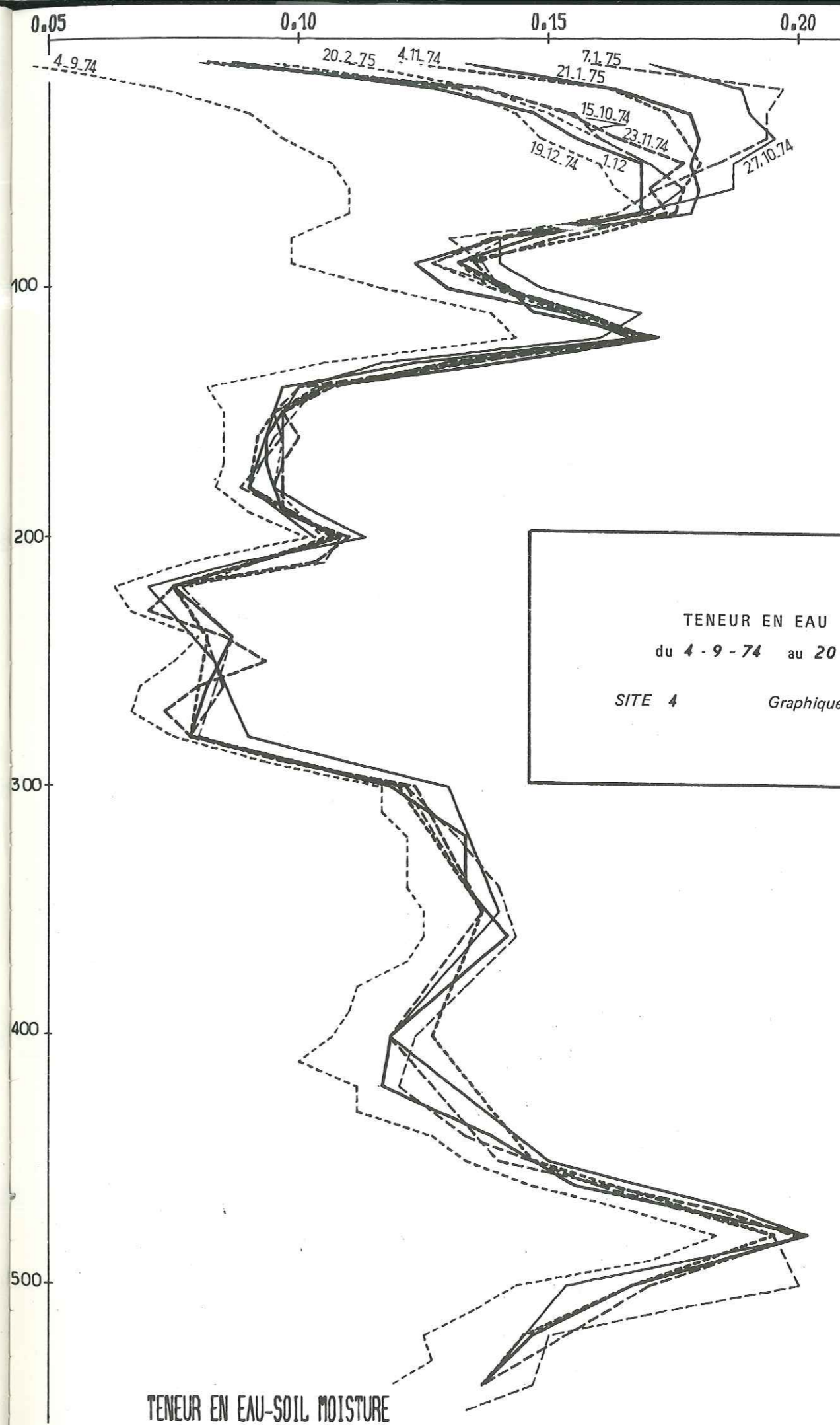
SITE 3

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



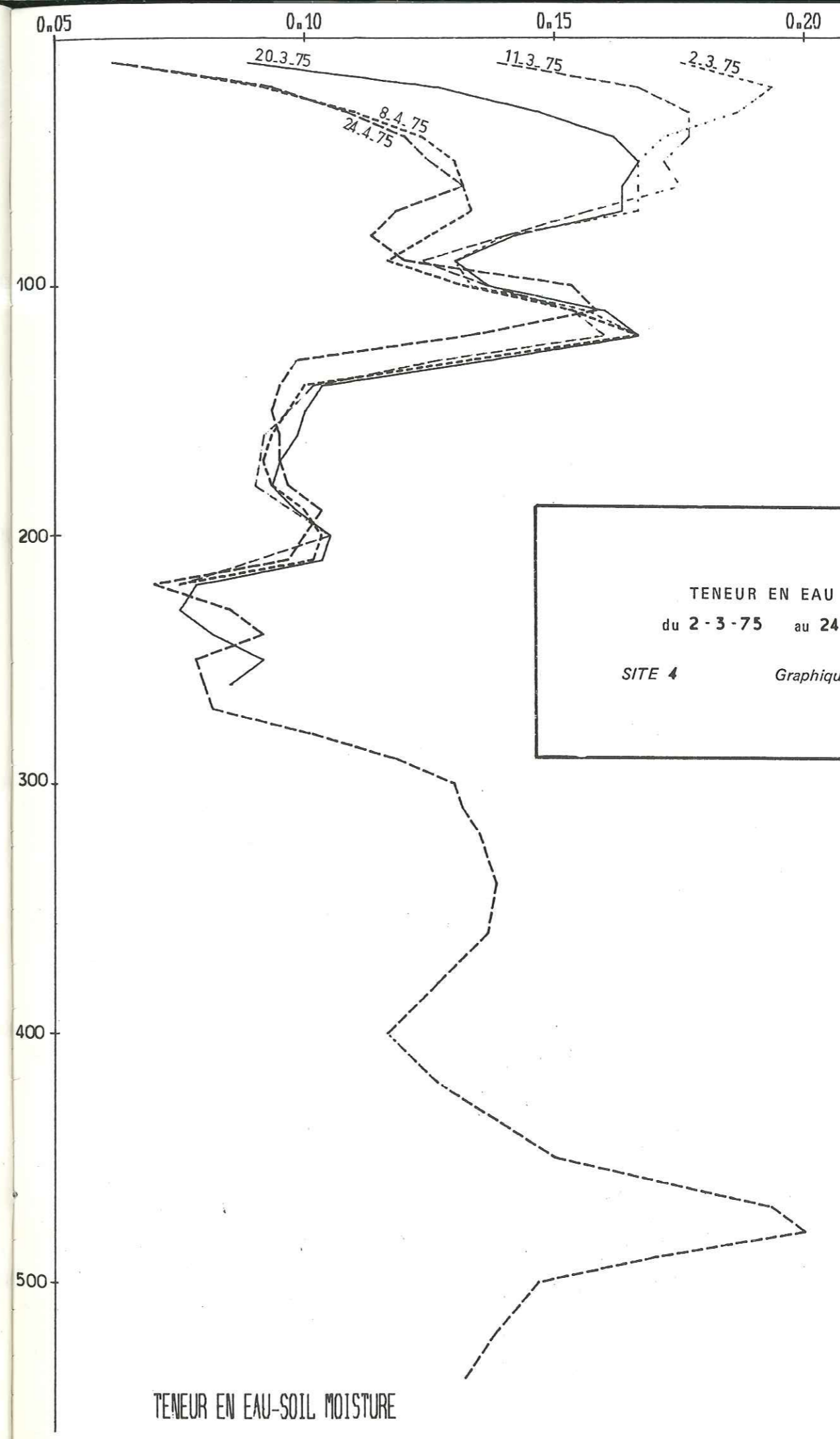
TENEUR EN EAU
du 23-2-74 au 4-9-74
SITE 4 Graphique n° 11A

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



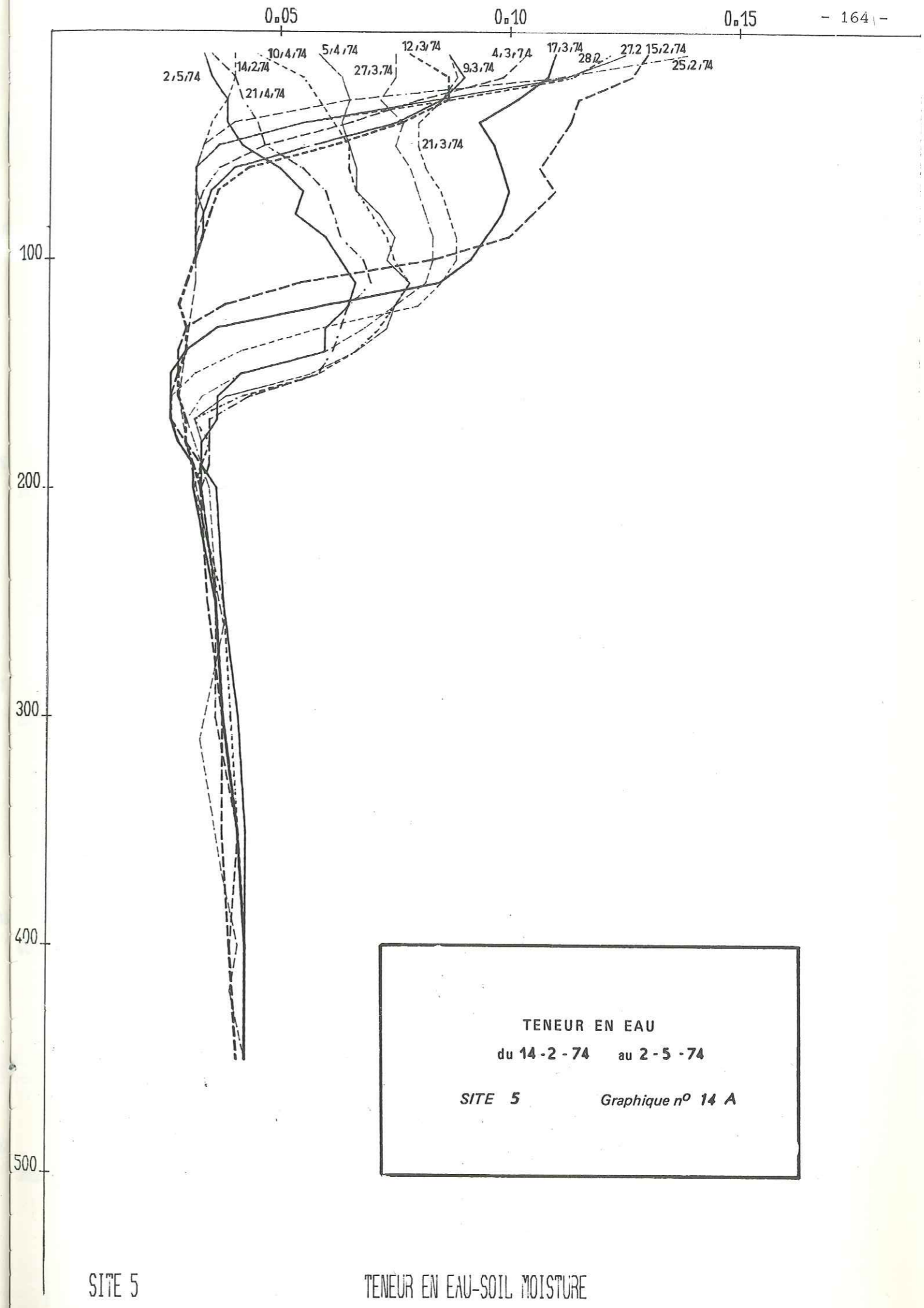
TENEUR EN EAU
du 4-9-74 au 20-2-75
SITE 4 Graphique n° 12 A

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



TENEUR EN EAU
du 2-3-75 au 24-4-75
SITE 4 Graphique n° 13 A

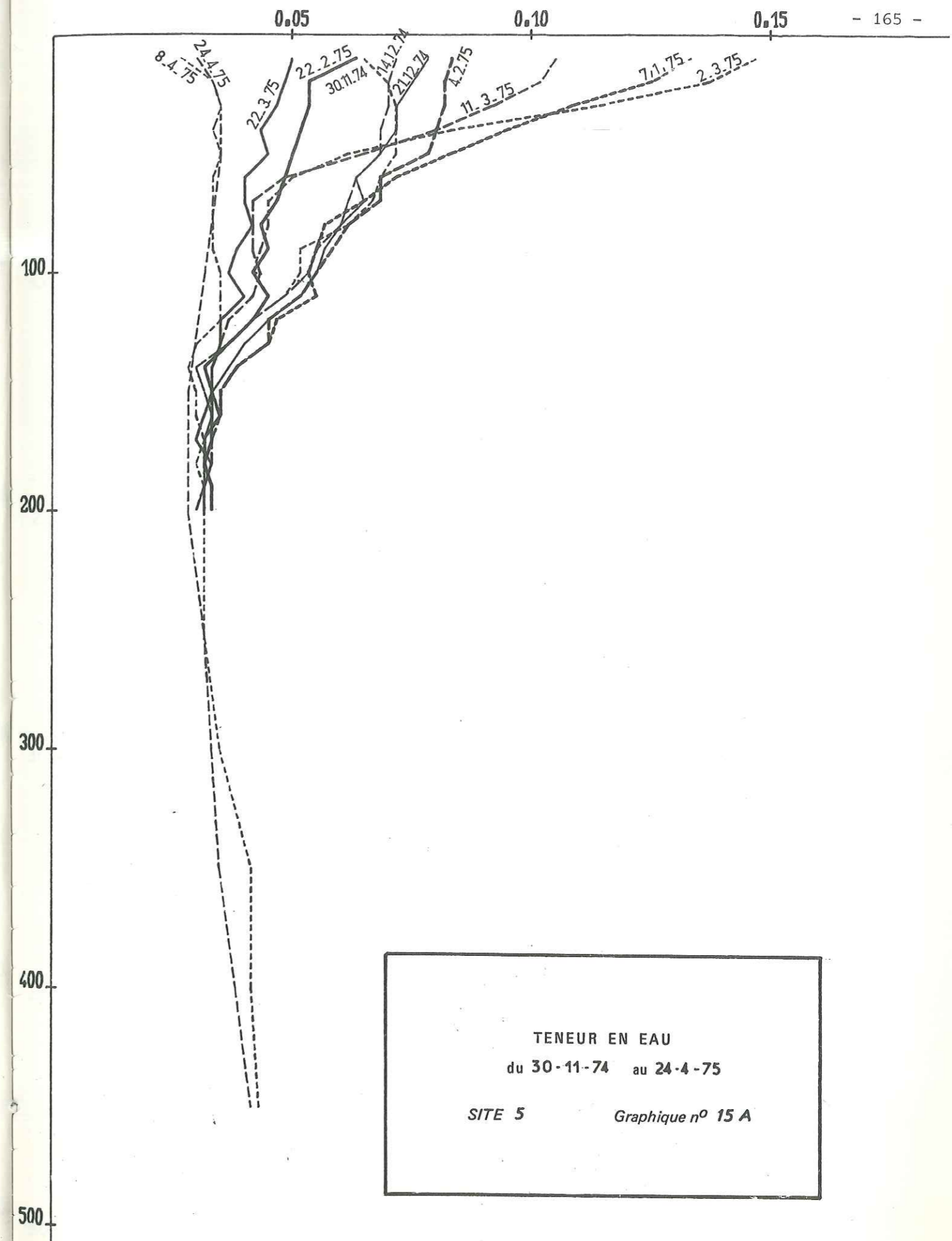
TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



TENEUR EN EAU
du 14-2-74 au 2-5-74
SITE 5 Graphique n° 14 A

SITE 5

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



TENEUR EN EAU
du 30-11-74 au 24-4-75
SITE 5 Graphique n° 15 A

SITE 5

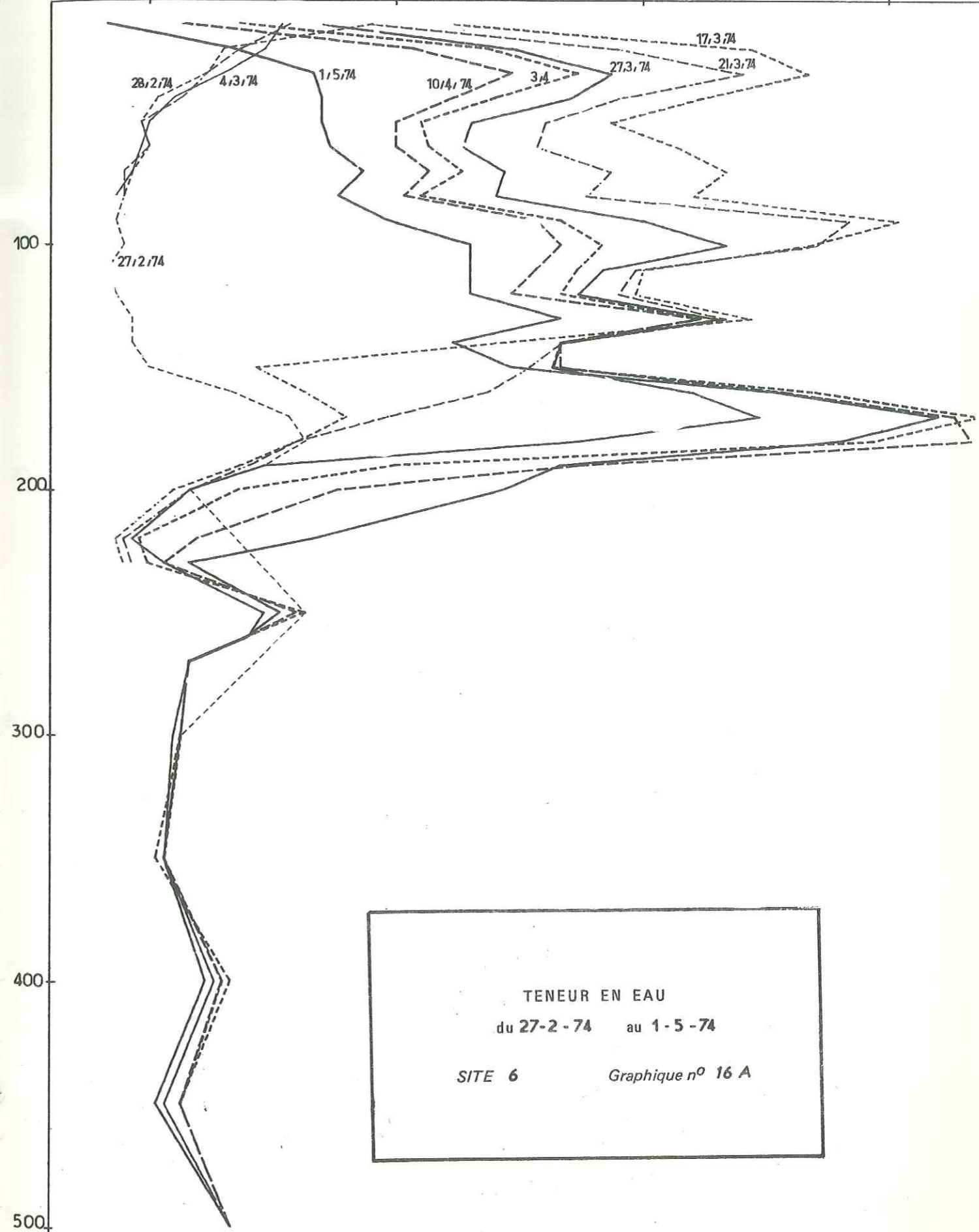
TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

0,05

0,10

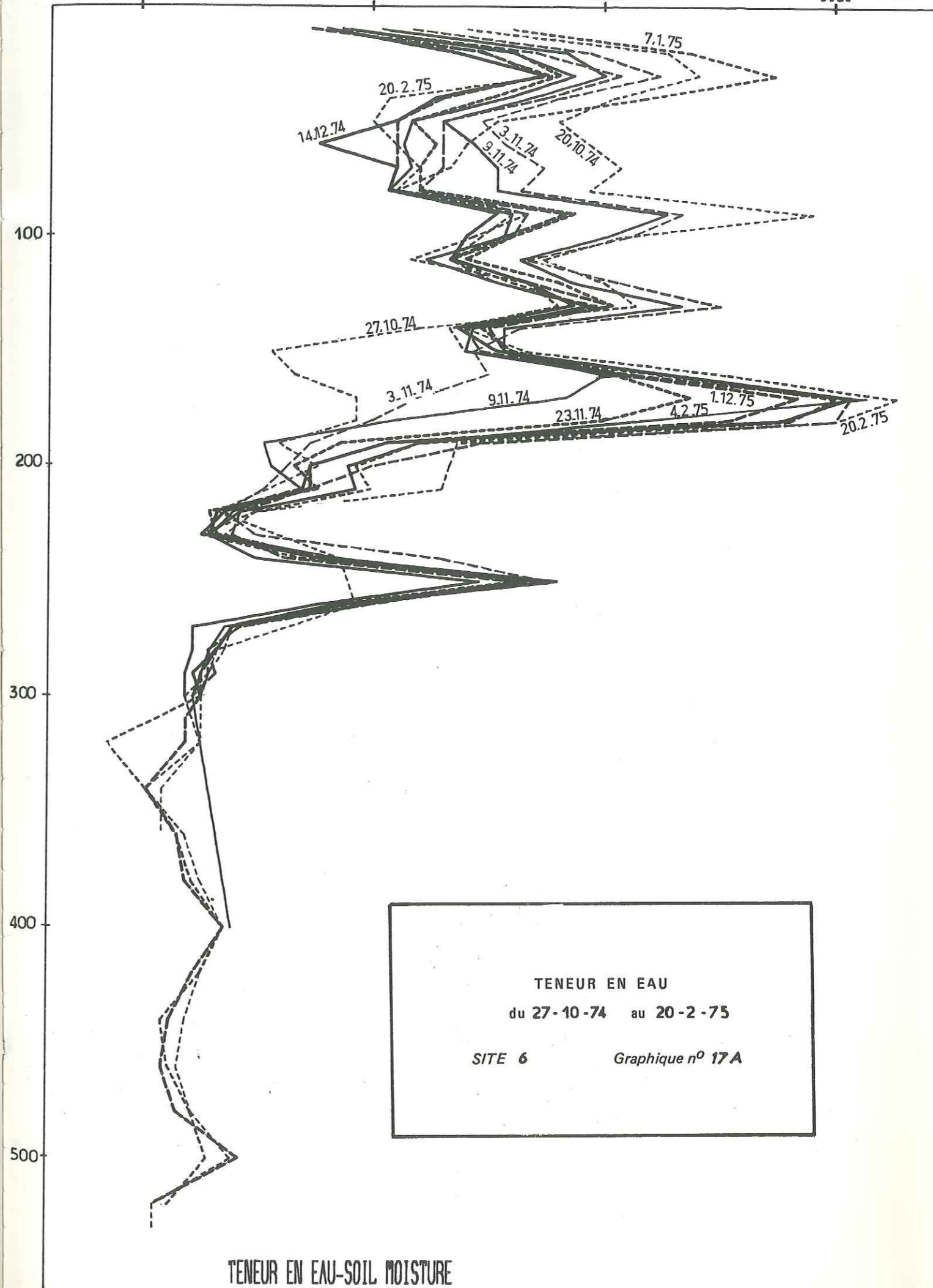
0,15

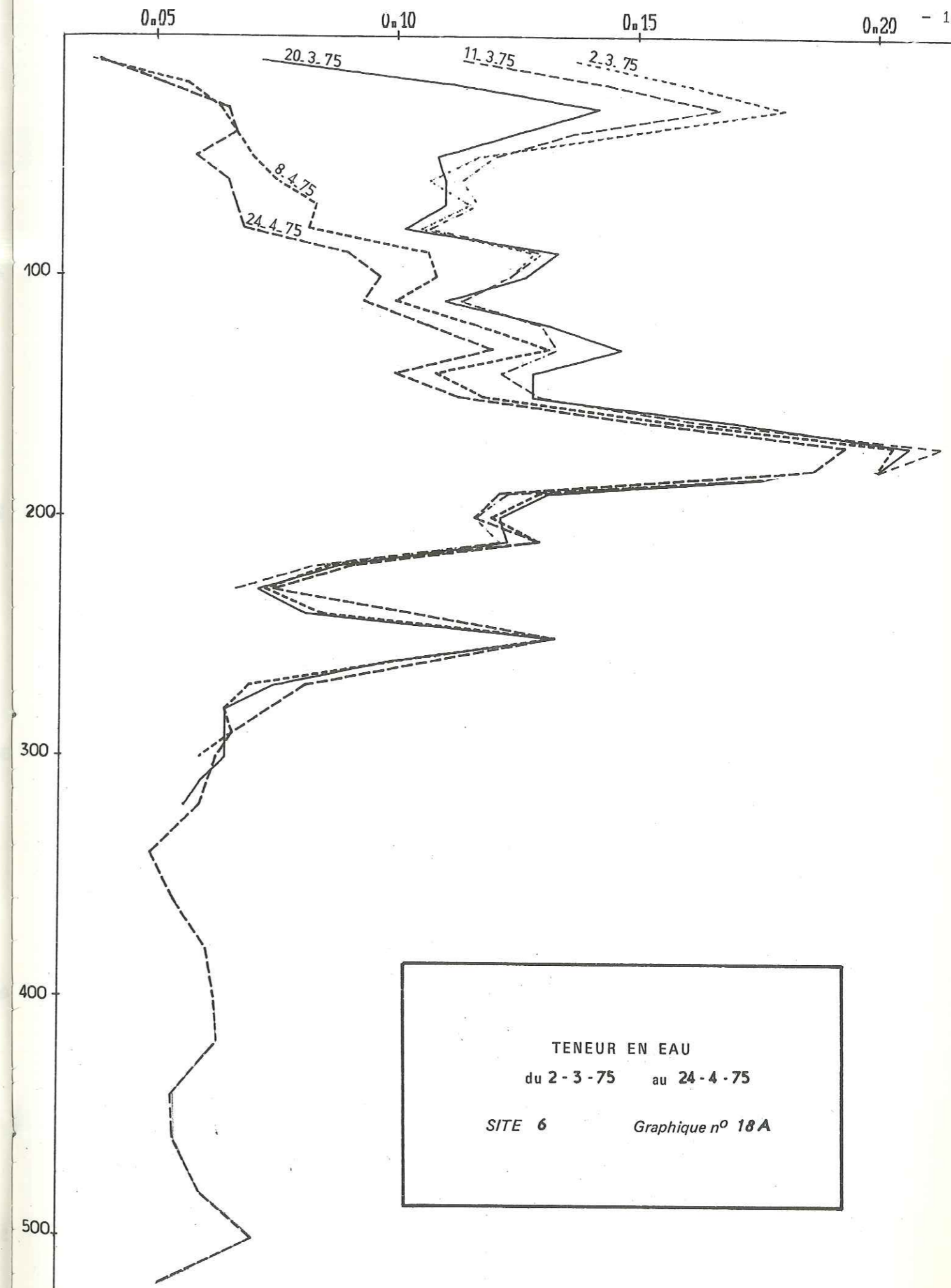
0,20 - 166 -



TENEUR EN EAU
 du 27-2-74 au 1-5-74
 SITE 6 Graphique n° 16 A

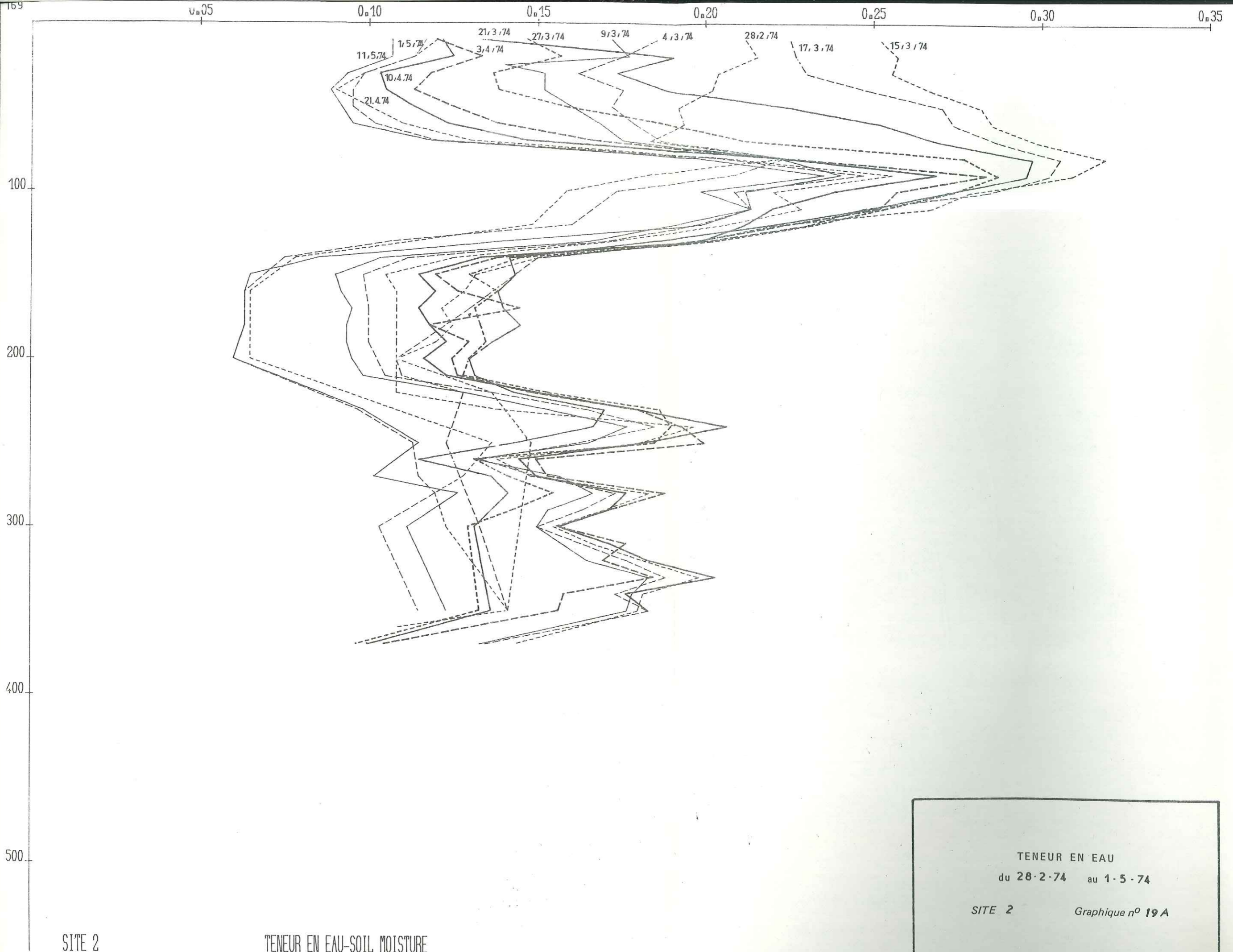
TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE





TENEUR EN EAU
du 2-3-75 au 24-4-75
SITE 6 Graphique n° 18A

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



SITE 2

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 28-2-74 au 1-5-74
 SITE 2 Graphique n° 19A

170

0.05

0.10

0.15

0.20

0.25

0.30

0.35

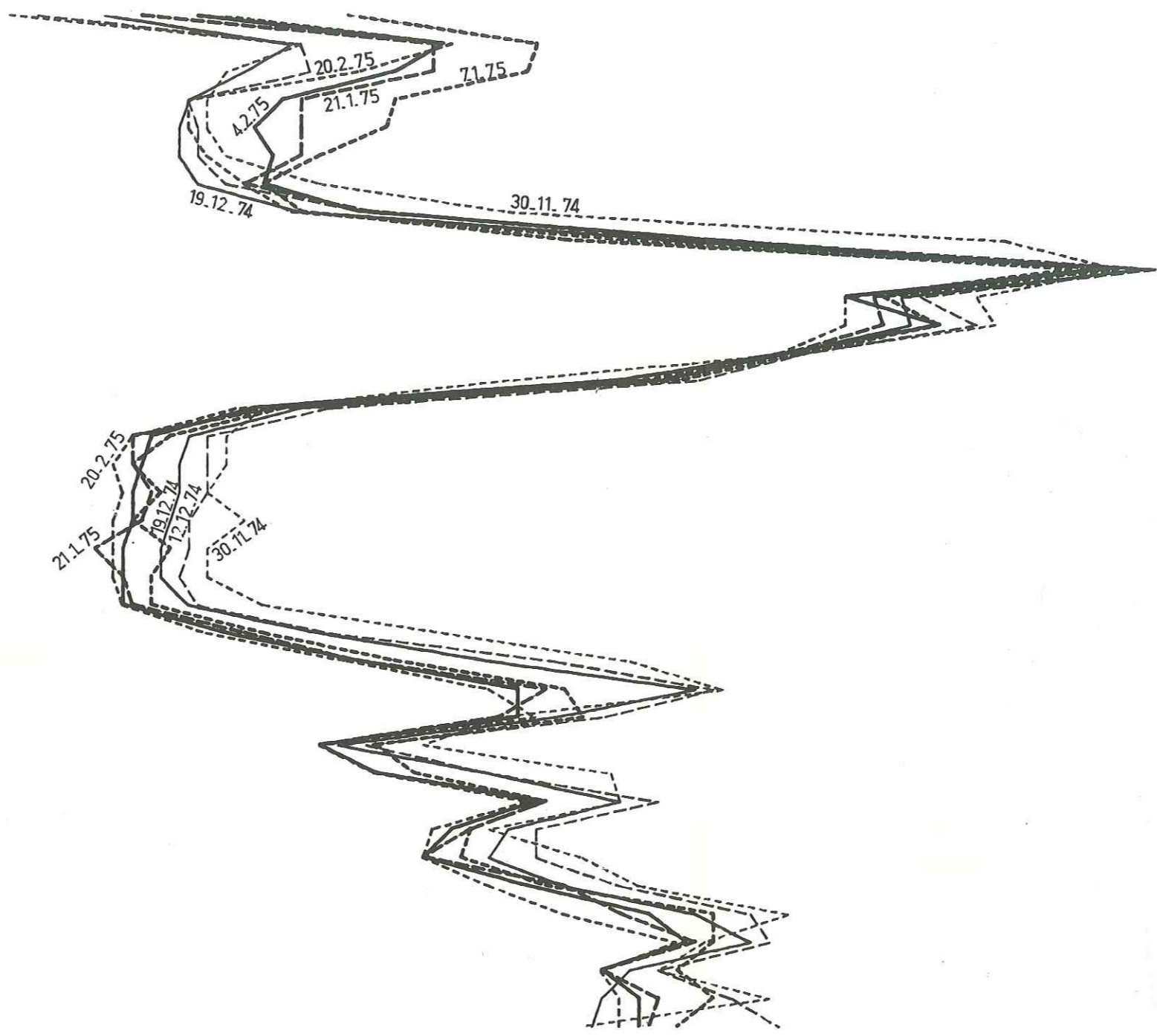
100

200

300

400

500



SITE 2

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 30-11-74 au 20-2-75
 SITE 2 Graphique n° 20 A

171

100

200

300

400

500

0.05

0.10

0.15

0.20

0.25

0.30

0.35

24.4.75

8.4.75

20.3.75

11.3.75

2.3.75

24.4.75

8.4.75

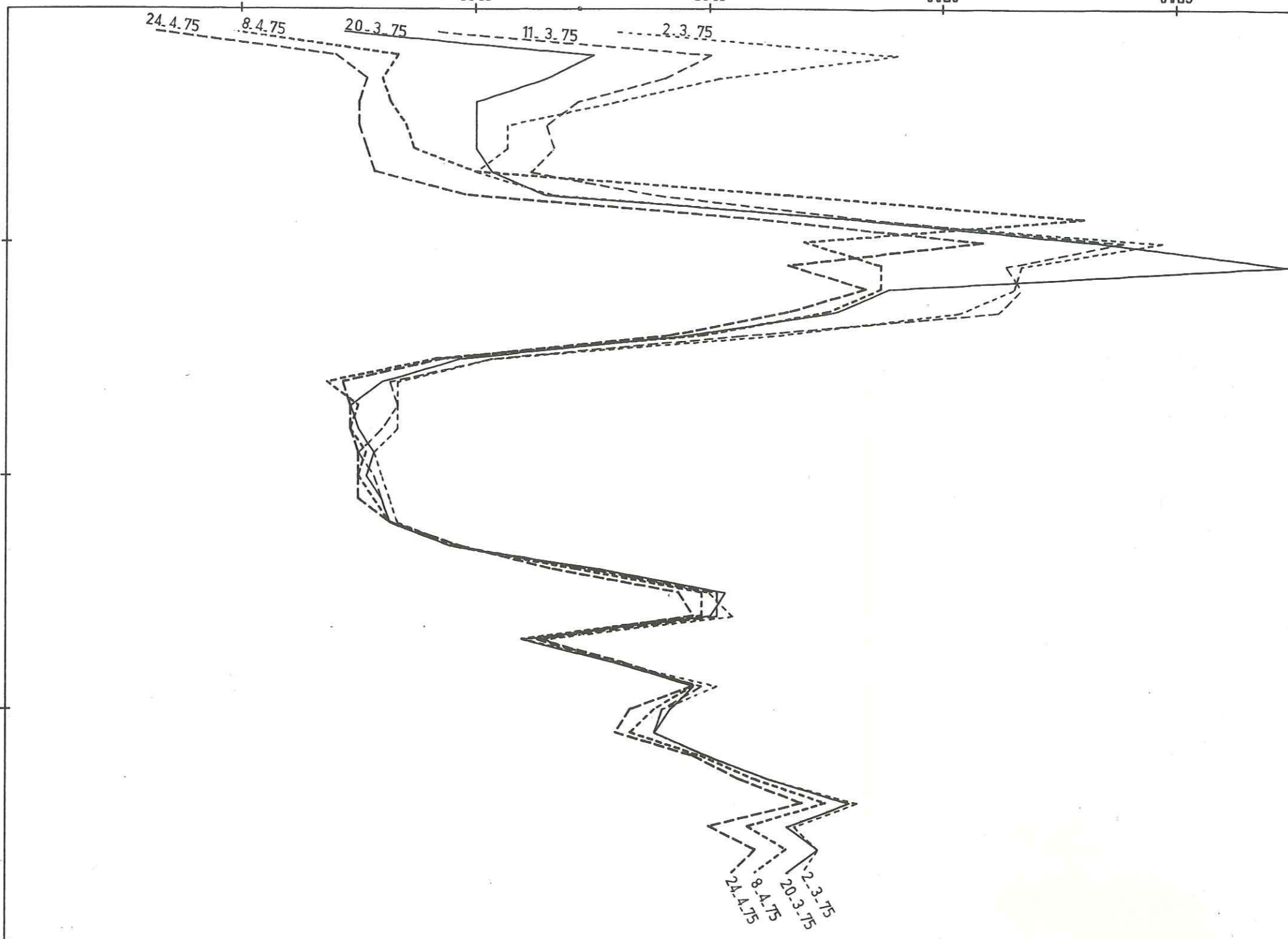
20.3.75

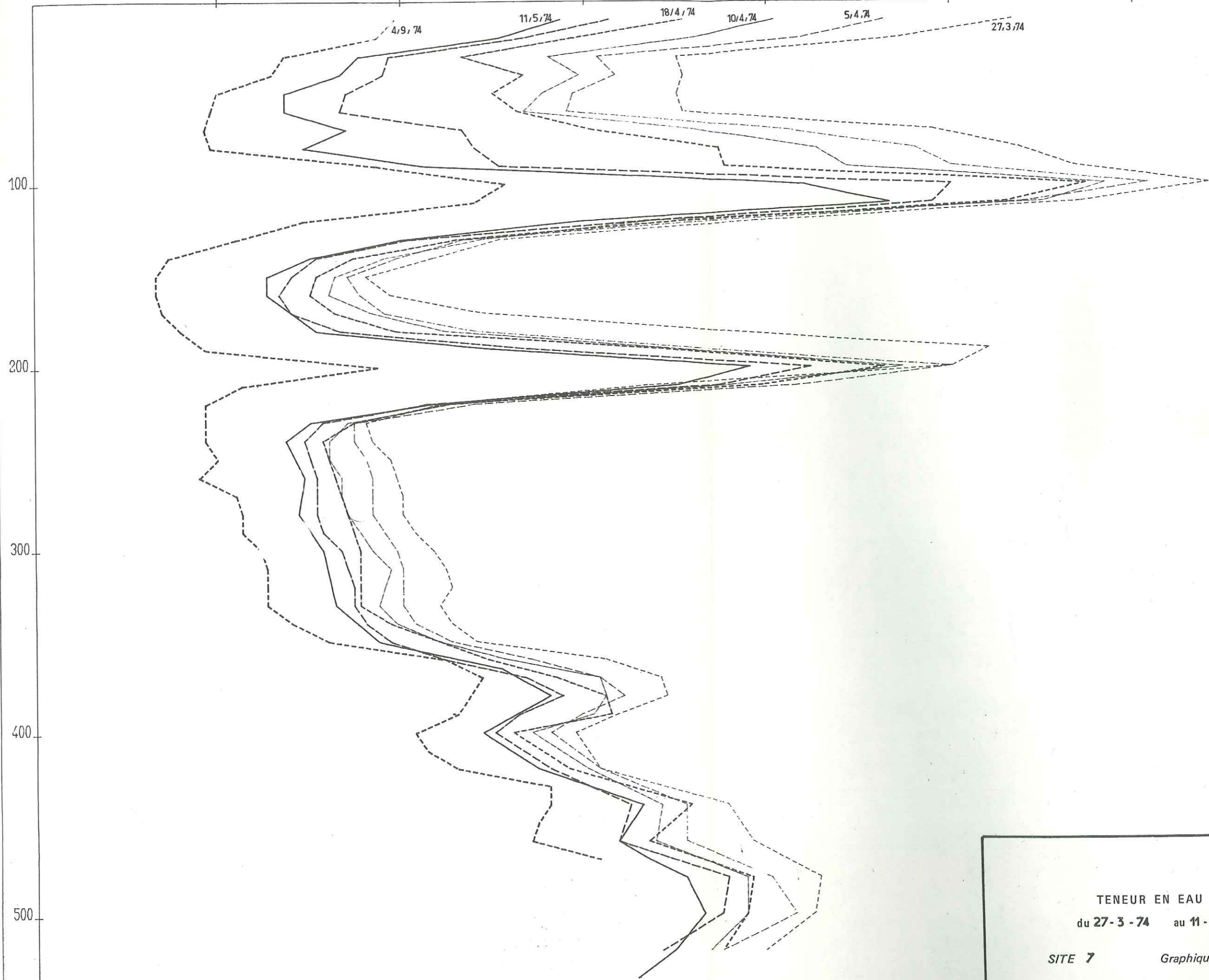
2.3.75

SITE 2

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 2-3-75 au 24-4-75
 SITE 2 Graphique n° 21 A





SITE 7

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 27-3-74 au 11-5-74
 SITE 7 Graphique n° 22 A

100

200

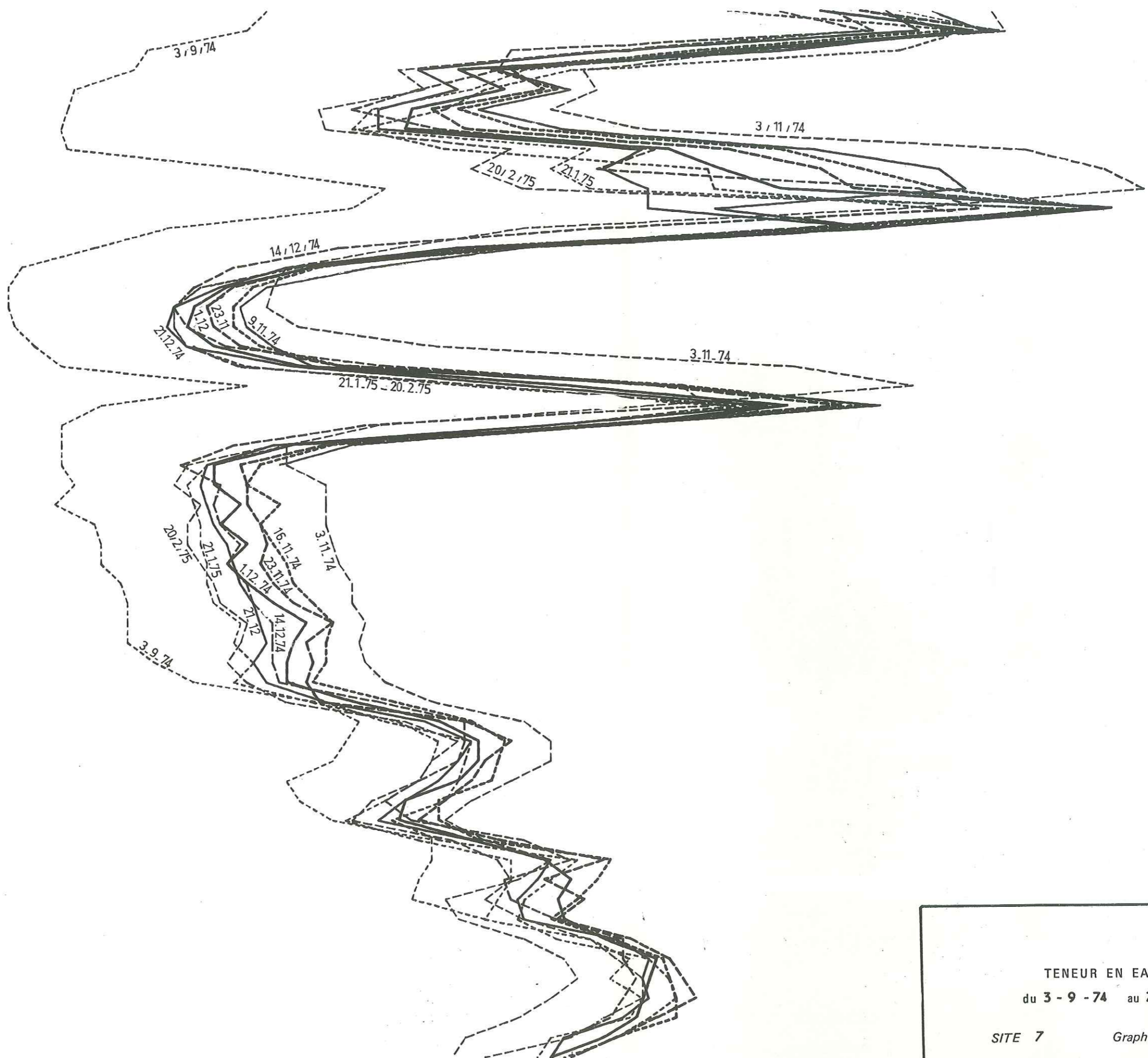
300

400

500

SITE 7

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE



TENEUR EN EAU
 du 3 - 9 - 74 au 20 - 2 - 75
 SITE 7 Graphique n° 23 A

174

0,05

0,10

0,15

0,20

0,25

0,30

0,35

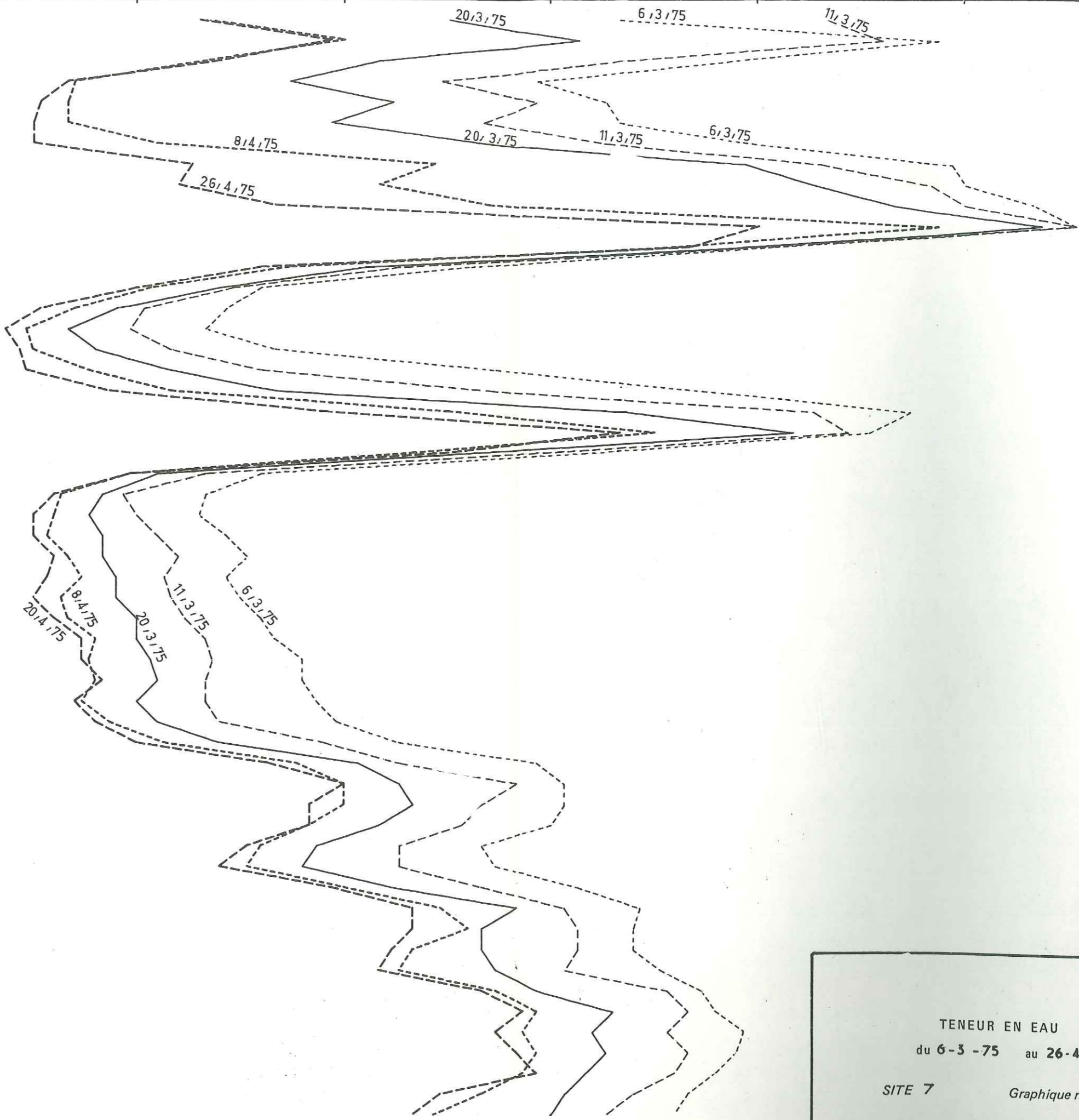
100

200

300

400

500



SITE 7

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 6-3-75 au 26-4-75
 SITE 7 Graphique n° 24 A

175

0,05

0,10

0,15

0,20

0,25

0,30

0,35

100

200

300

400

500

2/5/74

10/4/74

5/4/74

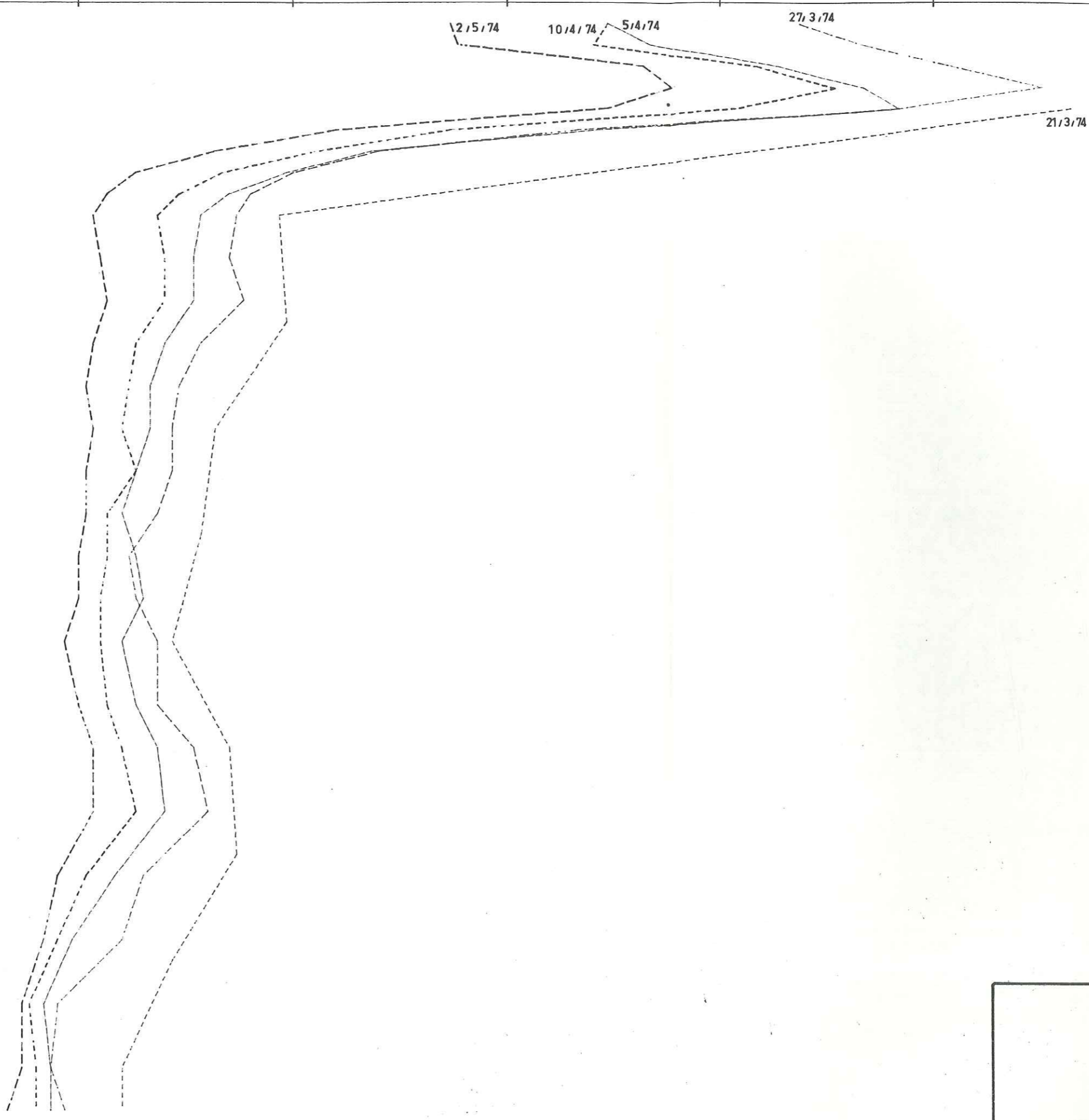
27/3/74

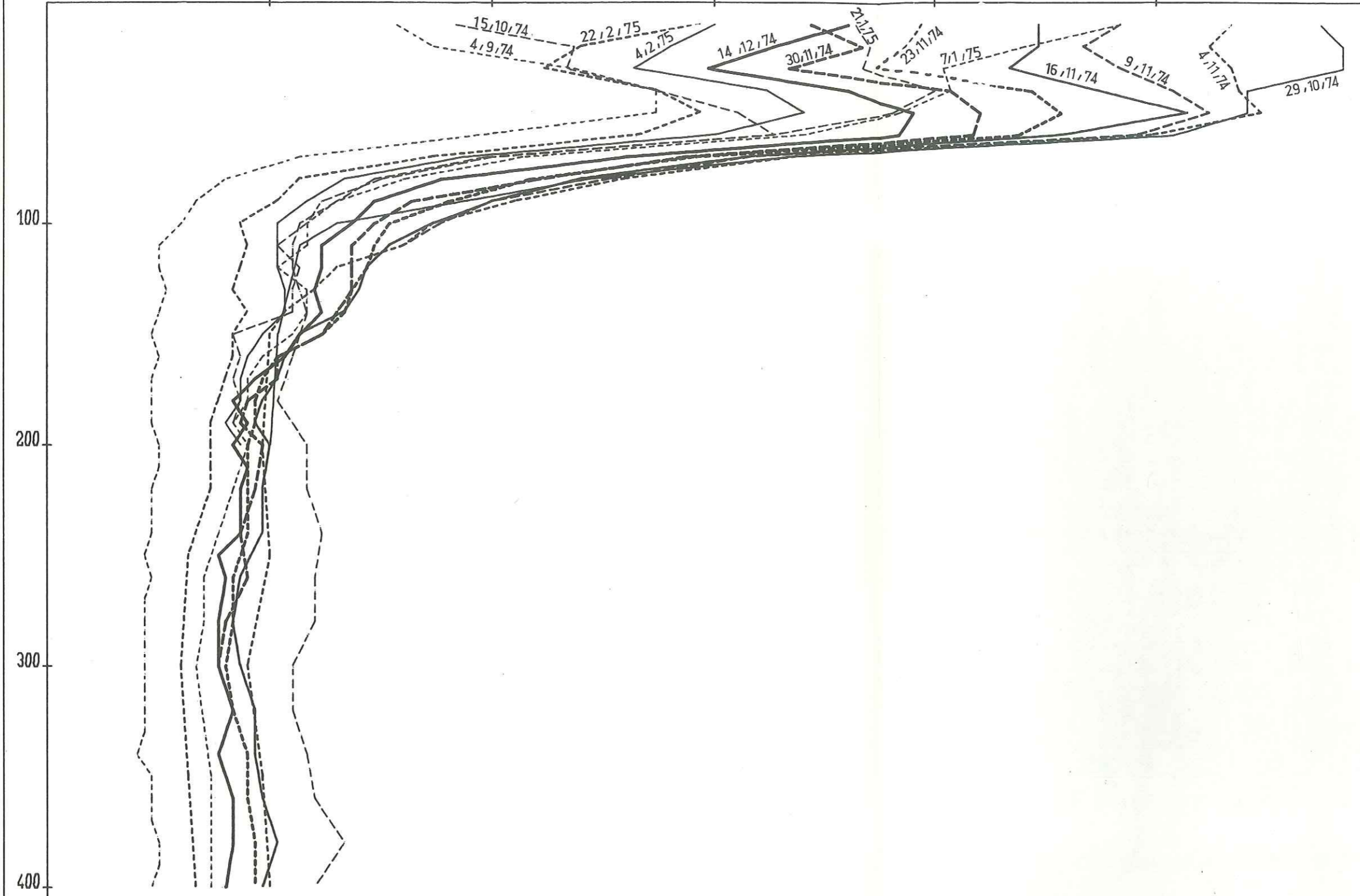
21/3/74

SITE 8

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 21-3-74 au 2-5-74
 SITE 8 Graphique n° 25A

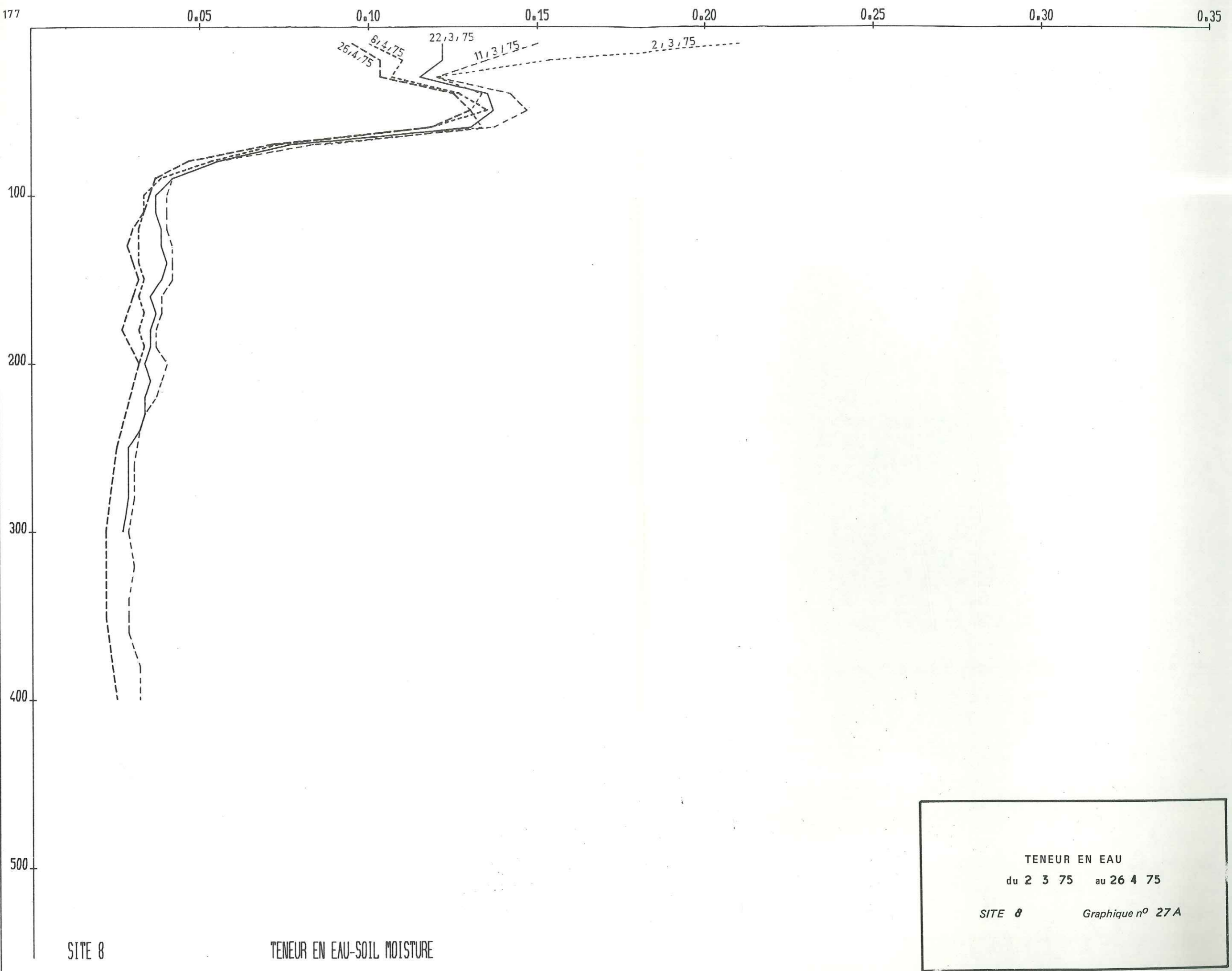




SITE 8

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 4-9-74 au 22-2-75
 SITE 8 Graphique n° 26 A



SITE 8

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 2 3 75 au 26 4 75
 SITE 8 Graphique n° 27 A

178

0,05

0,10

0,15

0,20

0,25

11,5,74

1,5,74

18,4,74

13,4,74

100

200

300

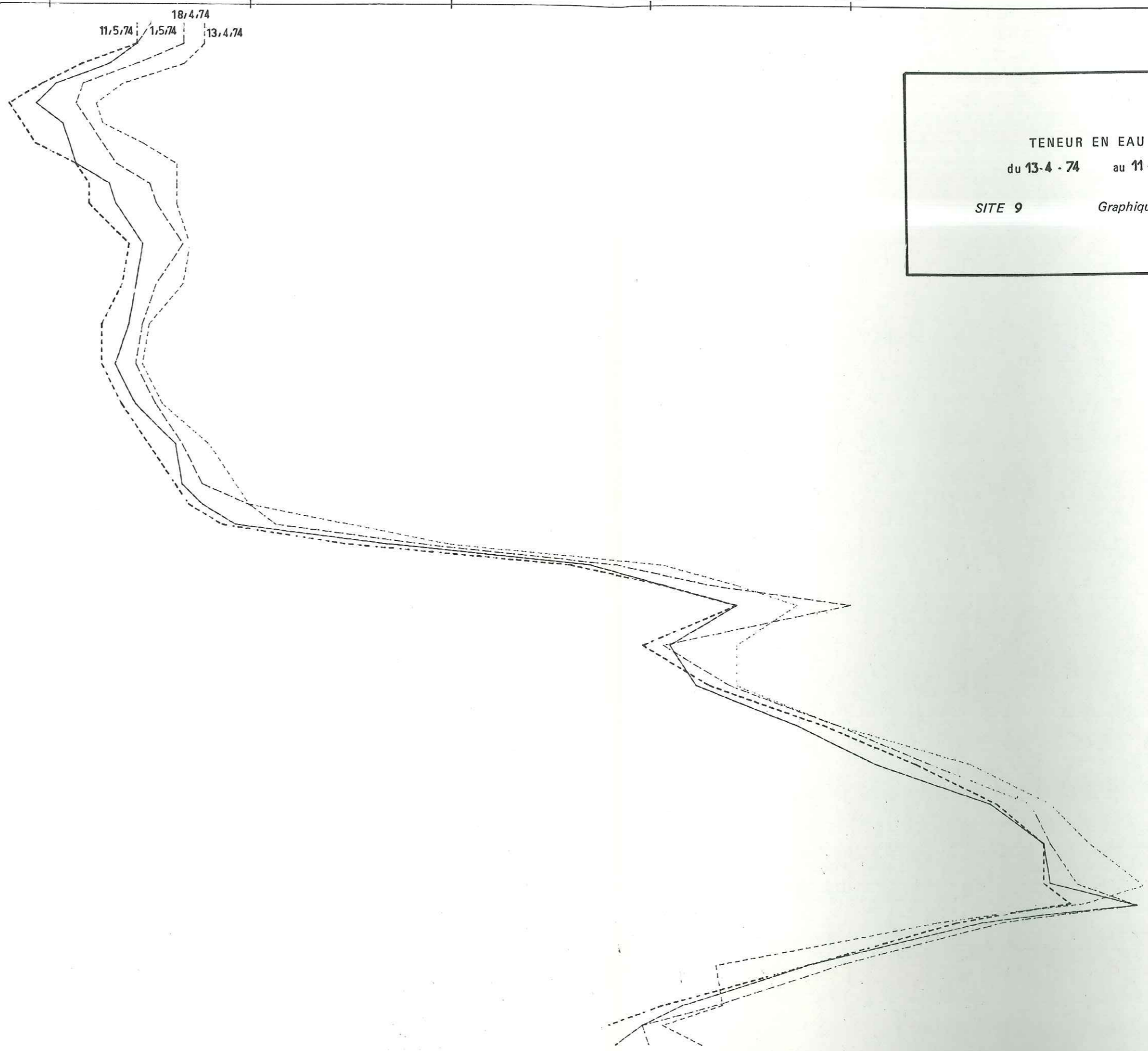
400

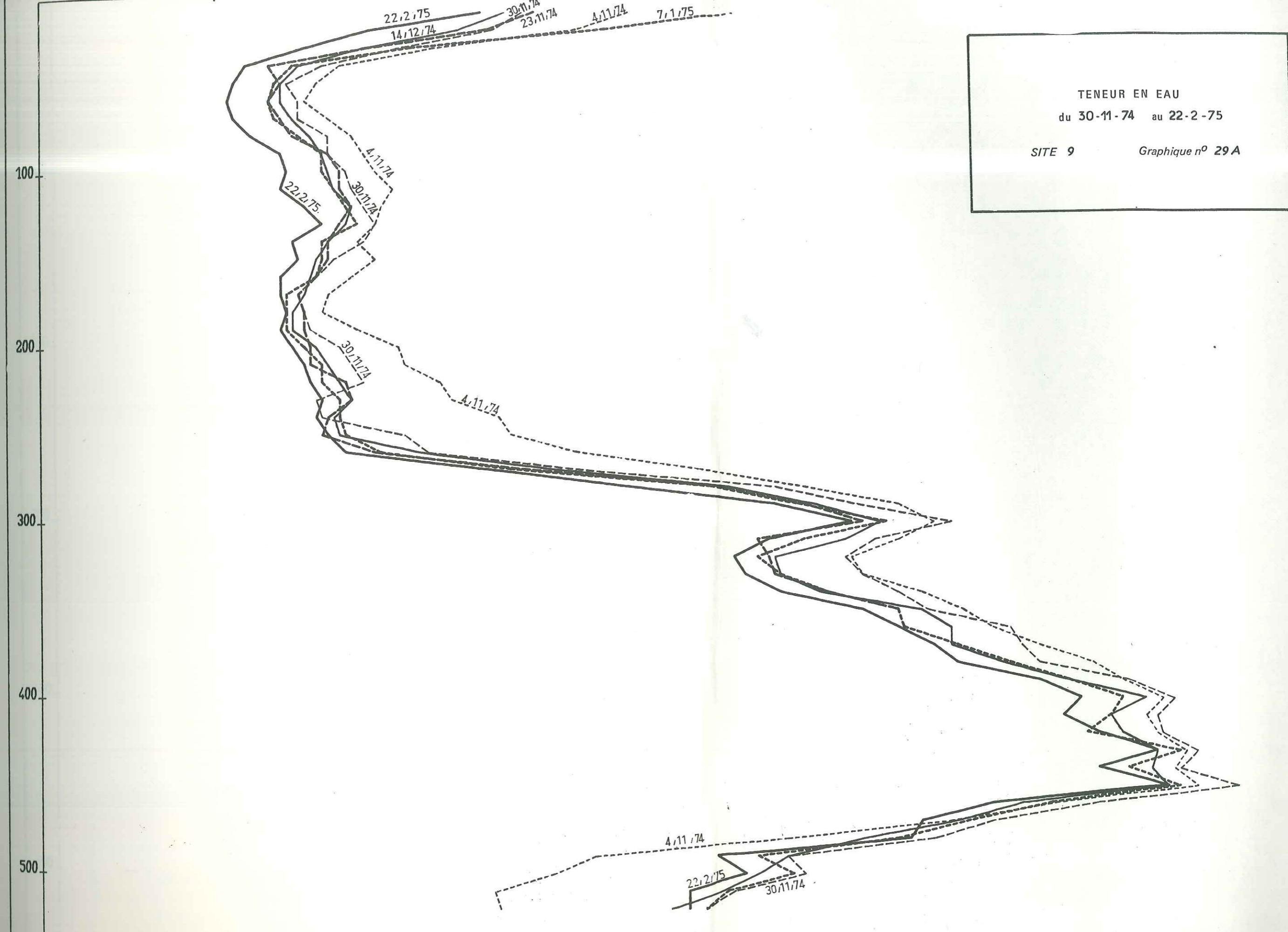
500

TENEUR EN EAU
 du 13-4-74 au 11-5-74
 SITE 9 Graphique n° 28 A

SITE 9

TENEUR EN EAU-SOL MOISTURE





TENEUR EN EAU
 du 30-11-74 au 22-2-75
 SITE 9 Graphique n° 29 A

100

200

300

400

500

11/5/74

1,5/74

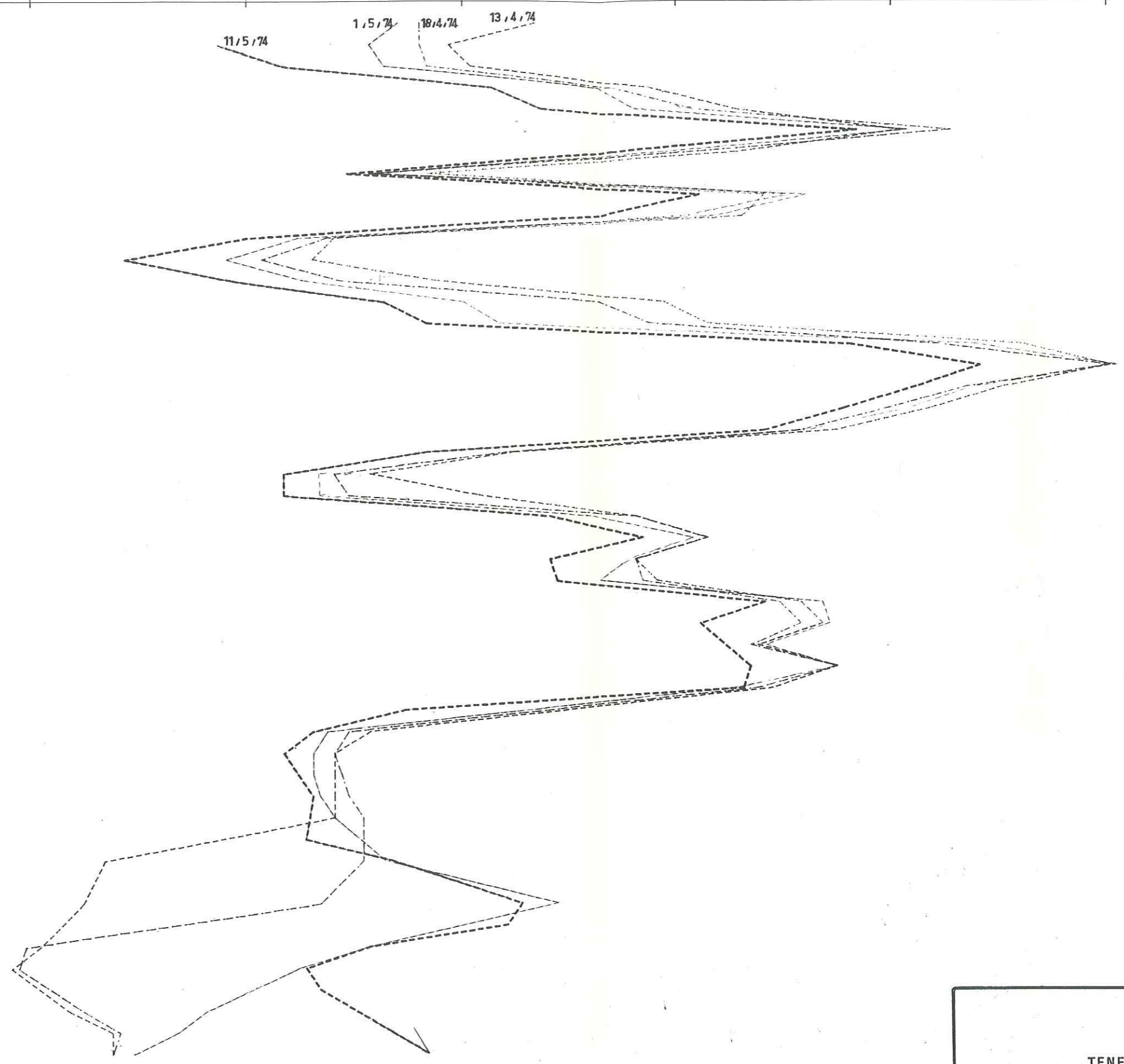
18/4/74

13/4/74

SITE 10

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

TENEUR EN EAU
 du 13-4-74 au 11-5-74
 SITE 10 Graphique n° 30 A



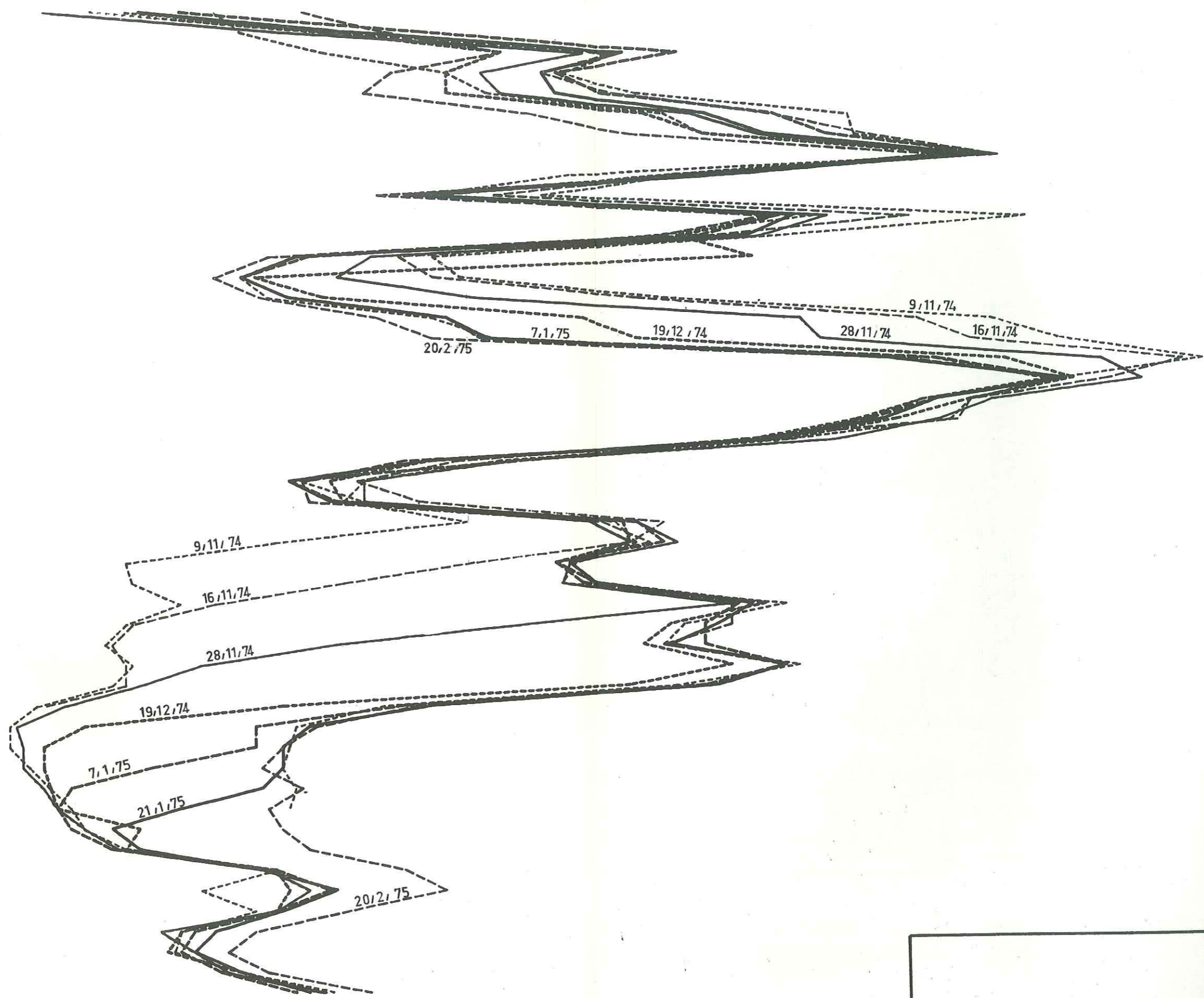
100

200

300

400

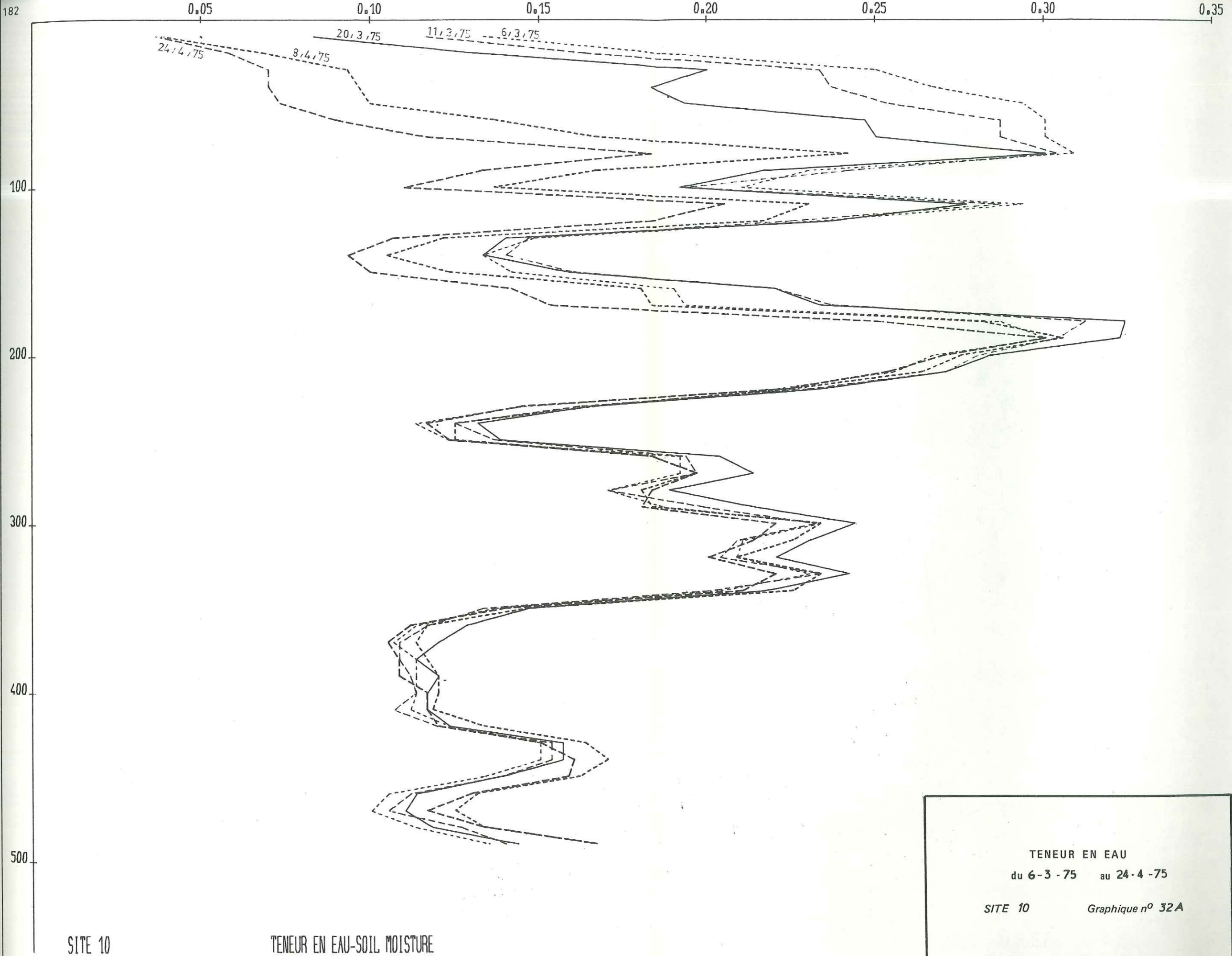
500



SITE 10

TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

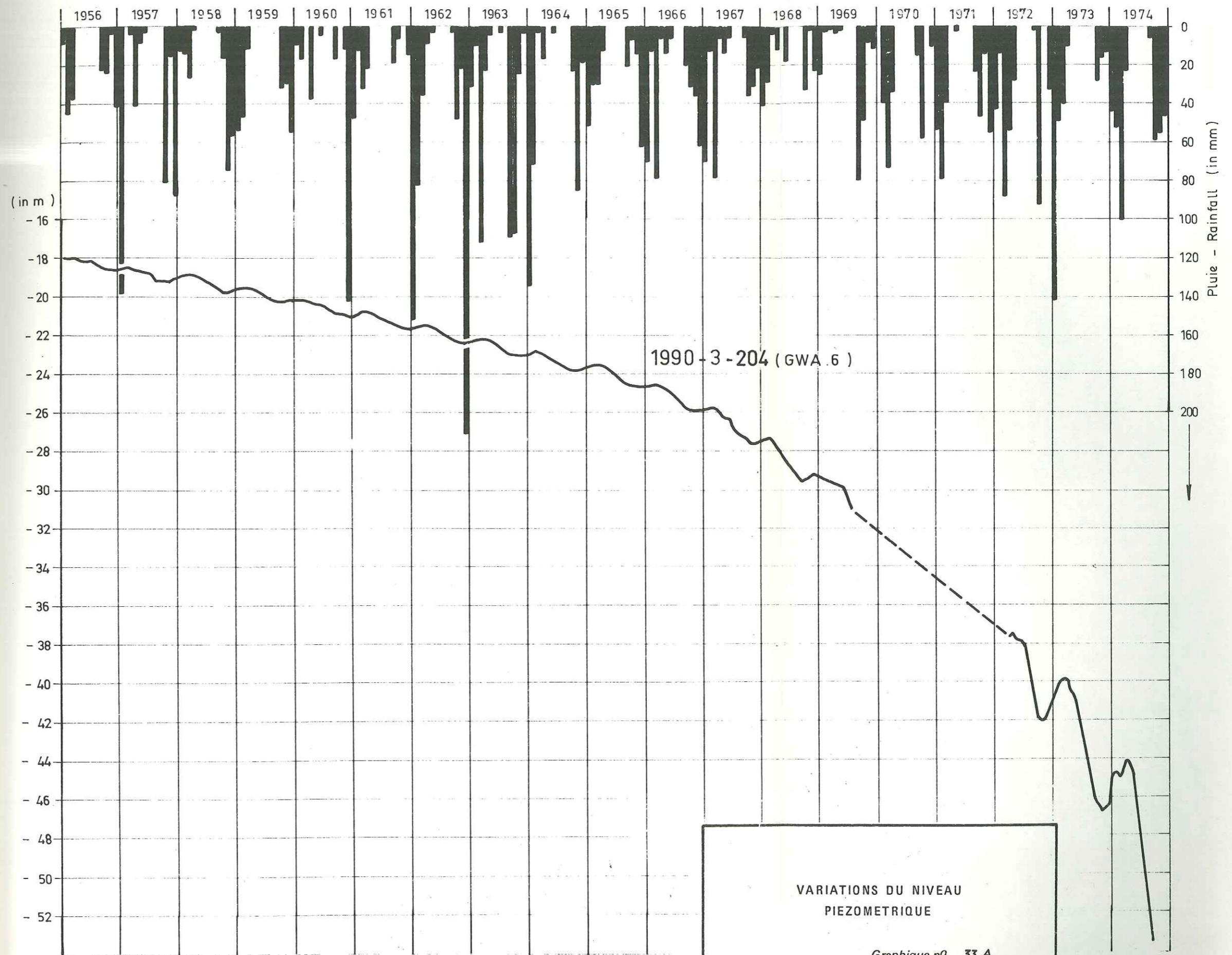
TENEUR EN EAU
 du 9-11-74 au 20-2-75
 SITE 10 Graphique n° 31 A



SITE 10

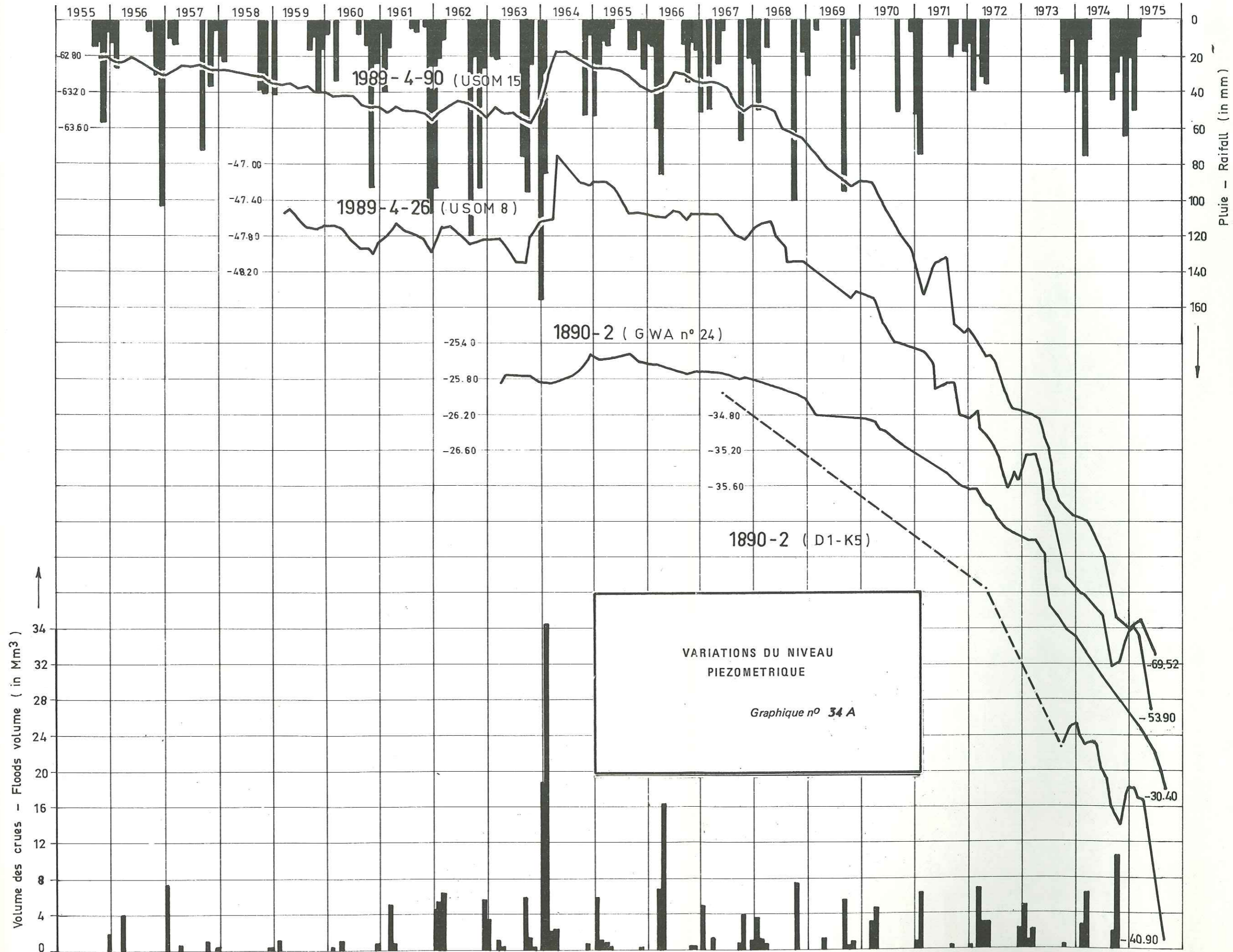
TENEUR EN EAU-SOIL MOISTURE

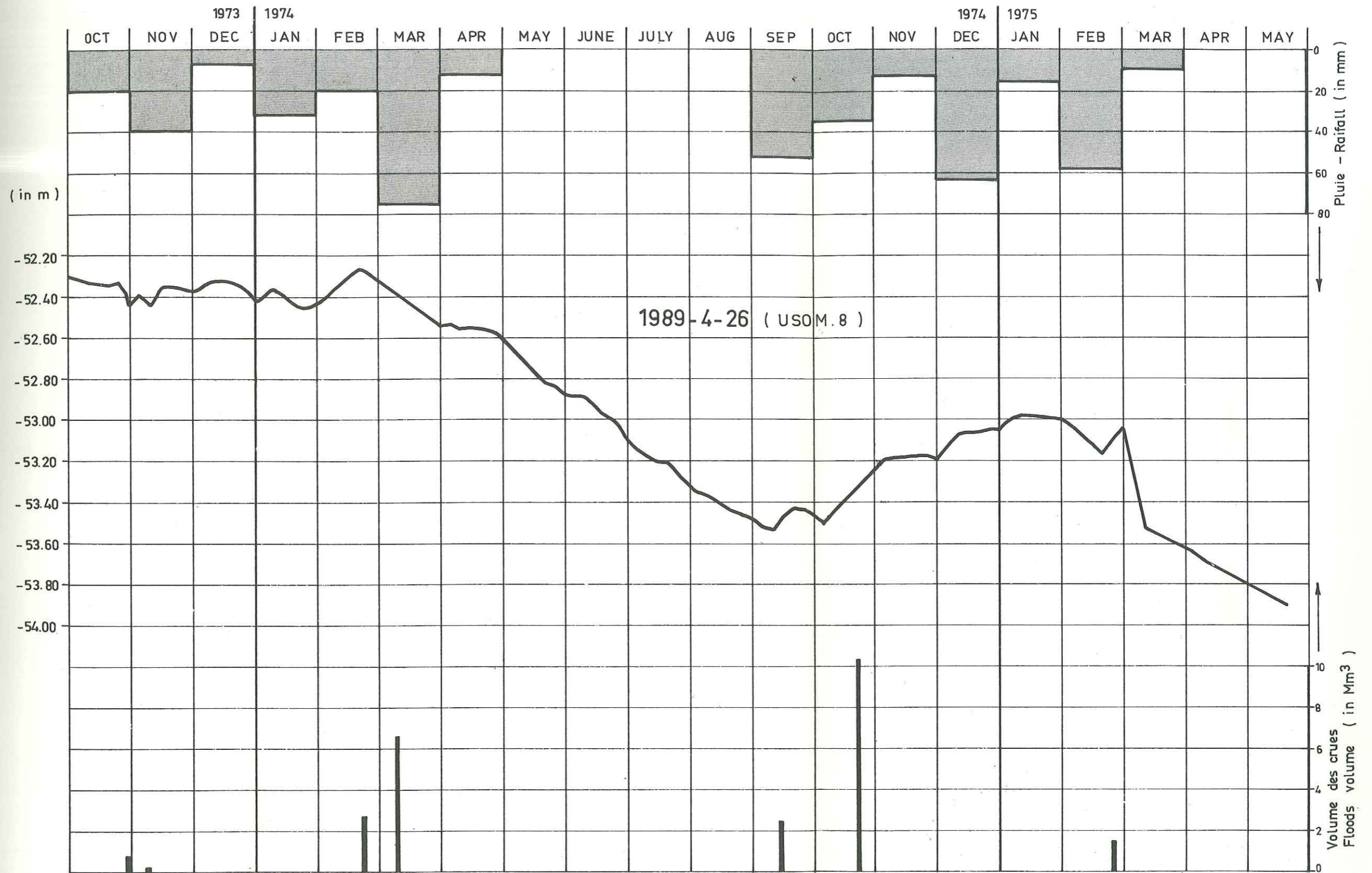
TENEUR EN EAU
 du 6-3-75 au 24-4-75
 SITE 10 Graphique n° 32A



VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

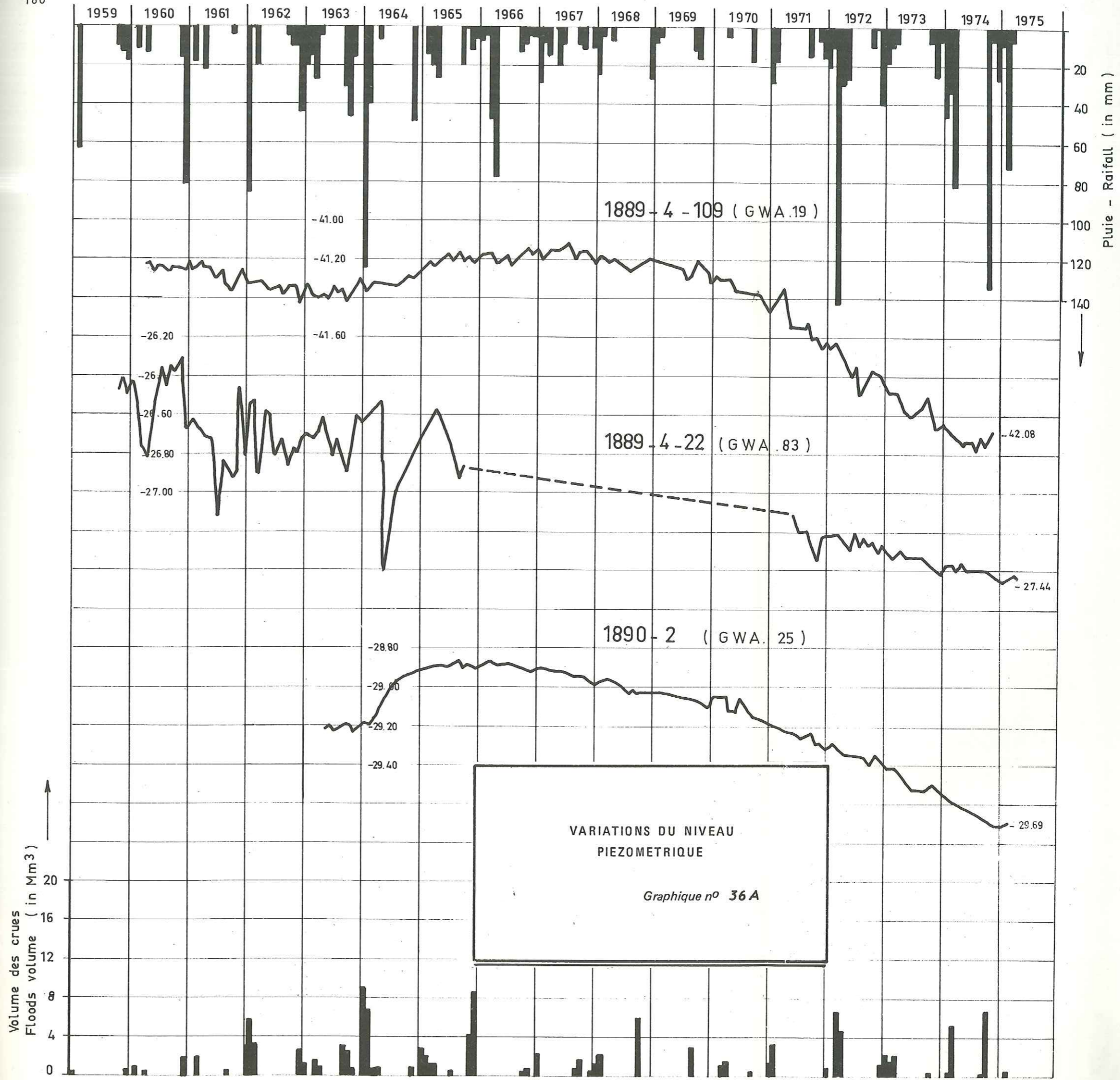
Graphique n° 33 A

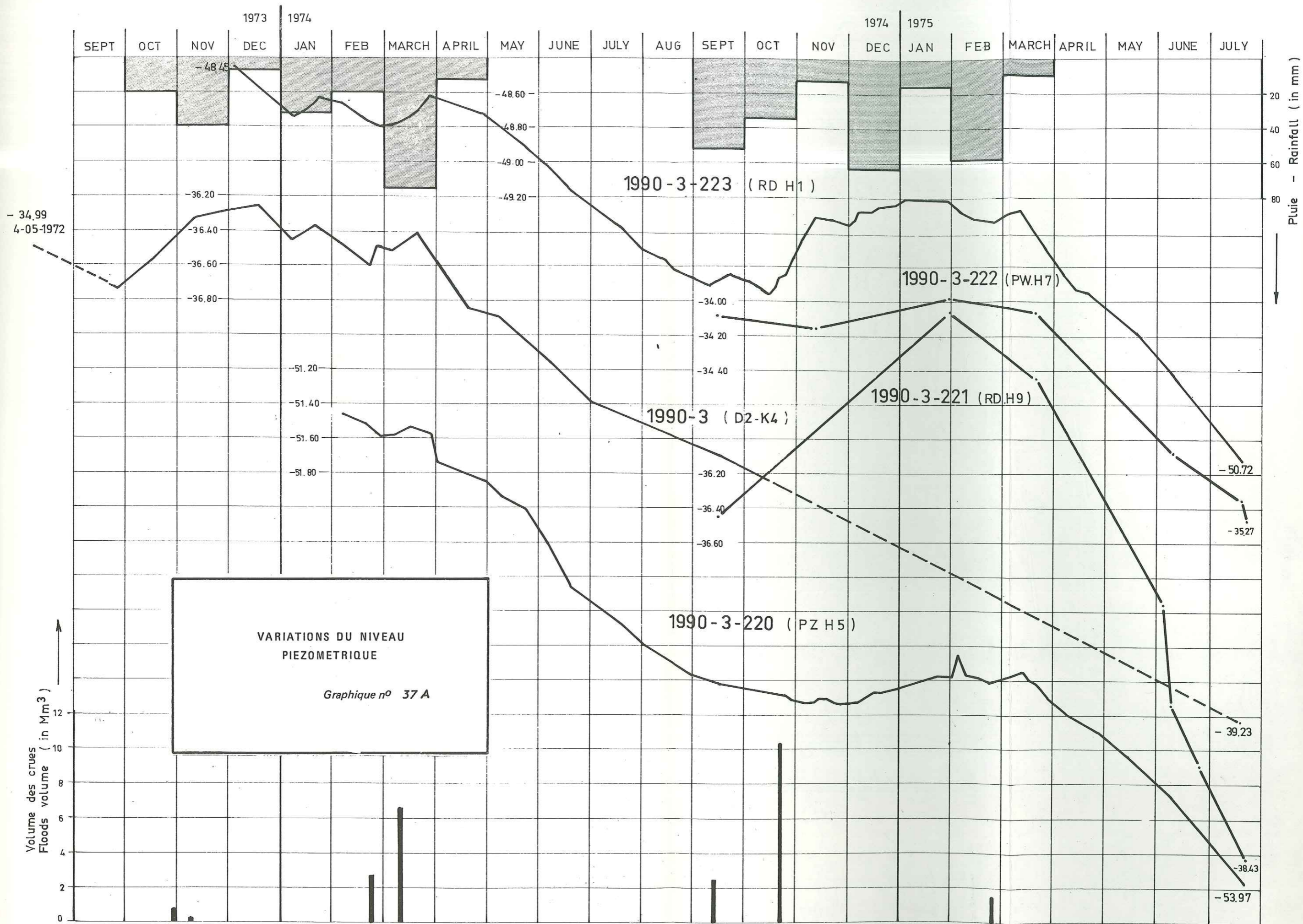


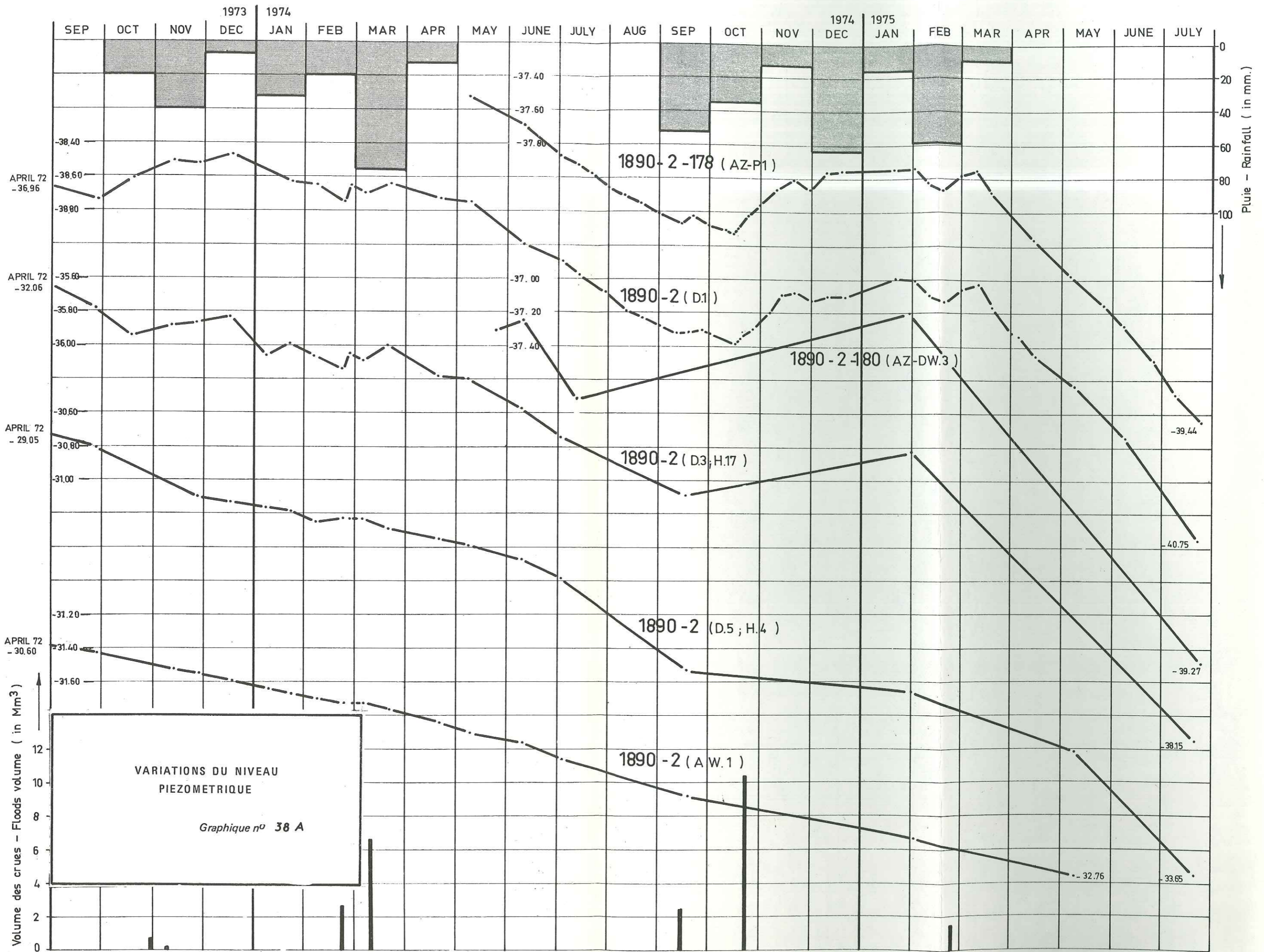


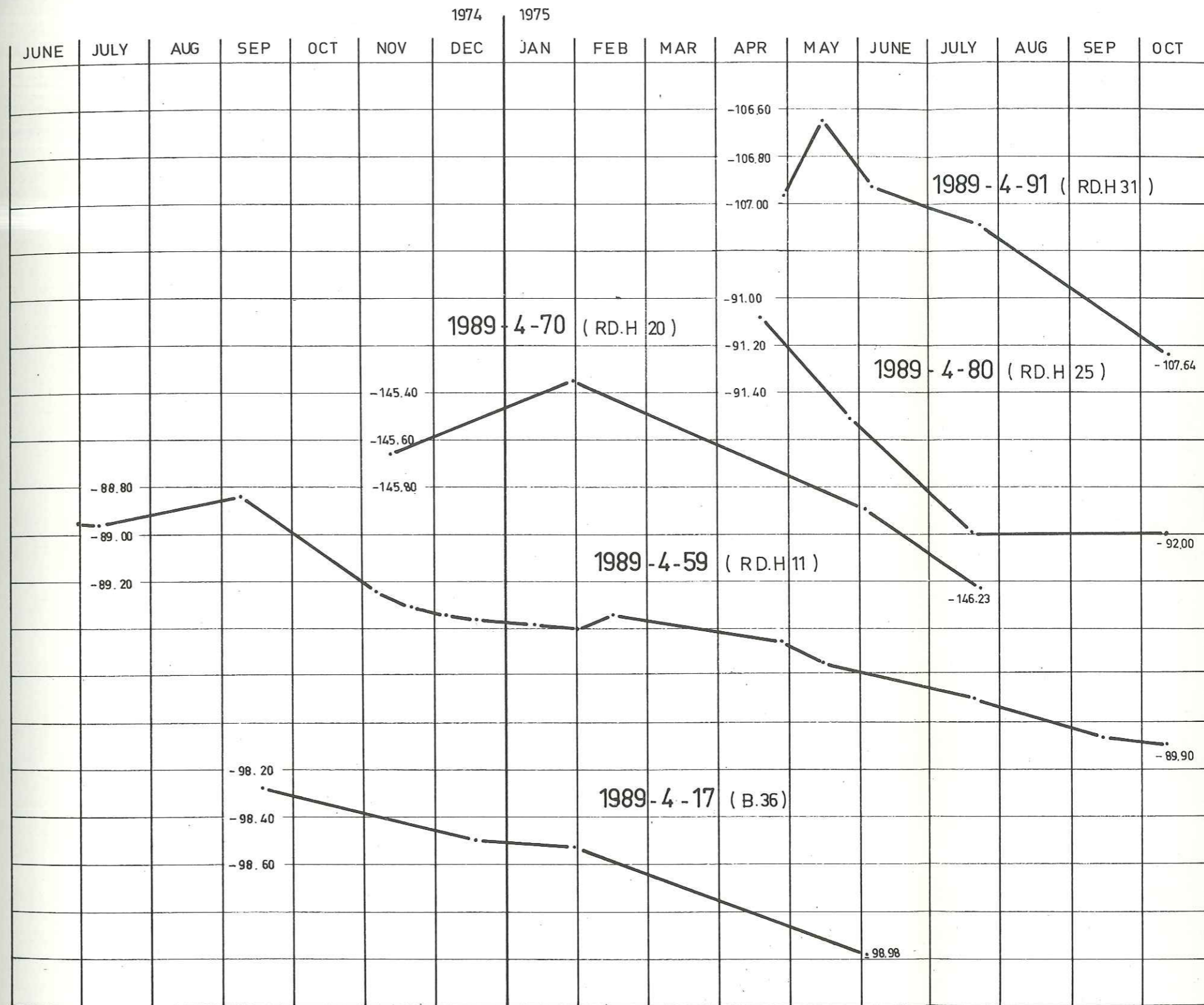
VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

Graphique n° 35 A



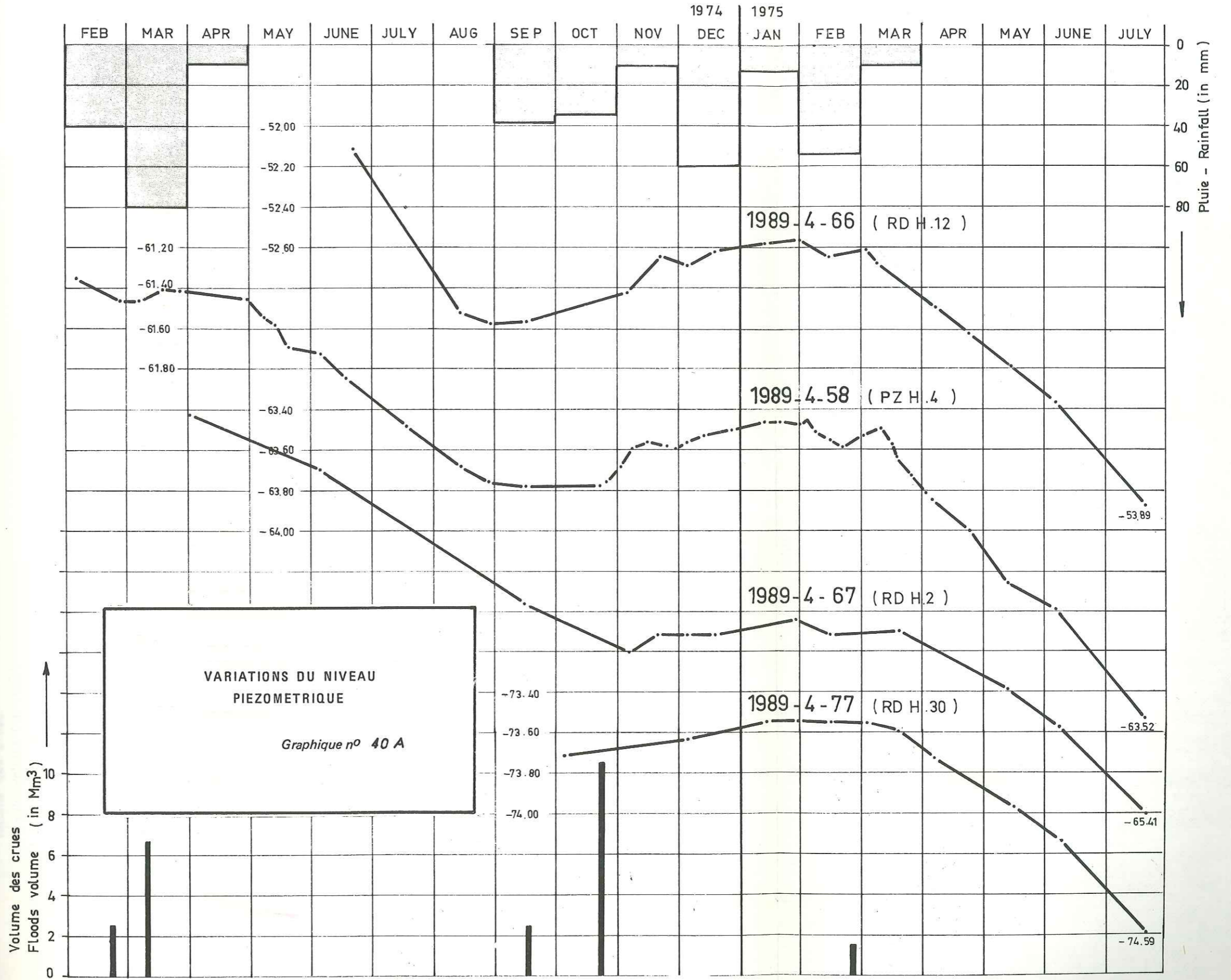


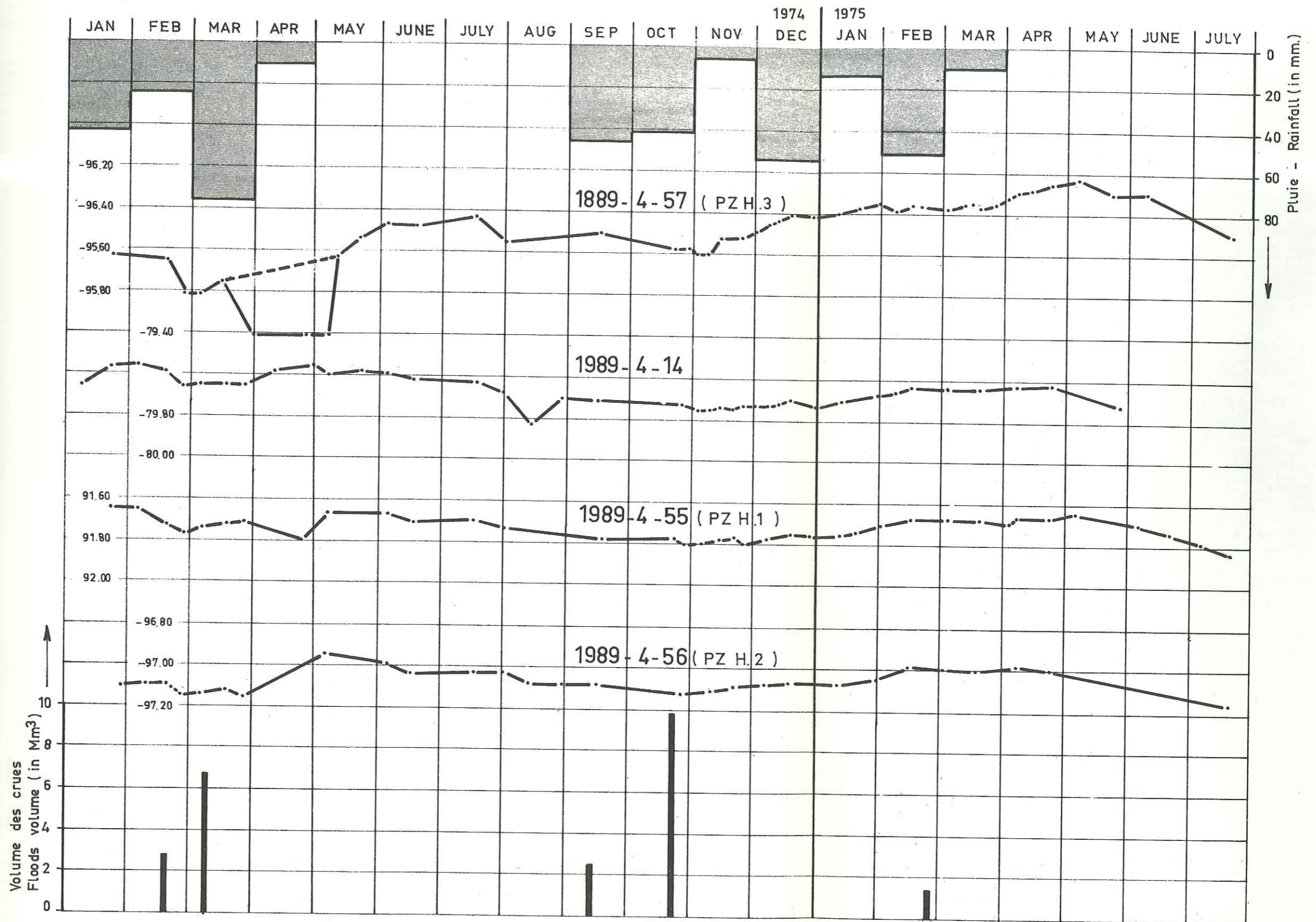




VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

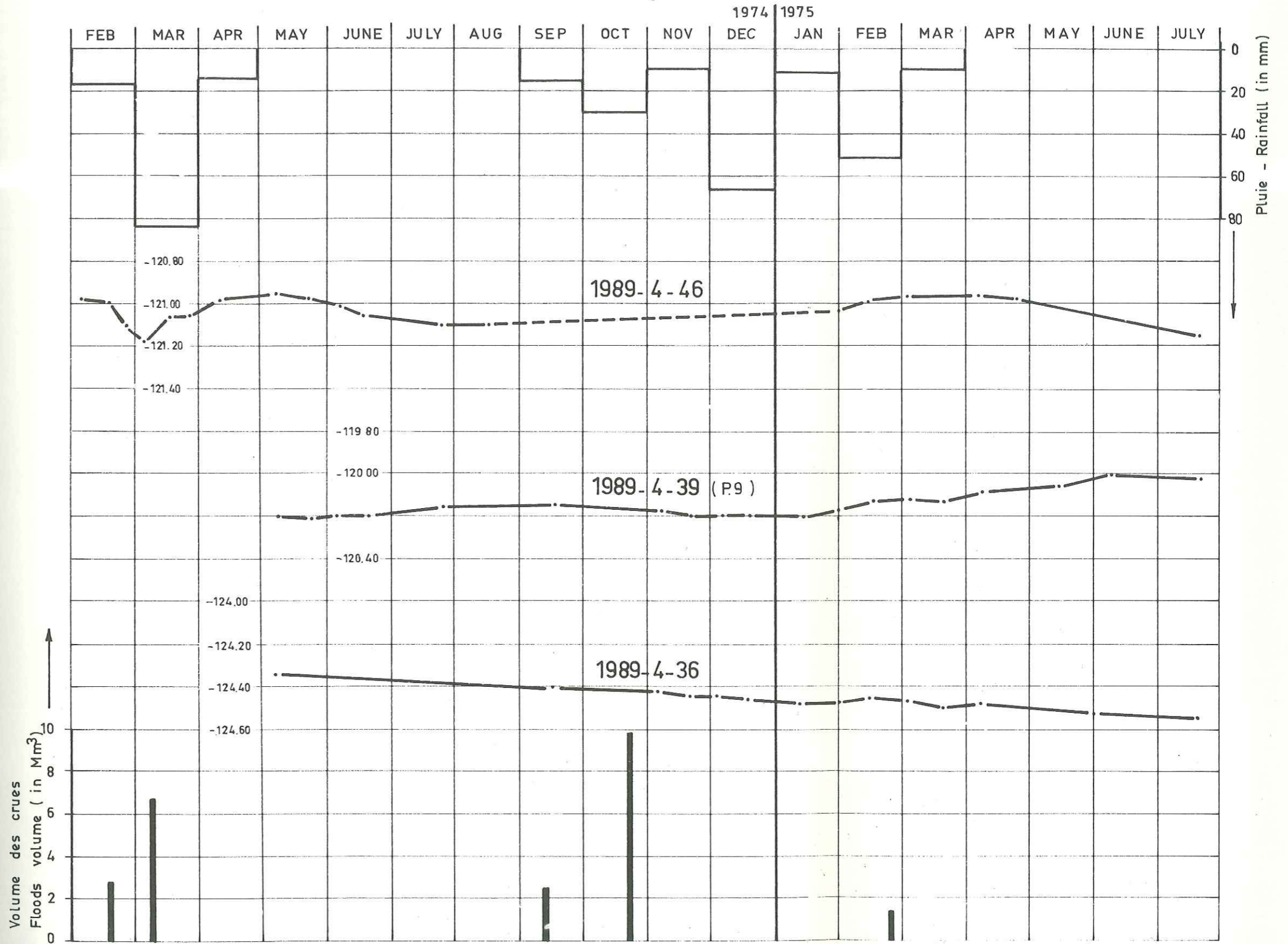
Graphique n° 39 A





VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

Graphique n° 41 A

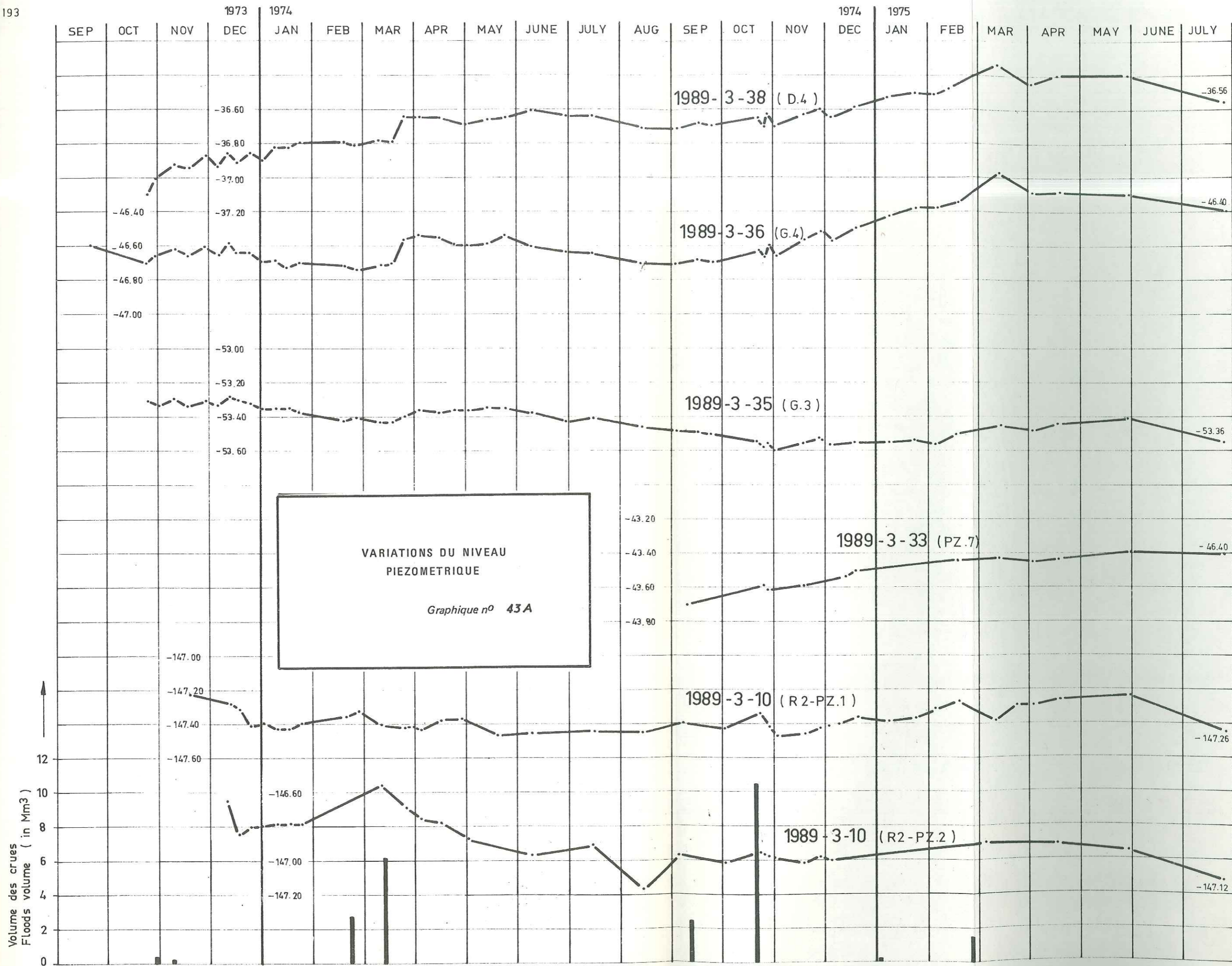


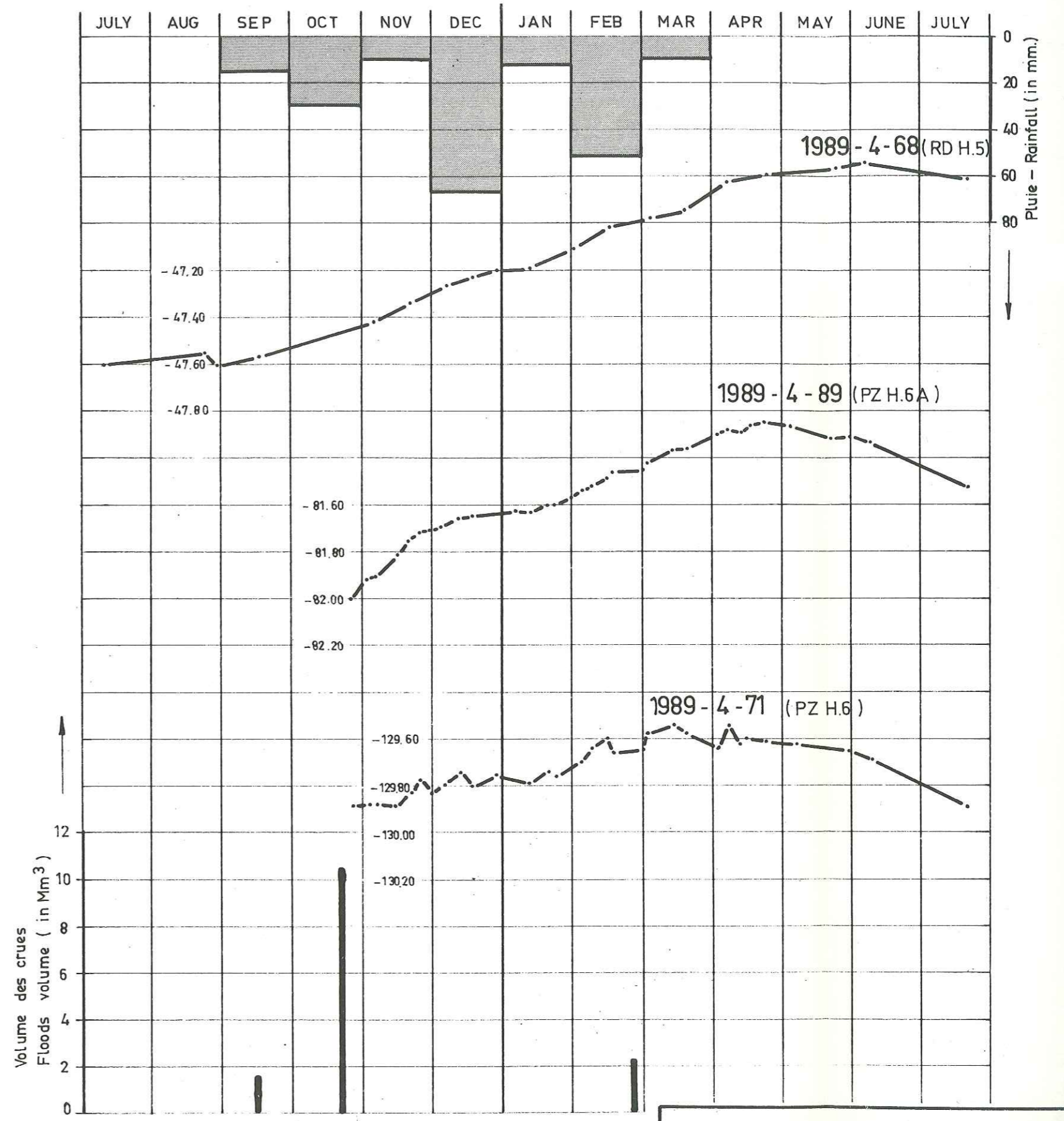
1989-4-46

1989-4-39 (P.9)

1989-4-36

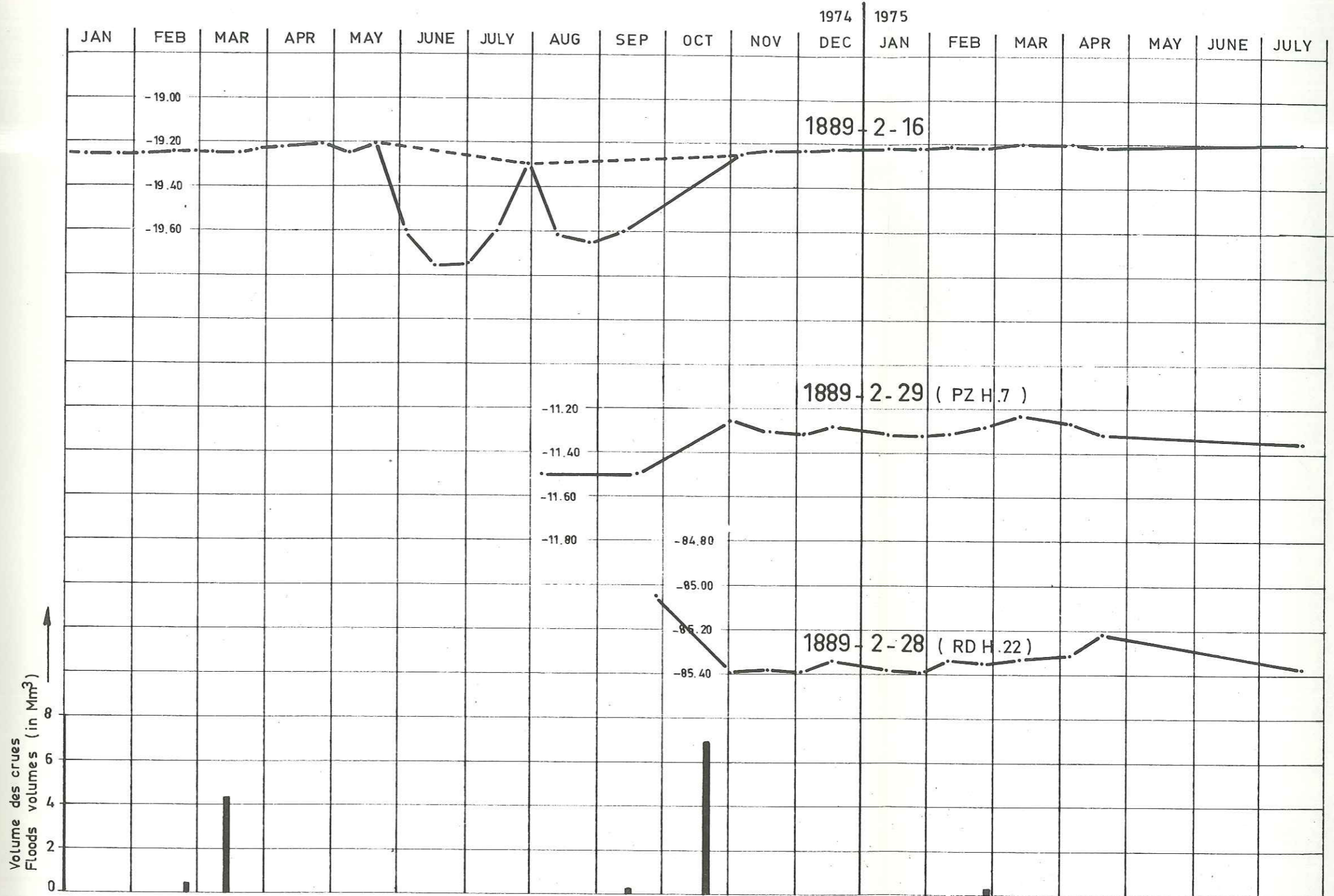
VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE
Graphique n° 42 A





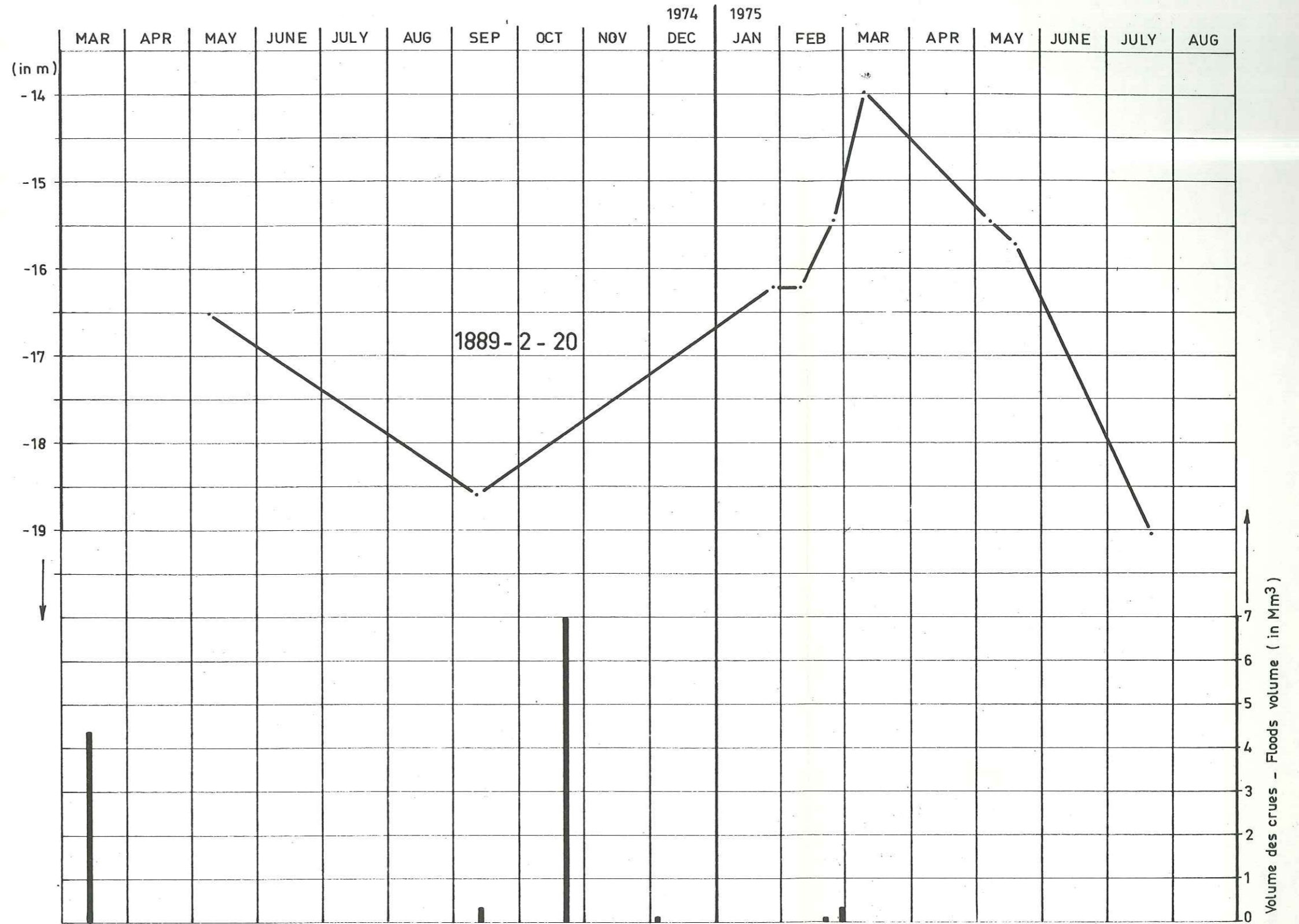
VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

Graphique n° 44 A



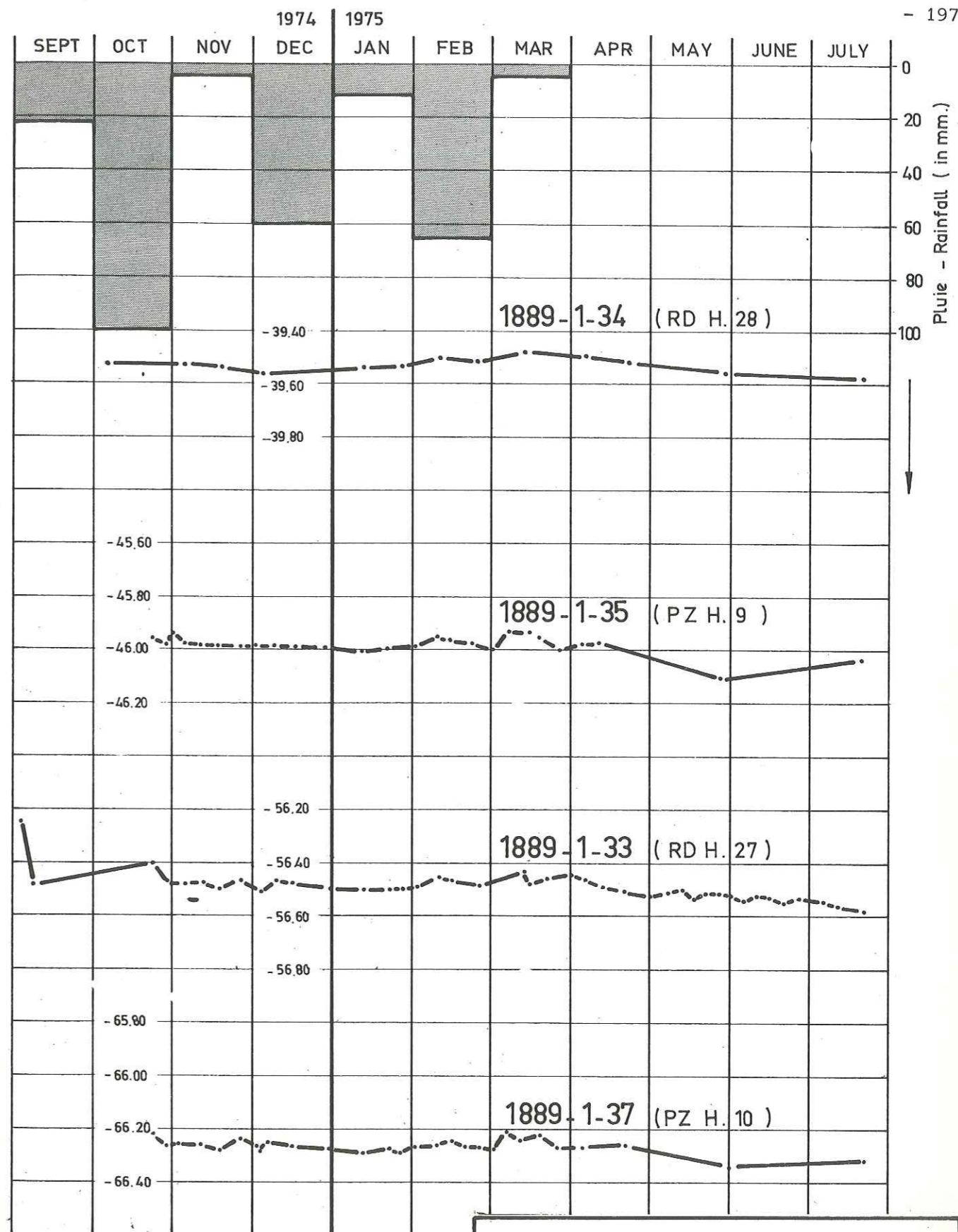
VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

Graphique n° 45 A



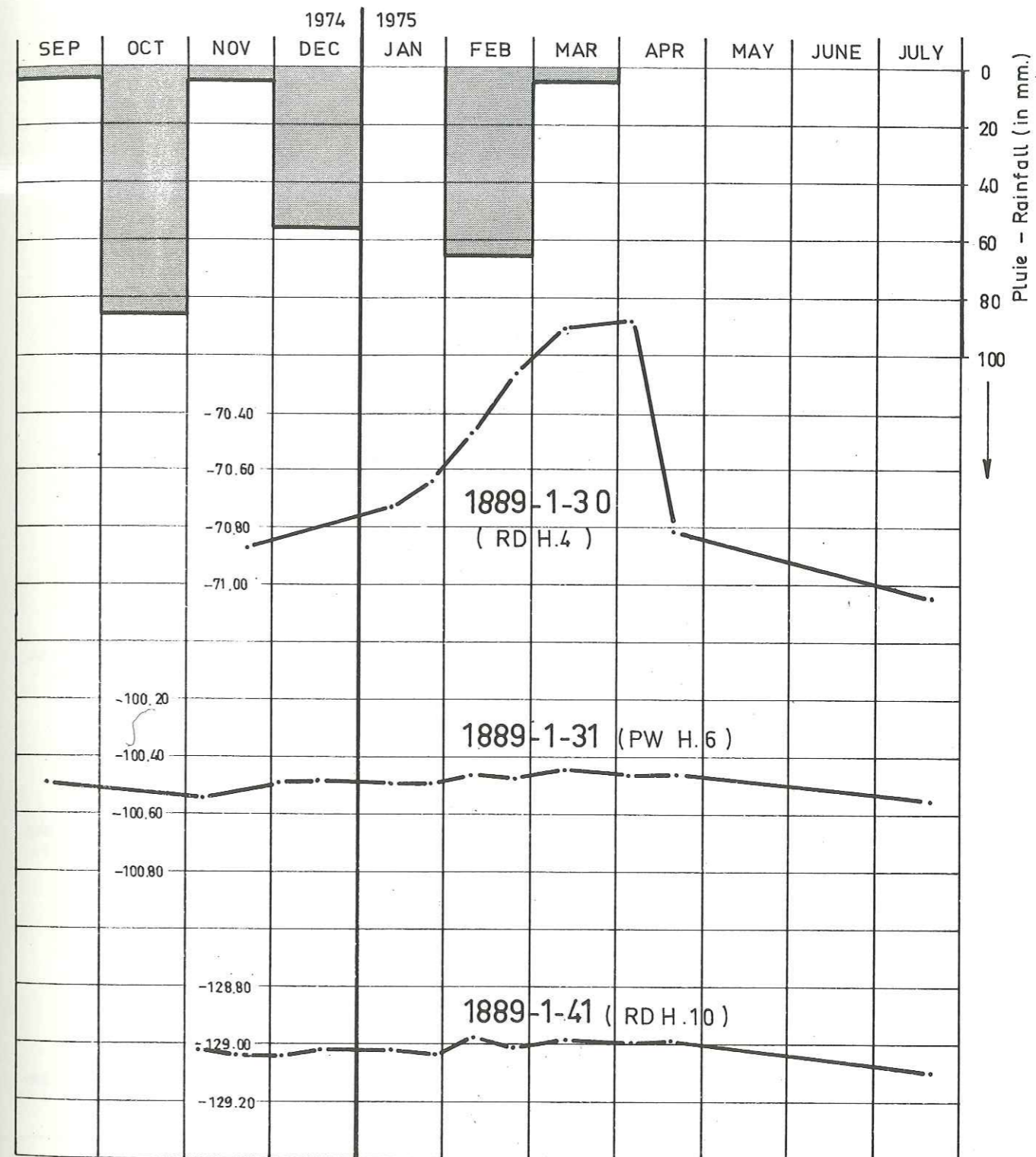
VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

Graphique n° 46 A



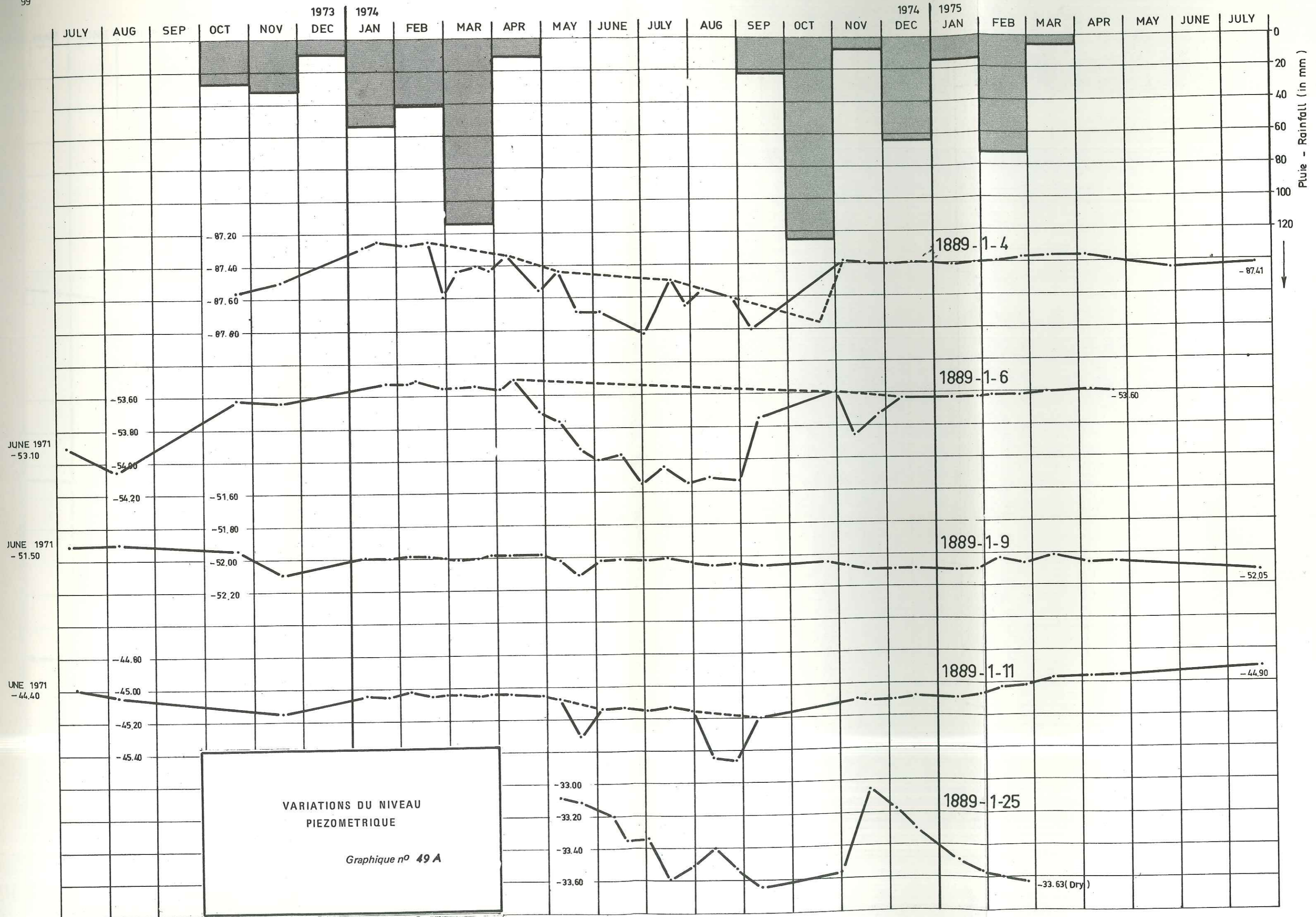
VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

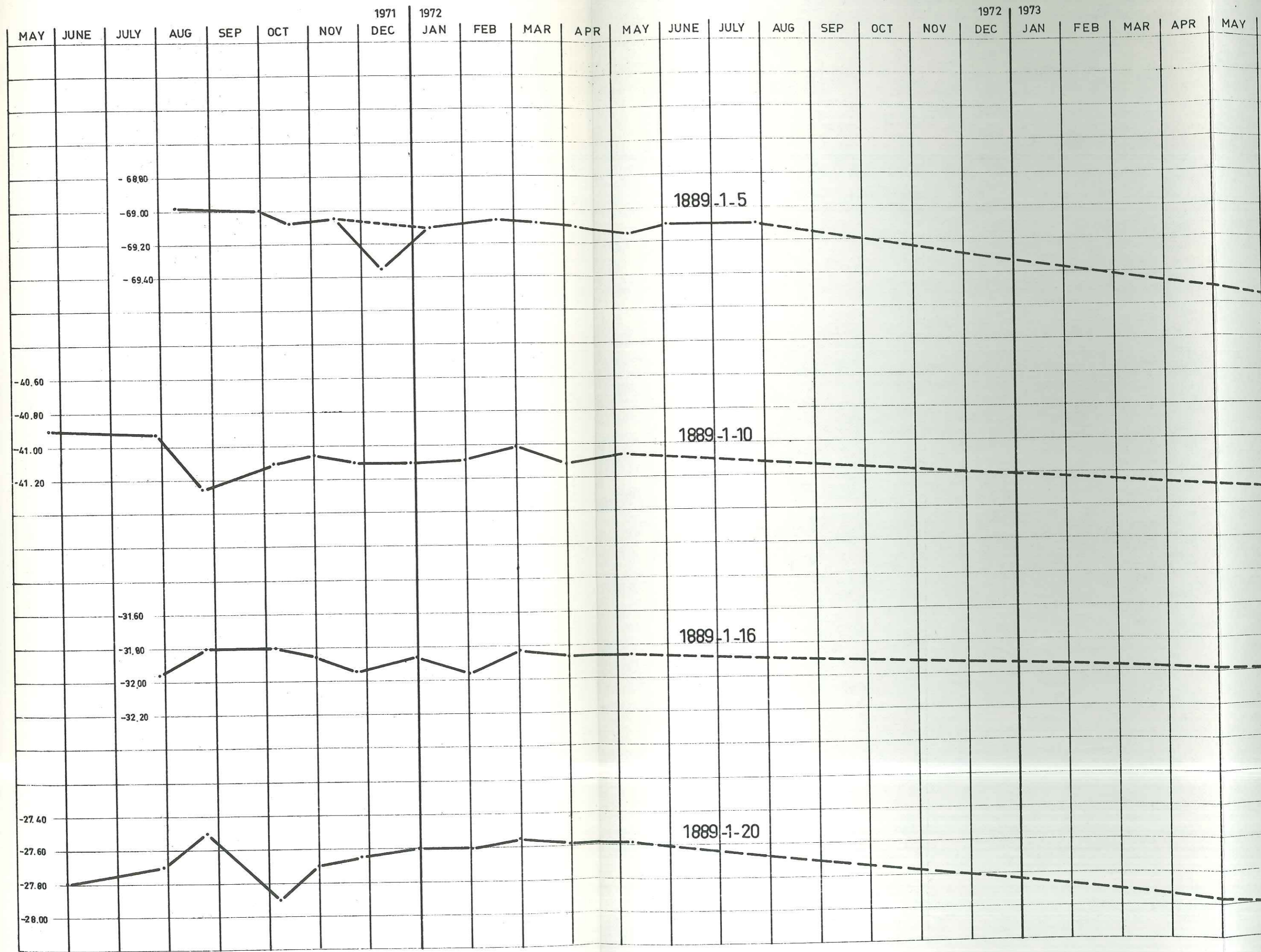
Graphique n° 47A

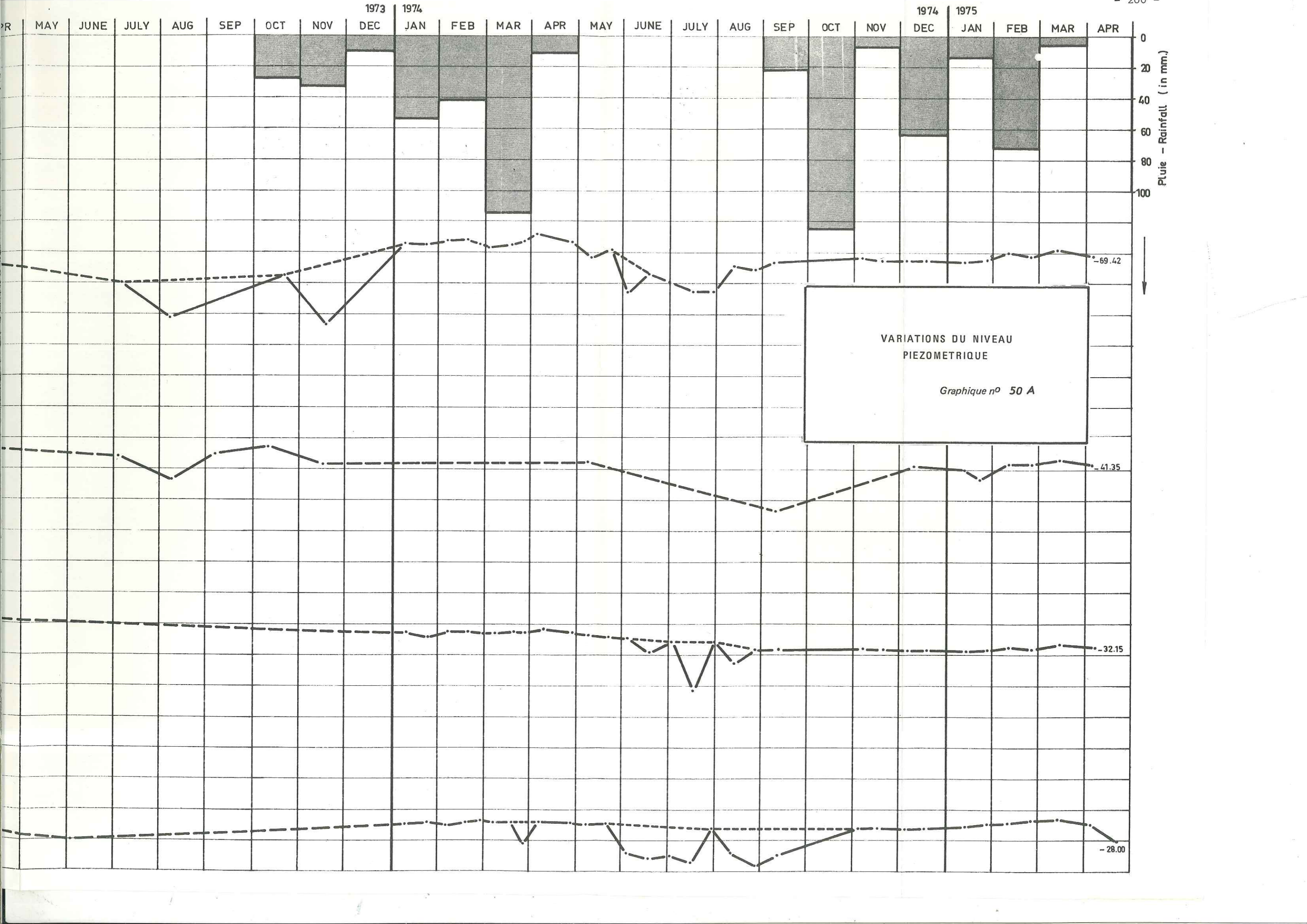


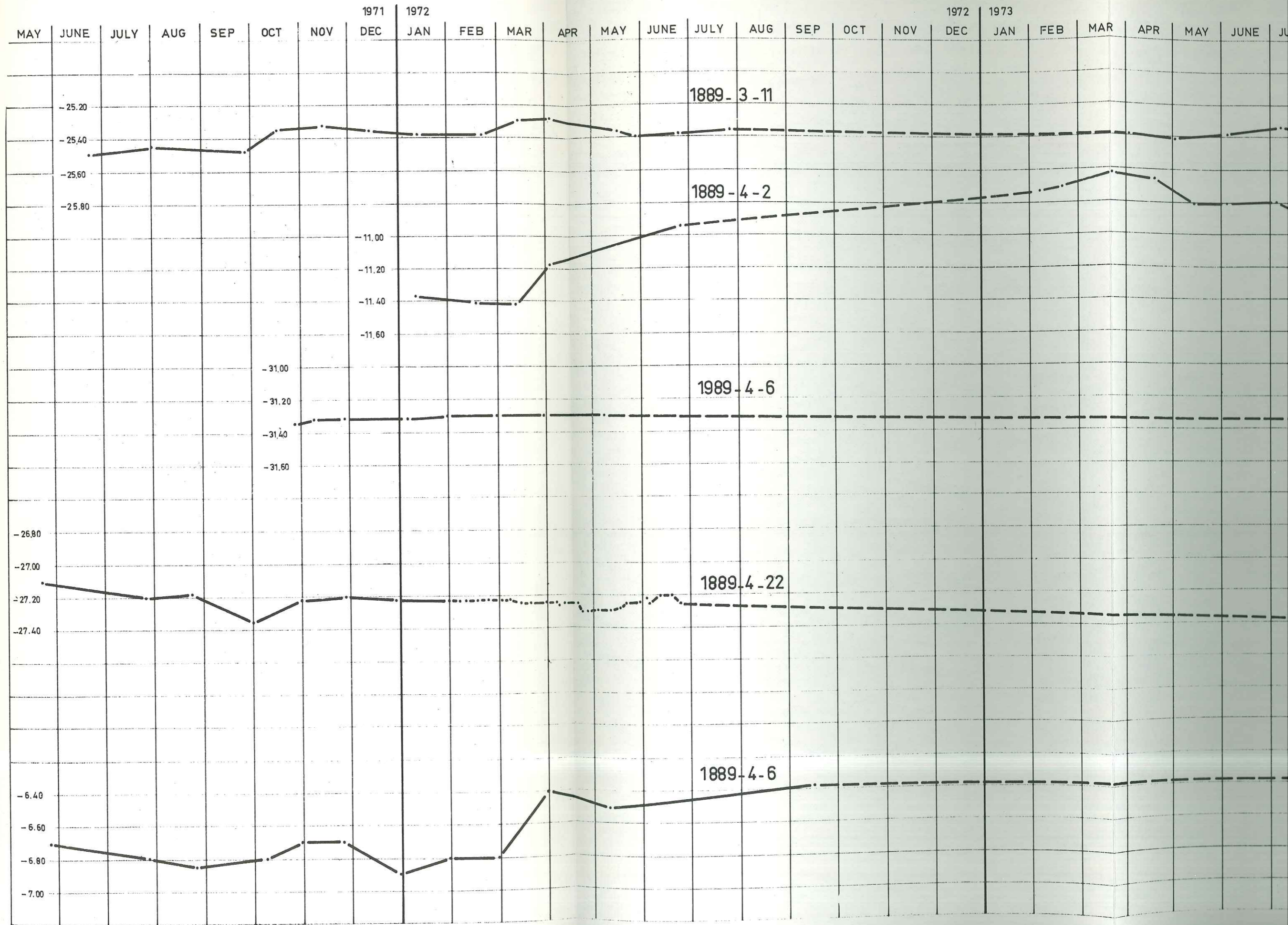
VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

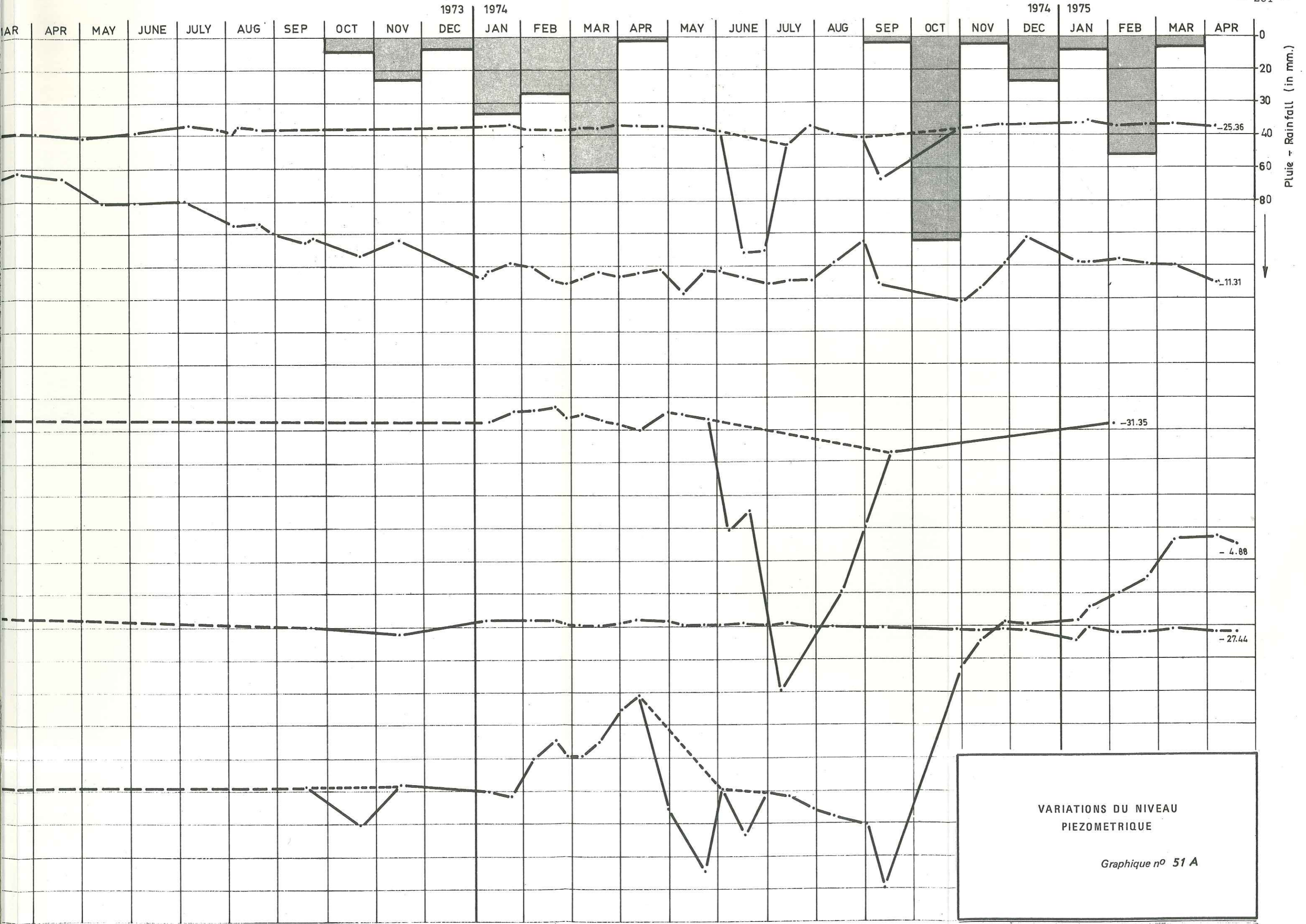
Graphique n° 48 A





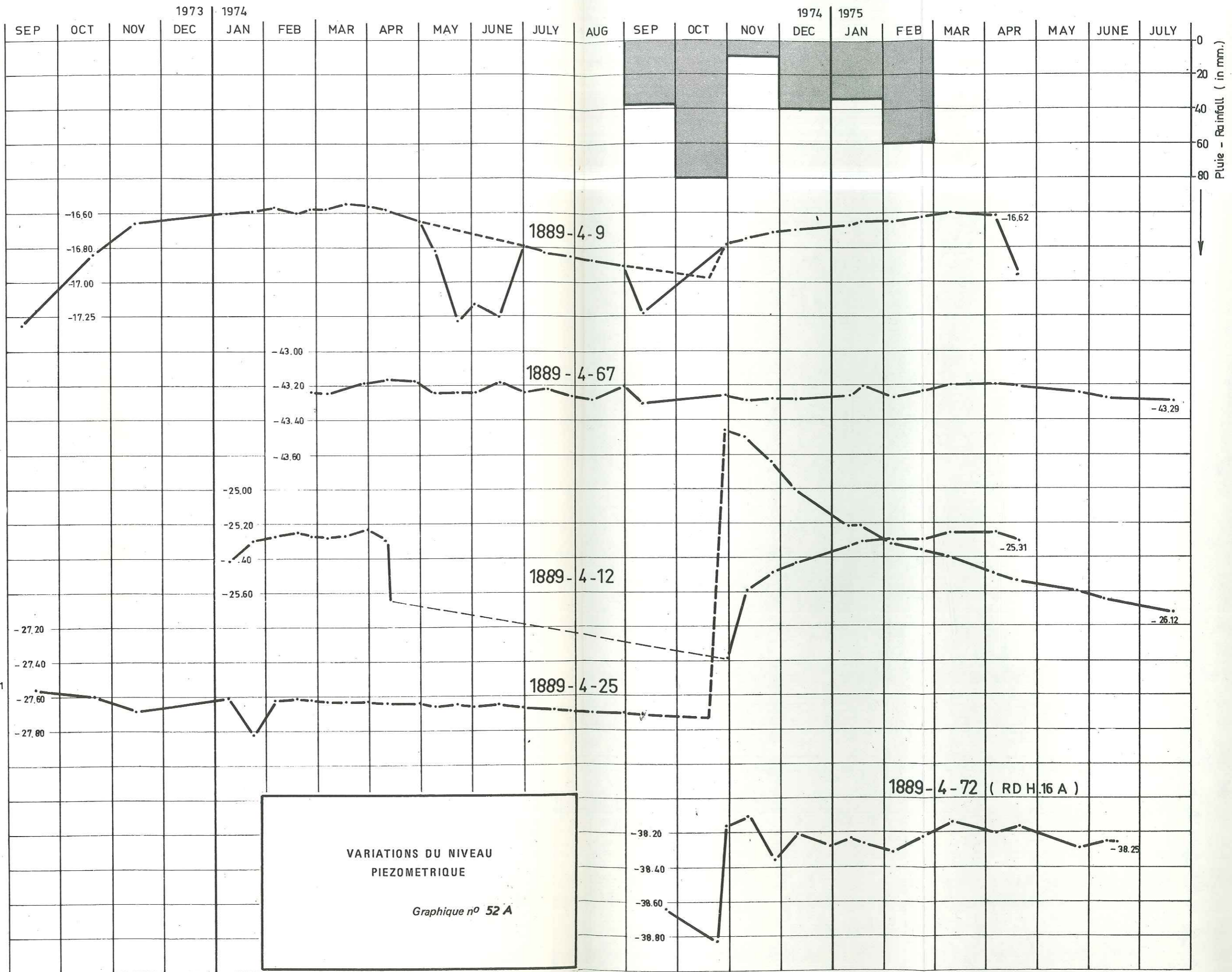


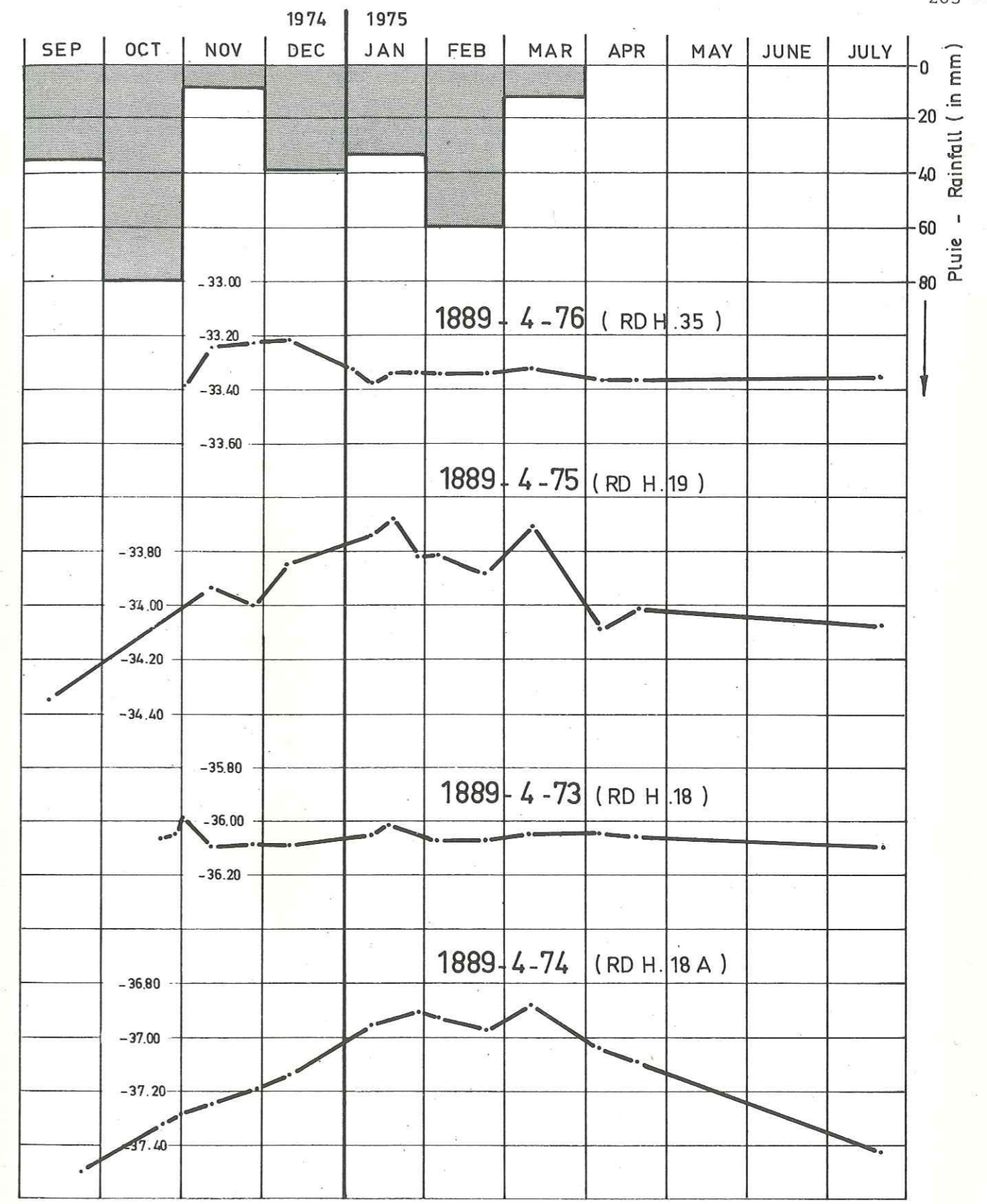




VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

Graphique n° 51 A





VARIATIONS DU NIVEAU
PIEZOMETRIQUE

Graphique n° 53 A

Carte n° 54A

BAISSE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES
OBSERVEE DE 1972 à 1975
(en m / an)

- LEGEND -

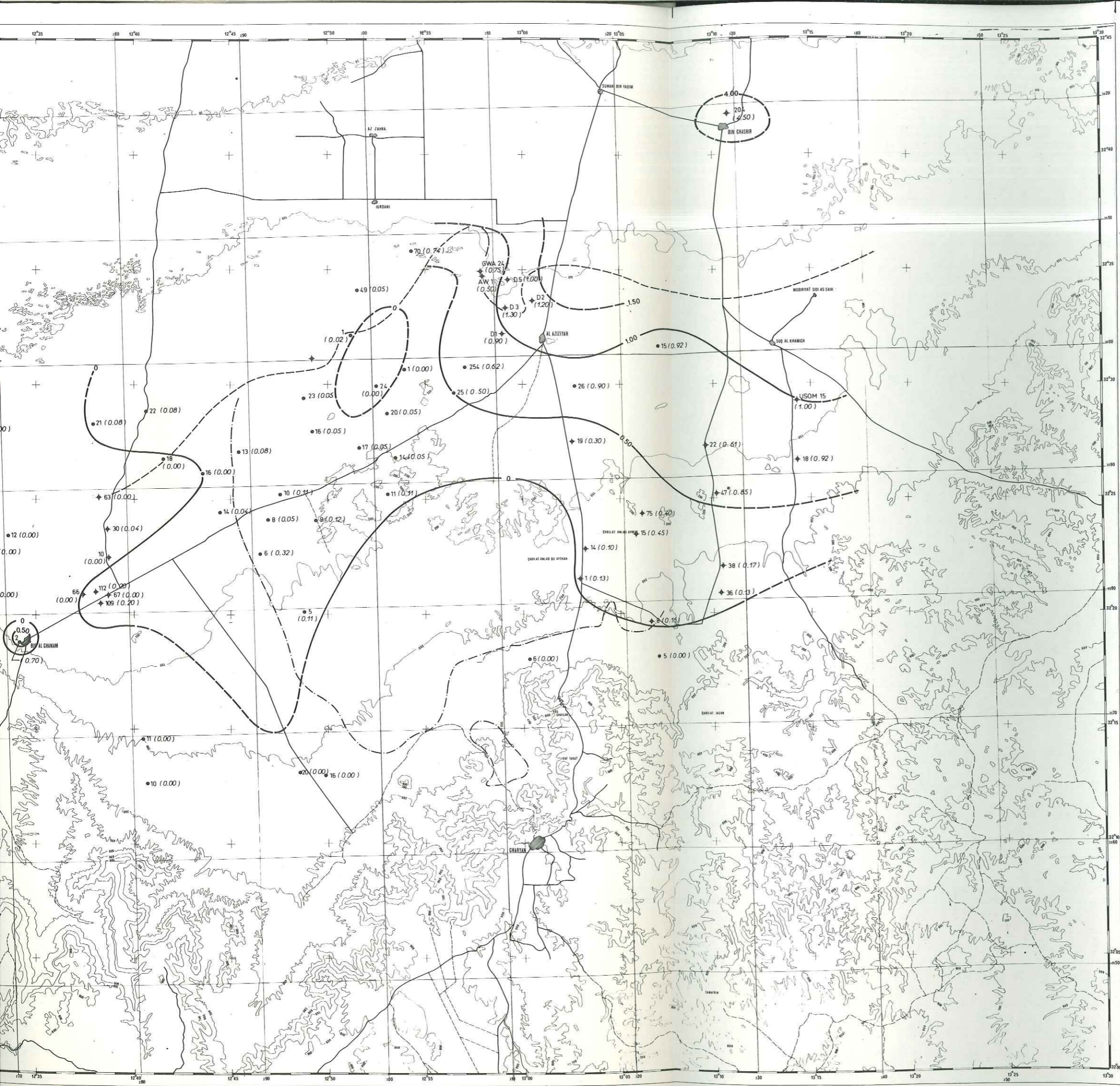
- ◆ (0.50) Observation point (decline of 0.50 m / year)
Point d'observation (baisse de 0.50 m / an)
- 0.50* Decline of 0.50 m./ year (uncertain value)
Baisse de 0.50m./an (valeur incertaine)
- Curve of egal decline
Courbe d'égalte baisse
- - - Curve of egale declinè (approximate curve)
Courbe d'égalte baisse (tracé approximatif)
- - - Northern limit of extension of the Abu Shaybah formation - Limite d'extension nord de la formation de L'Abu Shaybah.
- - - Southern limit of extension of the Miocene green clays - Limite d'extension sud des argiles vertes miocènes



Assemblage of the 1:50,000 scale maps
Assemblage des cartes au 1:50,000

12°45'	12°45'	12°45'	12°45'	12°45'
12°30'	12°30'	12°30'	12°30'	12°30'
12°15'	12°15'	12°15'	12°15'	12°15'
12°00'	12°00'	12°00'	12°00'	12°00'

Equidistance of the curves : 100 meters except in the plain 50 meters
Equidistance des courbes : 100 mètres sauf en plaine 50 mètres



Carte n° 55A

**BAISSE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES
OBSERVEE DE JUILLET 74 à JUILLET 75
(en m / an)**

- LEGEND -

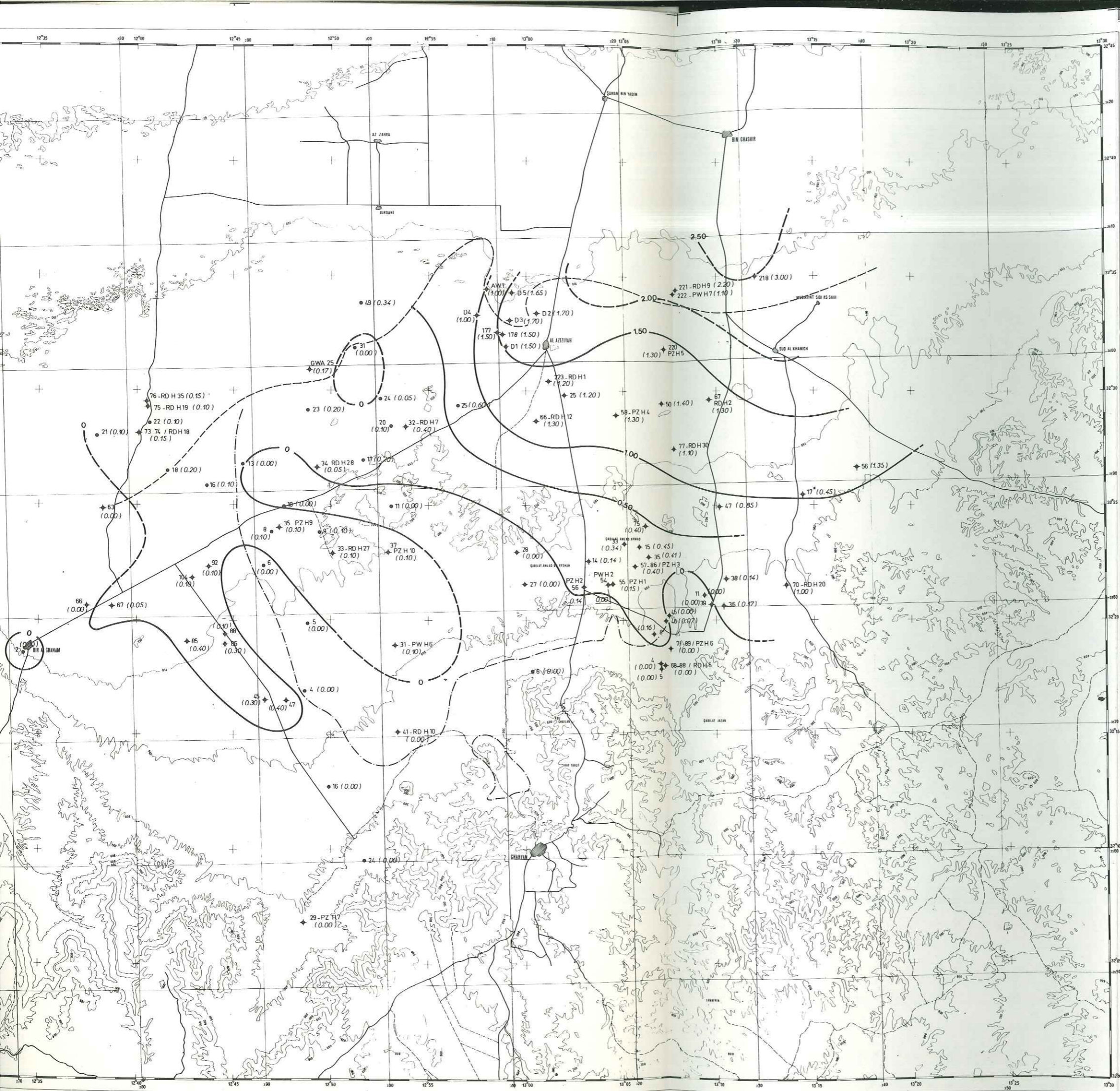
- ◆ ● (0.50) Observation point (decline of 0.50m./ year)
Point d'observation (baisse de 0,50m./ an)
- 0.50* Decline of 0.50 m. / year (uncertain value)
Baisse de 0.50 m. / an (valeur incertaine)
- — — — — Curve of egal decline
Courbe d'égale baisse
- - - - - Curve of egal decline (approximate curve)
Courbe d'égale baisse (tracé approximatif)
- Northern limit of extension of the Abu Shaybah formation -
Limite d'extension nord de la formation de l'Abu Shaybah.
- Southern limit of extension of the Miocene green clays -
Limite d'extension sud des argiles vertes miocènes

0 10 Km

Assemblage of the 1/50,000 scale maps
Assemblage des cartes au 1/50,000

32°45'	12°35'	12°45'	12°55'	13°05'	13°15'	13°25'
1990 III	1890 II	1890 III	1890 III	1890 III	1890 III	1890 III
32°30'	1890 IV	1890 I	1890 IV	1890 IV	1890 I	1890 I
32°15'	1890 III	1890 II	1890 III	1890 III	1890 II	1890 II
32°00'	12°30'	12°40'	12°50'	13°00'	13°10'	13°20'

Equidistance of the curves : 100 meters except in the plain 50 meters
Equidistance des courbes : 100 mètres sauf en plaine 50 mètres



Carte n° 56 A

REMONTÉE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES
OBSERVEE POUR L'ANNEE 1974 - 1975

- LEGEND -

◆ (0.50) Observation point (decline of 0.50m./year)
Point d'observation (baisse de 0,50m./an)

Seepage zones revealed
Zones d'infiltration mises en évidence

Curve of egal recovery
Courbe d'égal remontée

Curve of egal recovery (approximate curve)
Courbe d'égal remontée (tracé approximatif)

Northern limit of extension of the Abu Shaybah formation - Limite d'extension nord de la formation de l'Abu Shaybah.

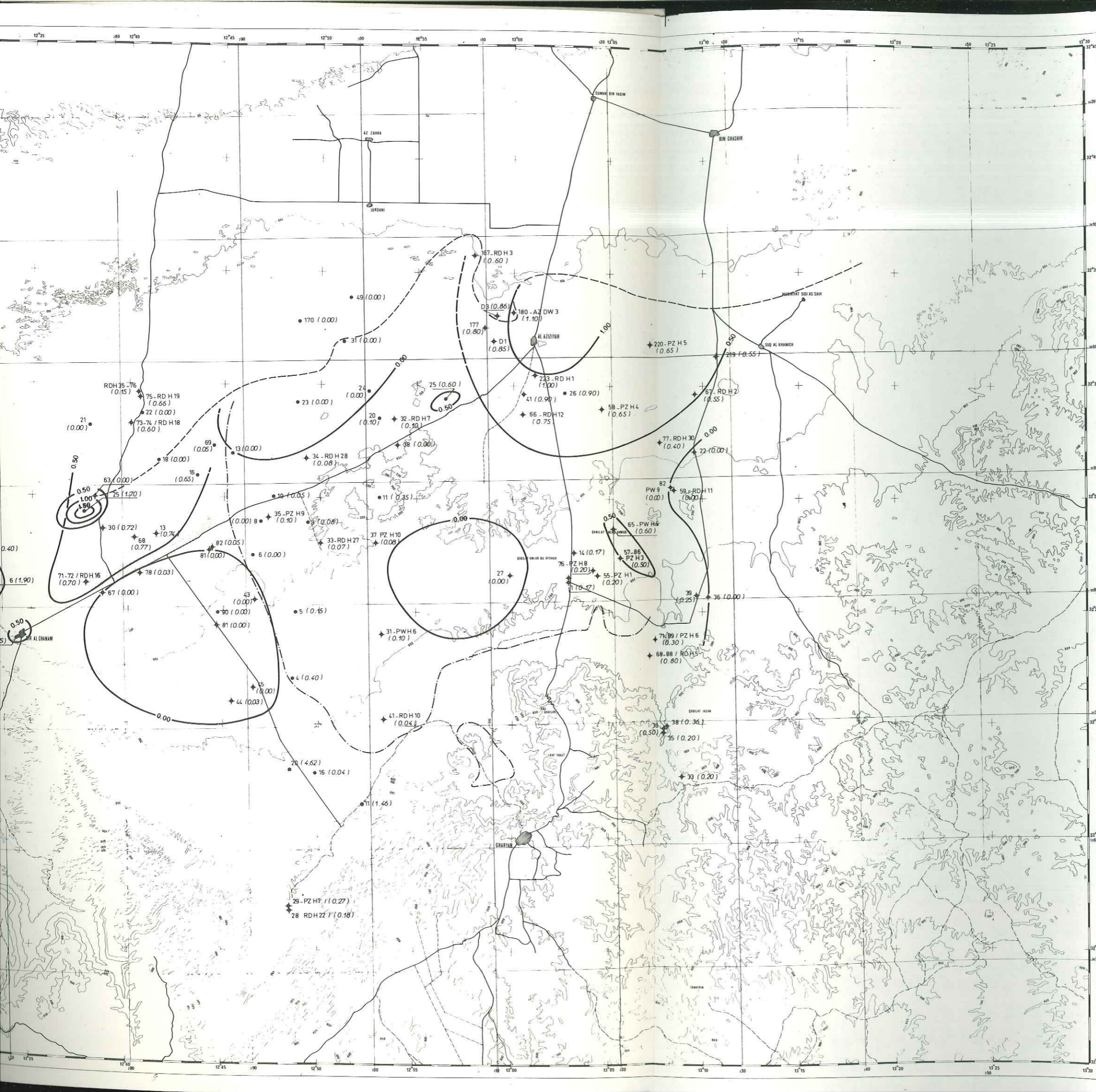
Southern limit of extension of the Miocene green clays - Limite d'extension sud des argiles vertes miocènes

0 10 Km

Assemblage of the 1:50,000 scale maps
Assemblage des cartes au 1/50,000

32°45'	12°55'	13°00'	13°05'	13°10'
1990 III	1990 II	1990 III	1990 III	1990 II
32°30'	12°55'	13°00'	13°05'	13°10'
1989 IV	1989 I	1989 IV	1989 I	1989 I
32°15'	12°55'	13°00'	13°05'	13°10'
1989 III	1989 II	1989 III	1989 II	1989 II
32°00'	12°55'	13°00'	13°05'	13°10'

Equidistance of the curves: 100 meters except in the plots 50 meters
Équidistance des courbes: 100 mètres sauf en plans 50 mètres



VU

Grenoble, le

Le Président de la thèse
R. BARBIER

Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale
G. CAU