

Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors de la crue exceptionnelle de mars 1973

J. CLAUDE

Hydrologue ORSTOM à la Division des Ressources
en Eau, Tunis

G. FRANCILLON

Professeur de statistique au Laboratoire d'informatique
de l'Institut national agronomique de Tunis

J. Y. LOYER

Pédologue ORSTOM à la Division des Ressources en Sol,
Tunis

RÉSUMÉ

En mars 1973, l'oued Medjerda a connu une crue exceptionnelle provoquant de graves inondations. Les mesures hydrologiques faites pendant la crue et les relevés des épaisseurs des alluvions faits après le retrait des eaux des zones inondées ont permis d'évaluer les transports solides et les volumes de sédiments déposés qui sont tout à fait exceptionnels. Les analyses pédologiques pratiquées sur un grand nombre d'échantillons d'alluvions ont servi de base à une étude statistique sur les sédiments eux-mêmes et sur le substratum auquel ils sont comparés. Les analyses en composantes principales et les analyses discriminantes à plusieurs populations des paramètres caractéristiques ont permis :

- de différencier infailliblement les sédiments du substratum sur lequel ils reposent ;*
- de mettre en évidence un classement systématique sur le plan vertical en fonction de la granulométrie des particules, ainsi qu'une anomalie dont l'interprétation sur le plan hydrologique est délicate faute de mesures de débits solides suffisantes ;*
- de même latéralement, de montrer que la taille des particules s'affine au fur et à mesure que l'on s'éloigne du lit ;*
- de dégager l'influence des ouvrages hydrauliques ou autres obstacles à l'écoulement qui ont pour effet de bouleverser la granulométrie des sédiments qui est d'autant plus grossière que l'obstacle est plus important ;*
- de conclure à la faible variabilité des caractères des sédiments de l'amont vers l'aval, qui est fortement masquée par les perturbations apportées à l'écoulement par des ouvrages humains ou des obstacles naturels.*

ABSTRACT

The flood of Medjerda River in March 1973 has been a rare occurrence and caused severe damages. The hydrological measurements carried out during the flood and the survey of the thickness of deposits allowed to estimate sediment transportation and sediment yield which are quite exceptional.

The pedological analysis which was practised on a large amount of sediment samples have permitted to establish a statistical study of the sediments and of the substratum at which they are compared. The findings of principal component analysis and of the discriminant analysis at several populations of characteristic parameters give significant values on the variation of grain-size distribution of sediment on the vertical and horizontal plan, on the influence of the hydraulic works and it may be noted that the small variability of sediment characteristics from upstream to downstream is widely hidden by runoff disturbances caused by human works or natural obstacles.

SOMMAIRE

Avant-propos

Introduction

1. *Les phénomènes pluviométriques et hydrologiques et leurs conséquences : les inondations et les dépôts*
 - 1.1. La pluviométrie
 - 1.2. La crue du 27 mars au 1^{er} avril 1973
 - 1.3. Les zones inondées
 - 1.4. Les effets de la crue
 - 1.5. Mesure des transports solides
 - 1.6. Composition chimique des eaux
 - 1.7. Les alluvions déposées
 - 1.8. Discussion
 - 1.9. Essai de quantification
 - 1.10. Conclusions
2. *Analyses globales des alluvions déposées et des substrats*
 - 2.1. Analyse qualitative des alluvions
 - 2.2. Comparaison aux substrats
3. *Analyses différentielles des alluvions par les méthodes statistiques*
 - 3.1. Analyse en composantes principales
 - 3.2. Recherche d'un classement vertical et géographique des alluvions
 - 3.2.1. Classement vertical des alluvions
 - 3.2.2. Classement géographique
4. *Conclusion*
5. *Bibliographie*

AVANT-PROPOS

Cette étude a été réalisée dans le cadre des actions sur convention entre l'ORSTOM et le gouvernement tunisien, ministère de l'Agriculture (action de type A).

Les mesures sur le terrain, pendant et après la crue, ont pu être réalisées grâce aux moyens mis à notre disposition par les responsables de la Direction des Ressources en Eau et en Sol : MM. KHOUDJA, directeur, HAMZA, Division des Sols, ZEBIDI, Division des Ressources en Eau, KALLEL, Service hydrologique.

Les analyses des échantillons prélevés ont été effectuées pour la plupart dans les laboratoires de l'ORSTOM à Bondy par les services de MM. DABIN, PELLOUX, COMBEAU et PINTA. Quelques analyses complémentaires ont été réalisées par le laboratoire de la Division des Sols dirigé par Mme NAANA.

Le traitement statistique des données d'analyses a été effectué au Laboratoire d'informatique de l'Institut national agronomique de Tunis, sur ordinateur HP 9830, grâce à l'obligeance de son directeur, M. K. BELKHODJA.

INTRODUCTION

L'oued Medjerda est le plus important de Tunisie ; il draine un bassin versant de 23 500 km² dont 7 600 km² sont situés en Algérie ; le cours suivant la branche la plus longue s'étend sur près de 600 km, le cours principal de la Medjerda faisant lui 485 km.

L'oued Medjerda et ses affluents collectent de l'ouest vers l'est la majeure partie des eaux de surface du nord de la Tunisie et véhiculent en moyenne près d'un million de mètres cubes d'eau par an soit environ la moitié des eaux superficielles disponibles sur l'ensemble du pays.

Le régime hydrologique de cet oued est très hétérogène ; il est régularisé par de nombreux ouvrages (5 barrages) qui répartissent sur toute l'année les écoulements d'hiver les plus abondants.

Le régime naturel résulte de l'addition de celui des différents sous-bassins bien caractérisés :

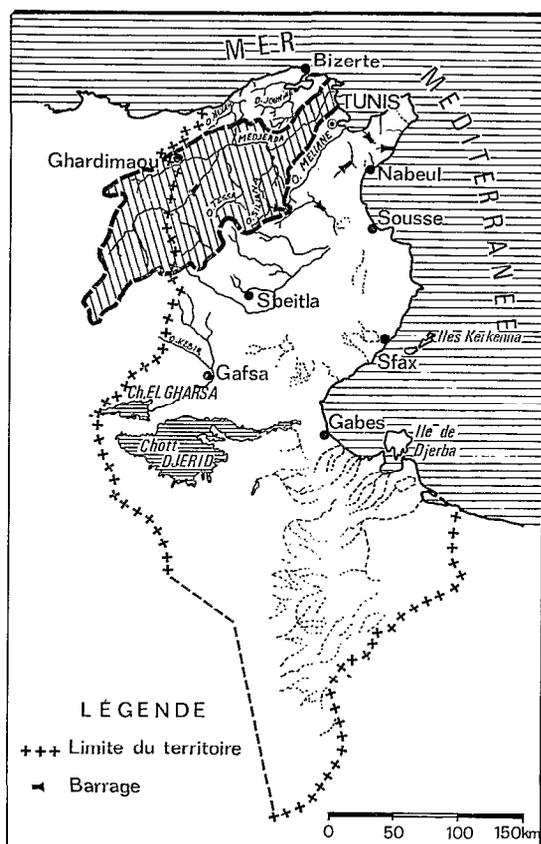
- la haute Medjerda et les affluents de la rive gauche, très arrosés en hiver (500 à 1 000 mm) et aux écoulements abondants ;
- les affluents rive droite, drainant de hauts plateaux en Algérie (Mellègue) et le flanc nord de la grande dorsale tunisienne, aux ressources moins abondantes mais soumis à de violents orages d'automne et de printemps ;
- la basse vallée, au relief peu marqué, très travaillé par l'homme et subissant l'influence maritime de la Méditerranée orientale.

La concordance de crues importantes sur tous les sous-bassins est très rare, mais non impossible, d'où l'ampleur limitée des crues exceptionnelles ; ainsi la crue décennale à Medjez el Bab (21 000 km²) estimée à 330 millions de mètres cubes, avec un débit maximum de 1 300 m³/s.

Au cours du mois de mars 1973, des précipitations continues sont tombées sur le nord de la Tunisie et de l'Algérie entretenant une très forte humidité des sols déjà bien humectés au sortir de l'hiver ; les pluies des 25, 26, 27 et 28 mars ont déclenché un fort ruissellement, provoquant une crue exceptionnellement forte de l'oued Medjerda lui-même aboutissant à des inondations catastrophiques dans la moyenne et surtout la basse vallée.

Devant l'ampleur de la sédimentation constatée après le retrait des eaux, nous nous sommes proposé d'effectuer l'étude des alluvions déposées qui présentent un intérêt certain à de nombreux égards :

- sur le plan pédologique d'une part, leur caractérisation au départ est importante car elles constituent le le matériau originel de nombreux sols d'apports alluviaux actuels de la vallée de l'oued Medjerda, et d'autre



Carte 1. — Plan de situation

- part, l'évolution dans le temps de certaines de leurs caractéristiques physico-chimiques mérite d'être suivie ;
- sur le plan agronomique, ces apports qui ont ennoyé les plaines de la basse vallée constituent les nouvelles terres de culture que les agriculteurs doivent exploiter ;
 - sur le plan hydrologique, ces alluvions offrent un moyen indirect d'estimer la quantité minimale transportée par l'oued et de recouper les mesures directes de transport solide.

1. LES PHÉNOMÈNES PLUVIOMÉTRIQUES ET HYDROLOGIQUES ET LEURS CONSÉQUENCES : INONDATIONS, DÉPÔTS

Les fortes précipitations tombées sur la majeure partie de la Tunisie du 24 au 30 mars 1973, et particulièrement sur le nord du pays et le bassin versant de la Medjerda, ont provoqué la plus forte crue connue actuellement sur le cours principal de cet oued.

Les observations et mesures faites à cette occasion par le Service hydrologique de la Direction des Ressources en Eau et en Sol, l'interprétation de ces mesures et les conclusions qui en ont été tirées, ont été publiées en octobre 1973 par le Service hydrologique [7]. Nous rappellerons seulement ici les principales données hydrologiques de cette crue de façon à situer dans leur contexte d'événement exceptionnel les prélèvements d'alluvions qui sont analysés ici.

1.1. LA PLUVIOMÉTRIE DE MARS 1973

Les deux premières décades du mois de mars 1973 ont connu une pluviométrie très voisine de la normale, avec principalement un épisode pluvieux du 12 au 19 mars, totalisant de 30 à 60 mm de pluie sur l'ensemble des postes pluviométriques. Sans donner lieu à un ruissellement notable, ces pluies avaient bien imbibé les terrains qui, à la sortie de l'hiver, sont souvent à la limite de la saturation. Du 24 au 30 mars, les précipitations amenées par des vents nord-ouest, ont pris une ampleur exceptionnelle, particulièrement dans la journée du 27 mars et la nuit du 27 au 28. A cause de la direction des vents, ce sont l'extrême-nord, la haute Medjerda et le haut Mellègue qui ont connu les plus fortes précipitations, avec un très fort gradient altimétrique ; les pluies, tout en demeurant très fortes, décroissent nettement au passage de la dorsale. Ces précipitations, trouvant un sol déjà saturé ont donné lieu à un ruissellement quasi immédiat avec un coefficient de ruissellement très fort pour des grands bassins versants.

Le tableau I ci-après donne un aperçu chiffré de l'importance de ces précipitations à quelques stations connues [7].

TABLEAU I

Stations	Altitude	Pluie moyenne en mars (mm)	Pluie de mars 1973 (mm)	Maximum de 24 h en mars 1973 (mm)	Indice pluviométrique du mois
Tunis	66	47,2	179,6	53,0 le 26	3,80
Bizerte	8	51,6	183,8	50,3 le 27	3,56
Mateur	16	43,9	291,3	90,0 le 27	6,63
Tabarka	10	84,2	288,4	73,5 le 27	3,42
Beja	234	61,1	261,5	60,5 le 27	4,27
Teboursouk	440	58,1	259,2	80,0 le 27	4,46
Thibar	365	68,8	223,4	64,5 le 27	3,24
Medjez El Bab	112	46,7	190,0	52,0 le 27	4,06
Jendouba	143	49,9	185,8	46,3 le 26	3,72
Thala	1 020	50,5	151,9	82,0 le 27	3,01
Aïn Draham	715	166,1	543,4	138,0 le 27	3,42
El Feidja	700	130,1	473,3	145,0 le 27	3,62
Le Kef	674	57,2	261,0	90,0 le 26	4,56
Maktar	937	52,7	193,2	92,0 le 27	3,66
Siliana	423	34,2	255,9	89,3 le 27	7,48
Tadjerouine	511	24,9	139,1	20,9 le 27	5,58

On remarque que :

- a) les stations situées en altitude ont de loin été les plus arrosées ; elles sont malheureusement peu nombreuses, aussi le tracé des isohyètes sur les régions montagneuses est-il très imprécis et les quantités de pluie tombées sur les reliefs sont probablement sous-estimées en particulier dans la partie algérienne de la haute Medjerda où nous n'avons que les valeurs de Souk Akras (174,6 mm) ;
- b) la pluie maximum de 24 h est relativement faible par rapport au total du mois, et ne s'est pas produite partout le même jour. Les pluies importantes se sont étalées sur 3 à 4 jours, avec des intensités instantanées peu élevées, mais une grande régularité, ce qui, à l'échelle des grands bassins versants, a provoqué une montée relativement lente des eaux mais une crue ample et étalée ;
- c) l'indice pluviométrique du mois (rapport de la pluie du mois à la normale du même mois) est de 3,5 à 4 pour la majorité des stations. La période de retour de ces pluies est difficilement estimable, car elle n'est pas homogène. Ponctuellement, la période de retour estimée est proche de 100 ans ou supérieure à 100 ans (la pluie de période 100 ans, en mars, calculée dans la *Monographie de la Medjerda*, est de 163 mm à Thala, 389 mm à El Feidja, 174 mm à Maktar), mais la probabilité pour que des pluies centennales à chaque station s'abattent simultanément sur les postes de tout un bassin versant aussi vaste que celui de la Medjerda est plus faible que la probabilité d'occurrence ponctuelle.

Pluies moyennes (tableau II)

Les isohyètes tracées pour la période du 24 au 31 mars sur tout le bassin versant de la Medjerda ont permis, par planimétrie, de calculer la pluie moyenne tombée sur chaque bassin versant contrôlé par une station hydro-métrique.

TABLEAU II

Bassin versant	Superficie du BV (km ²)	Pluie moyenne sur le BV du 24 au 31 mars (mm)	Remarques
Medjerda à Ghardimaou	1 480	176	probablement sous-estimée
Medjerda à Jendouba	2 410	179	<i>id.</i>
Medjerda à Bou Salem	16 230	123	<i>id.</i>
Medjerda à La Sloughia	20 990	128	
Medjerda à Djedeida	22 100	126	
Rarai au Rarai Plaine	356	290	BV montagneux
Siliana à Dj. Laoudj	2 110	135	
Tessa à Sidi Mediene	1 950	115	

Ces isohyètes sont très imprécises et peu détaillées surtout dans la partie algérienne du bassin de l'oued Mellègue.

1.2. LA CRUE DU 27 MARS AU 1^{ER} AVRIL 1973

A partir du 27 mars, tous les affluents et la Medjerda elle-même entraînent en crue. C'est sur le cours même de la Medjerda que la crue s'est développée avec le plus d'ampleur. Sur la haute Medjerda, on observe une montée assez rapide et régulière qui atteint le 28 mars un maximum exceptionnel ; la décrue s'amorcera ensuite rapidement. A partir de Bou Salem, à l'amont immédiat duquel se trouvent les principales confluences, on observe une montée assez lente mais très puissante, un maximum très étalé et plat et une décrue assez lente aussi ; la concordance des écoulements sur tous les affluents a contribué à gonfler l'onde de crue de la Medjerda, les apports des différents affluents se sont intégrés à ceux de la Medjerda où l'on observe un seul maximum et où l'arrivée des ondes de crues des différentes branches est absolument indiscernable (même les lâchures du barrage Mellègue à 1 200 m³/s). Les principaux affluents ont également connu des crues énormes, mais pas aussi exceptionnelles que la Medjerda, en particulier les affluents de la rive droite (Mellègue, Tessa, Siliana) n'ont pas atteint des débits aussi élevés qu'au cours des crues de l'automne 1969. Les affluents de la rive gauche sont de taille plus réduite, et comme les pluies de 24 h n'ont pas été très fortes, ils n'ont pas donné de débits instantanés énormes, mais souvent plusieurs pointes de crues et un débit soutenu pendant plusieurs jours ce qui conduit à des volumes écoulés exceptionnels. Nous avons rassemblé dans le tableau III ci-après les principaux résultats concernant les débits liquides que nous commenterons par la suite.

A l'aval de La Sloughia et de Medjez El Bab, nous n'avons pas eu d'observations suivies pendant ces 6 jours.

C'est à partir de Testour que les débordements ont pris une importance vraiment catastrophique. Toute la basse vallée étant inondée, l'accès à Djedeida était impossible les 28, 29 et 30 mars, les eaux s'écoulaient dans de vastes zones hors du lit et les mesures de hauteurs d'eau n'auraient pas eu grande signification. La station de référence pour cette crue reste La Sloughia qui remplace celle de Medjez submergée et détruite.

TABLEAU III

Station	Superficie du BV (km ²)	Débit maximum (m ³ /s)	Date et heure du Q max (mars 1973)	Volume écoulé en 6 jours (× 10 ⁶ m ³)	Observations et débordements
Medjerda à Ghardimaou	1 480	2 370	le 28 à 1 heure	206,9	Pas de débordements au pont, coupures de méandres à l'aval.
Medjerda à Jendouba	2 410	2 420	le 28 à 12 h 30	259	Débordements peu étendus de part et d'autre du pont et en ville le 28 mars.
Medjerda à Bou Salem	16 230	3 180	le 29 à 3 heures	721	Débordements à l'amont du pont et en ville du 28 mars à 7 heures au 30 mars dans la matinée.
Medjerda à La Sloughia	20 990		le 28	943	Débordements à partir de Testour et à Medjez du 27 mars à 12 heures au 31 mars à 21 heures environ.
et Medjez El Bab	21 200	3 500	12 à 15 heures		
Mellègue au K 13	9 000	1 280	le 28 à 5 heures	189,5	Première pointe de crue le 27 mars à 2 heures Q = 577 m ³ /s, pas de débordements.
Mellègue au barrage (lâchures)	10 000	1 200	—	155	Lâchures = 600 m ³ /s le 28 de 12 h 30 à 0 h 30 ; 1 200 m ³ /s le 29 de 0 h 30 à 13 h 30 ; 600 m ³ /s du 29 à 23 h 30 au 31 à 12 heures.
Tessa à Sidi Mediene	1 950	545	le 28 à 5 heures	(75)	Observations incomplètes, plusieurs pointes de crues.
Siliane à Dj. Laoudj	2 110	1 320	le 28 à 11 heures	138	
Rarai à Rarai Plaine	356	614	le 28 à 4 h 30	64	Observations des hauteurs d'eau imprécises plusieurs pointes.
Rhezalah à Fernana	138	148,2	le 28 à 7 h 30	16,8	Plusieurs pointes de crue.

1.2.1. Les débits maximums

Sur le cours de la Medjerda, les débits observés sont de loin les plus forts jamais vu depuis le début des observations faites sur cet oued (1898 à Jendouba, 1925 à Bou Salem). Les séries de mesures exploitables n'étant pas homogènes sur toutes les stations, il est difficile d'avancer une période de retour pour cet événement, toutefois des estimations ont été faites dans la *Monographie de la Medjerda* [10] qui permettent des comparaisons :

TABLEAU IV

Bassins versants	Q centenaire estimé (m ³ /s)	Q max mars 1973 (m ³ /s)
Medjerda à Ghardimaou	887	2 370
Medjerda à Jendouba	1 531	2 420
Medjerda à Bou Salem	2 016	3 180
Medjerda à Medjez (Sloughia)	3 363	3 500
Mellègue au K13	3 814	1 280
		(4 480 en sept. 1969)
Rhezalah à Fernana	296	148

Ces valeurs sont donc largement supérieures aux débits centenaires estimés pour la Medjerda. Sur les affluents, les débits sont beaucoup moins exceptionnels, comme nous l'avons mentionné, la période de retour serait de 10 ans pour le Mellègue, le Tessa et le Rhezalah et de 20 ans pour la Siliana.

1.2.2. Les volumes écoulés en 6 jours

La connaissance des volumes écoulés au cours de la crue est aussi importante que celle des débits maximums. Du fait de la généralisation des crues sur tout le bassin, les volumes écoulés dans la Medjerda sont énormes et leur période de retour plus élevée que celle des débits maximums. Ces périodes sont estimées (toujours d'après la *Monographie de la Medjerda*) à 7 à 800 ans à Ghardimaou, 200 à 300 ans à Jendouba et La Sloughia. Ces périodes de retour sont moins élevées sur les affluents et comprises entre 50 et 100 ans.

Il est intéressant, pour fixer l'ordre de grandeur de ces volumes, de les comparer aux apports moyens inter-annuels (cf. tableau V).

TABLEAU V

Bassins versants	Volume annuel moyen ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Apports de 6 jours en 1973 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
Medjerda à Ghardimaou	189	206,9
Medjerda à Jendouba	216	259
Medjerda à Bou Salem	673	721
Medjerda à La Sloughia (Medjez)	952	943
Mellègue au K13	162	189,5
Rhezalah à Fernana	43	16,8

Ainsi, en 6 jours, une seule crue a apporté plus d'eau que toute une année moyenne.

1.2.3. Forme des hydrogrammes

Pour donner une vue globale de cette crue, nous avons comparé sur la figure 1, les hydrogrammes aux différentes stations, en décalant l'échelle des temps en fonction des temps de propagation estimés entre stations, et l'échelle des débits d'une valeur comparable aux apports des bassins intermédiaires. Il ne s'agit pas là d'une composition d'hydrogrammes au sens strict, mais la lecture du graphique est intéressante. On remarquera que :

- 1) le maximum de débit a eu lieu à La Sloughia avant Bou Salem, la montée des eaux a été simultanée sur tout le cours inférieur de la Medjerda et la pointe de débit très en avance à La Sloughia est directement liée au débit maximum de la Siliana ($1\,320 \text{ m}^3/\text{s}$). L'apport de Bou Salem arrive ensuite et provoque une décrue très lente ;
- 2) la concordance des hydrogrammes décalés de Ghardimaou et Jendouba avec celui de Bou Salem est très bonne. Si on estime à environ $500 \text{ m}^3/\text{s}$ le débit apporté par le bassin versant intermédiaire (Mellègue exclu), on voit que les apports de la haute vallée sont responsables de $2\,900 \text{ m}^3/\text{s}$ environ sur $3\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ passés à Bou Salem ;
- 3) les lâchures effectuées au barrage Mellègue, par sécurité, ont très peu laminé la crue enregistrée au K13 du point de vue des débits mais elles ont retardé la propagation de cette crue d'une vingtaine d'heures. L'arrivée de ces lâchures n'est pas visible sur l'hydrogramme de Bou Salem, mais un témoin oculaire a confirmé l'arrivée du débit maximum au Pont de Cinq Dinars, juste à l'amont du confluent Mellègue-Medjerda, le 28 mars 1973 à 13 heures ce qui justifie notre décalage. On voit que ces lâchures ont dû retarder le maximum de débits à Bou Salem de 6 à 8 heures et augmenter ce débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une augmentation du niveau d'eau de 30 à 40 cm seulement, au moment du maximum. Par contre la décrue a été retardée par ces lâchures, on peut estimer que sans ces lâchures l'hydrogramme de Bou Salem aurait été presque parallèle à celui de Jendouba à la décrue, ce qui est confirmé par le fait que l'aire comprise entre les 2 hydrogrammes tels que nous les avons représentés, équivaut à un volume de $169 \times 10^6 \text{ m}^3$, alors que le total des lâchures du barrage monte à $155 \times 10^6 \text{ m}^3$. On peut donc avancer qu'en l'absence de lâchures du barrage Mellègue les débits maximums à Bou Salem et à l'aval auraient été inchangés ou presque et donc que les zones inondées auraient eu la même extension, mais que le maximum de la crue se serait produit plus tôt et que la décrue aurait été plus rapide donc la durée des inondations raccourcie de 24 à 36 heures.

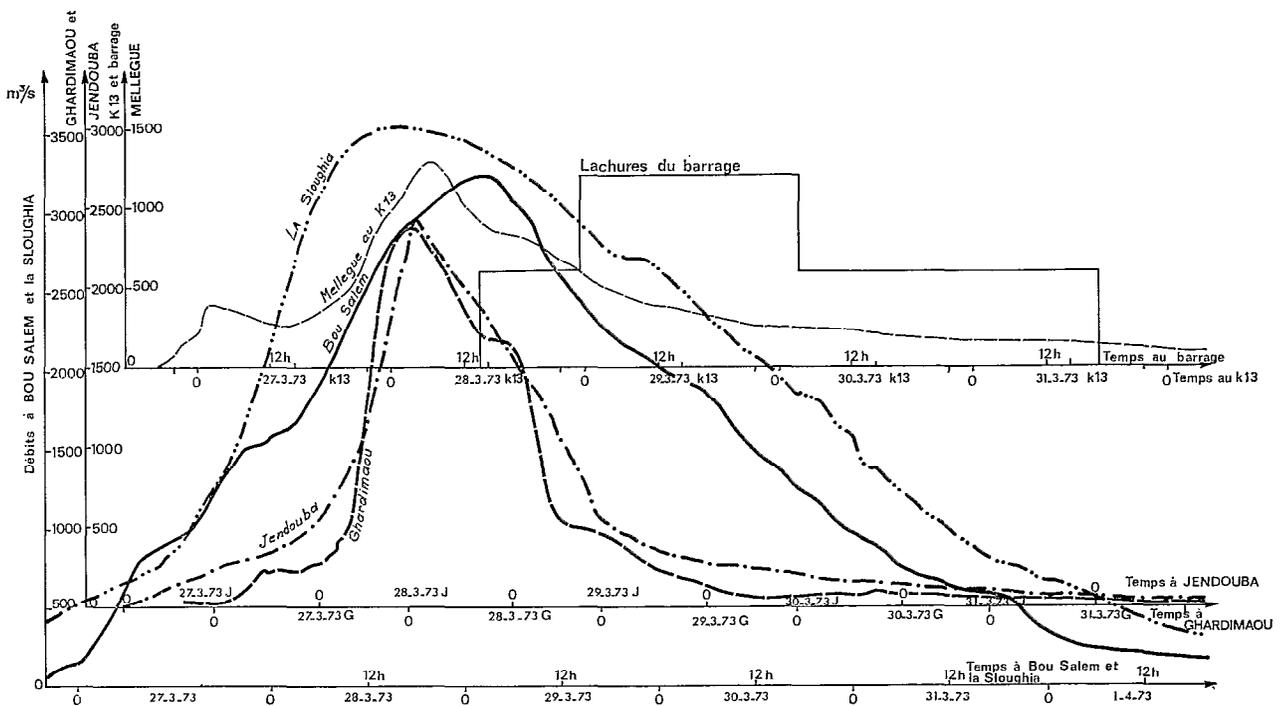


Fig. 1. — Oued Medjerda. Crue de mars 1973 : comparaison d'hydrogrammes

1.3. LES ZONES INONDÉES

Les limites des zones inondées à partir de Sidi Salem ont été portées sur un document cartographique général au 1/100 000^e : elles ont été établies après plusieurs reconnaissances aériennes du bassin, tournées de terrain lorsqu'elles furent possibles, et enquêtes auprès des habitants après le retrait des eaux. Nous avons également utilisé, pour la partie annexe du bassin, la carte des inondations au 1/50 000^e dressée par les équipes de la Direction EGTH depuis Ghardimaou jusqu'à la mer ; ce dernier document a été établi après enquêtes sur le terrain et interprétation des photos aériennes infrarouges prises par l'IGN à l'occasion de ces inondations.

1.3.1. Extension de la crue dans la haute vallée (en amont de Sidi Salem)

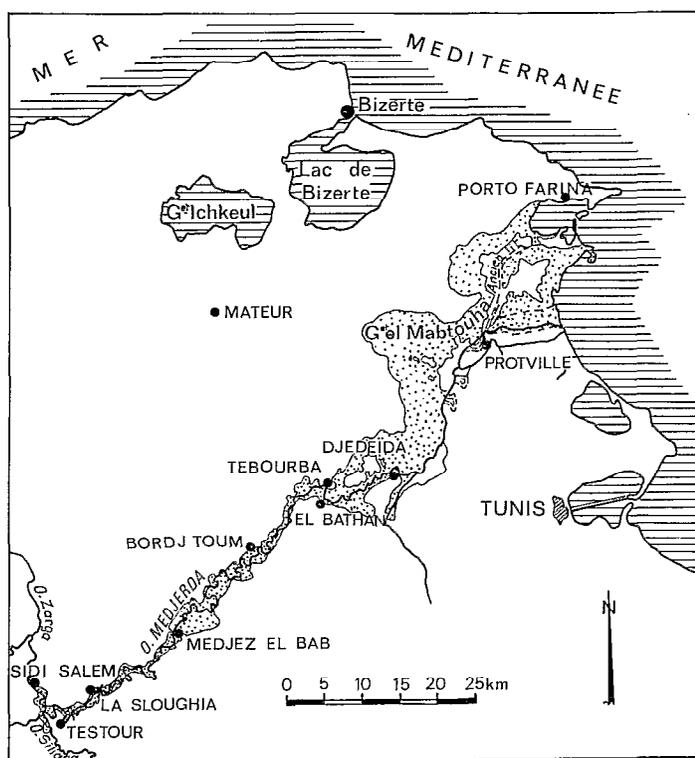
Le document EGTH montre que les zones inondées sont discontinues et d'extension limitée ; trois zones ont été surtout affectées :

- la plaine en rive gauche à l'aval de Ghardimaou au niveau d'oued Meliz ;
- la ville de Jendouba, entièrement inondée, localement sous environ 50 cm d'eau, par un débordement rive droite ;
- une partie de la ville de Bou Salem par un débordement rive gauche juste en amont du pont routier sur la GP 6, les eaux étant sorties du lit mineur à la faveur d'un ancien lit comblé.

Il faut signaler qu'aucun des affluents de l'oued Medjerda n'a donné dans son bassin de zone d'inondation notable, mais seulement un léger débordement au confluent dû au refoulement des eaux de la Medjerda (confluents oued Chafrou, oued Siliana).

1.3.2. Extension de la crue dans la moyenne et la basse vallée (carte 2)

En aval de Sidi Salem, jusqu'à Tebourba, les débordements sont généralisés, mais d'extension limitée ; coupure de méandres, creusement en rive concave, inondation des hautes terrasses parfois jusqu'au raccordement des



Carte 2. — Extension de la crue de 1973 dans la moyenne et basse vallée de la Medjerda

glacis, la plaine n'étant pas très large, et alluvionnement léger. Quelques zones ont néanmoins été plus largement inondées, en particulier la ville de Medjez El Bab, Bordj Toum et l'amont de Tebourba, probablement en raison de la présence dans le lit de deux obstacles importants, le pont de Medjez El Bab et le barrage d'El Batham (cf. pl. 1, 2, 3).

C'est dans la basse vallée à l'aval de Tebourba que l'extension de la crue a été la plus importante et ce, malgré les gros travaux d'endiguement et de recalibrage effectués à partir de Djedeida (1947 à 1957). On peut estimer que dans cette zone la limite des inondations suit approximativement la courbe topographique des 10 m.

La comparaison de la carte de la «grande crue» de 1931, qui eut lieu avant les travaux, à celle de 1973, montre une nette régression du champ inondé en rive droite en 1973, à partir de Sidi Thabet, alors qu'en rive gauche, les limites des deux cartes se superposent. Le creusement de l'émissaire a fortement contribué à l'évacuation des eaux, alors que la Garaa Mabtouha a joué, comme en 1931, le même rôle de réservoir temporaire pour les eaux qui se sont progressivement épanchées jusqu'à Porto Farina.

Les principaux champs d'inondation en 1973 sont la plaine de Chaouat, le domaine d'Utique, la Garaa ben Amar et surtout la Garaa Mabtouha qui représente quelques 12 000 ha.

Au total, nous avons évalué, après planimétrage, à 47 000 ha les zones inondées depuis Sidi Salem jusqu'à la mer.

1.4. LES EFFETS DE LA CRUE

Les dégâts causés par cette crue ont été importants et leur inventaire a déjà été dressé, chiffré et commenté par différents services du ministère de l'Agriculture : pertes en vies humaines (près de 100 morts), habitations en terre détruites, créant plusieurs milliers de sans-abri, infrastructures ferroviaire et routière gravement touchées, ponts et digues partiellement endommagés, pertes en bétail, cultures annuelles plus ou moins détériorées, sans

parler des dégâts occasionnés par les sédiments qui ont comblé, en particulier, la plupart des réseaux de drainage de la basse vallée.

Il est remarquable que la plupart des ouvrages d'art récents n'ont pas été gravement endommagés, ce qui montre qu'ils ont été correctement dimensionnés et implantés ; les principaux ponts enjambant la Medjerda n'ont pas été submergés, seul l'ancien pont routier métallique de La Sloughia a été détruit par effondrement de la pile centrale ; le pont « andalou », classé monument historique, de Medjez El Bab a été submergé et endommagé et le limnigraphe qui s'y appuyait a été détruit, mais ce pont n'a pas été emporté, de même que pour le pont-barrage d'El Batham, le pont routier situé dans la ville de Djedeida et le pont de chemin de fer à l'aval de Djedeida où se trouvait aussi un limnigraphe.

Par contre, si les ponts ont été maintenus hors d'eau, ce sont les accès immédiats de ces ponts, situés généralement plus bas, qui ont été inondés d'où les coupures de circulation prolongées (Jendouba, Bou Salem, Beja, Medjez El Bab, Djedeida, Protville).

Tous les barrages importants ont soit effectué des lâchures de sécurité (Mellègue-Ben Métir), soit déversé (Kasseb-Lakhmess) mais sans subir de dégâts : le barrage de prise d'eau d'El Aroussia, dont les vannes secteurs ont été ouvertes en grand a subi un contournement sans importance ni gravité.

Les dégâts les plus dramatiques ont été infligés aux installations au sol situées dans les zones de débordement et dont l'implantation n'est souvent pas contrôlée ; de nombreuses maisons ont été envahies par les eaux à Bou Salem, Jendouba, Medjez El Bab, Tebourba, Djedeida.

Les installations d'hydraulique agricole, dans ces zones, ont été soit emportées par les eaux, soit partiellement enfouies sous les sédiments, les canaux de drainage ont été colmatés et de nombreux puits de surface ont été bouchés, obligeant à de longs et coûteux travaux de remise en état.

Nous avons très peu d'éléments sur les modifications morphologiques du lit de la Medjerda. Nous avons pu constater à partir de Jendouba et Bou Salem de nombreuses coupures de méandres, avec érosion de la partie concave, des effondrements de falaises de Trias dans le défilé de Pont Trajan, des remaniements importants du lit et des berges au passage de sections particulières imposant un rétrécissement et une mise en vitesse (pont de La Sloughia, pont de Medjez El Bab, barrage El Aroussia, barrage d'El Batham), mais dans l'ensemble, à la décrue, l'oued a repris son tracé habituel et nous n'avons pas constaté de déplacements ou surcreusements ou comblements spectaculaires ni de modification de pente importante jusqu'à Protville tout au moins.

Le fonctionnement des aménagements de la basse vallée (endiguement, recalibrage) a été controversé ; il est certain que ces aménagements ont dans l'ensemble eu un effet bénéfique et que, depuis les années 1950, les inondations dans la basse vallée sont moins fréquentes. Ces aménagements ont pour effet de laminier les débits maximums tout en facilitant l'accès à la mer ; l'émissaire d'Henchr Tobbias véhicule la plus grande partie des volumes, il est en principe dimensionné pour un débit maximum de 1 200 m³/s, de ce fait l'ancien lit naturel de la Medjerda drainant des zones inondées a été colmaté par d'importantes quantités de sédiments, et son niveau de base s'est certainement élevé ; au contraire, à l'aval de Galaat el Andaleuss, un phénomène d'érosion régressive dans l'émissaire a creusé à l'aplomb d'un affleurement du pliocène résistant, une cascade de 7 à 8 m au cours des crues de 1969 et 1973. Il est donc certain que l'ancien lit de la Medjerda nécessitera des travaux de recalibrage et que de toute façon l'émissaire d'Henchr Tobbias joue de plus en plus le rôle de lit principal.

1.5. MESURES DES TRANSPORTS SOLIDES

Comme c'est souvent le cas lors de crues exceptionnelles, les hydrologues se préoccupent d'abord d'observations limnimétriques et de jaugeages et ont tendance à négliger les mesures de qualité des eaux et de turbidité.

Les opérations de jaugeage ont commencé à La Sloughia le 29 mars 1973 vers 18 heures, et se sont poursuivies jusqu'au 5 avril 1973. A chaque traversée, un échantillon d'eau était prélevé à la verticale 9, soit à 20 m environ du bord rive droite et à 3 m de la première pile du pont ; ces prélèvements étaient faits dans des bouteilles à goulot étroit, lancées dans l'eau au bout d'une ficelle. Trois prélèvements ont été effectués au saumon creux les 3 et 4 avril 1973.

Nous avons rassemblé les résultats concernant 26 prélèvements faits à La Sloughia du 29 mars 1973 au 5 avril dont 14 seulement jusqu'au 1^{er} avril 1973 à 20 heures ; à partir de ce moment, les débits sont inférieurs à 300 m³/s et on peut admettre que les débordements avaient cessé et qu'il n'y avait donc plus de dépôts dans les zones inondées. A Djedeida, un saumon creux US-SS était mis en service le 2 avril, 26 prélèvements furent effectués jusqu'au 3 à 18 heures par cette méthode, puis 11 prélèvements furent faits à la bouteille du 3 au 10 avril pour des débits ne dépassant pas 250 m³/s

Les résultats d'analyse de ces divers échantillons sont assez disparates, tous n'ont pas subi les mêmes analyses dans les mêmes laboratoires, mais c'est plus sûrement le mode et les conditions de prélèvement qui laissent planer un doute sur la représentativité des résultats.

La liste des résultats d'analyse que nous avons pu regrouper pour La Sloughia et Djedeida est donnée en annexe. Les échantillons de La Sloughia ont pu être analysés de façon assez complète et nous estimons que les valeurs données sont fiables. Ceux de Djedeida ont été traités beaucoup plus sommairement, en particulier on ne dispose d'aucune mesure de granulométrie sur les sédiments prélevés et on a très peu d'analyses ioniques complètes.

On remarquera tout de suite, au vu de ces tableaux, que :

- 1) les valeurs des *résidus secs* sont assez homogènes et très élevées dans l'ensemble pour une crue de cette importance. Nous n'avons pas eu de prélèvements à Ghardimaou et Jendouba comme points de comparaison, mais il est probable que les apports de la haute vallée et des affluents rive gauche étaient moins chargés que ceux des affluents rive droite et que la pointe des salinités enregistrée dans la journée du 1^{er} avril 1973 est due aux apports du barrage sur l'oued Mellègue dont les eaux ont un résidu sec moyen de 2,5 à 3 g/l. À titre indicatif, pour une crue observée les 19-20 février 1975, on a mesuré des résidus secs allant de 0,520 g/l à 0,630 g/l pour les débits de 480 à 160 m³/s ;
- 2) les valeurs des *transports en suspension* et des déterminations granulométriques sont très dispersées. Nous discuterons plus loin des multiples causes possibles de ces variations mais il ne faut pas perdre de vue qu'un seul échantillon était prélevé à la fois toujours au même endroit et toujours en surface ce qui exclut tout contrôle de la représentativité des échantillons.

1.5.1. Résultats des mesures

Cette maigre moisson de mesures directes des transports solides a cependant été utilisée, faute de mieux, pour estimer les quantités de sédiments et de matières dissoutes transportées par la crue du 27 mars au 1^{er} avril.

Les calculs ont été faits pour la station de La Sloughia avec uniquement les 14 premiers échantillons. Les mêmes calculs n'ont pas pu être faits à Djedeida, d'abord parce que nous ne disposions pas de mesures de débits permettant de reconstituer la crue étant donné l'importance des débordements et ensuite parce que les prélèvements ont été faits en fin de crue et portent sur des débits assez faibles.

À La Sloughia, les mesures n'ont commencé que le *troisième jour de la crue*, aussi pour les journées des 27, 28 et 29 mars, les valeurs moyennes de la turbidité et de la salinité ont dû être estimées sur la base des mesures des 3 jours suivants [7], ces estimations sont donc des valeurs minimales pour les transports en suspension.

Le taux de matière organique dans les sédiments transportés varie assez peu, aussi la même extrapolation a été faite pour déterminer le tonnage de matières organiques transporté au cours de la crue (moyenne 0,4 g/l). Le résultat de ces calculs pour les 6 jours considérés est rassemblé dans le tableau VI, les chiffres entre parenthèses sont les estimations. Rappelons que le «jour hydrologique» est compté de 20 heures à 20 heures. Ces calculs ne concernent que les transports en suspension.

TABLEAU VI
MEDJERDA A LA SLOUGHIA

Journée	Volume écoulé ($\times 10^6$ m ³)	Débit moyen (m ³ /s)	Transports en suspension		Salinités		Matière organique ($\times 10^3$ t)
			($\times 10^6$ t)	Concentration moyenne (g/l)	($\times 10^3$ t)	Concentration moyenne (g/l)	
27/3/73	69,5	805	(2,43)	(35)	(83,4)	(1,2)	(28)
28/3/73	257	2 980	(7,71)	(30)	(206)	(0,80)	(103)
29/3/73	272	3 150	(8,16)	(30)	(218)	(0,80)	(109)
30/3/73	195	2 260	5 20	26,6	217	1,11	69,5
31/3/73	103,7	1 200	3 32	32,2	144	1,40	43,4
1/4/73	46,2	535	2,41	52,1	72	1,56	21,8
Total ou moyenne sur 6 jours	943	1 820	(29,2)	(30,1)	(940)	(1,0)	(375)

1.5.2. Variation des débits en suspension ; granulométrie

Sur les 14 premiers échantillons, nous disposons de 11 déterminations granulométriques qui varient sur une large gamme, aussi ne semble-t-il pas possible d'extrapoler ces valeurs aux trois premiers jours de la crue.

On remarque une évolution de la granulométrie dans le temps qui se traduit par une diminution nette du pourcentage d'éléments fins, argiles et limons, et une augmentation des sables fins et très fins elle-même liée à une augmentation de la concentration en sédiments. On ne retrouve pas d'éléments supérieurs à 200 μ , qui ne sont pas maintenus en suspension en surface mais plutôt charriés au fond. Aucune estimation ni mesure n'ont pu être avancées pour le charriage de fond et les matériaux roulés.

Nous avons calculé les moyennes de ces répartitions granulométriques pour les trois derniers jours ainsi que la moyenne des 11 échantillons ; ces valeurs sont mentionnées dans le tableau VII.

TABLEAU VII
MEDJERDA A LA SLOUGHIA : TRANSPORTS SOLIDES PAR CLASSES GRANULOMÉTRIQUES

Classes granulométriques	30 mars 1973		31 mars 1973		1 ^{er} avril 1973		Moyenne des 11 prélèvements %	Moyenne des dépôts %	Tonnage en 6 jours d'après la moyenne ($\times 10^6$ t)
	%	Tonnage ($\times 10^6$ t)	%	Tonnage ($\times 10^6$ t)	%	Tonnage ($\times 10^6$ t)			
Argiles 0 - 2 μ	49,0	2,55	32,7	1,08	17,0	0,409	29,9	32,3	(8,73)
Limons 2 - 20 μ	33,3	1,73	24,2	0,803	15,2	0,366	22,8	21,6	(6,66)
Sables très fins 20 - 50 μ	13,0	0,676	30,0	0,996	36,0	0,868	28,0	17,8	(8,18)
Sables fins 50 - 200 μ	1	0,052	8,7	0,288	28,0	0,675	15,3	21,8	(4,47)
Total		5,20		3,32		2,41			(29,2)

Note : Les calculs étant faits sur des moyennes et non par intégration graphique, les tonnages calculés sont approximatifs.

1.6. COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX

Le bilan ionique des échantillons fait apparaître en même temps qu'une augmentation du total des matières dissoutes pendant la décrue, une évolution sensible de la composition chimique qui apparaît elle-même liée aux variations de la turbidité.

On remarque, à partir de la journée du 31 mars, une augmentation sensible des ions sulfate, chlore, sodium, magnésium, alors que les ions calcium et carbonate sont relativement stables en valeur absolue.

On peut admettre que le brassage de l'eau dans la section de mesure était suffisant pour que ces échantillons soient représentatifs de l'ensemble de la section à un moment donné ; ces variations de composition seraient donc dues à des phénomènes naturels difficiles à déterminer ; on a avancé les hypothèses d'importants effondrements de falaises de Trias dans le défilé de Pont Trajan (augmentation des sulfates), de l'arrivée des lâches du barrage sur l'oued Mellègue dont les eaux sont chlorurées sodiques, ou de l'arrivée d'ondes de crue de divers affluents.

Étant donné ces variations sensibles, il n'est pas possible d'extrapoler ces compositions ioniques aux 3 jours où nous n'avons pas de mesures.

Nous avons figuré sur diagramme triangulaire, les compositions relatives en $\text{m}\ell/\text{l}$ des anions et des cations, pour les 14 échantillons prélevés du 29 mars au 1^{er} avril (fig. 2). Rappelons que sur ces diagrammes triangulaires un échantillon est représenté par 2 points (anions et cations) dont la distance au côté opposé au sommet représentant un ion est proportionnelle au pourcentage de cet ion par rapport à la somme des anions ou des cations.

Pour les 3 journées observées, les compositions moyennes sont les suivantes :

Cations			Anions		
	%	$\text{m}\ell/\text{l}$		%	$\text{m}\ell/\text{l}$
Ca ⁺⁺	36,5	6,55	SO ₄ ⁻⁻	53	9,65
Mg ⁺⁺	17,5	3,14	Cl ⁻	32	5,83
Na ⁺ + K ⁺	46,0	8,25	CO ₃ H ⁻	15	2,73
	100	17,94		100	18,21

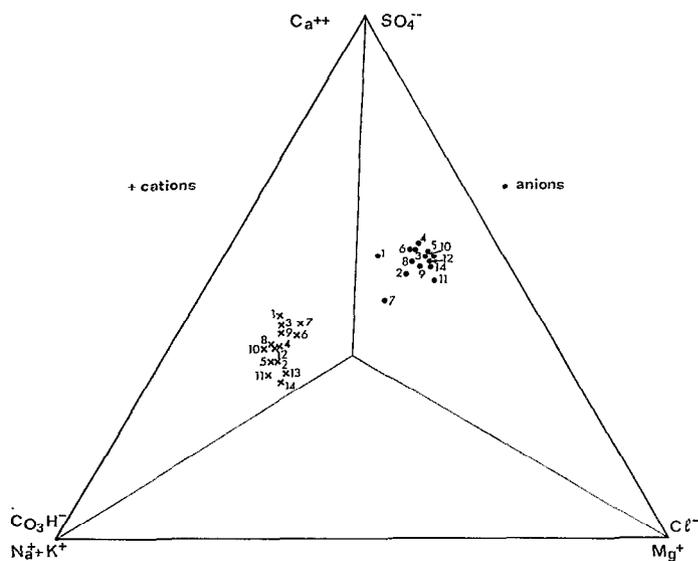


Fig. 2. — Oued Medjerda à la Sloughia.
Composition relative des sels solubles dans les eaux
du 30 mars au 1^{er} avril (14 échantillons)

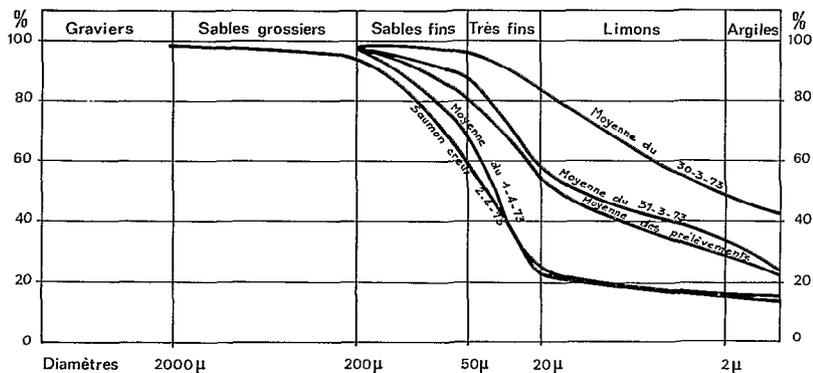


Fig. 3. — Oued Medjerda à la Sloughia.
Granulométrie des transports solides

Il est quasiment certain que durant les trois premiers jours de la crue les eaux étaient moins chargées en matières dissoutes comme le laisse voir le premier échantillon prélevé le 29 mars 1973 et que la proportion de sodium et de chlore était moindre.

1.7. LES ALLUVIONS DÉPOSÉES

1.7.1. Aspect morphologique des dépôts

Les boues déposées par l'oued sont de couleur vert olive plus ou moins pâle, homogène (Munsell sec 5 Y 6/3 à 7/3) ; elles sont surtout remarquables par leur forme de dessiccation typique et souvent spectaculaire, surtout

lorsqu'elles couvrent d'immenses étendues continues comme dans la Garaa Mabtouha, et qui sont liées à leur composition granulométrique.

Sur les dépôts limono-argileux, qui sont les plus fréquemment rencontrés en surface, les fortes tensions provoquées par le dessèchement ont réalisé des systèmes de fissuration polygonaux à fentes verticales d'autant plus larges que le dépôt est épais et régulier ; l'aspect d'ensemble présente une morphologie prismatique très anguleuse, constituée d'un réseau principal à trois branches, les polygones ainsi isolés pouvant atteindre 50 cm de hauteur. Très rapidement le réseau se complique par une fragmentation secondaire plus fine.

Un autre système de fissures se crée ultérieurement dans le plan horizontal aboutissant à une structure en plaquettes probablement liée à de faibles discontinuités granulométriques. Une desquamation superficielle peut apparaître en surface due à la concentration en sédiments très fins. La fissuration verticale est très sensible à l'action de l'eau et dès les premières pluies, il se produit une dispersion aboutissant à la fonte des prismes le long des fissures et reconstituant une couche boueuse bosselée, les bosses correspondant au centre des anciens polygones.

Nous avons noté lors de la prospection l'aspect fissuré ou non des dépôts. Après analyse granulométrique, il s'avère que tous les dépôts fissurés présentent un taux d'argile + limon > 50% (après décalcarisation).

Sur les alluvions les plus grossières, ayant de l'ordre de 20% A + L, les formes de dessèchement sont continues sans fissures, présentant des aspects variés en surface : soit totalement lisses, soit affectés de ripplemarks, soit vésiculés par l'échappement de gaz lors de la dessiccation, soit creusés de cuvettes régulièrement arrondies pouvant atteindre 1 m de diamètre et 40 cm de profondeur qui paraissent liées à des écoulements particulièrement perturbés.

Nous avons également remarqué dans certains cas (canaux d'irrigation comblés) de grandes taches rouge vif en surface qui correspondraient à des exsudations ferrugineuses qui, en présence de sels, prennent cette couleur très particulière.

1.7.2. Epaisseurs

La prospection effectuée après le retrait des eaux a permis de mesurer l'ampleur de la sédimentation. Le relevé des épaisseurs des alluvions déposées a été fait de façon grossière dans la haute vallée à l'amont de Sidi Salem où les dépôts sont très discontinus, et de façon plus précise pour la moyenne et la basse vallées très fortement affectées par la sédimentation. La carte des dépôts dressée à l'échelle du 1/100 000^e ne couvre que cette partie du bassin (Sidi Salem à la mer) [Annexes 14].

La première remarque concernant ces dépôts est leur grande variabilité d'épaisseur, quelques millimètres à deux mètres ; leur épaisseur ne présente en général aucune relation avec la hauteur de la lame d'eau qui les a déposés mais est liée à la microtopographie de la plaine et aux aménagements agricoles ; on a relevé de part et d'autre d'une tabia, 2 mm et 50 cm par exemple ; près de 40 cm dans la Garaa Mabtouha qui a servi de piège à décantation, et seulement des traces dans le domaine d'Utique situé immédiatement à l'aval, pour une hauteur d'eau du même ordre.

D'autres facteurs ont influencé les épaisseurs déposées tels que la vitesse du courant, (traces seulement dans le couloir situé en bordure de la route de Mateur et par où s'est surtout remplie la Garaa Mabtouha), ou la proximité du lit de l'oued. Quelques relevés transversaux à partir de l'oued le montrent nettement quand il n'y a pas eu d'obstacles perturbant les dépôts.

Les plus grandes épaisseurs ont été relevés entre Testout et La Sloughia dans le lit lui-même, large de 1 km à cet endroit, et où jardins et vergers ont été recouverts de plus de 2 m d'alluvions (profil 76 : 2,30 m), 1,50 m également, immédiatement à l'aval du « pont-barrage » d'El Bathan, probablement par brassage des eaux de profondeur très chargées (à cause de la morphologie même du barrage (cf. pl. 1, 2, 3)).

La gamme d'épaisseur la plus fréquemment relevée étant de l'ordre de 10-15 cm.

1.7.3. Volume déposé

L'estimation faite à partir des moyennes des différentes classes d'épaisseur de dépôts relevées après prospection (en faisant abstraction des traces qui couvrent plus de 17 000 ha de superficie), atteint $45 \cdot 10^6$ m³ d'alluvions.

Cette estimation est confirmée par l'analyse statistique de l'épaisseur des 105 profils prélevés au moment de la prospection.

Le tableau VIII donne, pour chaque classe, l'épaisseur moyenne, l'écart-type des épaisseurs, les limites (au niveau de confiance 95%) inférieure et supérieure de l'épaisseur moyenne ainsi que les volumes d'alluvions correspondants.

Le volume d'alluvions ainsi estimé est d'environ 46 millions de mètres cubes et il est fort vraisemblable que la valeur exacte soit comprise entre 40 et 52 millions de mètres cubes et on peut ainsi retenir le chiffre de 45 millions de mètres cubes.

TABLEAU VIII

Classe	Moyenne estimée (cm)	Ecart-type des épaisseurs	Limite inférieure (cm)	Limite supérieure (cm)	Surface (ha)	Volume moyen ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Limite inférieure (10^6 m^3)	Limite supérieure (10^6 m^3)
≈ 0	—	—	—	—	17 331	—	—	—
0-5 cm	3,7	0,28	3,1	4,3	13 760	5,1	4,3	5,9
5-20 cm	11,5	0,59	10,3	12,7	9 660	11,1	10	12,2
20-40 cm	32,0	1,36	29,3	34,7	4 930	15,8	14,4	17,1
40-80 cm	69,0	3,4	61,3	76,7	978	6,7	6,0	7,4
80-150 cm	120	—	80	150	632	7,6	5	9,5
			Total		47 291	46,3	39,7	52,2

1.7.4. Poids des alluvions déposées

La densité apparente a été mesurée sur mottes sèches, par la méthode au mercure :

- la moyenne sur 59 échantillons est de 1,74 ;
- écart-type 0,14 ;
- coefficient de variation 8,2% ;

ce qui donne comme intervalle de confiance au risque de 95% :

- une limite inférieure de 1,71 ;
- une limite supérieure de 1,78.

Ces limites sont probablement surestimées en raison de la méthode de mesure de la densité apparente employée qui n'a pas permis d'effectuer la détermination sur quelques échantillons parmi les plus sableux en raison de la non cohérence des mottes.

Pour une densité de 1,74, le poids total des alluvions déposées est de $78,6 \cdot 10^6 \text{ t}$ (pour une densité de 1,66 il est de $75 \cdot 10^6 \text{ t}$) (cf. Analyses physiques, 2^e partie, §7).

1.7.5. Récapitulatif

Superficie inondée : 470 km² de Sidi Salem à la mer

Volume déposé :

TABLEAU IX

Limites cartographiques d'égales épaisseurs des dépôts	Superficie (ha)	Volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
traces	17 331	—
< 5 cm	13 760	5,5
5-20 cm	9 660	11,6
20-40 cm	4 930	14,8
40-80 cm	978	5,8
80-150 cm	632	7,5
Total	47 291	45,2

Poids déposé : $45 \cdot 10^6 \times 1,66 = 75 \cdot 10^6 \text{ t}$ (arrondi) soit 1 000 m³/ha et 1 700 t/ha environ. Ce qui représente une couche nivelée de l'ordre de 10 cm sur les 470 km² inondés.

1.8. DISCUSSION

La comparaison des résultats du cubage des dépôts sur les zones inondées à l'estimation des transports solides mesurés à La Sloughia fait apparaître une énorme distorsion.

D'une part, $940 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau à 30 g/l de charge moyenne auraient transporté $29,2 \times 10^6 \text{ t}$ de sédiments, de l'autre sur 470 km^2 de zones inondées se seraient déposés $45 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sédiments dont la densité sèche moyenne est de 1,7, ce qui aboutit à $75 \times 10^6 \text{ t}$ de dépôts.

Il faut d'abord noter que les mesures de transport solide à La Sloughia n'englobent pas les volumes de sédiments déposés à l'amont. Ces volumes sont négligeables dans la haute vallée, mais entre Sidi Salem et La Sloughia, ils ont été chiffrés après planimétrage à $5,2 \times 10^6 \text{ m}^3$, soit $8,5 \times 10^6 \text{ t}$. Il y a donc lieu de soustraire ces volumes des $45 \times 10^6 \text{ m}^3$ estimés pour l'ensemble des zones inondées et faire porter les comparaisons sur $40 \times 10^6 \text{ m}^3$ de dépôts représentant $67 \times 10^6 \text{ t}$.

Par contre, cette différence ne tient pas compte de ce que la Medjerda a rejeté directement en mer, soit par l'émissaire, soit par l'ancien lit. Si nous considérons que le lit de la Medjerda à partir de Medjez El Bab est capable de débiter $800 \text{ m}^3/\text{s}$, on estime que toute la partie de l'hydrogramme de la crue à La Sloughia qui est supérieure à $800 \text{ m}^3/\text{s}$, représente le volume d'eau qui a rempli les zones inondées ; la séparation de ces deux parties de l'hydrogramme nous a donné :

- au-dessus de $800 \text{ m}^3/\text{s} = 570 \times 10^6 \text{ m}^3$
- au-dessous de $800 \text{ m}^3/\text{s} = 370 \times 10^6 \text{ m}^3$.

En supposant que les eaux ont déposé la totalité de leur charge dans les zones inondées, ce serait donc : $\frac{370 \times 100}{940} = 39\%$ du transport solide qui serait allé directement à la mer ; le transport solide total serait donc

à majorer de $\frac{67 \times 10^6 \text{ t} \times 370 \times 10^6 \text{ m}^3}{570 \times 10^6 \text{ m}^3} = 43,5 \times 10^6 \text{ t}$, ce qui porterait le total à $110,5 \times 10^6 \text{ t}$ de matériaux transportés à La Sloughia, tout ceci en simplifiant à l'extrême.

En fait, il est certain que le début et la fin de la crue transportent beaucoup moins de sédiments et que la concentration en sédiments est croissante avec le débit, aussi la majoration de $48 \times 10^6 \text{ t}$ est probablement surestimée et, en première estimation, nous ramènerons le transport total de sédiments à $100 \times 10^6 \text{ t}$. Nous sommes loin des $29,2 \times 10^6 \text{ t}$ et 30 g/l en moyenne. Un tel écart peut-il être expliqué, ou bien faut-il supposer une erreur systématique dans les méthodes d'utilisation ?

Nous allons examiner quelques raisons qui pourraient expliquer cet écart.

1.8.1. Précision des mesures

Les mesures des débits et des hauteurs d'eau au pont de La Sloughia sont relativement précises, le plus fort jaugeage à $2\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ a permis de tracer et d'extrapoler une courbe d'étalonnage sans grand risque d'erreur, le tracé du limnigramme se prête lui aussi à peu de variations, aussi pouvons-nous estimer la précision globale sur les débits liquides à $\pm 5\%$. Le volume total de la crue à La Sloughia serait donc :

$$V_e = (940 \pm 47) \times 10^6 \text{ m}^3.$$

L'erreur possible sur le cubage des sédiments déposés peut provenir :

- a) de l'imprécision sur la hauteur de dépôt mesurée et de la représentativité du point de sondage par rapport à la zone qui l'entoure : étant donné le mode de prélèvement à la tarière et compte tenu du fait que chaque prise d'échantillon était complétée de plusieurs observations, cette erreur relative sur l'épaisseur du dépôt ne doit pas dépasser 2% ;
- b) de l'approximation faite sur le tracé des zones d'égale épaisseur de dépôt : ici interviennent l'échelle de la carte et le facteur subjectif du cartographe, cette approximation peut atteindre 6%. Nous y ajouterons l'imprécision des planimétrages, environ 2% ;
- c) de la façon de faire le cumul des volumes déposés :
 - en multipliant les surfaces par la hauteur moyenne de dépôt, on aboutit à $43,4 \times 10^6 \text{ m}^3$,
 - en traçant la courbe des surfaces cumulées en fonction des hauteurs de dépôts et en planimétrant cette courbe, on aboutit à $40,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit un écart de 7%.

Au total, la précision sur les volumes de dépôts ne paraît pas pouvoir être meilleure que $\pm 15\%$. Le volume total de dépôts serait donc :

$$V_d = (43,4 \pm 6,5) \times 10^6 \text{ m}^3.$$

La densité sèche des sédiments est déterminée de façon assez précise sur mottes de terre séchées à l'air, les valeurs extrêmes admises sont 1,6 et 1,7 : la fourchette de variations de l'estimation des tonnages des dépôts serait donc :

$$\begin{aligned} \text{minimum} &= 39,7 \times 1,6 \times 10^6 = 63,52 \times 10^6 \text{ t} \\ \text{maximum} &= 52,9 \times 1,7 \times 10^6 = 89,93 \times 10^6 \text{ t} \end{aligned}$$

Ces résultats sont donc sujets à d'assez larges variations mais qui n'expliquent pas toute la différence avec les mesures de transports en suspension.

1.8.2. Imprécision des mesures de transport solide

C'est essentiellement sur les mesures de transport solide que doivent être recherchées les raisons de ces écarts. Les causes d'imprécision sont nombreuses.

1.8.2.1. Durée des mesures

Les mesures de transport solide à La Sloughia ont commencé le 29 mars 1973 à 20 h 20, elles ne portent que sur les trois derniers jours de la crue, au cours desquels s'est écoulé un volume de $345 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau sur $940 \times 10^6 \text{ m}^3$, et où l'on a mesuré $11,9 \times 10^6 \text{ t}$ de matières en suspension en surface, sur les $29,2 \times 10^6 \text{ t}$ estimées au total. Deux tiers environ de la quantité totale estimée sont donc le résultat d'une extrapolation qui, en restant vraisemblable, représente une valeur minimum ; on sait que la concentration augmente avec le débit, mais sans que l'on puisse établir une relation analytique précise, et que le maximum de transport solide se produit souvent avant le maximum de débit. Il est certain que la concentration moyenne de 30 g/l admise pour les journées des 27, 28 et 29 mars 1973 est une valeur minimum admissible. Il suffirait que cette valeur moyenne sur les trois premiers jours soit de 50 g/l, comme cela s'est produit le 1^{er} avril, pour que le total de sédiments transportés augmente de $11,5 \times 10^6 \text{ t}$.

Ce défaut de mesures sur les deux tiers du volume écoulé est la première cause d'imprécision.

1.8.2.2. Localisation des mesures

Nous n'avons pu exploiter que les mesures faites au pont de La Sloughia. Aucune vérification, ou recoupement, avec les données d'autres stations n'est possible (Djedeida en particulier). Si l'on a pu chiffrer les dépôts à l'amont, on ne peut tenir compte des phénomènes d'érosion et de transport solide qui ont pu se déclencher à l'aval de La Sloughia et qui peuvent être importants.

Le bassin versant de la Medjerda à La Sloughia couvre 20 990 km² sur les 23 500 km² du bassin total ; les 10,7% du bassin non contrôlés à La Sloughia ont pu apporter une quantité non négligeable de sédiments qui se sont redéposés dans les zones inondées. De plus, tout au long des quelque 150 km de lit d'oued qui séparent La Sloughia de la mer, des remaniements du lit, des effondrements de berges ont pu se produire mettant en jeu d'importants volumes de terre qu'il est évidemment impossible de chiffrer, mais dont une partie a pu se redéposer dans les zones inondées.

1.8.2.3. Charriage de fond

Nous l'avons déjà mentionné, aucune mesure de charriage de fond n'a été faite (et nous ne connaissons même actuellement aucune méthode pour mesurer ce charriage directement dans des conditions telles que celles de la crue de mars 1973). Les chiffres donnés plus haut ne tiennent aucune compte du charriage ; ils ne concernent que le transport en suspension mesuré en surface.

L'importance du charriage de fond dans le transport solide total ne doit pas être sous-estimée ; les observations a posteriori faites lors de crues importantes, l'estimation faite pour l'oued Mellègue à partir de l'envasement du barrage, et les quelques résultats expérimentaux disponibles dans les publications hydrologiques nous amènent à penser que le charriage de fond peut présenter 20 à 25% du transport solide total, soit 25 à 33% du transport en suspension. En principe, le charriage de fond est constitué d'éléments grossiers qui ne quittent pas le lit de l'oued, mais dans le cas de la Medjerda (comme cela apparaîtra dans l'analyse des sédiments déposés), au passage de points singuliers tels que le pont de Medjez El Bab ou le barrage d'El Bathan, l'eau est suffisamment brassée pour que les éléments grossiers soient entraînés dans les zones de débordements et participent pour une bonne part au dépôt de sédiments, d'autant plus que, dès que la turbulence diminue, ces éléments se déposent très vite et sont moins facilement repris à la décrue. Cette hypothèse semble confirmée par l'analyse granulométrique des sédiments déposés où la fraction d'éléments compris entre 0,2 et 2 mm n'est pas négligeable alors qu'elle est inexistante dans les prélèvements d'eau.

1.8.2.4. Remaniements possibles à l'aval

Les épaisseurs de dépôts ont été mesurées en s'arrêtant au niveau du sol en place (souvent matérialisé par une

couche de végétation enterrée). On peut supposer que ces épaisseurs peuvent englober non seulement les sédiments transportés et déposés par l'oued et venant de l'amont, mais aussi des produits de remaniements locaux dus à l'érosion au moment où les eaux envahissent les zones inondées et où le courant est assez fort.

Dans le cas présent, cette supposition n'est concevable que très localement dans des zones où le courant a été particulièrement violent pour éroder la plaine alluviale comme en amont de Medjez où une oliveraie a été coupée en deux et la surface du sol nettement perturbée.

Dans la plus grande partie de la plaine et en particulier dans la basse vallée, les dépôts se sont faits sous un écoulement relativement calme et en tous cas insuffisant pour éroder une tranche importante du sol, d'autant plus que ces sols étaient protégés au moment de la crue par une végétation d'annuelles bien enracinées à cette époque de l'année. En outre, s'il y avait eu remaniement important, les courbes de distribution verticale de la granulométrie et de la matière organique en particulier ne présenteraient pas la rupture brutale constatée (cf. classement vertical des alluvions), mais une zone intermédiaire ayant à la fois les caractères du substrat et des alluvions.

1.8.2.5. Mode de prélèvement ; variations dans la section de mesures

La façon de prélever les échantillons directement dans une bouteille immergée en surface est sujette à bien des critiques : si on peut admettre que pour les salinités, le brassage de l'eau est suffisant pour que les concentrations soient à peu près homogènes dans toute la section, il n'en est pas de même pour les transports solides, comme le prouve un examen rapide du tableau des analyses donné en annexe, en particulier pour les granulométries.

Une bouteille vide lancée dans l'eau ne peut prélever qu'une tranche d'eau de 10 cm au maximum ; si elle est immergée dans une zone de fortes vitesses, elle ne s'enfonce pas ; si elle est immergée près d'une rive, le prélèvement n'est pas représentatif des conditions de l'écoulement dans la section ; de plus, si la bouteille est immergée trop longtemps il peut y avoir triage des sédiments à l'entrée du goulot et dépôt en excès des sédiments les plus fins.

Les courbes granulométriques de la figure 3 montrent l'évolution dans le temps des granulométries ; tous les prélèvements à la main ayant été faits à partir de la même verticale de jaugeages, on constate une nette décroissance du pourcentage d'*éléments fins* allant de pair avec la décroissance des débits donc de la tranche d'eau et de la vitesse sur la verticale n° 9 et avec l'augmentation des concentrations durant la journée du 1^{er} avril.

On remarque aussi, le 2 avril, une diminution très nette des teneurs en matières en suspension. Ceci peut s'expliquer par le fait que la verticale n° 9 est assez proche de la rive droite et que pour des débits inférieurs à 300 m³/s, les débits de la première travée sont faibles par rapport au débit total (ex. : traversée n° 8 du 2 avril 1973 = débit de la première travée = 11 m³/s ; profondeur de la verticale n° 9 = 2,10 m ; vitesse moyenne de la verticale n° 9 = 0,5 m/s), la faiblesse des profondeurs et des vitesses entraîne une diminution très nette de la capacité de transport ce qui se traduit par une différence remarquable de la granulométrie où le pourcentage d'argiles et de limons augmente énormément. Les prélèvements faits au saumon creux les 3 et 4 avril viennent confirmer cette explication : en effet le prélèvement fait au milieu de la deuxième travée du pont donne un résultat deux fois plus élevé que les deux autres faits dans la 1^{ère} travée qui, à ce moment-là, débitait 6 à 7 m³/s seulement. La tranche d'eau prélevée au saumon creux était de 2 m environ pour les 3 prélèvements et l'on remarque que la proportion d'éléments fins est alors beaucoup plus faible que pour les échantillons à la bouteille et que ce sont les 3 seuls prélèvements où la fraction granulométrique supérieure (200 à 2 000 μ) a pu être mesurée. Il semble donc possible d'affirmer que les prélèvements faits à la main à la verticale n° 9, ne rendent compte que du transport solide sur une faible tranche d'eau et représentent très mal les variations de concentration sur une verticale, encore moins sur toute la section de mesures. Les transports en suspension sont sous-estimés par ce mode de prélèvement en particulier les sédiments de taille supérieure à 50 μ .

1.9. ESSAI DE QUANTIFICATION

Les disparités des résultats d'analyses granulométriques avaient déjà été remarquées et signalées par la Société Neyrpic en 1951 [11], en particulier la différence nette existant entre les courbes granulométriques des sédiments prélevés à la turbidonde et des sédiments déposés sur les berges de l'oued Medjerda et les laissés de crue ; la proportion d'argiles et de limons était bien plus importante dans les premiers. Une explication théorique à cette différence était donnée par les lois de Schmidt-Rouse sur la répartition des concentrations des matériaux en suspension. Nous avons repris cette théorie pour servir de base de calculs sur deux exemples, mais nous voulons tout de suite attirer l'attention sur le fait que ces calculs sont tout à fait théoriques et qu'il serait abusif de les pousser trop loin.

Dans des ouvrages tels que : *Précis d'Hydraulique fluviale* par LELIAVSKY (Dunod, 1961) ou *Dynamique fluviale* par J.C. LEBRETON (Eyrolles, 1974), il est toujours fait mention que les vérifications expérimentales des formules établies ont été faites sur des canaux de dimensions réduites, en laboratoire, et que les chiffres précis mesurés en vraie grandeur font le plus souvent défaut.

1.9.1. Bref rappel de la théorie

Une particule en suspension dans un courant est soumise à deux forces :

— la force due à la pesanteur, dirigée vers le bas et qui est traduite par la loi de Stokes, donnant la vitesse de chute d'une particule sphérique dans un fluide

$$W = \frac{2}{9} \frac{\gamma_1 - \gamma}{\mu} a^2$$

où γ_1 et γ sont les masses spécifiques de la particule et du fluide (ici $\gamma_1 = 2,6$ et $\gamma = 1$),
 μ la viscosité du fluide (prise ici égale à 1,17),
 a le diamètre de la particule ;

— la deuxième force est le résultat de la turbulence, c'est-à-dire de la composante instantanée de la vitesse dans un courant turbulent dans son ensemble, dont l'étude est due à PRANDTL et VON KARMAN, la résultante de cette force a tendance à entraîner les particules vers les zones de plus fortes vitesses. La turbulence est caractérisée par la valeur de la vitesse de fond u , dépendant de la tension tangentielle t_0 exercée par les filets liquides sur les parois par unité de surface :

$$t_0 = \rho g i R_h \quad \text{et} \quad u = \sqrt{\frac{t_0}{\rho}}$$

où ρ = masse spécifique de l'eau,
 i = pente de la ligne d'eau (prise ici égale à la pente du fond),
 R_h = rayon hydraulique.

L'application de la théorie de la turbulence, conduit à la formule dite de Schmidt-Rouse, qui s'écrit :

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D-y}{y} \times \frac{a}{D-a} \right)^Z = \frac{(D/y - 1)^Z}{(D/a - 1)^Z}$$

où C = concentration en matériaux en suspension à la distance y du fond,

C_a = concentration à la distance « a » du fond,

D = profondeur totale de l'écoulement (tirant d'eau),

Z = nombre de Schmidt-Rouse = $\frac{W}{0,4u}$.

Cette formule donne donc le rapport de la concentration à la distance y du fond, à la concentration à une distance « a » du fond.

Dans l'utilisation que nous en avons faite, nous avons pris $a = 10$ cm supposant que la concentration des particules suspension est encore maximale à cette distance du fond qui est de toute façon la plus faible que l'on puisse espérer approcher avec un préleveur de sédiments.

Cette formule ne concerne que le transport en suspension et non le transport total comprenant le charriage.

1.9.2. Application

Nous avons appliqué cette formule aux mesures faites à la verticale n° 23, qui est au milieu de la travée centrale du pont de La Sloughia et où l'écoulement semble être le plus représentatif de l'ensemble de la section. (Nous n'avons pas retenu la verticale n° 9 qui, dans la série des jaugeages présente des variations de profondeurs anormales probablement dues à l'effondrement du perré de protection du pont en rive droite.)

Nous avons choisi deux cas : le jaugeage n° 1, correspondant au prélèvement n° 1, et la traversée n° 10, correspondant au prélèvement n° 9. Les caractéristiques de l'écoulement sont les suivantes (tableau X) :

Dans les deux cas, nous avons calculé le rapport C/C_a pour différentes profondeurs et pour des grains de diamètre 1 μ , 2 μ , 10 μ , 20 μ , 50 μ , 100 μ , 200 μ , 300 μ , 400 μ , 500 μ , et 1 mm. On constate que jusqu'à 10 μ , le rapport C/C_a ne varie pratiquement pas sur toute la verticale et reste très voisin de 1. A partir de 100 μ la valeur du rapport C/C_a décroît très rapidement avec l'augmentation du diamètre des grains et avec la distance au fond, ce qui est traduit sur les courbes de la figure 4, donnant la répartition des concentrations sur la verticale 23 pour des particules de diamètre donné. Ceci confirme que les particules fines sont facilement brassées et s'échangent facilement entre les filets liquides inférieurs et supérieurs et que les grains plus grossiers cheminent au voisinage du fond ; ce qui explique déjà que, dans nos résultats d'analyses granulométriques, la classe 200-2 000 μ (sables grossiers) soit absente.

TABLEAU X

	Jaugeage n° 1	Jaugeage n° 10	Verticale 23	Jaugeage n° 1	Jaugeage n° 10
Date	29 mars 1973	31 mars 1973	Profondeur	12,54 m	7,30 m
Heure	18 h 30 à 21 h 20	18 heures à 20 h 30	Vitesse moyenne	2,7 m/s	1,70 m/s
Débit	1 700 m ³ /s	788 m ³ /s	Vitesse maximale	2,84 m/s	1,97 m/s
Section mouillée	1 014 m ²	656 m ²	Vitesse minimale	1,89 m/s	0,95 m/s
Largeur	113 m	78 m			
Vitesse moyenne	2,66 m/s	1,39 m/s			
Vitesse maximale	3,70 m/s	2,46 m/s			

Ces courbes représentent des concentrations spatiales de sédiments et non le transport réel des sédiments en suspension sur la verticale. Nous supposons que les sédiments grossiers sont transportés à la même vitesse que l'eau, ce qui, en fait, n'est pas vrai pour les sédiments grossiers mais acceptable jusqu'à des diamètres de l'ordre de 200 μ . Si nous multiplions les concentrations par les vitesses, nous obtenons le flux de matières en suspension par unité de surface perpendiculaire à l'écoulement, ce qui, en valeur relative par rapport au flux à une distance « a » du fond s'écrira :

$$\frac{T}{T_a} = \frac{C}{C_a} \times \frac{V}{V_a}$$

T et T_a sont le flux de matières en suspension à une distance y ou a du fond (ce qui s'exprimerait en g/m²/s ou kg/m²/s).

Le rapport C/C_a a été calculé précédemment.

Le rapport V/V_a est déterminé directement sur les courbes de vitesses mesurées au cours des jaugeages, où, avec un saumon de 50 kg, on peut mesurer la vitesse à environ 13 cm du fond, ce qui est une approximation suffisante pour estimer la vitesse à la distance « a » du fond.

Nous avons donc établi les tableaux des rapports T/T_a pour les deux exemples choisis (tableaux XI et XII) qui, traduits en courbes, figurent sur les figures 5 et 6 avec le profil des vitesses sur la verticale 23 au cours des deux mesures.

TABLEAU XI

SLOUGHIA. TRAVERSÉE N° 1, VERTICALE 23

Y distance au fond (m)	Valeurs du rapport T/T _a									
	V/V _a	10 μ	20 μ	50 μ	100 μ	200 μ	300 μ	400 μ	500 μ	1 mm
1	1,37	1,37	1,36	1,31	1,16	1,08	0,796	0,520	0,302	0,003
2	1,49	1,48	1,47	1,41	1,19	1,08	0,772	0,411	0,201	0,003
3	1,48	1,47	1,46	1,39	1,15	1,02	0,640	0,333	0,145	»
4	1,43	1,42	1,41	1,33	1,08	0,948	0,565	0,273	0,108	»
5	1,42	1,41	1,40	1,31	1,04	0,908	0,518	0,236	0,086	»
6	1,43	1,42	1,41	1,32	1,03	0,885	0,484	0,207	0,071	»
8	1,43	1,42	1,41	1,30	0,982	0,829	0,417	0,159	0,046	»
10	1,40	1,39	1,37	1,26	0,910	0,747	0,339	0,112	0,026	»
12	1,39	1,38	1,36	1,21	0,789	0,618	0,223	0,053	0,008	»
12,4	1,40	1,39	1,36	1,18	0,717	0,472	0,155	0,026	0,003	»

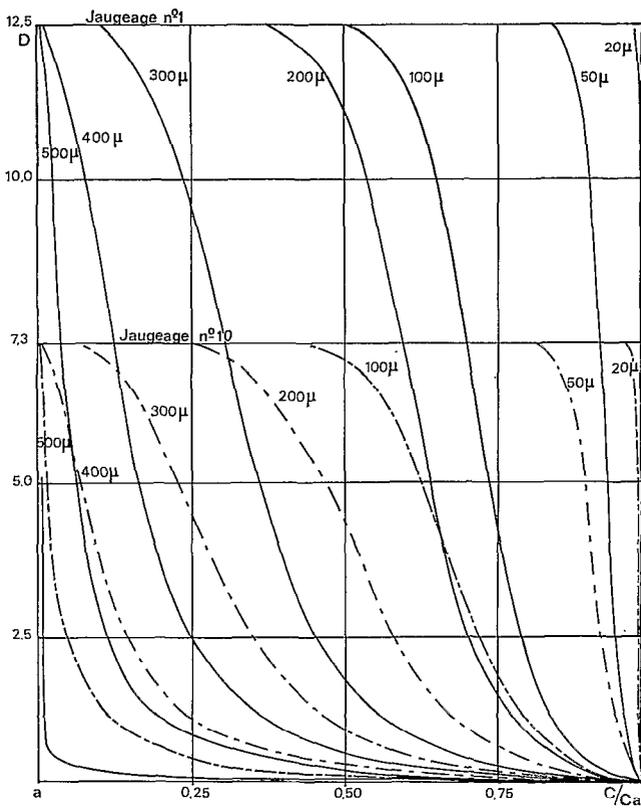


Fig. 4. — Oued Medjerda à la Sloughia.
Variation des concentrations sur la verticale n° 23

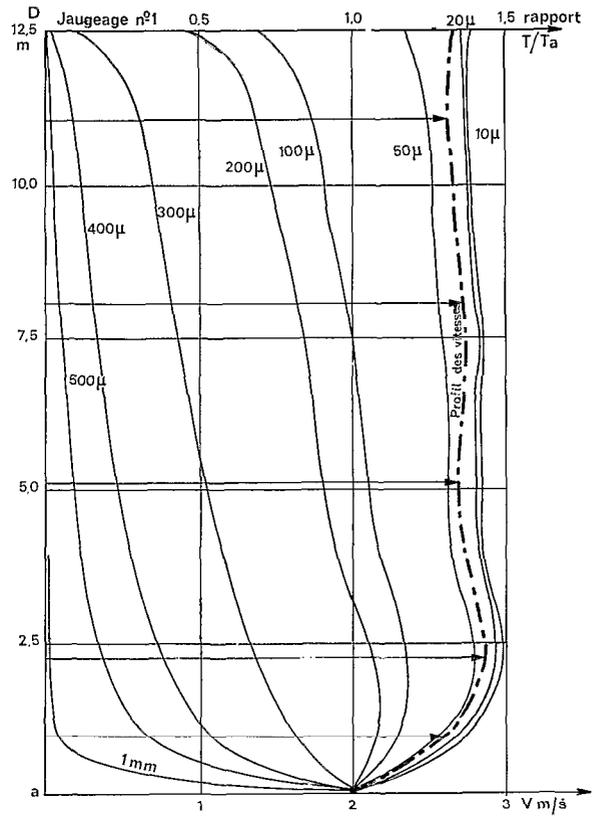


Fig. 5. — Oued Medjerda à La Sloughia.
Variations du transport solide sur la verticale n° 23

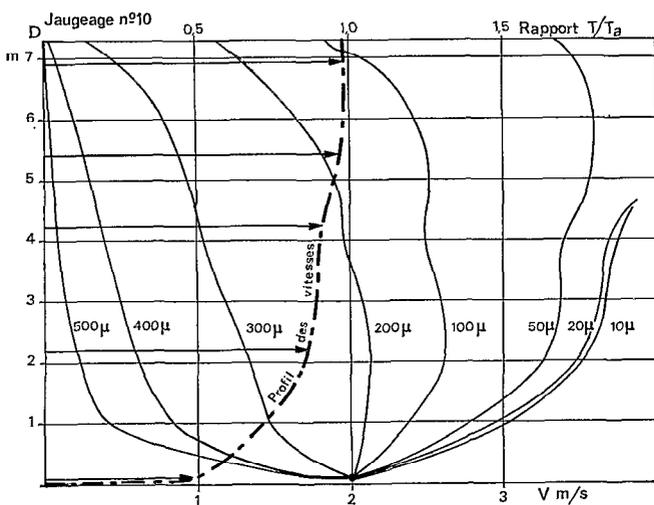


Fig. 6. — Oued Medjerda à la Sloughia.
Variations du transport solide sur la verticale n° 23

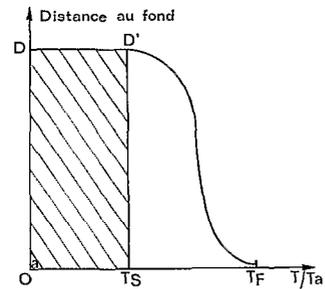


Fig. 7

TABLEAU XII
SLOUGHIA. TRAVERSÉE N° 10, VERTICALE 23

Y distance au fond (m)	Valeurs du rapport T/Ta									
	V/Va	10 μ	20 μ	50 μ	100 μ	200 μ	300 μ	400 μ	500 μ	1 mm
1	1,49	1,49	1,48	1,41	1,19	1,04	0,736	0,408	0,197	0,0004
2	1,77	1,76	1,75	1,64	1,31	1,07	0,681	0,308	0,113	»
3	1,85	1,84	1,82	1,69	1,29	1,03	0,596	0,231	0,070	»
4	1,88	1,87	1,85	1,70	1,25	0,976	0,517	0,175	0,045	»
5	2,00	1,99	1,96	1,78	1,26	0,945	0,464	0,136	0,030	»
6	2,05	2,04	2,01	1,79	1,21	0,827	0,383	0,094	0,016	»
7	2,06	2,04	2,00	1,74	1,05	0,651	0,241	0,039	0,004	»
7,2	2,06	2,04	2,99	1,69	0,945	0,546	0,173	0,022	0,0016	»

On voit sur ces courbes qu'à partir d'un diamètre de 100 μ , un prélèvement fait à 10 cm sous la surface de l'écoulement ne mesure qu'une faible partie du transport réel sur la verticale. Le rapport de la valeur mesurée à 10 cm de la surface, à la valeur réelle du transport sur la verticale, est égal au rapport des surfaces du rectangle DD'T_SO et de l'aire limitée par la courbe DD'T_FO (toujours en admettant que la concentration est maximale à 10 cm du fond), (fig. 7).

Nous avons planimétré toutes ces courbes sur le graphique n° 7 et par là calculé, en fonction du diamètre des grains, le rapport du transport solide mesuré à 10 cm de la surface (T_S) par rapport au transport solide sur toute la verticale (T_V), toujours pour les deux exemples choisis sur la verticale 23 (tabl. XIII).

TABLEAU XIII

Valeurs T _S /T _V	Diamètre des grains							
	10 μ	20 μ	50 μ	100 μ	200 μ	300 μ	400 μ	500 μ
Jaugeage n° 1, profondeur 12,5 m	1,00	0,984	0,917	0,715	0,541	0,312	0,104	0,026
Jaugeage n° 10, profondeur 7,3 m	1,13	1,12	1,03	0,787	0,601	0,317	0,091	0,014

La répartition des vitesses le long de la verticale joue ici un rôle important ; en effet, lors du premier jaugeage, les vitesses étaient presque uniformes tout au long de la verticale, alors que lors du jaugeage n° 10, les vitesses au fond étaient nettement plus faibles qu'en surface, ce qui confirme le fait connu que les fortes concentrations spatiales du fond transportées par de faibles vitesses compensent les faibles concentrations de surface transportées à de fortes vitesses ; quoi qu'il en soit, on remarque que, plus la granulométrie des sédiments est grossière et plus les mesures en surface sont peu représentatives : à partir d'un diamètre de 200 μ , les grains ne « montent » plus vers la surface sous l'action de la turbulence. En outre, plus la profondeur D de l'écoulement est grande, et plus la proportion d'éléments fins en surface sera importante ; et, enfin, plus les vitesses en surface seront grandes par rapport aux vitesses du fond, plus le transport des éléments fins sera important.

Ceci est tout à fait remarquable dans l'évolution des résultats d'analyses granulométriques faites sur les prélèvements où la proportion d'éléments fins diminue en même temps que le débit, donc que la hauteur et la vitesse de l'eau. Ainsi, pour les deux échantillons prélevés après les traversées n° 1 et n° 10, les répartitions sont les suivantes :

TABLEAU XIV

Fractions (en %)	Colloïdes 0-2 μ	Limons 2-20 μ	Sables très fins 20-50 μ	Sables fins 50-1000 μ	Sables grossiers 200-2000 μ	Total
Échantillon 1	50	33,5	10	1	0	94,5
Échantillon 9	23	18	40	15	traces	96

Il est sûr cependant que la théorie de la turbulence et les équations qui en découlent ne sont pas la seule explication des variations de la granulométrie des matériaux transportés. Les phénomènes naturels tels que des effondrements de berges peuvent provoquer des variations brusques du taux de matières en suspension et de leur granulométrie ; mais on conçoit fort bien, au vu des chiffres des tableaux XI et XII, qu'un échantillon prélevé en surface dans une zone de vitesse atténuée dans lequel on mesure 30 ou 40 g/l de sédiments, représente très mal la concentration moyenne des matériaux réellement transportés par l'oued qui peut être 1,5 ou 2 fois plus forte. Ceci fournit, à notre avis, une explication plausible à la différence énorme que nous avons trouvée entre le volume des sédiments déposés à l'aval du bassin de la Medjerda et le transport solide mesuré ou estimé à La Sloughia.

Cette explication toute théorique est assez satisfaisante pour l'esprit, mais nous l'avons déjà dit, il serait abusif de la mener trop loin. Il faut se garder d'application hasardeuse de formules, et quelques mesures de vérification sur le terrain s'imposent avant d'admettre ces chiffres. Il faudrait pour cela suivre tout au long d'une crue importante les variations des concentrations à différentes profondeurs et sur plusieurs verticales de façon à dresser des profils de transports solides pour toute la section de mesures. Le matériel et les moyens à mettre en œuvre pour de telles opérations de mesures sont très onéreux et pas toujours bien adaptés ; il est, en effet, difficile de satisfaire à la fois plusieurs impératifs tels que stabilité du préleveur de sédiment dans le courant, ouverture commandée du préleveur, diamètre de l'ajutage suffisant pour éviter tout triage des particules à l'entrée, récipients suffisamment grands pour récolter un poids de matières permettant au moins d'en déterminer les granulométries (20 g), simplicité et rapidité de manœuvre de façon à pouvoir faire des mesures répétitives.

On notera par ailleurs que les classes granulométriques habituellement utilisées en pédologie sont assez peu adaptées à l'usage que l'on en fait en hydrologie et reflètent mal le comportement des particules dans l'eau. En effet, nous avons vu que, jusqu'à 20 μ ou même 50 μ , les concentrations sur toute la verticale varient très peu or, nous avons 3 classes granulométriques jusqu'à 50 μ , par contre, le décrochement des courbes de concentration est très net à partir de 100 μ et 200 μ et les particules 1 mm et plus, restent très voisines du fond : la classe granulométrique 200-2 000 μ ne peut rendre compte de ces variations d'autant qu'elle est absente de presque tous les prélèvements en surface. Il serait plus intéressant pour des mesures sédimentologiques de répartir des classes granulométriques régulièrement de 100 μ à 500 μ .

1.10. CONCLUSIONS

La leçon qui se dégage de cette discussion est que, si rien ne peut évidemment remplacer de bonnes mesures, les techniques de mesure des transports solides pour de grands bassins versants ne sont pas encore au point.

La mesure des dépôts de sédiments dans les zones inondées est un moyen efficace de recouper les mesures de transport solide dans les eaux (tout comme la mesure de l'envasement des barrages), mais pas forcément précis. Il offre la possibilité de nombreux contrôles sur le terrain et de répétitions de mesures douteuses, alors que les mesures faites pendant une crue ne sont ni programmables ni répétitives, surtout lors de crues catastrophiques comme celles de mars 1973 qui perturbent toujours l'organisation d'un service hydrologique.

Quoi qu'il en soit, le cubage des dépôts de sédiments dans les zones inondées ne peut être réduit dans de grandes proportions et la différence constatée ici avec les mesures de transports solides ne peut s'expliquer que par une sous-estimation systématique des concentrations à partir des prélèvements à la bouteille et en surface. Les justifications de cette sous-estimation, que nous avons données ici, ne sont bien évidemment que des hypothèses auxquelles il manque une confirmation par des mesures en vraie grandeur, mais que les quelques maigres résultats d'analyses granulométriques dont nous disposons semblent bien corroborer.

Il faut donc admettre que la Medjerda, au cours de la crue de mars 1973, a pu transporter au total 80 à 100 $\times 10^6$ t de matériaux ce qui représente une concentration moyenne dans les eaux de 80 à 100 g/l et une abrasion ramenée à l'ensemble du bassin de 3 400 à 4 250 t/km². Ce sont des chiffres très forts qui, a priori, surprendront l'hydraulicien ou l'hydrologue, mais il ne faut pas perdre de vue que cette crue a une période de récurrence estimée entre 200 et 300 ans et qu'au cours de phénomènes exceptionnels de cette importance les chiffres annuels puissent tripler ou quadrupler.

2. ANALYSE GLOBALE DES ALLUVIONS DÉPOSÉES ET DES SUBSTRATS

Les quelque 300 échantillons prélevés ont été soumis aux analyses pédologiques classiques. Quelques déterminations particulières ont en outre été effectuées pour préciser certaines caractéristiques.

Des prélèvements faits simultanément sur les substrats envoyés sous les dépôts ont subi les mêmes traitements permettant d'utiles comparaisons. Successivement seront étudiés :

- les alluvions elles-mêmes,
- la comparaison substrat/alluvions.

2.1. ANALYSE QUALITATIVE GLOBALE DES ALLUVIONS

2.1.1. Analyse granulométrique

2.1.1.1. Méthodologie (M. PELLOUX)

La préparation des échantillons a été faite de façon classique à 2 mm, assurant une bonne homogénéisation mais présentant aussi le risque d'être un peu violente. Il serait sans doute plus intéressant d'adopter pour ce genre d'échantillons une méthode directe de remise en suspension dans le dispersant.

Les analyses granulométriques ont été faites avec et sans décarbonatation, par la méthode internationale modifiée par emploi de la pipette Robinson. Les analyses sans décarbonatation ont été faites par dispersion au pyrophosphate après contact et lessivage par NaCl, N (500 ml pour 20 g), puis lavage à l'eau par décantation avant mise en suspension ; sans ce traitement supplémentaire, les 9/10 flocculent et malgré tout certaines analyses ont dû être refaites.

La décarbonatation a été faite par HCl 6 N en quantité calculée d'après le CaCO₃total, puis affinée par lessivage avec HCl 0,5 N et lavages par décantation. La dispersion est réalisée dans le pyrophosphate pour analyse granulométrique.

Nous avons jugé intéressant de subdiviser la fraction argileuse en effectuant une détermination à 1 μ . Pour ce, nous avons utilisé les suspensions décalcarisées et non décalcarisées provenant de la manipulation classique et qui sont recueillies dans des flacons d'un litre au moment du premier siphonnage de la fraction 0-20 (lavage des sables). Ces flacons sont gardés en armoire isotherme le temps nécessaire, soit 4 fois le temps de la fraction 0 à 2 μ (32 h en moyenne), puis pipetés normalement ; la stabilité de la suspension, observée attentivement pour noter une éventuelle floculation, est bonne à très bonne.

2.1.1.2. Résultats

TABLEAU XV
GRANULOMÉTRIE AVANT DÉCARBONATATION

Variable	Nombre	Moyenne (%)	Ecart-type	Coefficient variation (%)	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
0-1 μ	242	25,0	15,4	61,6	23,1	27,0
1-2 μ	242	7,6	5,6	73,4	6,9	8,4
0-2 μ	243	32,4	19,9	61,4	29,9	34,9
2-20 μ	243	21,7	10,6	48,8	20,4	23,1
20-50 μ	243	17,9	12,8	71,9	16,3	19,5
50-200 μ	243	21,3	22,8	107,3	18,4	24,1
200-2 000 μ	243	3,0	8,7	289,9	1,9	4,1
H ₂ O 105°	244	2,7	1,3	48,7	2,5	2,9
M.O. totale	245	1,14	0,5	46,7	1,07	1,21

TABLEAU XVI
GRANULOMÉTRIE APRÈS DÉCARBONATATION

Variable	Nombre	Moyenne (%)	Ecart-type	Coefficient variation (%)	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
0-1 μ	244	22,4	13,0	58,2	20,8	24,1
1-2 μ	244	3,6	2,3	65,3	3,3	3,8
0-2 μ	244	26,2	14,8	56,7	24,3	28,0
2-20 μ	244	11,3	4,5	39,8	10,7	11,9
20-50 μ	244	7,1	4,8	68,6	6,5	7,7
50-200 μ	244	10,5	11,7	112,1	9,0	11,9
200-2 000 μ	244	1,8	5,5	312,4	1,1	2,5
H ₂ O 105 °C	244	2,7	1,3	48,7	2,5	2,9
M.O. totale	245	1,14	0,5	46,7	1,07	1,21
CaCO ₃ total	245	38,4	5,8	15,2	37,7	39,2

Les résultats de l'analyse granulométrique normale font apparaître une importante fraction 0-1 μ qui constitue 85% de la fraction colloïdale à tendance argileuse, puisqu'elle contient moins de 3% de calcaire.

La texture globale simplifiée de ces dépôts peut donc être qualifiée de calcaro-limono-argileuse. La fraction sableuse est surtout constituée de sables fins, les sables grossiers représentant moins de 3% en moyenne, et la fraction supérieure à 2 000 μ (refus) étant nulle pour l'ensemble. Nous verrons par la suite les exceptions que peuvent présenter certains dépôts à cette répartition granulométrique moyenne, les plus fortes différences portant sur sables fins et sables grossiers dont les coefficients de variation sont très élevés, 112 et 313%.

La comparaison des chiffres granulométriques avec et sans décarbonatation permet d'apprécier la proportion moyenne de calcaire contenu dans chaque fraction sur la moyenne des alluvions (cf. tabl. XVII).

TABLEAU XVII
RÉPARTITION DU CaCO₃ TOTAL DANS LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES

Fractions	Analyse granulométrique		Différence calcaire (%)	calcaire dans chaque fraction (%)
	avec décalcarisation (%)	sans décalcarisation (%)		
0-1 μ	22,4	25	2,6	10,4
1-2 μ	3,6	7,6	4,0	52,6
2-20 μ	11,3	21,7	10,4	47,9
20-50 μ	7,1	17,9	10,8	60,3
50-200 μ	10,5	21,3	10,8	50,7
200-2 000 μ	1,8	3,0	1,2	40
H ₂ O - M.O et CaCO ₃	42,2	3,8	38,4	—

2.1.2. *pH, calcaire actif, calcaire total, gypse*

2.1.2.1. Résultats

TABLEAU XVIII

Variable	Nombre	Moyenne	Ecart-type	Coefficient Variation	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
CaCO ₃ total %	245	38,4	5,8	15,2	37,7	39,2
CaCO ₃ total en méq.	245	767,4	114,6	14,9	753,0	781,7
CaCO ₃ actif en ‰	219	135,0	77,5	57,4	124,8	145,3
Gypse en %	40	0,43	0,44	103	0,29	0,57
pH, H ₂ O	215	8,33	0,19	2,3	8,31	8,36
pH, KCl	215	7,58	0,27	3,5	7,55	7,62

2.1.2.2. Interprétation

2.1.2.2.1. *Le taux de calcaire total* est élevé pour l'ensemble des échantillons avec un faible coefficient de variation. Ceci est lié à la pétrographie des roches du bassin versant pratiquement toutes calcaires, avec une dominance de calcaires et marnes, et aux sols et matériaux qui en sont issus (croûtes et encroûtements très riches en calcaire, sols calciques).

Une exception à noter est celle que présentent certains échantillons prélevés sur la rive gauche au niveau du confluent de l'oued Bajer près de Jendouba, et qui sont moins calcaires que la moyenne (25%). Ceci est probablement lié à la nature acide des matériaux constituant les hauts bassins de la rive gauche (argiles et grès du flysch oligocène).

2.1.2.2.2. *Le calcaire actif*. On pouvait s'attendre dans ce type d'échantillons, très divisés du point de vue granulométrique, à trouver des quantités plus importantes de calcaire actif par rapport au calcaire total. Celui-ci ne représente en moyenne que 35% seulement du calcaire total et semble en outre inversement proportionnel au calcaire total, pour des rapports sol/solution d'extraction ajustés à des valeurs convenables en fonction du taux de calcaire total ; certains échantillons très calcaires présentent même des taux insignifiants ou même nuls de calcaire actif.

Ce fait étant probablement en rapport avec la granulométrie des échantillons, nous avons essayé d'expliquer la teneur en CaCO₃ actif en fonction :

- de l'importance des différentes fractions granulométriques (après décalcarisation) ;
- de la teneur de ces différentes fractions en calcaire total,

en utilisant 3 méthodes statistiques complémentaires :

- corrélations simples (apparentes) et multiples ;
- régression multiple ;
- régression orthogonale.

a) *Liaison calcaire actif - fractions granulométriques*

Le tableau XIX résume l'essentiel des analyses portant sur 210 échantillons.

L'analyse des coefficients de corrélation simple montre qu'en apparence le CaCO₃ actif est lié positivement aux fractions fines (0 à 20 μ), ce qui correspond à sa définition et, négativement, aux fractions plus grossières (20 à 200 μ). Cette constatation est-elle confirmée par la suite ?

L'explication (mesurée en % de variation) de la teneur en CaCO₃ actif en fonction des différentes fractions est donnée par les coefficients de détermination.

Ainsi la fraction (0-1 μ) explique 75,7% des variations de CaCO₃ actif à elle seule tandis que la fraction (200-2 000 μ) n'en explique que 10%.

La connaissance du calcaire actif à partir de l'ensemble des fractions est excellente (90,3% expliqué).

Étant donné les liaisons entre les différentes fractions, l'étude des corrélations simples ainsi que la recherche d'un modèle explicatif du calcaire actif par une régression multiple en fonction des différentes fractions granulométriques n'éclaircissent guère le problème.

Nous avons cherché à expliquer le calcaire actif par une régression orthogonale (régression fonction de variables

TABLEAU XIX
RÉPARTITION DU CaCO_3 ACTIF DANS LES DIFFÉRENTES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES

	CaCO_3 actif (‰)	Fractions granulométriques après décarbonatation (en %)						
		0-1 μ	1-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ	
Moyenne	135,0	22,4	3,6	11,3	7,1	10,5	1,8	
Ecart-type	77,5	13,1	2,3	4,5	4,9	11,8	5,6	
Coefficient variation %	57,4	58,2	65,3	39,8	68,6	112,2	312,4	
Corrélations CaCO_3 /fractions		0,87	0,82	0,72	-0,47	-0,75	-0,32	Corrélation multiple 0,95
Coefficient de détermination en %		75,7	67,2	52,1	21,9	55,8	10,0	Coefficient de détermination multiple 90,3%
Corrélations composantes fraction		0,95	0,91	0,89	-0,26	-0,89	-0,44	Corrélations Ca actif/ composante = 0,88

indépendantes qui sont des combinaisons linéaires des variables de départ = composantes principales) en fonction des 6 composantes principales des 6 fractions.

L'analyse est particulièrement claire car elle isole une seule composante (cf. tabl. XIX) corrélée fortement et positivement (0,88) avec le calcaire actif.

Les corrélations entre les fractions et cette composante (positive de 0 à 20 μ , et négative de 20 à 200 μ) permettent ainsi d'interpréter de façon indépendante leur influence sur les variations de CaCO_3 actif.

b) *Liaison calcaire actif - calcaire dans les différentes fractions granulométriques*

Nous obtenons des résultats analogues (tabl. XX) :

TABLEAU XX

	CaCO_3 actif (‰)	CaCO_3 % dans fractions						
		0-1 μ	1-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ	
Moyenne	133,1	3,8	3,9	10,8	10,9	9,6	1,4	
Écart-type	74,9	3,4	3,1	7,6	8,4	10,7	3,7	
Coefficient variation (%)	56,3	89,5	79,5	70,4	77,1	111,5	264,3	
Corrélation CaCO_3 /fractions		0,46	0,72	0,79	-0,42	-0,70	-0,31	Corrélation multiple = 0,88
Coefficient détermination (%)		21	52	62	17,6	49	9,6	Détermination = 78%
Corrélation composants fractions		0,50	0,84	0,87	-0,48	-0,85	-0,32	Corrélation composants/ CaCO_3 actif = +0,87

La teneur en CaCO_3 est extrêmement variable (coefficients de variation élevés) dans les différentes fractions granulométriques.

Les coefficients de corrélation simple montrent en apparence que CaCO_3 actif est lié positivement au CaCO_3 des fractions fines (0-20 μ) et négativement aux fractions plus grossières (20-200 μ) de façon plus ou moins intense.

Pour les mêmes raisons que précédemment, nous avons effectué une analyse de régression orthogonale qui permet d'expliquer le CaCO_3 actif par une seule composante liée de façon forte et positive (+0,87). Les résultats montrent clairement que :

- les fractions fines sont liées positivement à cette composante (liaison forte pour (1-2 μ) et (2-20 μ)) ;
- les fractions plus grossières sont liées de façon négative (liaison forte avec la fraction (50-200 μ)).

La teneur en CaCO_3 actif, très liée aux fractions (1-2 μ), (2-20 μ) et (50-200 μ)
 — augmente donc quand le CaCO_3 augmente dans les fractions fines (0-20 μ) ;
 — diminue quand le CaCO_3 augmente dans les fractions grossières (20-200 μ).

La dispersion de ces résultats traduit sans doute certaines différences de composition et de liaison entre les alluvions : il apparaît donc nécessaire d'analyser plus en détail ce phénomène.

2.1.2.2.3. *Le dosage du gypse.* Il a été effectué seulement sur 40 échantillons (cf. tabl. XVIII). Les valeurs sont faibles, 0,4% en moyenne, mais présentent un fort coefficient de variation. Certains échantillons ne sont pas du tout gypseux.

2.1.2.2.4. *Le pH* de la suspension eau 1/2,5 est élevé, 8,3 pour l'ensemble des échantillons avec un coefficient de variation très faible. Les faibles variations enregistrées n'ont pu être interprétées.

La différence pH eau — pH KCl est faible et constante sur l'ensemble des échantillons (0,75 unité pH).

2.1.3. La matière organique

2.1.3.1. Méthodologie des analyses.

La matière organique totale est calculée après dosage du carbone total par oxydation au bichromate de potassium (méthode Anne) en affectant au taux de carbone trouvé le coefficient 0,714.

L'azote total a été dosé par la méthode Kjeldahl après attaque sulfurique.

Les matières humiques sont extraites par un sel alcalin le pyrophosphate de sodium après attaque phosphorique ; séparation des acides humiques et acides fulviques par acide sulfurique et soude et dosage du carbone des deux fractions par oxydation au bichromate.

2.1.3.2. Résultats

TABLEAU XXI

Variable	Nombre	Moyenne	Ecart-type	Coefficient varianon	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
M.O. totale (%)	245	1,14	0,5	46,7	1,07	1,21
C (‰)	245	6,51	2,7	41,3	6,18	6,85
N (‰)	245	0,72	0,32	45,2	0,68	0,76
C/N	245	9,3	1,5	16,0	9,14	9,52
Acides fulviques en C (‰)	77	0,88	0,43	48,9	0,78	0,98
Acides humiques en C (‰)	75	0,62	0,37	60,0	0,53	0,70
Matières humiques en C (‰)	80	1,46	0,76	52,1	1,29	1,63

Quantitativement le taux moyen de matière organique déposée est plus faible que la moyenne des sols cultivés dans le bassin de la Medjerda où le taux est de l'ordre de 2% pour les horizons de surface. Ce taux moyen de 1,14% représente néanmoins un poids énorme de matière organique déposée, près de 900 000 t (auquel il faut ajouter une quantité évacuée à la mer peut-être 3 fois plus forte) ce qui correspondrait à une concentration minimale dans les eaux de 1 g/l.

Matière organique totale et granulométrie. Nous avons essayé de voir sous quelle forme se trouve la matière organique en utilisant la même approche que pour le calcaire actif (cf. tabl. XXII).

TABLEAU XXII
GRANULOMÉTRIE APRÈS DÉCARBONATATION

Variables (en %)	M.O.T.	0-1 μ	1-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ	
Moyenne	1,14	22,4	3,6	11,3	7,1	10,5	1,8	
Écart-type	0,53	13,1	2,3	4,5	4,9	11,8	5,6	
Coefficient variation (%)	46,7	58,2	65,3	39,8	68,6	112,2	312,4	
Corrélation M.O.T./fractions		0,16	0,17	0,06	- 0,08	- 0,25	- 0,12	Corrélation multiple = 0,56
Coefficients détermination (%)		2,6	2,9	0,4	0,6	6,3	1,4	Détermination multiple = 31
Corrélation composants /fractions		0,93	0,82	0,58	- 0,53	- 0,88	- 0,47	Corrélation composants/M.O.T. = 0,24

2.1.3.3. Conclusions

Nous retrouvons les mêmes tendances que pour le CaCO_3 actif :

- la teneur en matière organique totale est très variable ;
- la matière organique est en apparence liée positivement aux fractions fines et négativement aux fractions grossières mais ces liaisons sont faibles.

D'ailleurs, les pourcentages d'explications aux variations de la matière organique apportées par les différentes fractions et l'ensemble (31%) sont faibles.

Une analyse de régression orthogonale permet d'extraire une composante intéressante mais assez peu liée à la matière organique (0,24), elle fait intervenir :

- positivement les fractions fines,
- négativement les fractions grossières.

Ces résultats confirment donc qu'en moyenne, la teneur augmente quand la teneur en éléments fins augmente et diminue quand la teneur en éléments grossiers augmente.

Ces alluvions sont caractérisées par une matière organique évoluée, à complexe argilo-humique stable dont les principales valeurs caractéristiques sont les suivantes :

- taux d'humidification $\frac{\text{CAF} + \text{CAH}}{\text{C. M.O.T.}} = 22\%$;
- rapport acides fulviques/acides humiques = 1,42 ;
- le rapport C/N qui traduit le degré de minéralisation de cette matière organique est en moyenne de 9,3 ce qui est assez bas et caractéristique de sols biologiquement actifs dont l'azote est facilement assimilable. Ces valeurs sont plus proches de celles trouvées généralement pour les sols cultivés de la haute et moyenne vallée, que de celles des sols forestiers des hauts bassins pour lesquels le C/N en particulier dépasse souvent 12 ; ce qui tendrait à dire que les alluvions ont été arrachées aux sols cultivés plutôt qu'aux sols forestiers ;
- les taux d'azote, matières humiques totales, acides humiques et acides fulviques sont très faibles ;
- la capacité d'échange rapportée en % de la matière organique est égale à 0,25 méq./100 g de matière organique.

2.1.4. Le complexe absorbant

2.1.4.1. Méthodologie

Les cations échangeables (et solubles) ont été déterminés après percolation dans une solution normale d'acétate d'ammonium à pH 7. Les ions hydrosolubles sont retranchés après dosage sur extrait de saturation effectué dès que la conductivité dépasse 2 mmhos. La capacité d'échange totale (T Ca) est déterminée par percolation au chlorure de calcium tamponné à pH 7.

2.1.4.2. Résultats

Les taux de calcium échangeable sont énormes et manifestement surestimés. Cela tient à l'utilisation de l'acétate d'ammonium comme solution d'échange, qui tamponné à pH 7, dans ces matériaux très calcaires, dissout

TABLEAU XXIII

Variables	Nombre	Moyenne en még/ 100 g sol	Ecart-type	Coefficient variation (%)	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Ca ⁺⁺	244	(66,88)	20,11	30,0	64,35	69,40
Mg ⁺⁺	244	9,16	3,87	42,3	8,67	9,65
K ⁺	244	0,42	0,27	65,5	0,38	0,45
Na ⁺	244	0,67	1,41	210,6	0,49	0,84
T (Ca)	244	22,4	18,5	82,6	20,0	24,7

une grande quantité de CaCO₃. Les chiffres de Ca⁺⁺ échangeable trouvés sur les 244 échantillons sont tous du même ordre de grandeur (64 à 69 még/100 g de sol) et pourraient correspondre à la capacité de dissolution du réactif.

Dans ces conditions, il est difficile d'estimer la part de Ca⁺⁺ réellement échangeable par rapport à celle provenant du calcaire. Il n'est pas possible non plus de doser les ions CO₃⁻⁻⁻ provenant du carbonate, dans un milieu aussi tamponné que l'acétate d'ammonium.

En outre, le calcaire des sédiments étant probablement faiblement dolomitique l'acétate d'ammonium dissout également un peu de CO₃Mg et il n'est pas possible d'appliquer une formule de correction telle que celle-ci :

$$\text{Ca}^{++} \text{ éch.} = \text{T (Ca)} - (\text{Mg}^{++} + \text{K}^+ + \text{Na}^+) \text{ éch.}$$

Pour tenter de remédier à ce défaut de la méthode, nous avons testé sur quelques échantillons une méthode de double percolation à l'acétate d'ammonium à pH 8,2 : la première percolation donne les ions hydrosolubles + les échangeables + les carbonates de calcium et magnésium dissous. On peut considérer que la seconde percolation dans ce milieu très calcaire et peu salé ne déplace que les carbonates (et le reliquat des sels de sodium) : la différence des deux percolations donnant une valeur plus approchée du Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ réellement échangeables desquels il faut déduire les ions hydrosolubles dosés sur l'extrait de saturation. La somme des cations échangeables trouvés par cette méthode est nettement plus faible et assez proche (en excès) de la capacité d'échange dosée.

Au vu de ces résultats, nous avons finalement admis que ces sédiments riches en calcaire actif étaient totalement saturés $V = S/T = 100\%$ et estimé la somme (Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺) échangeable par la formule

$$(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) \text{ éch.} = \text{T (Ca)} - (\text{K}^+ + \text{Na}^+) = 21,3 \text{ még/100 g en moyenne}$$

Ca⁺⁺ étant toujours plus grand que Mg⁺⁺ avec des proportions relatives variant dans la proportion d'une partie de Mg⁺⁺ pour 7 parties de Ca⁺⁺ environ. Les quantités de K⁺ et Na⁺ sont très nettement plus faibles, avec pratiquement pas de sodium fixé sur le complexe :

$$\text{coefficient d'adsorption de Na}^+ = \frac{\text{Na}^+ \text{ éch.}}{\text{CEC} - \text{Na}^+ \text{ éch.}} = 0,03 \text{ en moyenne.}$$

2.1.5. Sels hydrosolubles

Résultats des dosages effectués sur l'extrait de saturation.

TABLEAU XXIV

Variables	Nombre	Moyenne	Ecart-type	Coefficient variation	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Conductivité en mmhos	245	2,66	2,25	84,8	2,37	2,94
Ca ⁺⁺ (még/100 g)	245	0,68	0,72	107,0	0,58	0,77
Mg ⁺⁺ (még/100 g)	245	0,49	0,52	106,1	0,42	0,55
K ⁺ (még/100 g)	245	0,025	0,12	501,4	0,009	0,04
Na ⁺ (még/100 g)	245	0,80	1,87	234,6	0,56	1,03
Cl ⁻ (még/100 g)	245	0,85	1,62	189,5	0,65	1,06
SO ₄ ⁻⁻⁻ (még/100 g)	245	0,78	0,76	96,8	0,69	0,88
HCO ₃ ⁻ (még/100 g)	245	0,14	0,07	51,7	0,13	0,15

Les sédiments déposés sont en moyenne « légèrement salins » dans l'échelle de Riverside, la salure étant due surtout au chlorure de sodium, faiblement aux sulfates qui d'ailleurs apparaissent peu dans la percolation à l'acétate d'ammonium (pour dosage des cations échangeables). Le NaCl représente près de 50% des sels solubles totaux.

— Différents rapports caractéristiques calculés sur l'E.S. moyen :

TABLEAU XXV

$\frac{Ca^{++}}{SO_4^{--}}$	$\frac{Cl^-}{SO_4^{--}}$	$\frac{Ca^{++}}{Mg^{++}}$	$\frac{Na^+ + K^+}{Ca^{++} + Mg^{++}}$
0,87	1,09	(> 1) 1,4	(< 1) 0,7

2.1.2. Les éléments totaux

Les résultats des éléments totaux, déterminés par l'analyse tri-acide, du fer et du manganèse sont consignés ci-après.

TABLEAU XXVI

Variable	Nombre	Moyenne	σ	Coefficient variation	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Mn total ppm (HNO ₃)	83	236,0	54,6	23,1	224,1	248,0
Fe ₂ O ₃ libre (DEB)	83	1,67	0,37	22,3	1,60	1,74
Fe ₂ O ₃ total (HCl)	83	3,39	0,70	20,7	3,26	3,52

TABLEAU XXVII
TRIACIDES

Variables	Nombre	Moyenne	σ	Coefficient variation	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
SiO ₂ 10 ⁻²	24	46,17	2,81	6,1	45,00	47,33
Al ₂ O ₃ 10 ⁻²	24	21,82	1,66	7,6	21,13	22,50
Fe ₂ O ₃ 10 ⁻²	24	8,10	0,89	10,9	7,73	8,47
TiO ₂ 10 ⁻²	24	0,92	0,06	6,8	0,89	0,94
MnO ₂ 10 ⁻²	24	0,04	6,92	17,3	0,037	0,042
CaO10 ⁻²	24	0,99	0,37	37,9	0,84	1,15
MgO10 ⁻²	24	2,29	0,58	25,6	2,05	2,53
K ₂ O10 ⁻²	24	1,84	0,38	20,6	1,68	2,00
Na ₂ O10 ⁻²	24	0,41	0,09	22,5	0,37	0,45
SiO ₂ /R ₂ O ₃	24	2,91	0,33	11,5	2,77	3,05
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	24	3,61	0,45	12,6	3,42	3,80
Ca ⁺⁺ (méq/100 g)	24	35,57	13,48	37,9	30,01	41,14
Mg ⁺⁺ (méq/100 g)	24	113,80	29,17	25,6	101,76	125,84
K ⁺ (méq/100 g)	24	38,00	9,66	25,4	34,01	41,99
Na ⁺ (méq/100 g)	24	13,29	2,99	22,5	12,05	14,53

Le résidu quartzeux insoluble est en relation avec la granulométrie des échantillons : il est de l'ordre de 1 à 2% pour les plus argileux et 5 à 8% pour les plus sableux.

La méthode triacide a été appliquée à 6 profils seulement (25 échantillons) répartis depuis Medjez jusqu'à la mer. Les différences entre les échantillons sont minimes, elles portent principalement sur le calcium, CaO, K₂O et l'oxyde de magnésium. Les différences sont très faibles pour les oxydes de cations lourds (Fe₂O₃, TiO₂, MnO₂). Ceci est à mettre en relation avec la grande homogénéité des matériaux du bassin, uniquement sédimentaires et contenant très peu de minéraux lourds.

Le manganèse total a été dosé sur un plus grand nombre d'échantillons car il était considéré par les hydrologues comme un bon indicateur traqueur. En fait, dans le cas du bassin versant de l'oued Medjerda, pour la raison énoncée ci-dessus, les variations sont faibles (C.V. = 23%) et difficilement interprétables.

La proportion de fer libre extrait, est importante et représente près de 50% du fer total ; chiffre élevé par rapport à la majorité des sols du bassin.

2.1.7. Analyses physiques

2.1.7.1. Méthodologie

- Densité apparente mesurée sur mottes séchées à l'air et immergées dans le mercure.
- Densité réelle mesurée au pycnomètre. Porosité calculée.
- Le test d'instabilité structurale : méthode Henin, utilisant les trois solvants eau - alcool - benzène.

2.1.7.2. Résultats

TABLEAU XXVIII

Variables	Nombre	Moyenne	Ecart-type	Coefficient variation	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Dr	56	2,67	0,09	3,3	2,65	2,70
Da	59	1,74	0,14	8,2	1,71	1,78
Porosité	56	34,8	5,31	15,2	33,3	36,2

2.1.7.2.1. La densité apparente moyenne sur 56 échantillons est relativement élevée : 1,74, avec un faible coefficient de variation (8,2%). Cela s'explique par deux raisons :

- la première est due à la méthodologie même de la mesure qui surestime probablement légèrement la moyenne, en effet, la non-cohésion des mottes des granulométries les plus grossières (70 à 80% de sables), n'a pas permis d'effectuer la mesure sur ces échantillons ;
- la deuxième raison est liée au fait qu'une grande proportion d'échantillons contient un très fort pourcentage d'éléments fins (jusqu'à 90% d'A + L), leur densité apparente est très élevée, voisine de 1,9. Les densités plus faibles, de l'ordre de 1,50 sur mottes, ont été mesurées sur échantillons comprenant seulement 20% de A + L environ. Afin d'apporter une correction à cette mesure, nous avons calculé la droite de régression de la densité apparente en fonction du taux d'argile plus limon des 56 échantillons analysés dont l'équation est $y = 0,030x + 1,5520$ et la valeur estimée du coefficient de corrélation $R = 0,5801$.

La densité apparente présente une assez bonne corrélation avec le taux d'argile plus limon ce qui nous a permis d'estimer la densité apparente moyenne des 244 échantillons d'alluvions pour un taux moyen de 37,5% d'A + L à 1,66 (cf. tabl. XXIX et fig. 8).

L'incidence de la différence entre la mesure effective sur 56 échantillons et l'estimation sur 244 échantillons sur le tonnage des alluvions déposées est faible ($75,0 \times 10^6$ t, contre $78,6 \times 10^6$ t).

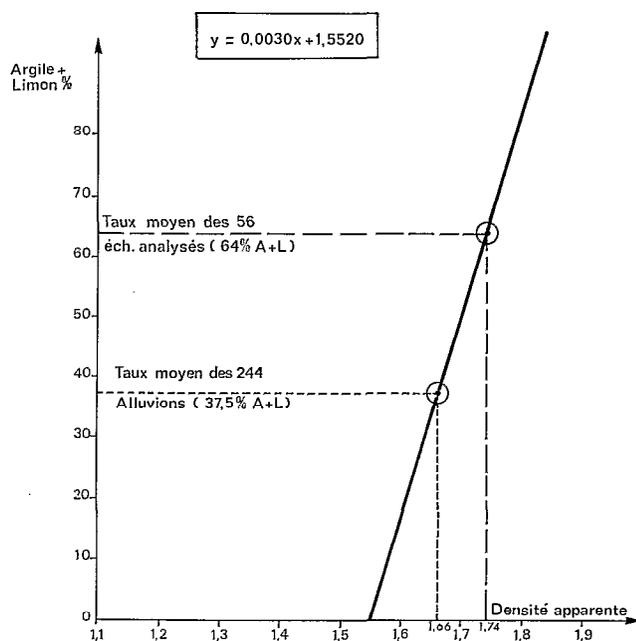


Fig. 8. — Variation de la densité apparente en fonction du taux d'argile plus limon

TABLEAU XXIX

Nombre d'échantillons analysés	Taux moyen d'A + L	da	Intervalle de confiance			
			95%		99%	
			minimum	maximum	minimum	maximum
56	64%	mesuré 1,74				
244	37,5%	estimé 1,66	1,62	1,71	1,60	1,72

2.1.7.2.2. Les densités réelles mesurées au pycnomètre sont stables. La moyenne sur 56 échantillons de 2,67, montre un faible coefficient de variation (3,3%).

2.1.7.2.3. La porosité totale calculée à partir de ces moyennes est de 34,8% pour 1,74 de densité apparente, et de 37,8% pour 1,66 de densité apparente.

2.1.7.2.4. Les tests de stabilité structurale ont été effectués sur 69 échantillons d'alluvions, prélevés environ 1 mois après les crues et non réhumectés par les pluies après leur dépôt. Ce test, mis au point pour des agrégats au sens pédologique, a une signification limitée dans le cas présent où nous avons affaire à des particules de fragmentation non encore agrégées ; néanmoins, il permet, par la réaction des particules aux différents prétraitements, de définir le comportement de ces matériaux originels par rapport à des alluvions plus évoluées et ultérieurement de suivre leur évolution. (cf. tabl. XXX).

— Le pourcentage de fragments stables à l'eau après prétraitement à l'alcool est de 7,5% en moyenne, ce qui est faible traduisant un manque de cohésion et même une certaine fragilité. Ce pourcentage est en assez bonne corrélation avec le taux d'argile de la majorité des échantillons sauf pour 10 échantillons de la région d'El Batham qui présentent un taux d'agrégation élevé (20 à 50%) avec moins de 8% d'argile. Ceci est lié au calcaire qui, sous forme fine maintient dans ces échantillons sableux une certaine cohésion.

— Le taux de fragments stables après prétraitement au benzène est extrêmement faible : 2% seulement, ce qui traduit le peu d'influence de la matière organique dans la cohésion de ces matériaux ; il est très peu différent du test-témoin à l'eau sans prétraitement (2,7%) pour lequel les fragments les plus stables sont constitués d'une forte proportion de sables calcaires avec moins de 10% d'argile. Les échantillons les plus argileux ne présentent aucune cohésion à l'eau (Ag stables < 1%), et présentent les taux de dispersion les plus élevés (taux de dispersion A + L de l'ordre de 70% pour 45% d'argile). Ceci explique la stabilité pratiquement nulle de ces alluvions qui se dispersent totalement et fondent sous l'effet des pluies.

— Le taux de dispersion A + L moyen pour 68 échantillons est de 33,4%. Ce qui est élevé et explique la faible stabilité des fragments.

— L'indice *Is* moyen est très élevé (21) ce qui, dans ces échantillons, n'a pas grande signification en soi, mais seulement par comparaison aux substrats et par l'étude de son évolution dans le temps.

TABLEAU XXX

	Nombre	Moyenne	Ecart-type	Coefficient variation (%)	Intervalle de confiance 95%	
					Limite inférieure	Limite supérieure
Alcool	69	7,5	10,1	133,5	5,5	9,6
AGR % Air	69	2,7	4,3	161,8	1,8	3,5
Benzène	69	2,0	4,0	198,8	1,2	2,8
Moyenne corrigée des S.G.	69	3,2	3,9	121,3	2,4	4,3
A + L %	68	33,4	21,2	63,5	29,1	37,7
<i>Is</i>	68	21,8	19,9	91,1	17,8	25,9

Il faut noter les écarts-types élevés et souvent supérieurs aux moyennes ainsi que les coefficients de variation très forts sur l'ensemble des variables qui traduisent une grande hétérogénéité des échantillons.

2.1.8. Minéralogie des argiles

Des déterminations minéralogiques ont été faites sur 94 échantillons.

La première remarque concernant les résultats est la grande similitude des échantillons du point de vue argileux. Les proportions relatives des différents minéraux argileux sont identiques pour tous les échantillons, les différences observées portant seulement sur la plus ou moins grande abondance de calcite : toutes les alluvions en sont abondamment pourvues sauf deux échantillons de la région d'El Batham qui contiennent malgré tout 40% de CO₃Ca total.

Du point de vue de la composition relative des différents types d'argiles :

- la montmorillonite est toujours dominante, représentant 50% environ du total des argiles et toujours bien cristallisée, caractéristique retrouvée généralement dans ce type de dépôts alluviaux ;
- la kaolinite vient en second proportionnellement.
- l'illite représente 5 à 10%.
- la chlorite 5 à 10%.

Cette composition reflète bien la nature des matériaux pédologiques et géologiques des bassins versants de la Medjerda.

2.1.9. Fertilité des dépôts alluviaux

La capacité productive que représentent ces jeunes sols alluviaux est conditionnée par leurs caractéristiques chimiques mais surtout physiques et granulométriques.

Les alluvions sableuses déposées localement sur les terrasses du lit majeur dans la région de Testour, d'El Batham et à l'aval de Djedeida dans le lit majeur indiqué, conviennent mal aux cultures céréalières mais constituent un bon substrat pour les cultures maraîchères d'été en irrigué, très meuble, très perméable. Leur situation

privilegiée à proximité du lit mineur facilite l'irrigation et les travaux de nivellement sont généralement minimes avant l'installation des parcelles. Néanmoins, étant donné la pauvreté de leurs réserves minérales, elles nécessitent un apport d'éléments fertilisants organiques et chimiques. Les dépôts les plus profonds peuvent être plantés en petits arbres fruitiers calcicoles si les conditions de salure de profondeur le permettent, mais seront soumis aux risques de débordements de l'oued tant que le cours ne sera pas régularisé (futur barrage de Sidi Salem).

Les alluvions les plus lourdes argilo-limoneuses qui constituent la majorité des alluvions présentent un grave défaut de structure en surface. On a vu au printemps 1973, après les crues, certains agriculteurs, pour remédier à ce défaut, ôter à la main les gros prismes isolés par la fissuration pour planter des tomates directement sur le substrat.

Ces alluvions nécessitent au départ un ameublissement qui peut être obtenu par labour profond et mélange des strates argileuses de surface avec les strates plus grossières de profondeur ou, dans les cas où le dépôt est peu épais, avec le substrat lui-même, ce qui améliore nettement leur structure ; dans ces conditions, elles conviennent assez bien aux cultures céréalières ou fourragères.

Une réserve est à faire pour les sols de la Garaa Mabtouha, zone topographiquement basse favorable à la stagnation des eaux pluviales et dont tout le réseau de drainage à ciel ouvert a été colmaté par les sédiments ; d'importants travaux de curage sont à entreprendre pour protéger les sols et les cultures soit d'un excès d'eau, qui sera peut-être bénéfique les années les plus sèches, mais catastrophique les hivers les plus humides, soit surtout d'une concentration de sels dans les sols par défaut de drainage.

Du point de vue chimique, il est délicat d'interpréter les chiffres des analyses qui n'ont pas été faites dans le but d'apprécier la fertilité de ces alluvions. Disons seulement que, du point de vue des réserves minérales, les alluvions sont bien pourvues en bases avec un taux de saturation de 100% et dominance des alcalino-terreux, Ca et Mg, sur le potassium. Du point de vue de l'assimilabilité des éléments, nous avons seulement dosé le P_2O_5 assimilable dont le taux est très faible probablement retenu en partie par le CO_2Ca . Il est à craindre également que l'assimilabilité d'autres éléments soit limitée sous ces conditions de pH supérieur à 8.

En ce qui concerne la matière organique, et l'azote total, les réserves sont également faibles. Ces sols jeunes nécessiteront très rapidement pour accroître leur potentialité un enrichissement en matières organiques, azote et phosphore surtout. Nous avons remarqué que la majorité des agriculteurs qui ont exploité ces terres et auprès de qui nous avons enquêté, ont considéré leurs rendements supérieurs à la normale au cours de la première année de culture 1973/74 mais diminuant nettement la seconde année.

Alluvions	Nombre	\bar{x}	σ	Coefficient variation	Limite inférieure 95%	Limite supérieure 95%
P_2O_5 ass %	83	0,029	0,02	66,5	0,025	0,033

Le taux de calcaire total des alluvions est élevé et la part du calcaire actif est malgré tout forte, 35% en moyenne. La salure moyenne de 2,65 mmhos avec dominance du chlorure de sodium n'est pas un facteur trop défavorable et doit permettre des cultures moyennement tolérantes d'autant plus que saisonnièrement elle subit des variations importantes qui vont dans le sens du dessalement, sauf dans des conditions très particulières (fond de la Garaa Mabtouha). Le taux de sodium fixé sur le complexe est faible, 3% en moyenne, et ne dépassant pas 6%.

2.1.10. Conclusion

Chimiquement, les différentes alluvions déposées par l'oued Medjerda présentent une composition relativement homogène qui reflète bien la nature des matériaux originels du bassin versant composés de roches uniquement sédimentaires, à dominance de calcaires et de marnes et d'où sont hérités des sols en majorité calcimagnésiques. Dans un tel bassin peu différencié du point de vue composition chimique des matériaux, les différences entre alluvions portent donc essentiellement sur les *caractéristiques granulométriques* et les *caractéristiques physiques* qui leur sont liées et qui devront donc être la base d'interprétations plus poussées dans la recherche des variations entre les sédiments, verticalement et en différents points du bassin versant.

En considérant les seules moyennes globales, ces alluvions peuvent être qualifiées de *calcaro-limono-argileuses* avec une très forte proportion dans la fraction colloïdale de particules inférieures à un micron. Les plus fortes variations observées dans ces sédiments se situent au niveau des sables fins (50-200 μ) et surtout des sables grossiers (200-2000 μ).

Le calcaire représente une part importante des fractions granulométriques, principalement des fractions comprises entre 2 et 200 μ . Le calcaire actif, très lié à la dimension des particules, présente des variations importantes selon les échantillons. Le gypse est peu abondant.

Le pH est nettement alcalin et le complexe absorbant saturé avec une nette dominance du calcaire et du magnésium sur les ions alcalins.

Les alluvions sont légèrement salées. Elles sont pauvres en matière organique, mais celle-ci est très minéralisée.

Les minéraux argileux y sont très homogènes et à dominance de montmorillonite. La fertilité de ces dépôts est médiocre en raison, d'une part, de la pauvreté de leurs réserves minérales et organiques qui paraissent néanmoins sous une forme facilement assimilable et, d'autre part, de leurs caractères structuraux.

2.2. COMPARAISON DES ALLUVIONS AUX SUBSTRATS

Le problème de la distinction infaillible des alluvions par rapport aux sols qu'elles enterrent est important pour estimer la sédimentation lors d'une crue sur un bassin versant par exemple. Dans le cas présent, le problème était simplifié par deux faits :

- les prélèvements ont pu être faits très tôt après la crue, aucune interaction substrat/alluvions ne s'étant produite encore, soit naturellement, soit artificiellement (labour...) ;
- la période de la crue elle-même a joué un rôle important dans cette distinction des deux matériaux, le sol étant occupé à cette époque de l'année (fin mars) par une végétation annuelle abondante, céréales, fèves, germinations diverses (ricin, ...) qui a laissé des empreintes très nettes à différents niveaux : empreintes de tiges à la base et empreintes de feuilles dans les alluvions elles-mêmes. La distinction morphologique était simple.

Nous avons néanmoins précisé cette distinction sur le plan analytique en effectuant le même type d'analyses physico-chimiques sur les substrats et les alluvions, et comparé par des tests statistiques unilatéraux (Student-Fisher), les moyennes obtenues sur les différentes variables analytiques des substrats et des alluvions, aux risques 5% et 1%.

Par convention NS = différence non significative
S = significative au risque 5%
HS = significative au risque 1%.

Les résultats concernant les substrats comportent les mêmes analyses physico-chimiques et les mêmes calculs statistiques que ceux effectués sur les alluvions (moyenne, écart-type, coefficient de variation) et sont présentés ci-dessous avec les tests de comparaison alluvions/substrats.

2.2.1. Analyse granulométrique, calcaire, pH

2.2.1.1. Granulométrie sans décalcarisation

TABLEAU XXXI

Variable (%)	Alluvions			Substrats			Valeur absolue de la variable T (1)	Limites		Conclusion
	\bar{x}	σ	C.V.	\bar{x}	σ	C.V.		5%	1%	
0-1 μ	25,0	15,4	61,6	29,4	11,2	37,9	2,45	1,65	2,33	HS
1-2 μ	7,6	5,6	73,4	7,9	3,7	46,1	0,53	1,65	2,33	NS
0-2 μ	32,4	19,9	61,4	37,4	14,4	38,4	2,17	1,65	2,33	S
2-20 μ	21,7	10,6	48,8	26,0	8,3	31,9	3,24	1,65	2,33	HS
20-50 μ	17,9	12,8	71,9	16,2	8,6	52,8	1,14	1,65	2,33	NS
50-200 μ	21,3	22,8	107,3	13,2	14,3	108,9	3,32	1,65	2,33	HS
200-2 000 μ	3,0	8,7	289,9	2,8	5,7	204,4	0,23	1,65	2,33	NS
H ₂ O 105°	2,7	1,3	48,7	3,1	0,9	30,1	2,53	1,65	2,33	HS
M.O. totale	1,14	0,5	46,7	1,64	0,4	24,5	7,78	1,65	2,33	HS

(1) T : variable de Student-Fisher.

2.2.1.2. Granulométrie avec décalcarisation

TABLEAU XXXII

Variable (%)	Alluvions			Substrats			Valeur absolue de la variable T (1)	Limites		Conclusion
	\bar{x}	σ	C.V.	\bar{x}	σ	C.V.		5%	1%	
0-1 μ	22,4	13,0	58,2	25,4	9,9	39,1	1,90	1,65	2,33	S
1-2 μ	3,6	2,3	65,3	3,6	1,9	55,0	0,02	1,65	2,33	NS
0-2 μ	26,2	14,8	56,7	29,0	10,9	37,7	1,62	1,65	2,33	(NS)
2-20 μ	11,3	4,5	39,8	12,8	4,4	34,5	2,27	1,65	2,33	S
20-50 μ	7,1	4,8	68,6	6,7	3,9	59,0	0,54	1,65	2,33	NS
50-200 μ	10,5	11,7	112,1	7,4	8,2	111,6	2,30	1,65	2,33	S
200-2 000 μ	1,8	5,5	312,4	1,8	4,1	233,7	0,01	1,65	2,33	NS
CaCO ₃ total	38,4	5,8	15,2	36,4	6,3	17,5	2,14	1,65	2,33	S

2.2.1.3. Calcaire, pH

TABLEAU XXXIII

Variable (%)	Alluvions			Substrats			Valeur absolue de la variable T (1)	Limites		Conclusion
	\bar{x}	σ	C.V.	\bar{x}	σ	C.V.		5%	1%	
CaCO ₃ total méq.	767,4	114,6	15	728,3	127,4	17,4	2,08	1,65	2,33	S
CaCO ₃ actif ‰	135,0	77,5	57,4	143,9	68,5	47,6	0,82	1,65	2,33	NS
pH H ₂ O	8,33	0,18	2,2	8,36	0,12	1,5	1,11	1,65	2,33	NS
pH KCl	7,58	0,26	3,5	7,47	0,12	1,7	4,33	1,65	2,33	HS

(1) T : variable de Student-Fisher.

Au niveau des moyennes globales, les différences portent de façon hautement significative sur les fractions granulométriques (sans décalcarisation) 0-1 μ , 2-20 μ et 50-200 μ surtout.

Les substrats étant nettement argilo-limoneux et moins calcaires que les alluvions à texture plutôt limono-argileuse ; après décalcarisation, on remarque que les différences portent sur les mêmes fractions, mais sont seulement significatives. On constate en moyenne que les substrats sont plus riches en calcaire que les alluvions dans les fractions fines (A + L) et moins riches que les alluvions dans les fractions grossières (sables). La différence étant surtout nette dans la fraction sables fins (50-200 μ). (cf. tabl. ci-après).

TABLEAU XXXIII bis

Fractions	Calcaire %	
	Alluvions	Substrats
0-1 μ	2,6	4,0
1-2 μ	4,0	4,2
2-20 μ	10,4	13,2
20-50 μ	10,8	9,5
50-200 μ	10,8	5,8
200-2 000 μ	1,2	1,0
CaCO ₃ total	39,8	37,7

Les coefficients de variation des différentes variables, pratiquement toujours plus élevés pour les alluvions que pour les substrats, traduisent une plus grande hétérogénéité de ces matériaux alluviaux.

Sur le plan qualitatif, les techniques d'analyses des liaisons entre calcaire actif et calcaire total dans les différentes fractions granulométriques appliquées aux échantillons du substrat conduisent aux résultats suivants :

TABLEAU XXXIV

	CaCO ₃ (%)	0-1 μ	1-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ	
Moyenne	157,6	3,9	5,3	13,2	8,1	8,0	0,8	
Écart-type	77,2	3,8	3,2	6,6	6,8	10,8	1,3	
Coefficient variation (%)	49,0	97,4	60,4	50,0	84,0	135,0	162,5	
Corrélation CaCO ₃ /fractions		0,45	0,74	0,70	- 0,58	- 0,80	0,20	Corrélation multiple = 0,89
Coefficient détermination (%)		20,3	54,8	49,0	33,6	64,0	4,0	Détermination = 0,79
Corrélation composants/ fractions		0,50	0,79	0,80	- 0,68	- 0,89	0,36	Corrélation composants/ CaCO ₃ actif = 0,88

L'analyse de régression orthogonale permet d'isoler une seule composante fortement corrélée (0,88) au CaCO₃ actif. Elle fait intervenir surtout les fractions (1-2 μ), (2-20 μ) et (50-200 μ), plus faiblement les autres.

La comparaison des résultats à ceux obtenus pour les alluvions (cf. tabl. XX) montre :

- 1) que le substrat est plus riche que les alluvions en CaCO₃ actif ;
- 2) que les fractions fines du substrat (0-20 μ) sont plus riches en CaCO₃ total que celles des alluvions ;
- 3) que les fractions grossières (20-2000 μ) des alluvions sont par contre plus riches en CaCO₃ total que celles du substrat ;
- 4) que le calcaire actif est lié positivement (faiblement mais de façon significative) à la fraction (200-2000 μ) du substrat, alors qu'il était lié négativement à la fraction (200-2 000 μ) des alluvions.

Les résultats précédents semblent donc indiquer que le calcaire du substrat est sous une forme différente de celui des alluvions :

- plus de CaCO₃ actif dans le substrat ;
- fractions grossières moins riches en CaCO₃ total, mais liées positivement avec CaCO₃ actif ;
- fractions fines plus riches en CaCO₃ total.

A noter également que le pH KCl est plus bas pour les substrats pour un pH identique, ce qui laisserait présumer d'une tendance à une acidité d'échange plus forte que dans les alluvions.

2.2.2. La matière organique

TABLEAU XXXV

Variable (%)	Alluvions			Substrats			Valeur absolue de la variable T	Limites		Conclusion
	\bar{x}	σ	C.V.	\bar{x}	σ	C.V.		5%	1%	
M.O.T. (%)	1,14	0,5	46,7	1,64	0,4	24,5	7,78	1,65	2,33	HS
C (‰)	6,51	2,7	41,3	9,49	2,3	24,6	8,21	1,65	2,33	HS
N(‰)	0,72	0,3	45,2	1,05	0,3	27,0	7,55	1,65	2,33	HS
Acides fulviques AFT (‰)	0,88	0,4	48,9	1,38	0,3	22,6	3,91	1,66	2,37	HS
Acides humiques AHT (‰)	0,62	0,3	60,0	1,20	0,5	40,5	4,80	1,66	2,37	HS
Matières humiques MHT (‰)	1,46	0,7	52,1	2,59	0,7	28,5	4,81	1,66	2,37	HS

L'examen du tableau de comparaison montre que toutes les variables analysées présentent une différence hautement significative régulièrement en faveur des substrats.

L'ensemble de ces résultats d'analyse de la matière organique différencie nettement les deux types de matériaux : les variations sont plus accusées pour les alluvions que pour les substrats qui sont relativement homogènes.

2.2.3. Complexe et sels solubles

— On constate peu de différences au niveau du complexe adsorbant sinon pour le potassium échangeable qui est probablement lié au taux d'argile plus élevé dans les substrats que dans la moyenne des alluvions.

— La conductivité, le calcium, le magnésium et les sulfates solubles présentent les plus grandes différences, avec des taux plus élevés dans les alluvions que dans les substrats.

TABLEAU XXXVI
COMPARAISON DES DIFFÉRENTS RAPPORTS CARACTÉRISTIQUES
CALCULÉS SUR LA MOYENNE DES EXTRAITS DE SATURATION

Rapports	$\frac{Ca^{++}}{SO_4^{--}}$	$\frac{Cl^-}{SO_4^{--}}$	$\frac{Ca^{++}}{Mg^{++}}$	$\frac{Na^+ + K^+}{Ca^{++} + Mg^{++}}$	$\frac{Na}{T}$ (%)
Alluvions	0,87	1,09	1,4	0,71	3
Substrats	1,08	1,43	1,7	0,76	5

2.2.4. Caractéristiques physiques

2.2.4.1. Porosité

TABLEAU XXXVII

Variable	Alluvions			Substrats			Valeur absolue de la variable T	Limites		Conclusion
	\bar{x}	σ	C.V.	\bar{x}	σ	C.V.		5%	1%	
dr	2,67	0,09	3,3	2,61	0,08	3,3	1,21	1,67	2,39	NS
da	1,74	0,14	8,2	1,81	0,12	6,8	0,79	1,67	2,39	NS
Porosité	34,8	5,31	15,2	30,4	5,88	19,3	1,37	1,67	2,39	NS

Bien que la différence de porosité entre les deux matériaux soit non significative, il semble exister une tendance vers une porosité plus faible du substrat par rapport aux alluvions. Une tendance dans ce sens semble d'autant plus étonnante que les substrats ont été prélevés dans leur couche la plus superficielle généralement structurée et aérée. Il a pu y avoir un certain colmatage au moment du dépôt par les boues alluviales.

2.2.4.2. Test de stabilité

2.2.4.2.1. Tableau de comparaison

TABLEAU XXXVIII

Variable	Alluvions			Substrats			Valeur absolue de la variable T	Limites		Conclusion
	\bar{x}	σ	C.V.	\bar{x}	σ	C.V.		5%	1%	
alcool	7,6	10,1	133	20,8	13,2	64	4,26	1,68	2,40	HS
AG air	2,7	4,3	162	6,5	4,1	63	3,26	1,68	2,40	HS
benzène	2,0	4,0	198	3,2	4,2	129	1	1,68	2,40	NS
Moyenne corrigée des S.G.	3,2	3,9	121	8,8	5,1	58	4,73	1,68	2,40	HS
A + L (%)	33,4	21,2	63	51,2	22,5	44	2,83	1,68	2,40	HS
Is	21,8	20,0	91	6,9	3,0	44	2,79	1,68	2,40	HS

A noter, pour les alluvions, des écarts-types plus élevés et souvent supérieurs aux moyennes et des coefficients de variations nettement plus forts que pour les substrats, traduisant une plus grande hétérogénéité dans les échantillons.

2.2.4.2.2. *Analyse statistique et comparaison alluvions-substrats par les méthodes d'analyse de variance sur l'ensemble des 3 méthodes de mesures d'agrégats stables : alcool, air, benzène.*

Compte tenu des différences importantes observées entre les variances des différents prétraitements, nous avons dû effectuer une transformation de variable.

La transformation ($y = x^{0,465}$ voisine de $y = \sqrt{x}$), a permis de stabiliser les variances des différents traitements, le rapport de la plus grande à la plus petite variance estimée ne dépassant pas 3.

a) *deux analyses de variances à 1 facteur effectuées*

- sur les alluvions seules,
- sur le substrat seul,

ont montré que :

- 1) pour le substrat : les agrégats alcool sont > agrégats air > agrégats benzène ;
- 2) pour les alluvions : les agrégats alcool sont > agrégats air et benzène, mais la différence air/benzène n'est pas significative.

b) *Analyse globale alluvions/substrats* : afin de mieux cerner les différences entre alluvions et substrats ainsi que celles entre agrégats, nous avons effectué une analyse de variance globale à 1 facteur (et 6 modalités).

c) *Conclusions* :

- 1) La valeur de la variable F observée, montre qu'il y a des différences très grandes entre les traitements.
- 2) Les comparaisons multiples de groupes effectuées par la méthode des contrastes de Scheffe conduisent aux résultats globaux suivants (dont certains confirment les analyses précédentes) :

Sur la moyenne corrigée des agrégats stables (alcool + air + benzène), les substrats sont globalement supérieurs aux alluvions ; ils présentent un taux de dispersion nettement plus élevé mais une stabilité globale plus grande. En analysant de plus près ces différences, en particulier au niveau du comportement des deux types de matériaux sous l'influence des prétraitements, on constate que :

- les taux d'agrégats alcool et air du substrat sont supérieurs à ceux des alluvions ce qui traduit une meilleure cohésion d'ensemble en relation avec le taux d'argile ;
- par contre, la différence entre agrégats benzène n'est pas significative ; l'influence de la matière organique dans l'agrégation étant la même pour les deux types de dépôts et pratiquement négligeable ; les taux de matière organique, pourtant différents (1,1 contre 1,6%) ne marquant pas ;
- pour les substrats, le classement Ag.Alcool Ag.Air Ag.Benzène, est vrai avec une fraction agrégée moyenne pour l'alcool et très faible pour air et benzène. Mais pour les alluvions, si Ag.alcool est supérieur à Ag.air, tout en restant dans des valeurs très faibles, par contre, la différence air-benzène n'est pas significative ;
- l'analyse des interactions entre types de sédiments et types d'agrégats stables montre que :
 - la différence entre agrégats alcool et air est plus forte pour les substrats que pour les alluvions. Les premiers montrent une cohésion supérieure aux alluvions pour lesquelles le sodium joue peut-être un rôle dans la forte dispersion observée ; la différence agrégats alcool et agrégats benzène va dans le même sens,
 - par contre, les différences Ag.air-Ag.benzène ne sont pas significatives traduisant dans les deux cas une faible influence de la matière organique.

2.2.5. *Eléments totaux*

L'examen comparatif des résultats de l'analyse triacide et des éléments divers (Mn, Fe₂O₃) montre très peu de différences entre la composition globale des deux types de matériaux qui sont issus des mêmes roches géologiques sur un bassin uniquement sédimentaire. La différence est hautement significative pour 2 éléments :

- le calcium, qui traduit la différence observée au niveau du carbonate total (54 méq/100 g pour les substrats contre 35 pour les alluvions) ;
- le manganèse qui marque seulement dans l'analyse triacide, le substratum étant plus riche que les alluvions.

2.2.6. *Conclusions sur la comparaison alluvions/substrats.*

Morphologiquement, les alluvions se différencient nettement du substratum dans le cas présent surtout grâce à une végétation herbacée.

Analytiquement, cette distinction est confirmée par les tests statistiques unilatéraux qui ont été effectués sur les moyennes globales des différentes variables analysées. La différence est significative à hautement significative pour les données suivantes :

- les fractions granulométriques 0-1 μ , 2-20 μ , 50-200 μ , 200-2000 μ , le calcaire contenu dans les différentes fractions tendant à augmenter cette différence qui devient seulement significative après décarbonatation ;
- le pH, KCl ;
- le CO_3Ca total ;
- toutes les données de la matière organique de façon hautement significative ;
- le potassium échangeable et la capacité d'échange ;
- la conductivité, le calcium, le magnésium, le sodium et les sulfates solubles dans l'extrait saturé ;
- tous les tests d'agrégats ;
- quelques éléments totaux triacides (MnO_2 - CaO et calcium)

Il est certain que, dans le cas de l'oued Medjerda dont le bassin versant est constitué de matériaux uniquement sédimentaires et peu variés, les différences entre alluvions et substratum seront minimales sur le plan chimique ainsi qu'en témoignent les différents tests de comparaison. Les plus grandes différences observées portent sur la composition granulométrique et les variables physiques qui lui sont liées, ainsi que sur la matière organique. La salure marque bien, mais étant très sujette à des variations rapides, les différences sont à interpréter prudemment. La granulométrie des alluvions est liée à la composition en matières en suspension des eaux de l'oued, et est très sujette aux fortes perturbations apportées à l'écoulement par des conditions locales ou des variations géographiques, comme le montrent les forts coefficients de variation constatés en particulier pour les sables. Si bien que la comparaison au substratum faite sur des moyennes globales, bien qu'intéressante, est insuffisante comme le montreront par la suite les analyses différentielles plus approfondies.

Au niveau des moyennes globales, ce sont les données de la matière organique qui différencient le mieux les deux types de matériaux car, d'une part, les différences sont toutes hautement significatives en faveur du substratum et, d'autre part, les coefficients de variation plus faibles traduisent une bonne homogénéité d'ensemble des échantillons verticalement et géographiquement.

3. ANALYSE DIFFÉRENTIELLE DES SÉDIMENTS PAR LES MÉTHODES STATISTIQUES

3.1. ANALYSE DE COMPOSANTES PRINCIPALES

La comparaison globale alluvions-substrat met déjà en évidence des différences notables. En ce qui concerne l'ensemble des alluvions, la variabilité élevée (coef. de variation forts) des diverses mesures n'est pas fortuite. Les distributions latérale, longitudinale et en profondeur de ces alluvions regroupées en un «tout hétérogène», permettent sans doute de l'expliquer.

Méthodologie

A partir des diverses mesures effectuées, nous avons cherché à préciser cette variabilité, ce qui implique de rechercher :

- des sédiments qui se ressemblent (constitution de groupes homogènes) ;
- des sédiments différents (recherche de différences entre groupes) ;
- des gradients traduisant une variation progressive entre ces sédiments.

Nous avons choisi d'appliquer la méthode d'analyse «en composantes principales» qui permet :

- de mettre en évidence les variables les plus discriminantes ;
- d'étudier les liaisons entre ces variables ;
- d'obtenir une (ou plusieurs) image simplifiée sur des plans discriminant au maximum les sédiments :
 - les sédiments comparables sont représentés par des points rapprochés constituant ainsi une constellation, un groupe homogène,
 - les sédiments différents sont représentés par des points éloignés,
 - les gradients sont mis en évidence par un nuage de points étiré selon un «axe».

Les images obtenues ont été ensuite interprétées en tenant systématiquement compte :

- des variations géographiques latérales et longitudinales,
- des variations verticales.

Nous avons considéré un certain nombre de rubriques analytiques essentiellement :

- analyse granulométrique avec et sans décalcification
- analyse du complexe et des sels solubles
- analyse de l'humus
- diverses analyses pour lesquelles le nombre réduit de résultats n'a pas permis d'apporter d'explication satisfaisante.

3.1.1. Analyse granulométrique

3.1.1.1. Sans décalcification

Les tableaux ci-dessous XXXIX et XL résument l'essentiel des résultats obtenus à partir de l'étude de 9 variables sur l'ensemble des 298 échantillons (substrat + alluvions).

TABLEAU XXXIX

Rubrique	Variables							M.O.T.
	0-1 μ	1-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ	H ₂ O 105°	
Moyenne %	25,7	7,5	32,5	17,6	20,1	3,0	2,8	1,2
Écart-type	14,8	4,6	10,3	12,2	21,8	8,3	1,2	0,5
Corrélations composante 1/variables	0,97	0,93	0,87	- 0,52	- 0,90	- 0,39	0,96	0,77
Corrélations composante 2/variables	0,14	0,17	- 0,24	- 0,78	0,17	0,72	- 0,00	- 0,22

TABLEAU XL

Composante	Variance	% variance totale	% cumulé variance totale
1	6,24	69,3	69,3
2	1,32	14,7	84,0
			etc.

L'analyse «en composantes principales» effectuée sur la matrice des corrélations entre variables est particulièrement puissante puisque les 2 premières composantes absorbent 84% de la variabilité. De plus, elles sont les seules dignes d'intérêt.

3.1.1.1.1. *Composante 1* : très fortement liée aux fractions (0-1 μ), (1-2 μ), (2-20 μ), (50-200 μ), ainsi qu'à H₂O 105° et M.O.T., plus faiblement aux fractions (20-50 μ) et (200-2 000 μ), elle met en évidence :

- une opposition entre fractions fines (0-20 μ) corrélées positivement, et fractions plus grossières (20-2 000 μ) corrélées négativement ;
- le fait que H₂O 105° et M.O.T. sont liées positivement aux fractions fines.

3.1.1.1.2. *Composante 2* : surtout liée aux fractions (20-50 μ) et (200-2 000 μ) elle les oppose. Toutes ces variables fortement corrélées avec l'une des deux premières composantes ont donc un pouvoir discriminant élevé. On peut donc penser que les niveaux de ces variables seront très différents.

3.1.1.1.3. *Conséquence graphique* : l'image obtenue (fig. 9) par la projection des points «sédiments» sur le plan défini par les deux premiers «axes principaux» (axes sur lesquels les projections des points sont les deux premières composantes principales), peut être interprétée en fonction de ce qui précède :

- la composante 1 augmentant avec les fractions fines, H₂O 105° et M.O.T., et diminuant quand les fractions plus grossières augmentent, on doit trouver à droite du premier axe les sédiments «fins», à gauche les sédiments «grossiers» et entre les deux les intermédiaires ;

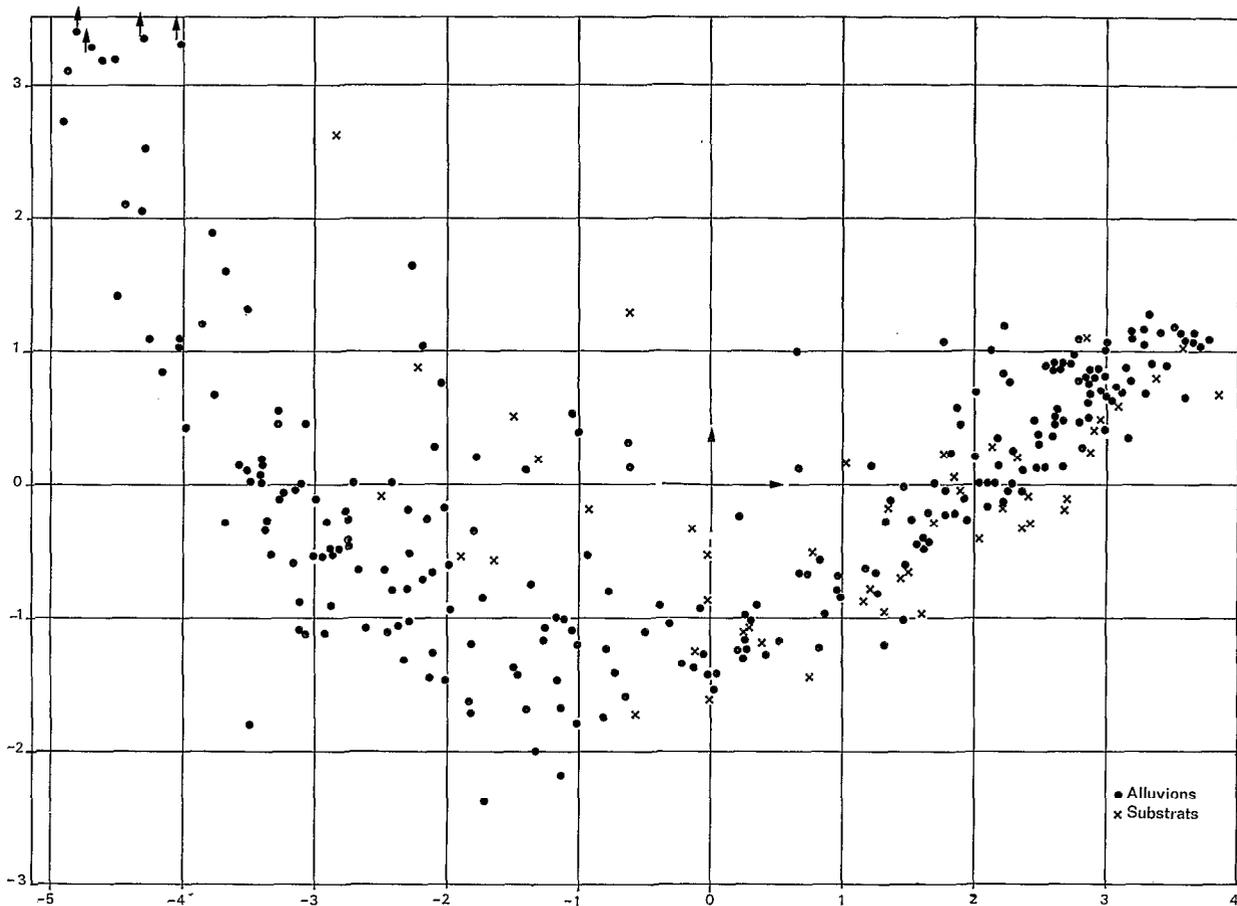


Fig. 9. — Analyse en composantes principales. Granulométrie (sans décalcarisation)

— la composante 2 augmentant avec la fraction (200-2 000 μ), et diminuant quand la fraction (20-50 μ) augmente, on trouve les sédiments riches en sable grossier et pauvres en limon vers le haut du deuxième axe principal, le contraire vers le bas.

3.1.1.1.4. *Interprétation* : l'étude de l'image obtenue par l'analyse ci-dessus permet de mettre en évidence des variations dans la composition granulométrique des alluvions sur le plan géographique, latéralement et parfois longitudinalement, ainsi que sur le plan vertical.

3.1.1.1.4.1. LATÉRALEMENT, par rapport au lit de l'oued, l'image montre deux séquences qui sont à interpréter séparément :

- séquence latérale dans le lit majeur endigué,
- séquence latérale dans le lit majeur non endigué (plaine).

a) Dans le lit majeur endigué (fig. 10) : la branche droite de l'image en « V » correspond à des séries de profils prélevés successivement depuis le bord de l'oued, sur le bourrelet de berge et à proximité de la digue et qui montrent dans le même sens une variation continue dans leur granulométrie : les plus grossiers situés à proximité de l'oued, les plus fins à proximité de la digue. Cette répartition est très nette dans toutes les transversales prélevées depuis Djedeida (début des endiguements) jusqu'à l'embouchure (émissaire), et ce, quelle que soit la dimension du lit endigué (quelques dizaines de mètres ou quelques centaines de mètres).

b) Séquence latérale dans la plaine : toutes les séquences transversales prélevées montrent une répartition granulométrique identique (Sloughia, Bordj Toum, mont Djedeida, aval Djedeida, station de pompage, etc.). Les profils les plus éloignés de l'oued se situent à l'extrémité de la branche droite du « V » de l'image figure 9, au-delà

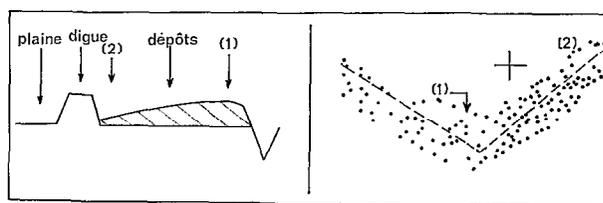


Fig. 10. — Variation latérale dans le lit majeur endigué.

Réduction schématique de la figure 9

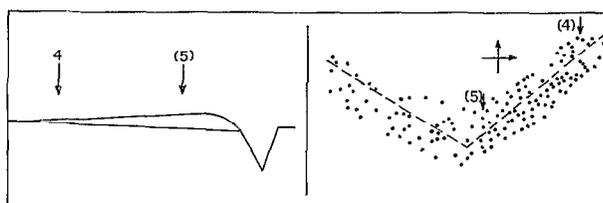


Fig. 11. — Séquence latérale dans la plaine

Réduction schématique de la figure 9

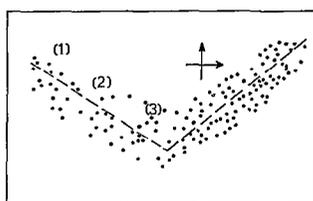


Fig. 12. — Réduction schématique de la figure 9

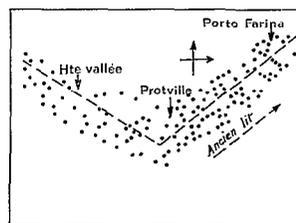


Fig. 13. — Réduction schématique de la figure 9

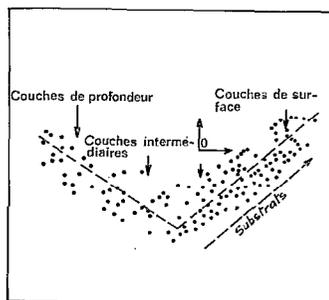


Fig. 14. — Réduction schématique de la figure 9

des profils du lit endigué, et présentent une dominance d'éléments fins de 0 à 20 μ (A + L), H₂O et matière organique (4).

Les profils les plus près de l'oued se situant à l'opposé, correspondent à une granulométrie moins fine (> 20 μ ou 50 μ) (5), mais cependant moins grossière que les profils (1) du lit majeur endigué.

c) Anomalies dans la répartition granulométrique : la branche droite de l'image en « V » correspond à une variation normale de la composition granulométrique des sédiments : il est évident que de nombreux facteurs externes interviennent pour perturber cette répartition (la microtopographie et les aménagements agricoles en particulier). L'interprétation de l'image granulométrique globale met en outre nettement en évidence une répartition anormale de certains profils, alignés suivant la branche gauche du « V » qui correspond à une granulométrie de plus en plus grossière du centre vers l'extrémité de la branche (variations de 20 à 2 000 μ) ; après analyse, il s'avère que ces profils à granulométrie plus grossière correspondent à des alluvions prélevées à proximité d'obstacles dans le lit même de l'oued et qui, opérant un brassage de fond, ont apporté d'importantes perturbations à la répartition granulométrique normale. Par exemple les profils situés à l'extrémité de la branche gauche, (1) figure 12, sont prélevés de part et d'autre du pont barrage d'El Batham. Les principaux obstacles ayant apporté de telles perturbations dans les profils granulométriques sont, outre le pont d'El Batham (1), la cascade de l'Émissaire, les méandres de Cherfech, le pont de Medjez (2) et, à un degré moindre, le débouché du défilé de Sidi Salem, le pont de La Sloughia et celui de Protville (3). *La granulométrie des dépôts est donc à proximité des obstacles d'autant plus grossière que la forme de l'obstacle a plus perturbé l'écoulement.*

3.1.1.4.2. LONGITUDINALEMENT : de l'amont à l'aval du bassin, le gradient granulométrique est beaucoup moins net. Globalement, on peut seulement dire que tous les profils prélevés à l'amont du bassin (Medjez, Jendouba, Bou Salem, Pont Cinq-Dinars) sont concentrés dans la partie gauche du graphique et correspondent donc aux granulométries les plus grossières ; ceux déposés à l'aval sont par contre disséminés sur tout le graphique, les variations granulométriques latérales et verticales masquant le gradient longitudinal. Un gradient apparaît néanmoins de façon plus nette dans le tronçon de l'ancien lit majeur endigué qui va de Protville à la mer ; les profils alluviaux de cette partie du lit s'alignent suivant la même branche droite de l'image en « V » que les profils latéraux (avec qui ils chevauchent d'ailleurs) et correspondent à une granulométrie de plus en plus fine vers Porto-Farina ; ce phénomène est probablement dû à un écoulement très ralenti des eaux dans ce tronçon partiellement obstrué et rehaussé par rapport au profil en long actuel de l'émissaire, ce qui a permis une décantation régulière des éléments granulométriques.

3.1.1.4.3. VERTICALEMENT : la représentation de chaque point du nuage en « V » par un signe différent selon sa profondeur de prélèvement a permis de visualiser une variation granulométrique verticale des dépôts :

- à l'extrémité de la branche droite du « V » sont surtout localisées les alluvions de surface prélevées entre 0 et 3 cm et qui correspondent à une dominance d'éléments de 0 à 20 μ avec une proportion importante d'eau et de matière organique qui, comme nous l'avons vu, sont liées à ces fractions fines ;
- les alluvions des couches intermédiaires de 3 à 10 cm, sont réparties sur toute la longueur de la branche droite ;
- les couches plus profondes (10 à 50 cm) montrent une nette tendance à une répartition selon la branche gauche représentant des granulométries plus grossières (20 à 2 000 μ). Les couches de profondeur (> 50 cm) sont totalement absentes de la branche droite et réparties uniquement sur la branche gauche, les points extrêmes correspondant aux couches les plus profondes (150 à 200 cm).

L'image (fig. 14) montre donc sur le plan vertical une très nette tendance, avec quelques chevauchements qui seront interprétés ultérieurement, à une *concentration des éléments granulométriques les plus fins, (et des éléments qui leur sont liés, M.O. et H₂O), dans les couches les plus superficielles et une concentration des éléments les plus grossiers dans les couches profondes.*

Les substrats se répartissent suivant la branche droite du « V » et leur répartition selon cet axe n'est pas liée à des variations verticales puisqu'ils ont toujours été prélevés en surface mais à des variations géographiques latérales ou longitudinales délicates à saisir ici.

3.1.1.2. Avec décalcarisation

L'analyse des différentes fractions granulométriques après élimination du calcaire donne des résultats comparables. Cependant, les différences sont moins marquées (le calcaire est un composant important des différentes fractions). Ceci s'observe au niveau

- de la variation absorbée par les deux premières composantes (76,3%) ;
- des corrélations entre variables et composantes :
 - corrélations un peu moins fortes avec la première composante,
 - opposition entre fractions (20-50 μ) et (200-2000 μ) moins marquée au niveau de la deuxième composante.

L'image graphique obtenue a la même forme en «V» mais plus fermé, le nuage de points étant moins dispersé et moins étiré, ce qui montre un gradient granulométrique plus régulier selon les trois directions définies précédemment (verticalement, longitudinalement et latéralement) lorsqu'on fait abstraction du calcaire qui perturbe cette répartition. Ceci est particulièrement sensible pour la branche gauche du «V» qui traduit une nette opposition entre le CaCO_3 total et la fraction 200-2 000 μ , le tassement de cette branche dans le graphique obtenu après décalcarisation montre qu'une certaine proportion des éléments grossiers déposés à la faveur d'une perturbation de l'écoulement dans le lit, sont constitués par des particules calcaires (débris coquilliers, ou nodules).

3.1.1.3. Analyse de la répartition du calcaire dans les différentes fractions granulométriques

Compte tenu des différences entre analyses granulométriques sans décalcarisation et avec décalcarisation, afin de les compléter et d'étudier le rôle propre du calcaire, nous avons effectué une analyse en composantes principales sur les 7 variables suivantes :

— CaCO_3 total dans la fraction	0-1 μ
— » » » »	1-2 μ
— » » » »	2-20 μ
— » » » »	20-50 μ
— » » » »	50-200 μ
— » » » »	200-2000 μ
— CaCO_3 actif	

Les résultats sont particulièrement nets, les 3 premières composantes expliquant 81,5% des variations totales.

TABLEAU XLI

Rubriques	Variables						
	Calcaire 0-1 μ	Calcaire 1-2 μ	Calcaire 2-20 μ	Calcaire 20-50 μ	Calcaire 50-200 μ	Calcaire 200-2000 μ	CaCO_3 actif
Moyenne (%)	3,84	4,15	11,25	10,33	9,29	1,30	137,9 %
Écart-type	3,46	3,18	7,47	8,17	10,73	3,37	75,81
Corrélation composante 1	— 0,50	— 0,83	— 0,86	0,52	0,84	0,28	— 0,93
Corrélation composante 2	0,05	0,04	— 0,13	— 0,70	0,08	0,84	— 0,01
Corrélation composante 3	0,85	— 0,21	— 0,29	— 0,03	0,08	— 0,12	0,02

TABLEAU XLII

Composante	Variance	% variance totale	% cumulé variance totale
1	3,60	51,4	51,4
2	1,23	17,6	69,0
3	0,88	12,5	81,5
			etc.

a) Composante 1 : très discriminante (variance 3,60), elle oppose le calcaire actif et le calcaire total des fractions fines (0-2 μ), au calcaire total des fractions plus grossières (20-2000 μ).

Les variables les plus discriminantes sont CaCO_3 actif, CaCO_3 (1-2 μ), CaCO_3 (2-20 μ) liées positivement à cette composante et CaCO_3 (50-200 μ) liée négativement.

En représentation graphique, sur l'axe principal 1, les points situés à droite correspondent à des sédiments riches en calcaire total dans les fractions fines et en CaCO_3 actif ; les points situés à gauche correspondent à des sédiments riches en calcaire plus grossier (surtout 50-200 μ).

b) Composante 2 : elle oppose très nettement le calcaire total de la fraction (20-50 μ) à celui de la fraction (200-2000 μ).

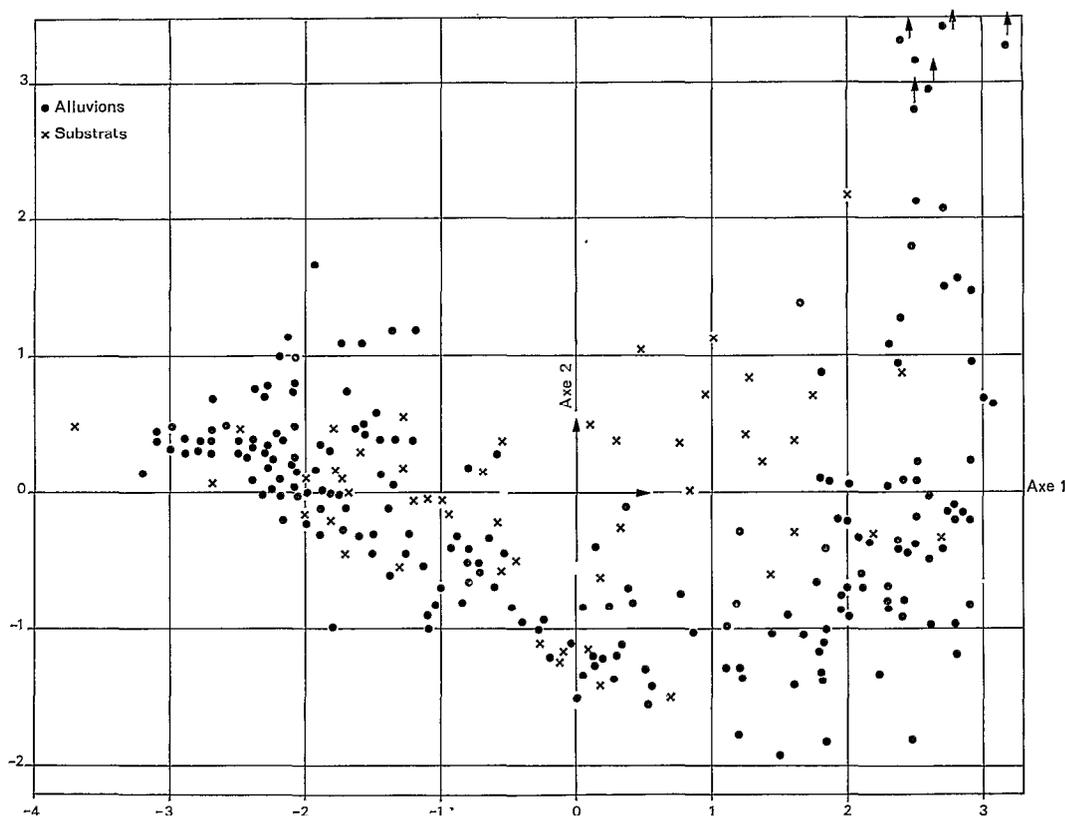


Fig. 15. — Analyse en composantes principales.
Répartition du calcaire dans les fractions granulométriques

En haut de l'axe 2, on trouve les sédiments riches en calcaire très grossier, en bas de l'axe ceux qui sont riches en calcaire plus fin (20-50 μ).

c) Composante 3 : elle est caractérisée essentiellement par le calcaire de la fraction (0-1 μ).

L'axe principal 3, axe «calcaire (0-1 μ)», a de ce fait un intérêt particulier : en haut de l'axe, les sédiments sont riches en calcaires (0-1 μ), le contraire en bas.

Interprétation : la figure 15 a été construite sur la différence entre les données de la granulométrie avec et sans décalcarisation selon les axes 1 et 2. L'image obtenue a grossièrement la même forme en «V» inversé par rapport aux deux images granulométriques précédentes.

Pour les alluvions, la branche gauche du «V» est très allongée suivant un axe dont la partie extrême représente la fraction calcaire total ayant une granulométrie de 1 à 20 μ ; la base du «V» représentant en moyenne une granulométrie du calcaire comprise entre 20 et 200 μ .

On constate surtout que la partie la plus externe de la branche gauche est constituée en majorité, d'une part, par les couches les plus superficielles sans aucune couche de profondeur, et, d'autre part, par les alluvions de la basse vallée. La base de cet axe comprenant à la fois des couches de surface et des couches de profondeur, et surtout des profils de la haute et moyenne vallée. Il semble donc que de l'amont vers l'aval et de la profondeur vers la surface, la granulométrie du calcaire s'affine.

La branche de droite présente la même dispersion correspondant à la perturbation de l'écoulement et au dépôt d'éléments plus sableux que la moyenne. On constate qu'en partie ces sables sont uniquement constitués de calcaire et sont presque uniquement représentés dans des couches profondes, les premières déposées, lors de la montée de la crue qui a brassé les sables les plus grossiers (vitesse et débits plus grands).

Les substrats présentent la même image en «V» que les alluvions, mais plus fermée et moins dispersée. La

branche gauche du «V» du substrat qui correspond aux particules fines se confond avec celles des alluvions, mais la branche droite qui correspond aux particules calcaires grossières s'en sépare nettement. Les alluvions sont donc plus riches en calcaire que les substrats dans la fraction 20-2 000 μ . Les deux matériaux se différencient donc par la répartition du calcaire dans leurs particules grossières et se ressemblent par la répartition du calcaire dans les particules fines.

3.1.2. Matière organique (carbone, azote, matières humiques)

L'image obtenue par la méthode d'analyse en composantes principales ne présente pas de forme caractéristique mais une grande dispersion qui permet seulement de dire :

- dans le plan vertical, les couches de surface et le substratum se situent dans la partie droite du graphique correspondant aux valeurs les plus élevées en matières humiques en général (valeurs > 0 sur l'axe x). Les couches de profondeur se situent dans la partie gauche avec les profils à granulométrie grossière, liés à un écoulement perturbé (El Bathan) ;
- dans le plan latéral et longitudinal, la discrimination sur l'ensemble du bassin versant est peu marquée. On constate seulement une tendance à un regroupement des profils de la basse vallée et de l'embouchure en particulier, vers la droite de l'image (valeurs les plus élevées en matière organique qui, nous l'avons vu, sont liées aux éléments granulométriques les plus fins).

3.1.3. Densité apparente, porosité

Le peu de données dont nous disposons n'a pas permis de pousser très loin l'interprétation. Le graphique obtenu met en évidence une discrimination selon l'axe x entre les valeurs élevées de la densité apparente (et porosité faible) pour les couches les plus superficielles par rapport aux couches de profondeur.

3.1.4. Fer et manganèse

sont discriminés selon la granulométrie des alluvions, les plus fines étant les plus riches en manganèse et fer total.

3.1.5. Phosphore assimilable

L'analyse permet seulement de différencier les substrats qui sont plus riches en P_2O_5 assimilable que la majorité des alluvions de la basse vallée. Les quelques dépôts analysés dans la moyenne vallée (Medjez) et dans la haute vallée (Jendouba) étant, au contraire, plus riches que les substrats.

3.1.6. Analyse des sels solubles

Les tableaux résumant l'analyse faite sur 8 variables sont donnés ci-après :

TABLEAU XLIII

Rubriques	Variables							
	Conductivité	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
Moyenne	2,51	0,63	0,45	0,02	0,68	0,81	0,72	0,25
Écart-type	2,24	0,70	0,50	0,12	1,30	1,55	0,73	0,07
Corrélations variables/composante 1	0,89	0,84	0,88	0,37	0,83	0,89	0,71	0,13
Variables/composante 2	- 0,23	0,49	0,35	0,89	- 0,39	- 0,37	- 0,27	0,03
Variables/composante 3	- 0,16	- 0,05	0,07	- 0,06	0,04	- 0,01	- 0,02	0,99

TABLEAU XLIV

Composante	Variance	% variance totale	% cumulé variance totale
1	4,43	55,4	55,4
2	1,56	19,6	75,0
3	1,01	12,7	87,7 etc.

Nous avons retenu les 3 premières composantes principales qui expliquent 88% de la variabilité.

a) Composante 1 : elle est de loin la plus discriminante (variance 4,43 contre 1,01 pour la troisième). Sur l'axe principal 1, on trouve en effet un étirement et une dispersion des points extrêmement nets. Liée positivement à l'ensemble des variables, elle met surtout en évidence l'action de la conductivité, Mg^{++} , Cl^- , Ca^{++} , Na^+ puis SO_4^{--} alors que K^+ et HCO_3^- interviennent peu. Les sédiments riches en ces éléments se trouveront à droite de l'axe 1 et les sédiments pauvres à gauche, les intermédiaires entre les deux.

b) Composante 2 : l'axe 2 est un axe «potassium». La composante 2 est surtout liée à K^+ (Ca^{++} , Na^+ , Cl^- et Mg^{++} jouent un rôle secondaire). Graphiquement, les sédiments riches en K^+ se trouveront en haut de l'axe 2 et les éléments pauvres en bas.

c) Composante 3 : l'axe 3 est un axe «bicarbonate». La composante 3 est représentée essentiellement par HCO_3^- qui joue un rôle tout à fait indépendant des autres variables. Les sédiments riches en HCO_3^- seront en haut de l'axe 3 et les sédiments pauvres en bas.

L'intensité des liaisons entre ces 8 variables avec l'une des 3 premières composantes laisse prévoir des différences importantes entre sédiments.

3.1.6.1. Interprétation du graphique effectué avec les axes 1 et 2

3.1.6.1.1. *Sur le plan vertical* : la forte dispersion constatée suivant l'axe x correspond à des variations continues de la conductivité et en particulier des chlorures, et du sodium, à un degré moindre du calcium et du magnésium, dont les valeurs augmentent de la gauche vers la droite.

L'agencement des différentes strates alluviales suivant cet axe s'organise de la façon suivante :

- les substrats ont très généralement des valeurs négatives et sont très regroupés autour des valeurs comprises entre -2 et -1 , correspondant à des conductivités faibles. Seuls, quelques «substrats» situés très en aval près de l'embouchure présentent des valeurs plus élevées et sont disposés dans la partie droite de l'axe. *La différenciation est donc ici très marquée entre substrats et alluvions* ;
- les alluvions peuvent être regroupées ainsi du point de vue comportement : les couches les plus profondes sont pratiquement toujours négatives et situées dans la partie gauche de l'axe (salure peu élevée liée à une granulométrie moins fine) ;
- les couches de surface sont très dispersées vers les valeurs positives qui représentent les conductivités et les valeurs de sels solubles extraits les plus élevées ($-0,75$ à $+4,5$), les points représentant les couches les plus superficielles étant toujours dans la partie positive de l'axe 1.

Finalement, on peut dire que l'on constate une augmentation de la salure et de l'extrait de saturation dans le sens substrat, strates profondes, strates de surface, ce qui est probablement lié à la granulométrie, mais aussi à une certaine diffusion des sels dans les alluvions après leur dépôt, de la profondeur vers la surface.

3.1.6.1.2. *Sur le plan latéral* : L'analyse des différentes séquences prélevées ne montre pas de gradient de répartition des sels ou de la conductivité en fonction de la distance relative à l'oued.

3.1.6.1.3. *Sur le plan longitudinal* : Bien que les variations longitudinales interfèrent avec celles liées à l'axe vertical des dépôts, il est possible de mettre en évidence, à partir de l'image graphique, une certaine variation de la conductivité et des sels solubles de l'amont vers l'aval du bassin :

- toutes les alluvions prélevées dans la *haute vallée* (Jendouba, Bou Salem) et *moyenne vallée* (Sloughia, Medjez, Bordj Toum jusqu'à Tebourba) se situent dans la partie négative de l'axe 1 (partie gauche du diagramme) où elles sont très regroupées, sauf pour leur strate la plus superficielle située dans la partie positive de l'axe 1 qui, elle, atteint les valeurs qui représentent les salures et extraits saturés plus élevés. Cette tendance est très généralement retrouvée pour l'ensemble des dépôts ;
- les profils de la basse vallée, à l'aval de El Bathan, sont dispersés sur toute la longueur de l'image mais s'étalent beaucoup plus en longueur à partir des valeurs positives traduisant des valeurs de conductivité

sensiblement plus élevées que les précédentes ; les profils situés les plus près de l'embouchure dans l'ancien lit se situant à l'extrême droite de l'image (où ils rejoignent les sédiments prélevés sur trias près Tebourba).

On peut donc dire, en faisant abstraction du gradient vertical, que, globalement, *la conductivité et les extraits de saturation des alluvions sont caractérisés par une variation continue de l'amont, où les valeurs sont relativement faibles, à l'aval du bassin où elles sont relativement plus fortes.*

3.1.6.2. Interprétation de l'image selon les axes 1 et 3 (fig. 18)

La dispersion selon l'axe 1 correspond au même gradient vertical que l'image précédente ce qui traduit des compositions de l'E.C. de plus en plus chargées depuis les couches de profondeur aux couches de surface. On remarque encore ici le parfait regroupement des substrats dans la partie gauche de l'image, nettement différenciée par rapport aux alluvions. Quelques rares échantillons correspondant à des substrats salés (trias ou anciennes alluvions salées) se retrouvent dans la partie droite du graphique. La variation longitudinale est un peu moins nette.

La dispersion constatée ici selon l'axe vertical 3 correspond à des variations de la teneur en bicarbonate de l'E.S. Ces variations sont délicates à interpréter dans le cadre d'un phénomène naturel lié à ces dépôts de crue, la méthodologie même de l'analyse pouvant apporter d'importantes perturbations à la teneur en bicarbonate des extraits saturés (température, temps...).

Remarquons seulement que les profils haute et moyenne vallée sont situés dans la moitié inférieure du graphique (valeurs négatives sur l'axe 3) correspondant aux teneurs les plus faibles en bicarbonate, tandis que les alluvions de la basse vallée sont réparties dans la moitié supérieure (plus fortes teneurs en HCO_3^-).

3.1.7. Analyse du complexe + sels solubles

Une première analyse en composantes principales a été faite sur l'ensemble complexe + sels solubles, puis complétée par une analyse :

- sur le complexe seul,
- sur les sels solubles seuls.

Nous n'avons conservé que les deux premières composantes, très discriminantes et les seules intéressantes du point de vue de l'interprétation :

- le premier axe, très discriminant fait intervenir positivement (à plus ou moins haut degré) toutes les variables, sauf T (Ca) et HCO_3^- qui interviennent de façon négative dans cette analyse. On trouve donc vers la droite du premier axe les sédiments riches en éléments échangeables et solubles ;
- le deuxième axe oppose les éléments du complexe (liés négativement) aux sels solubles, liés positivement. Vers le bas de l'axe, on trouve les sédiments riches en bases échangeables et pauvres en sels solubles, le contraire vers le haut.

Interprétation de l'image selon les axes 1 et 2 (fig. 18 bis) :

L'image présente un groupement de points dans les valeurs faiblement négatives des deux axes orthogonaux, les points négatifs extrêmes étant constitués presque uniquement par les *substrats* qui sont encore ici nettement différenciés des alluvions par leur capacité d'échange moins élevée et leur extrait de saturation plus faible.

L'image présente une dispersion oblique des alluvions qui correspond à des extraits de saturation et une conductivité de plus en plus élevés vers la droite, liés en partie aux ions Na^+ et Cl^- . On trouve dans cette partie droite, de l'image les profils de la basse vallée et des couches les plus superficielles qui présentent, d'une part par rapport aux alluvions de la moyenne et basse vallée et, d'autre part, par rapport aux couches de profondeur, une salure plus élevée.

3.1.8. Conclusion

Les analyses en composantes principales confirment la variabilité élevée des diverses mesures effectuées sur les alluvions et que laissaient soupçonner les forts coefficients de variation des moyennes globales. Les différentes analyses mettent en évidence un gradient entre les différentes alluvions qui correspond à des variations verticales, longitudinales et latérales.

3.1.8.1. Verticalement

Les images obtenues permettent :

- a) de séparer au sein des alluvions deux groupes extrêmes de comportement nettement différent :
 - les couches alluviales de surface
 - les couches alluviales de profondeur

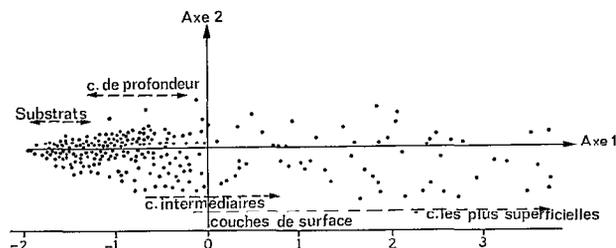


Fig. 16. — Analyse en composantes principales des sels solubles. Réduction schématique de la projection sur les axes 1 et 2

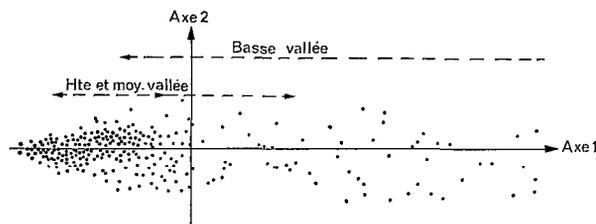


Fig. 17. — Réduction schématique de la projection « sels solubles » sur les axes 1 et 2

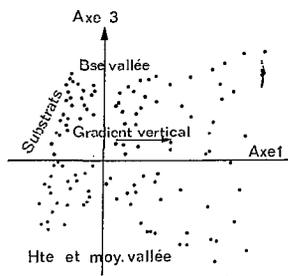


Fig. 18. — Réduction schématique de la projection « sels solubles » sur les axes 1 et 3

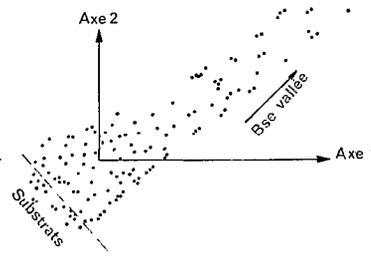


Fig. 18 bis. — Réduction schématique du graphique obtenu avec les sels solubles + complexe (projection des axes 1 et 2)

ainsi que des strates intermédiaires formant un nuage continu entre ces deux extrêmes. Nous avons consigné en annexe les résultats analytiques se rapportant aux alluvions de surface et aux autres alluvions [14].

Les différences entre ces deux populations sont particulièrement nettes pour les variables suivantes :

- la granulométrie : les couches de surface sont plus fines que les couches de profondeur ;
- le calcaire : les couches de profondeur sont plus riches en calcaire total que les couches de surface et ceci est lié à l'augmentation des fractions sableuses en profondeur ;
- la matière organique : les couches de surface sont plus riches en matière organique, carbone, azote et acides humiques que les couches profondes ;
- la densité apparente est plus élevée en surface qu'en profondeur ;
- Fer total et Manganèse : les taux sont plus élevés en surface qu'en profondeur ;
- la conductivité et les sels solubles différencient les couches de surface plus salées, plus riches en magnésium, chlorure, calcium et sodium solubles, que les couches de profondeur ;

— le complexe absorbant : on constate surtout une différence au niveau du sodium, chlorure et sulfate échangeables et de la capacité d'échange dont les valeurs sont plus élevées en surface qu'en profondeur.

b) de confirmer la différenciation substratum/alluvions que la comparaison des moyennes globales avait déjà mise en évidence ; mais elle montre en outre que cette distinction est beaucoup plus accentuée avec les couches alluviales de profondeur reposant directement sur le substratum, qu'avec les couches alluviales de surface qui ont un comportement proche du substratum.

3.1.8.2. Géographiquement

La méthode a permis de mettre en évidence des variations à l'intérieur du nuage des points alluviaux suivant deux directions :

a) *Latéralement* : seules les images obtenues sur la granulométrie avec ou sans décarbonatation sont intéressantes car elles définissent une répartition granulométrique continue et de plus en plus fine au fur et à mesure de l'éloignement du lit de l'oued que ce soit à l'intérieur des digues ou dans la plaine. Elle montre de plus une répartition granulométrique anormale, plus grossière et plus calcaire, à proximité des obstacles ayant perturbé l'écoulement dans le lit de l'oued (pont, cascade, méandre). On remarque en outre que cette granulométrie des dépôts est d'autant plus grossière que la morphologie de l'obstacle est susceptible d'opérer un brassage plus ou moins profond des matériaux transportés par l'oued et qui sont constitués en profondeur de particules grossières et calcaires.

b) *Longitudinalement* : les images montrent un faible gradient granulométrique entre les profils d'alluvions déposées dans la haute vallée qui sont sensiblement plus grossiers que ceux déposés dans la basse vallée. Ce gradient est beaucoup plus net dans le tronçon de l'ancien lit depuis Protville jusqu'à la mer, où l'écoulement très ralenti a permis une décantation plus régulière.

L'analyse de la répartition du calcaire dans les différentes fractions granulométriques semble mettre en évidence une diminution de la taille des particules calcaires à l'aval par rapport à l'amont du bassin, qui pourrait correspondre à une usure, à une dissolution ou à un phénomène de décantation progressive.

La conductivité et les sels solubles montrent une évolution de l'amont vers l'aval où les dépôts sont plus salés. Ceci pourrait être dû à un lessivage des terrains halomorphes de la basse vallée (ancien lit, Garaa Mabtuha, plaine de Galaat El Andless). Cette tendance est particulièrement nette pour le bicarbonate soluble mais n'a pu être interprétée.

3.2. RECHERCHE D'UN CLASSEMENT VERTICAL ET GÉOGRAPHIQUE DES ALLUVIONS

Les analyses précédentes ont mis en évidence essentiellement des variations verticales et longitudinales au sein des sédiments ; nous avons cherché à préciser ces variations à partir des données les plus discriminantes.

3.2.1. Recherche d'un classement vertical

3.2.1.1. Méthodologie

Afin de cerner avec le maximum de précision (tout en respectant des tailles d'échantillons suffisantes) les variations sur le plan vertical, nous avons divisé les alluvions en 9 classes, en fonction de la profondeur moyenne de prélèvement :

TABLEAU XLV

Classes d'alluvions	Profondeur moyenne (m) en cm
C1	$m \leq 1$
C2	$1 < m \leq 2$
C3	$2 < m \leq 3$
C4	$3 < m \leq 5$
C5	$5 < m \leq 10$
C6	$10 < m \leq 20$
C7	$20 < m \leq 50$
C8	$50 < m \leq 80$
C9	$m > 80$

Afin de mettre en évidence les ressemblances et les différences entre ces classes, dans le but d'identifier des groupes homogènes et de suivre les variations des données analytiques en fonction de la profondeur, nous avons effectué une série d'analyses discriminantes à plusieurs populations et tracé une série de profils normés. Dans chaque cas, les alluvions des différentes classes ont été comparées au substrat.

Nous avons retenu les rubriques analytiques les plus importantes : granulométrie, calcaire, matière organique, complexe, sels solubles.

3.2.1.2. Granulométrie et calcaire

Les analyses granulométriques avec ou sans décalcarisation conduisent à des résultats comparables. Nous donnons à titre d'exemple ceux de l'analyse granulométrique avec décalcarisation et nous étudions ensuite le rôle particulier du calcaire dans les différentes fractions granulométriques.

3.2.1.2.1. Etude granulométrique avec décalcarisation.

Le tableau des moyennes pour les 10 classes de sédiments (substrat et C1 à C9) obtenues sur les 9 variables, est donné ci-dessous :

TABLEAU XLVI

Variable (%)	Classe									
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Substrats
0-1 μ	31,63	32,28	27,66	18,07	26,39	17,49	15,24	12,56	12,06	25,60
1-2 μ	4,54	5,53	4,87	3,10	3,67	2,70	2,45	1,91	1,98	3,69
0-2 μ	35,16	37,81	32,54	21,17	30,05	21,41	17,69	14,47	14,04	29,09
2-20 μ	14,50	13,33	12,71	11,08	12,44	10,03	9,47	9,20	6,89	13,11
20-50 μ	6,16	5,15	5,54	9,47	8,38	7,63	6,76	9,17	8,34	6,83
50-200 μ	1,99	2,34	6,98	12,71	5,31	14,41	18,10	19,44	18,20	6,94
200-2 000 μ	0,17	0,16	0,69	1,02	0,74	2,28	4,87	2,69	4,94	1,67
H ₂ O 105°	3,53	3,79	3,10	2,37	5,22	2,33	2,06	1,67	1,71	3,11
M.O.T.	1,44	1,35	1,20	0,88	1,20	1,13	1,07	0,95	0,99	1,63

Une analyse discriminante effectuée sur les 298 échantillons des différentes classes permet de sélectionner les deux premiers axes dont le «pouvoir discriminant est significatif» et dont les composantes par rapport aux 9 variables sont données ci-après :

TABLEAU XLVII

Axe	Variance	Test	Composantes des axes par rapport aux 9 variables								
1	0,62	χ^2 avec 17 DL = 139,2	0,11	- 0,00	- 0,26	- 0,20	- 0,18	- 0,09	0,07	0,01	0,37
2	0,23	χ^2 avec 15 DL = 59,7	1,50	1,19	- 1,47	0,06	0,02	0,05	0,08	- 0,01	2,80
1'	Composantes multipliées		1,21	- 0,00	- 3,2	- 0,80	- 0,95	- 0,89	- 0,36	0,05	0,48
2'	par les écarts-types		16,5	2,44	- 18,4	0,20	0,11	0,50	0,42	- 0,05	3,64

Dans le plan de projection des deux premiers axes discriminants, nous avons calculé les coordonnées des barycentres des différentes classes et nous avons entouré les points représentatifs de ces centres de leurs «cercles de confiance» au niveau de confiance 90%. Les tableaux des coordonnées des centres des 10 populations et de leurs rayons de confiance sont donnés ci-dessous :

TABLEAU XLVIII

Classe	Coordonnée Axe 1	Coordonnée Axe 2	Rayon de confiance 90%
Substrat	- 8,70	5,74	0,23
C1	- 9,59	4,81	0,41
C2	- 9,57	4,20	0,33
C3	- 9,17	4,05	0,25
C4	- 8,29	3,66	0,34
C5	- 8,96	4,31	0,26
C6	- 7,80	4,47	0,28
C7	- 7,62	4,30	0,31
C8	- 7,39	4,36	0,37
C9	- 6,78	4,42	0,44

La représentation graphique des positions relatives des différentes populations met très nettement en évidence des groupes bien individualisés (fig. 19) :

- substrat tout à fait à part (assez proche de C1)
- alluvions de surface C1, C2 et C3
- alluvions intermédiaires C4
- alluvions de profondeur C6, C7, C8, C9
- alluvions intermédiaires C5, qui sont «très proches» des alluvions de surface.

Nous avons également donné les valeurs des composantes des 2 axes multipliées par les écarts-types des variables ce qui permet de se faire une idée plus nette des variables qui discriminent au mieux les différentes classes. En premier, les fractions fines (0-20 μ), puis les fractions plus grossières (20 à 2 000 μ) ainsi que les teneurs en M.O.T. sont déterminantes ; (H_2O joue un rôle secondaire).

Pour compléter ces résultats nous donnons les profils normés des différentes variables qui permettent de suivre leur évolution en profondeur :

- profil des fractions fines (0 à 20 μ) + matière organique (fig. 20) ;
- profil des fractions grossières (20 à 2 000 μ) (fig. 21).

Interprétation :

Sur le plan granulométrique vertical, les quatre populations mises en évidence par l'analyse discriminante correspondent à des conditions de sédimentation différentes qui peuvent être interprétées comme suit :

- les substrats sont nettement à part mais néanmoins plus proches des couches de surface, en particulier de C1, que des couches profondes (C6, C7, C8, C9), ceci est probablement dû au fait qu'il s'agit d'anciennes alluvions qui se sont déposées suivant un mode de sédimentation du même style et dont nous n'avons prélevé que la partie la plus superficielle ;
- le groupe des couches C1, C2, C3, C4 et C5 qui correspondent aux strates superficielles sauf la couche C5 qui est à moyenne profondeur ;
- la couche C4 qui est à part et tend à se rapprocher des couches C6, C7, C8, C9, qui représentent les strates les plus profondes.

L'analyse des profils normés met nettement en évidence : une granulométrie et un taux de matière organique régulièrement décroissants des couches les plus superficielles les plus fines, aux couches de profondeur les plus grossières. Les substrats tendent à se rapprocher des couches de surface et sont très nettement différents des couches plus profondes. La simple analyse des moyennes globales ne permettrait pas une discrimination aussi nette des deux types de matériaux (substrats/couches immédiatement supérieures). On remarque en outre que les couches C4 et C5 apportent une perturbation à cette répartition granulométrique.

La couche C4 contient plus de fractions grossières, est plus pauvre en matière organique que sa position verticale ne le laissait prévoir, elle tend à ressembler aux couches profondes.

La couche C5, au contraire, formant un pic, présente une composition granulométrique plus fine et un taux de matière organique plus proche des courbes de surface. Cette coupure très nette dans la répartition granulométrique verticale qui se situe aux environs de 5 à 10 cm de profondeur mettrait donc en évidence deux séries alluviales continues déposées au cours de la même crue (fig. 22) :

- un premier dépôt, le plus important quantitativement, de C9 à C5, constitué de sédiments très grossiers

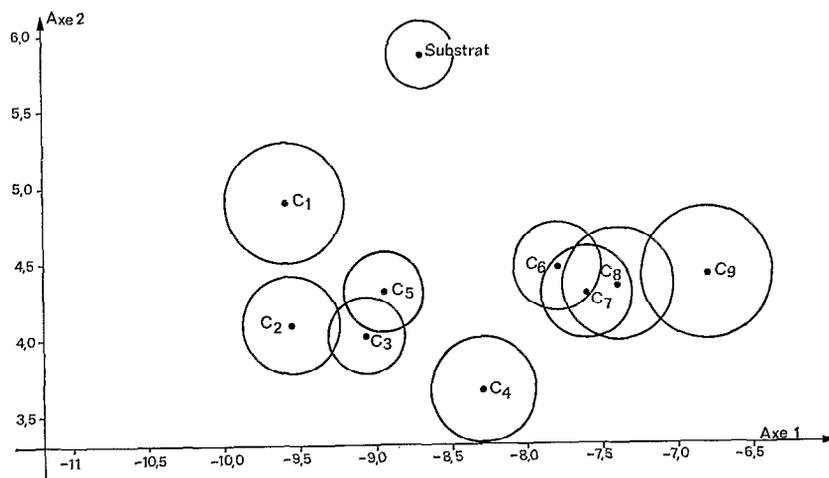


Fig. 19. — Analyse discriminante de la granulométrie avec décarbonatation

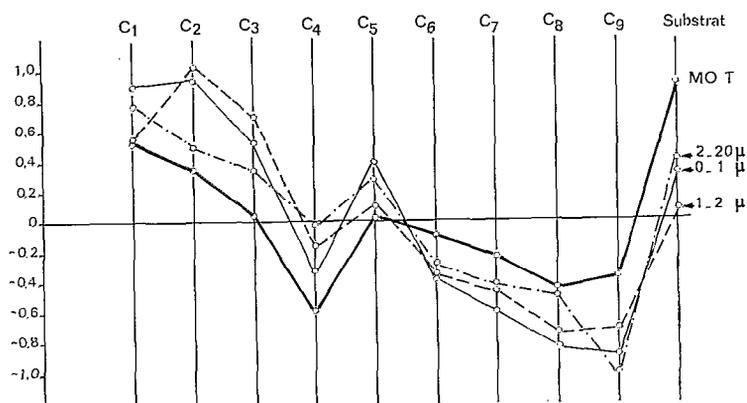


Fig. 20. — Profils normés de la granulométrie après décarbonatation. Variations verticales des fractions fines et de la matière organique

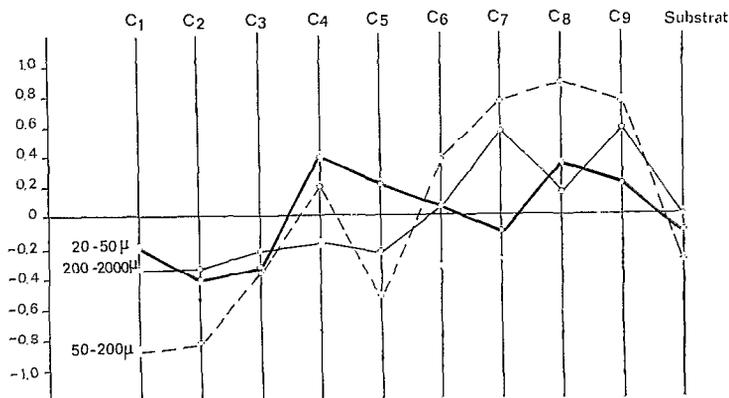


Fig. 21. — Profils normés de la granulométrie après décarbonatation Variations verticales des fractions sableuses

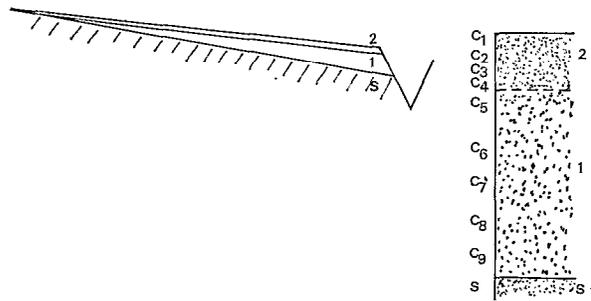


Fig. 22. — Représentation schématique des deux séries alluviales superposées et de leur répartition latérale

en profondeur dont la granulométrie diminue vers la surface pour se terminer par la couche C5 de comportement proche d'une couche de surface type C1 ou S ;

- un second dépôt plus réduit de C4 à C1, granulométriquement plus fin, mais dont la couche C4 est néanmoins plus grossière que C5 et terminé par une couche C1 très fine.

3.2.1.2.2. Analyse de répartition du calcaire dans les différentes fractions granulométriques.

Les résultats obtenus avec les mêmes techniques statistiques permettent de compléter ce qui précède. Nous donnons simplement ici le tableau des teneurs moyennes en CaCO_3 total dans les différentes fractions granulométriques ainsi qu'en calcaire total et calcaire actif, l'image des 10 classes (substrat et C1 à C9) dans le plan des 2 premiers axes discriminants et les profils normés des différentes variables retenues :

TABLEAU XLIX

Variables	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Substrats
CaCO_3 total (%) (0-1 μ)	5,2	4,3	4,5	2,6	2,4	1,9	2,3	0,3	0,0	3,9
CaCO_3 total (%) (1-2 μ)	4,9	6,4	5,0	2,6	6,2	4,6	2,3	2,0	1,7	5,3
CaCO_3 total (%) (2-20 μ)	16,0	15,7	12,3	9,0	14,2	7,2	6,4	4,0	4,6	13,2
CaCO_3 total (%) (20-50 μ)	8,5	7,8	9,0	13,5	9,2	12,1	11,1	12,8	13,9	8,1
CaCO_3 total (%) (50-200 μ)	2,3	2,9	7,2	13,3	5,0	14,9	14,2	22,0	22,4	8,0
CaCO_3 total (%) (200-2 000 μ)	0,3	0,3	0,8	0,6	2,0	1,3	3,0	2,2	2,7	0,8
CaCO_3 actif (%)	180,8	177,2	167,2	99,9	157,6	106,0	98,0	76,3	88,6	157,6
CaCO_3 total (%)	35,0	35,0	36,4	40,3	37,6	40,7	39,1	41,5	43,7	36,4

Sur le plan des deux premiers axes discriminants, nous avons représenté les classes C1, C2 et C3 puis les classes C7, C8, C9, ce qui donne une meilleure idée des positions relatives des différentes classes.

Nous retrouvons sur la figure 23 :

- les classes de surface C1, C2, C3, très proches du substrat ;
- les classes de profondeur C7, C8 et C9 ;
- les classes intermédiaires C4, C5, C6...

D'autre part, les profils normés ont été portés sur 2 graphes :

- premier graphe : (CaCO_3 total des fractions, 0-1 μ , 1-2 μ , 2-20 μ et CaCO_3 actif) (fig. 24) ;
- deuxième graphe : (CaCO_3 total, CaCO_3 total des fractions 20-50 μ , 50-200 μ , 200-2000 μ) (fig. 25).

Interprétation :

L'analyse discriminante (fig. 23) sépare de façon un peu moins nette les différentes couches du point de vue calcaire dans les différentes fractions granulométriques : la différence marquant plus sur les fractions granulomé-

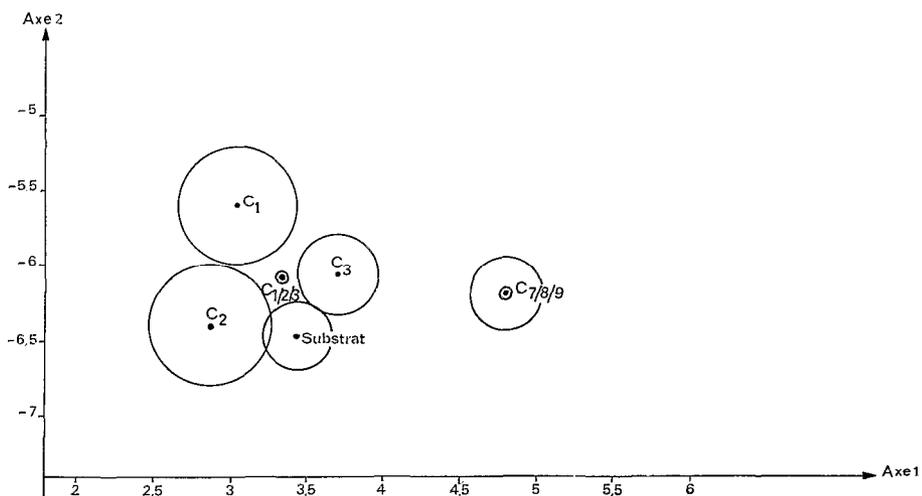


Fig. 23. — Analyse discriminante du calcaire en fonction des différentes fractions granulométriques. Variations verticales

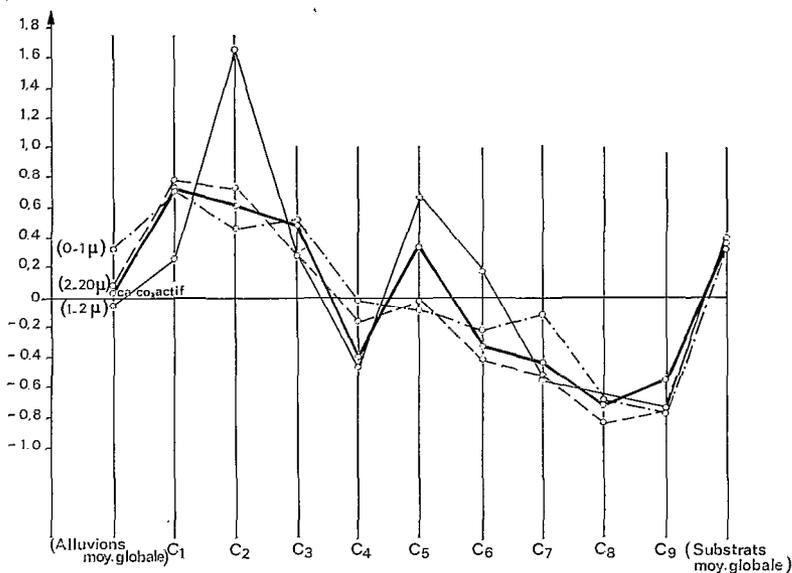


Fig. 24. — Profils normés verticaux du CaCO_3 dans les fractions (0-1 μ), (1-2 μ), (2-20 μ) et du CaCO_3 actif

triques non calcaires et le calcaire total tendant à atténuer ces différences. Néanmoins, nous retrouvons la même distinction en couches de surface, couches de profondeur et substrat, nettement séparés, et couches intermédiaires.

Les profils normés confirment la variation discontinue de la granulométrie du calcaire des couches de surface C1, C2, C3 les plus riches en calcaire fin, aux couches de profondeur C6, C7, C8, C9 les plus riches en calcaire grossier, la fraction calcaire 1-2 μ étant particulièrement abondante dans la couche C2. Les couches C4 et C5 ayant respectivement le même comportement qu'une couche de profondeur et qu'une couche de surface confirment le *dédoulement des alluvions déposées en deux séries superposées*.

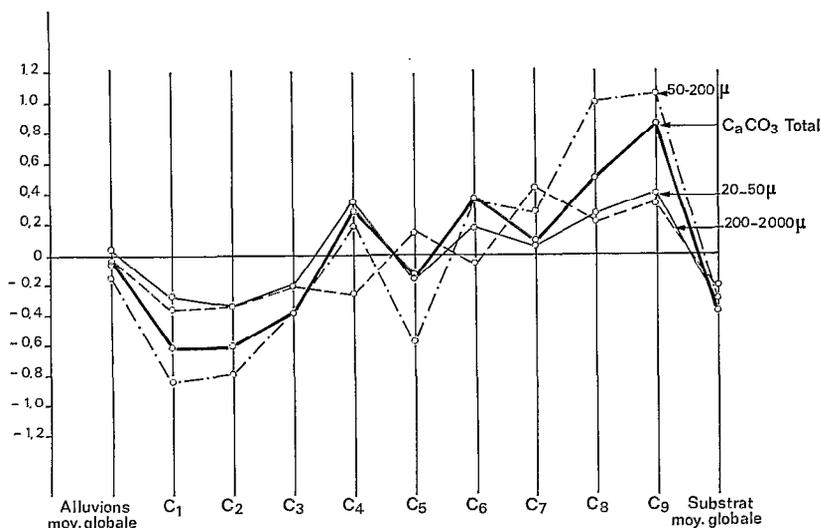


Fig. 25. — Profils normés du CaCO_3 dans les fractions sableuses.
Variations verticales

3.2.1.2.3. Analyse des liaisons calcaire actif — calcaire total des différentes granulométries.

Nous avons vu plus haut que le CaCO_3 actif avait (en moyenne pour l'ensemble des alluvions) les liaisons les plus fortes avec les fractions 1-2 μ , 2-20 μ et 50-200 μ .

La variabilité des résultats nécessitait une étude plus approfondie et nous avons, au vu des analyses discriminantes précédentes, analysé plus en détail ce phénomène en distinguant 2 classes d'alluvions :

- alluvions de surface C1, C2 et C3 (profondeur 0 à 3 cm) ;
- alluvions de profondeur C7, C8, C9 (profondeur > 20 cm).

Voici brièvement les résultats des 2 analyses de régression orthogonale, chacune ayant permis d'isoler 1 seule composante fortement corrélée avec le calcaire actif.

TABLEAU L

Classes	Corrélation CaCO_3 actif / composante	Corrélations composantes / CaCO_3 total des différentes fractions					
		0-1 μ	1-2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200-2 000 μ
C1/2/3	0,85	0,48	0,78	0,83	- 0,80	- 0,83	0,14
C7/8/9	0,86	0,58	0,85	0,85	0,40	- 0,81	- 0,34
Alluvions	0,87	0,50	0,84	0,87	- 0,48	- 0,85	- 0,32

— Les résultats obtenus sur l'ensemble des alluvions marquaient le rôle particulier des fractions 20-50 μ et 200-2000 μ . Par contre, le calcaire actif a légèrement tendance à augmenter avec le CaCO_3 total de la fraction la plus grossière (200-2000 μ).

— Dans les alluvions de surface, le calcaire actif est fortement et négativement corrélé au calcaire total de la fraction 20-50 μ , ce qui signifie que, dans ces alluvions, le calcaire total n'est certainement pas sous forme active.

— Dans les alluvions de profondeur, c'est le contraire. Le calcaire actif augmente (liaison positive moyenne) avec la teneur en calcaire total de la fraction 20-50 μ et diminue avec celui de la fraction grossière 200-2000 μ .

Cette différence de comportement des particules grossières et calcaires (200-2000 μ) entre la surface et la profondeur laisserait supposer une sorte d'enrobage de ces particules sableuses par du calcaire finement divisé et actif dans les couches de surface, phénomène qui n'existe pas dans les couches de profondeur où les fractions sableuses et calcaires seraient plus lavées.

L'allure discontinue des profils normés de ces deux variables dans le sens vertical avec rupture au niveau des couches C4 et C5 confirme en outre la différenciation en deux séries alluviales superposées.

3.2.1.3. Complexe et sels solubles

Le même type d'analyse permet de différencier très nettement les différentes strates.

3.2.1.3.1. *Complexe.* Nous donnons seulement ici le tableau des moyennes :

TABLEAU LI

Variables en méq/100 g	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Substrats
Ca ⁺⁺	72,85	68,78	67,94	62,65	68,56	64,25	63,10	67,8	65,17	69,55
Mg ⁺⁺	10,68	10,71	9,20	8,49	9,30	8,76	8,08	8,37	8,70	8,74
K ⁺	0,57	0,58	0,47	0,34	0,47	0,41	0,35	0,28	0,26	0,68
Na ⁺	1,35	1,22	1,03	0,65	0,64	0,50	0,50	0,42	0,34	0,91
T (Ca)	27,94	26,18	18,67	29,78	25,04	18,67	18,65	23,03	16,67	19,39

Interprétation des profils normés des différents cations (fig. 26) :

L'allure des différents profils normés montre une nette diminution des éléments échangeables de la surface vers la profondeur ce qui est lié à la répartition granulométrique verticale des alluvions. La décroissance est particulièrement nette pour les alcalis, potassium et sodium, également pour le magnésium ; le calcium échangeable présente une diminution plus faible et même une remontée en profondeur.

La cassure des courbes au niveau C4/C5 est ici aussi très nette et confirme la superposition de deux dépôts alluviaux. Curieusement, la courbe de la capacité d'échange s'oppose à celles des cations échangeables au niveau de la couche C4 et de façon moins nette de la couche C8. Ceci est probablement lié à l'augmentation du calcaire total dans les couches de profondeur des deux séries alluviales, augmentation que ne suit pas le calcium échangeable en raison de l'imperfection de la méthode d'extraction employée. Le taux de calcaire dans ces deux couches était supérieur à la capacité de dissolution de l'acétate d'ammonium.

3.2.1.3.2. *Sels solubles.* Le tableau des moyennes est présenté ci-dessous et les profils normés sont représentés sur deux graphes séparés :

- premier graphe : cations Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺ et Na⁺ (fig. 27),
- deuxième graphe : anions Cl⁻, SO₄⁻⁻, HCO₃⁻ et conductivité (fig. 28).

TABLEAU LII

Sels solubles E.S.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Substrats
Conductivité mmhos	4,367	3,791	3,031	3,159	1,582	1,934	2,284	2,271	1,600	1,841
Ca ⁺⁺ (méq/100 g)	1,289	1,030	0,769	0,633	0,462	0,433	0,482	0,431	0,304	0,438
Mg ⁺⁺ (méq/100 g)	0,948	0,710	0,646	0,488	0,354	0,278	0,327	0,245	0,181	0,254
K ⁺ (méq/100 g)	0,019	0,019	0,017	0,017	0,016	0,019	0,019	0,014	0,012	0,018
Na ⁺ (méq/100 g)	1,557	1,773	0,782	0,683	0,399	0,349	0,370	0,363	0,245	0,495
Cl ⁻ (méq/100 g)	1,853	2,067	0,977	0,942	0,415	0,370	0,501	0,340	0,131	0,575
SO ₄ ⁻⁻ (méq/100 g)	1,534	1,140	0,971	0,625	0,538	0,519	0,526	0,524	0,372	0,402
HCO ₃ ⁻ (méq/100 g)	0,213	0,156	0,152	0,115	0,149	0,123	0,121	0,147	0,149	0,154

L'interprétation de ces profils verticaux est plus délicate car les sels solubles déposés ont pu subir une évolution postérieure à leur dépôt sous l'effet d'une stagnation plus ou moins prolongée des eaux ou ultérieurement par diffusion vers la surface lors du dessèchement des boues.

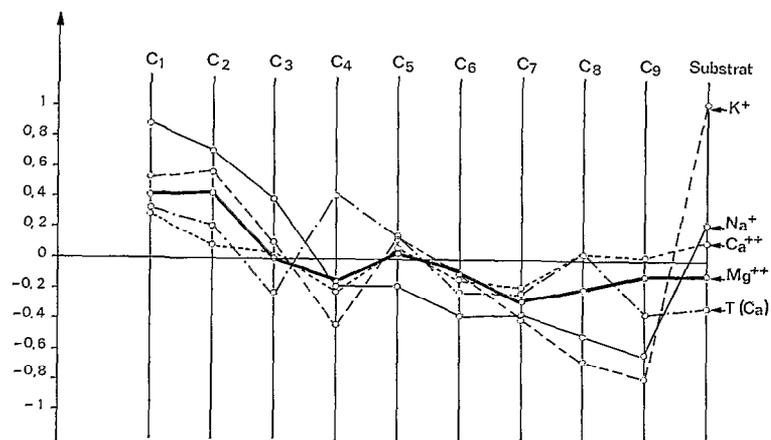


Fig. 26. — Profils normés du complexe absorbant.
Variations verticales

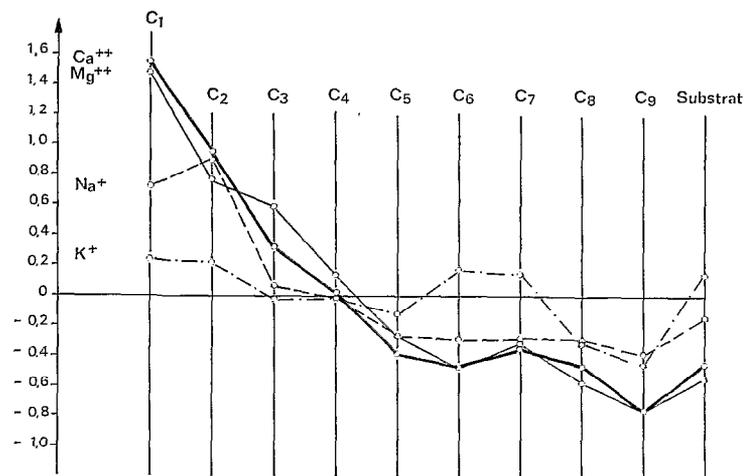


Fig. 27. — Profils normés des sels solubles (E.S.).
Variations verticales des cations

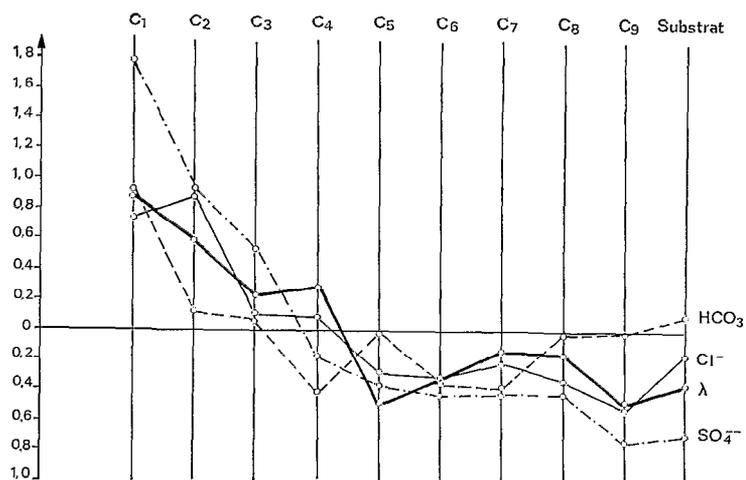


Fig. 28. — Profils normés des sels solubles (E.S.).
Variations verticales des anions

C'est ce que semble montrer l'allure générale des courbes qui présentent une décroissance brutale des couches les plus superficielles jusqu'à la couche C5, puis un palier et même parfois une augmentation au niveau des couches C7, C8, surtout sensible pour la conductivité. La rupture au niveau de la couche C5 confirme ici encore la présence des deux dépôts superposés.

La décroissance brutale et régulière des sels que montre la première partie de la courbe de la couche C5 aux couches les plus superficielles C1 et C2, est probablement due à un phénomène de diffusion vers la surface après le dépôt, (limité dans la série inférieure en raison de la rupture granulométrique de C5). Il semble en effet difficile d'admettre que les dépôts de fin de crue soient plus salés que les précédents alors que c'est l'inverse qui est généralement constaté dans les mesures de transport de sels.

La seconde partie de la courbe, des couches C5 aux couches C8/C9, serait à ce point de vue plus représentative de la répartition initiale des sels dans les dépôts successifs, les alluvions de fin de crue correspondant aux couches C5/C6 étant moins salées que les précédentes (couches C7, C8, C9). Le décrochement présenté par la couche C9 étant probablement lié à sa granulométrie très grossière. La différence par rapport au substrat est faible au niveau des couches de profondeur.

On peut noter, en outre, la remarquable superposition d'une part de la courbe des chlorures avec celle du sodium et, d'autre part, de la couche du sulfate avec celle du calcium et surtout du magnésium.

3.2.1.4. Analyse de la matière organique

Nous avons suivi de la même façon les évolutions du carbone, de l'azote, et du C/N, ainsi que des matières humiques totales (M.H.T.). Si, pour les 3 premières variables, on dispose de nombreuses analyses, il n'en est pas de même pour les matières humiques dont l'interprétation doit être faite avec *beaucoup plus de prudence*. Il a, par conséquent, été impossible de faire une analyse discriminante sur ces données et nous reportons seulement ici le tableau des moyennes.

TABLEAU LIII

Variables	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Substrats
C (‰)	8,40	8,05	6,95	5,09	6,85	6,31	5,43	5,60	5,60	9,49
N (‰)	0,98	0,95	0,83	0,58	0,78	0,66	0,56	0,53	0,48	1,05
C/N	8,69	8,58	8,56	9,09	8,91	9,89	9,94	10,54	11,25	9,16
M.H.T. en C (‰)	1,64	1,91	1,12	1,63	1,51	1,58	1,53	1,32	1,32	2,59

La distinction des alluvions par rapport au substrat est particulièrement nette ce dernier étant nettement plus riche en C, N et M.H.T. que la couche la plus profonde et ayant un comportement de couche de surface néanmoins plus riche que la couche C1, la couche alluviale la plus riche.

Le rapport C/N présente un aspect particulier, les couches les plus profondes ayant un C/N plus élevé (≤ 12) que les couches les plus superficielles à C/N de 8. La matière organique des couches les plus profondes étant proportionnellement moins riche en azote que celle des couches de surface dont le rapport C/N caractérise une matière organique nettement plus minéralisable. L'interprétation de ce phénomène est délicate : la cassure au niveau C4/C5 existe, mais de façon moins tranchée.

Le C/N plus élevé des couches les plus profondes correspondrait à la présence de débris végétaux frais, litières ou résidus de récolte emportés les premiers avec les horizons humifères, le C/N des strates alluviales supérieures correspondant à des horizons sous-jacents (A1) ou même à de plus profonds emportés lors d'effondrements de berges. On peut pousser plus loin l'interprétation et dire que les premiers dépôts correspondraient à des matériaux érodés des sols des bassins de l'amont moins cultivés et dont le C/N est plus élevé ; la deuxième tranche alluviale présentant un C/N plus caractéristique de sols cultivés correspondrait, elle, à une érosion de sols de plaine (?).

3.2.1.5. Conclusion

Les analyses discriminantes à plusieurs populations effectuées sur les 9 classes de profondeur d'alluvions et sur le substratum sont particulièrement intéressantes : elles mettent en évidence de façon sûre un comportement différent des 9 couches verticales choisies a priori, à partir des variables analytiques les plus importantes et en sélectionnant les axes dont le pouvoir discriminant est significatif.

La représentation des centres des différentes classes entourés de leurs cercles de confiance donne une image discriminante, surtout selon la granulométrie et le calcaire, des populations suivantes :

- le substratum ;
- les couches alluviales de surface (C1 - C2 - C3) ;
- les couches alluviales de profondeur (C6 - C7 - C8 - C9) ;
- les couches alluviales intermédiaires C4 et C5 qui ont un comportement proche soit des couches de surface (C5), soit des couches de profondeur (C4).

Le tracé des profils normés montre le classement vertical suivant :

- les substrats ont un comportement tout à fait à part,
- les alluvions présentant une granulométrie s'affinant régulièrement de la profondeur vers la surface : C9 → C8 → C7 → C6 / C3 → C2 → C1,
- la courbe granulométrique verticale présente deux anomalies :
 - l'une au niveau de la couche C4 dont la granulométrie est anormalement grossière et se rapproche de celles des couches de profondeur,
 - l'autre au niveau de la couche C5 dont la granulométrie est anormalement fine et se rapproche des couches de surface.

Les profils normés réalisés sur d'autres variables confirment la présence de ces deux anomalies de façon particulièrement nette pour la matière organique, le calcaire des différentes fractions, le complexe absorbant, moins pour les sels solubles qui ont peut-être subi une évolution postérieure à leur mise en place.

L'interprétation sédimentologique de ces courbes laisse supposer que nous avons affaire à deux séries alluviales superposées dont la plus profonde, représentée par les couches C9-C8, C7, C6 et C5 est la plus importante quantitativement et la plus grossière, son épaisseur est très variable puisque cette série peut n'être représentée que par quelques couches, C6 et C5 par exemple (soit 15 cm au lieu de 1,50 m). La série la plus superficielle représentée par les couches C4-C3-C2-C1 est plus fine, plus régulière et nettement moins épaisse. La limite entre les deux séries se situe entre 5 et 10 cm.

Dans chacune des deux séries, la granulométrie diminue régulièrement des premiers aux derniers sédiments déposés ; la matière organique, les bases échangeables augmentent régulièrement des premiers aux derniers dépôts. Le calcaire augmente dans les fractions fines mais diminue dans les fractions grossières des premiers aux derniers dépôts.

L'interprétation hydrologique de cette superposition de deux séries n'est pas évidente puisque l'hydrogramme (cf. fig. 1) ne montre qu'une seule pointe de crue et non deux comme on aurait pu le supposer. Par contre, il montre une montée de crue rapide et une décrue très lente, très étalée que les importantes « lâchures » du barrage de l'oued Mellègue ($155 \times 10^6 \text{ m}^3$) contribuent encore à étaler.

On peut alors supposer que la première tranche alluviale déposée correspondrait aux transports solides de la montée de crue généralement plus chargée que la décrue et d'autant plus chargée et plus grossière, dans le cas présent, que cette montée a été brutale, donnant des dépôts très hétérogènes en épaisseur, en fonction de la microtopographie du terrain et de l'architecture des obstacles dans le lit. Les dépôts de la deuxième série sont beaucoup plus réguliers, peut-être en raison du nivellement du terrain opéré par les premiers, et correspondrait à la décrue dont les eaux sont beaucoup moins chargées, la vitesse plus lente et les dépôts plus fins ; ou bien, on peut ajouter également que les dépôts les plus superficiels correspondraient aux « lâchures » du barrage du Mellègue qui, si elles ne sont pas chargées elles-mêmes en matières en suspension, ont pu reprendre, en s'ajoutant aux eaux de décrue, des matériaux d'effondrement de berges par exemple. La montée de salure constatée dans la deuxième série alluviale par rapport à la première pourrait être un argument pour confirmer cette hypothèse, puisque les eaux de l'oued Mellègue sont généralement plus salées que les eaux de l'oued Medjerda. Le rapport C/N, qui est nettement différent dans les deux séries, pourrait laisser supposer que les matériaux de la première série proviennent des sols forestiers de la haute vallée, alors que ceux de la deuxième série à C/N très bas, correspondent mieux aux horizons profonds des sols de plaine emportés lors des effondrements de berge à la décrue.

Cette dernière hypothèse paraît la plus plausible mais, faute de mesures hydrologiques continues, rien ne permet de l'étayer plus solidement qu'une autre.

3.2.2. Recherche d'un classement géographique

Dans le but de mettre mieux en évidence des variations géographiques dans les dépôts alluviaux que l'analyse en composantes principales laisse soupçonner, nous avons sélectionné sept groupes d'alluvions répartis comme suit depuis la haute vallée jusqu'à la mer :

- A = haute vallée (Jendouba - Bou Salem), à proximité du lit
- B = moyenne vallée (Sidi Salem à Tebourba), à proximité du lit
- C = El Batham
- D = basse vallée (Djedeida à la mer), à proximité du lit

E = plaine (Djedeida et Garaa Mabtouha)

F = ancien lit (Protville à la mer)

G = émissaire (Protville à la mer) à proximité du lit.

et qui correspondent, soit à un profil en long régulier de l'oued Medjerda groupes A, B, D, G, dans lesquels on n'a affaire qu'à des profils prélevés à proximité du lit, soit à des profils latéraux (plaine de Djedeida et Garaa Mabtouha), soit à des profils perturbés par la présence d'un obstacle important (El Batham) ou, au contraire, très régulier comme dans l'ancien lit en comparaison avec l'émissaire.

Des analyses discriminantes à plusieurs populations ont été effectuées et des profils normés tracés, concernant les rubriques analytiques suivantes : granulométrie sans décarbonatation, calcaire dans les différentes fractions granulométriques, et sels solubles.

3.2.2.1. Granulométrie sans décalcarisation

L'analyse discriminante effectuée sur les 7 populations A, B, C, D, E, F, G à partir des 6 variables granulométriques sans décalcarisation 0-1 μ , 1-2 μ , 2-20 μ , 20-50 μ , 50-200 μ et 200-2000 μ , conduit aux résultats suivants :

TABLEAU LIV
MOYENNES

Variables (%)	Populations						
	A	B	C	D	E	F	G
0-1 μ	10,5	20,4	19,6	21,5	46,2	36,0	21,1
1-2 μ	3,8	6,4	5,3	6,5	14,4	11,7	5,9
2-20 μ	12,5	20,2	16,4	20,1	28,4	28,6	22,5
20-50 μ	17,3	25,5	12,5	20,2	2,9	9,4	25,2
50-200 μ	45,4	22,2	32,5	27,9	2,0	8,3	21,4
200-2000 μ	8	2,6	10,8	0,7	0,9	1,2	0,9

L'analyse discriminante extrait deux axes seulement dont le pouvoir discriminant est significatif (axes 1 et 2). Nous avons fait figurer également les composantes de ces axes multipliées par les écarts-types des variables, ce qui donne une idée plus claire de leur pouvoir discriminant.

TABLEAU LV

Axes	Variance	Test	Composante des axes par rapport aux six variables					
1	0,70	χ^2 avec 11 DL = 122,9	0,080	0,073	- 0,031	- 0,019	0,012	0,004
2	0,26	χ^2 avec 8 DL = 53,7	- 0,018	- 0,033	0,038	- 0,058	0,028	0,058
1'	Composantes des axes		1,23	0,41	- 0,33	- 0,26	0,28	0,04
2'	multipliées par écarts-types		- 0,28	- 0,19	0,40	- 0,79	0,65	0,51

Nous avons fait figurer sur le graphe (fig. 29) les centres des 7 populations munis de leur cercle de confiance au niveau 90%.

Interprétation :

L'analyse discriminante sépare nettement 4 groupes géographiques d'alluvions ayant des granulométries voisines :

- groupe haute vallée et région d'El Batham (A et C) ;
- groupe basse vallée - moyenne vallée et émissaire (B, D, G) ;
- la plaine (Djedeida et Garaa Mabtouha) (E) ;
- l'ancien lit (F).

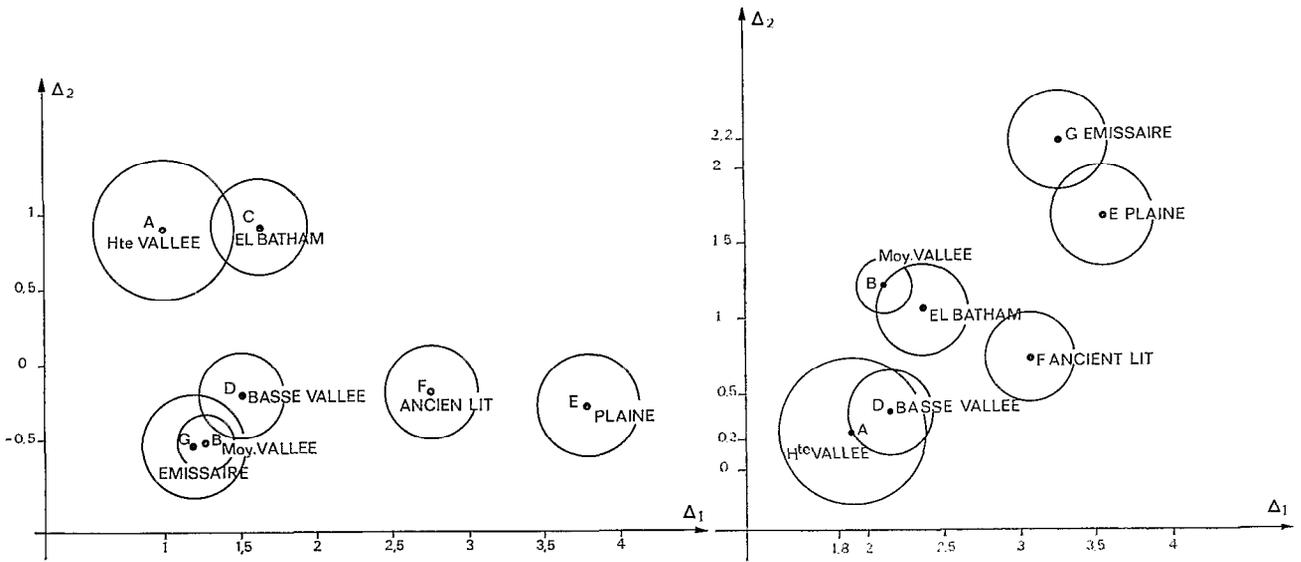


Fig. 29. — Analyse discriminante de la granulométrie sans décarbonatation. Variations géographiques

Fig. 30. — Analyse discriminante des sels solubles (E.S.). Variations géographiques

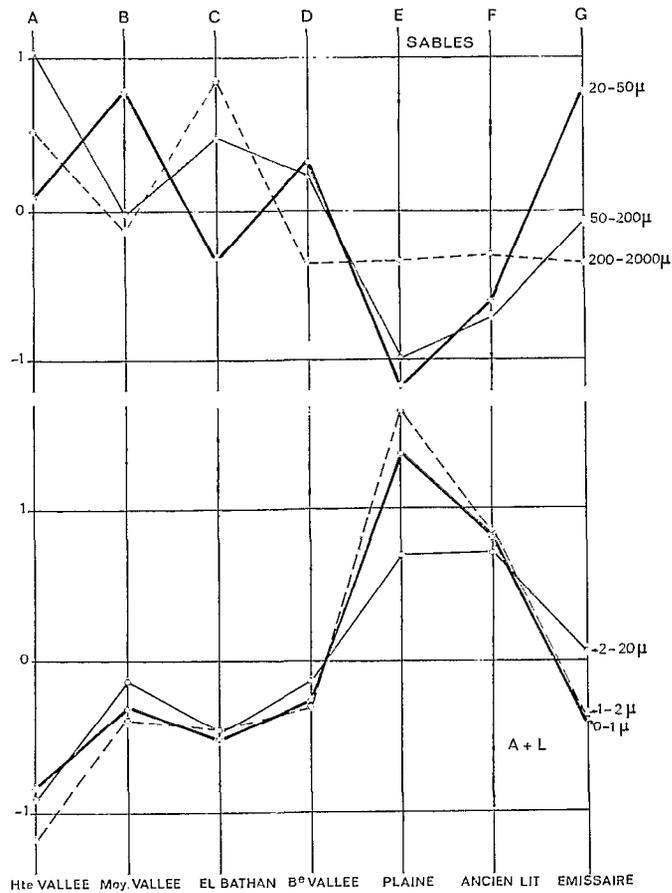


Fig. 31. — Profils normés de la granulométrie sans décarbonatation. Variations géographiques

L'analyse des profils normés sur ces données (fig. 30) est délicate car ils intègrent à la fois des variations latérales et longitudinales. Néanmoins, on peut considérer que ces variations sont atténuées par le découpage géographique que nous avons fait : le profil en long des alluvions déposées de l'amont à l'aval n'étant représenté que par les dépôts prélevés à proximité de l'oued, comprend les groupes suivants :

- haute vallée (A)
- moyenne vallée (B)
- El Batham (C)
- basse vallée (D)
- émissaire (G).

Le groupe « ancien lit » étant à part et ayant un comportement granulométrique proche des alluvions prélevées dans la plaine de Djedeida et dans la Garaa Mabtouha, qui représentent une séquence latérale par rapport à l'oued.

L'analyse des profils fait ressortir les principaux points suivants :

- longitudinalement : on constate que les fractions granulométriques fines (0-1 μ , 1-2 μ et 2-20 μ) présentent une très légère augmentation de l'amont vers l'aval en prenant l'émissaire pour exutoire (profil A, B, D, G) ; l'augmentation est beaucoup plus marquée si on prend l'ancien lit comme exutoire (profil A, B, D, F). L'évolution longitudinale des fractions sableuses est irrégulière car ce sont elles qui sont les plus affectées par les obstacles perturbant l'écoulement ; au niveau du pont d'El Batham, ce sont les fractions les plus grossières (200-2000 μ et 50-200 μ) qui dominent dans les dépôts. Au niveau de la cascade sur l'émissaire, les sables très fins (20-50 μ), constituent la fraction dominante, dans les dépôts ;
- latéralement : les profils sont représentés par le groupe E rassemblant les épandages alluviaux de la plaine de Djedeida et de la Garaa Mabtouha qui sont à comparer au groupe D (basse vallée) prélevé à proximité du lit : les fractions les plus fines, argiles 0-1 μ et 1-2 μ montrent latéralement une très forte augmentation, les fractions sables très fins et sables fins évoluant en sens inverse, curieusement la fraction sables grossiers ne présente pas de différence entre les deux groupes.

En raison des obstacles perturbant l'écoulement et les dépôts, il est difficile de conclure avec certitude s'il y a une diminution de la taille des particules granulométriques de l'amont vers l'aval. Une telle évolution dans ce sens porterait plus sur les particules fines que sur les fractions grossières.

Les obstacles dans le lit de l'oued apportent des perturbations certaines dans la granulométrie des dépôts environnants dont les fractions sableuses augmentent dans tous les cas par rapport aux fractions fines.

Mais l'importance de l'obstacle semble, en outre, avoir un rôle dans la dimension de la fraction sableuse déposée :

- le plus important (El Batham) perturbant le plus fortement l'écoulement favorise le dépôt de sables grossiers (200-2000 μ) ;
- la faible perturbation apportée par la morphologie des autres obstacles (pont de la Sloughia ou cascade de l'émissaire) favorisant un dépôt moins grossier constitué surtout de sables très fins (20-200 μ).

Les alluvions déposées dans l'ancien lit montrent une augmentation régulière des fractions fines par rapport à celles de l'émissaire, traduisant un écoulement et une décantation réguliers à dominance d'éléments fins (A + L) du même type que celle observée dans un profil latéral dans la plaine de Djedeida par exemple. Il faut faire remarquer que c'est la différence de niveau existant au confluent entre l'émissaire et l'ancien lit qui a différencié la sédimentation dans les deux branches :

- le premier étant plutôt en phase de creusement et n'ayant pas atteint son profil d'équilibre (la cascade située à 2 km à l'aval du confluent a reculé de plusieurs dizaines de mètres lors des crues), a entraîné les sédiments profonds ;
- le second étant en phase de comblement (l'alluvionnement est au-dessus du niveau de la plaine actuelle), laisse passer seulement la partie supérieure du flux contenant les éléments les plus fins.

3.2.2.2. Calcaire dans les fractions granulométriques

Les profils normés réalisés sur le calcaire contenu dans les différentes fractions granulométriques mettent en évidence les variations suivantes :

- deux augmentations du calcaire grossier 200-2000 μ au niveau des obstacles d'El Batham où la proportion de sables grossiers calcaires est très nettement dominante, traduisant une très grande perturbation de l'écoulement, et au niveau de la cascade de l'émissaire, dans les fractions 50-200 μ , et 200-2000 μ ;
- au niveau de l'ancien lit (et probablement de la plaine qui a été regroupée ici avec la basse vallée), on constate une dominance du calcaire dans les fractions les plus fines 1 à 2 μ en particulier ;
- l'évolution longitudinale de l'amont vers l'aval n'est pas nette, car probablement perturbée par de nombreux facteurs, et il est délicat de conclure de façon sûre à une diminution de la taille des particules de l'amont vers l'aval bien qu'une tendance dans ce sens apparaisse sur certaines fractions.

3.2.2.3. Sels solubles

Nous avons cherché à discriminer également ces 7 populations géographiques à partir des sels solubles en retenant les 8 variables suivantes de l'extrait saturé :

- conductivité,
- Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ ,
- Cl^- , SO_4^{--} et HCO_3^- .

Le tableau des moyennes est le suivant :

TABLEAU LVI

Variables	Populations						
	A	B	C	D	E	F	G
Conductivité mmhos/cm	3,18	2,44	1,99	2,44	2,41	2,82	3,92
Ca^{++} (méq/100 g)	0,49	0,59	0,46	0,55	0,84	0,98	0,91
Mg^{++} (méq/100 g)	0,35	0,34	0,33	0,46	0,76	0,85	0,60
K^+ (méq/100 g)	0,021	0,014	0,013	0,017	0,019	0,088	0,020
Na^+ (méq/100 g)	0,36	0,51	0,50	0,44	0,90	1,75	0,97
Cl^- (méq/100 g)	0,90	0,58	0,49	0,49	1,32	1,08	1,40
SO_4^{--} (méq/100 g)	1,16	0,67	0,56	0,77	0,82	1,03	0,82
HCO_3^- (méq/100 g)	0,08	0,12	0,14	0,12	0,21	0,20	0,18

L'analyse discriminante extrait les deux premiers axes dont le pouvoir discriminant est significatif.

Interprétation :

La discrimination entre les différents groupes géographiques est moins marquée que pour la granulométrie. Néanmoins 3 à 4 groupes d'alluvions présentent un comportement similaire (cf. fig. 30) :

- émissaire et plaine de la basse vallée,
- haute et basse vallée,
- moyenne vallée, El Batham et l'ancien lit étant intermédiaires.

L'analyse des profils normés effectuée pour ces différents groupes géographiques fait apparaître les faits suivants :

- longitudinalement (profil A, B, D, G), les courbes présentent peu de variations mais une tendance à l'augmentation de la conductivité et des sels solubles de la moyenne vallée à l'émissaire. Les profils de la haute vallée présentent un comportement différent (moins chargés que les autres) ;
- on constate une nette augmentation de la conductivité et des sels solubles latéralement entre les profils de la plaine par rapport à ceux de la basse vallée et aussi entre les profils de l'ancien lit par rapport à ceux de la basse vallée d'une part, et à ceux de l'émissaire d'autre part. La majorité des cations et anions évolue dans le même sens, sauf l'ion bicarbonate qui présente un comportement à part, difficile à interpréter.

On constate donc une faible tendance à une augmentation de salure de la moyenne vallée vers l'aval, les dépôts moins salés de la haute vallée étant probablement influencés par les matériaux plus acides de la rive gauche de l'oued Medjerda.

L'augmentation sensible de la salure au niveau de la plaine et de l'ancien lit peut être due à un enrichissement en sels des alluvions, par lessivage des sols salés de la Garaa Mabtouha ou des anciens dépôts de terrasses de l'ancien lit.

La même analyse effectuée sur les éléments du complexe absorbant ne montre pas de différence notable entre les populations des différentes régions ; et les profils normés présentent peu de variation de l'amont vers l'aval.

3.2.2.4. Conclusion

Les analyses discriminantes effectuées sur la granulométrie, la répartition du calcaire et les sels solubles, séparent nettement des groupes géographiques de comportement différent :

- la haute vallée,
- la moyenne vallée,

- la région d'El Batham,
- la basse vallée,
- la plaine (Djedeida et Garaa Mabtouha),
- l'émissaire,
- l'ancien lit (Protville à Porto Farina).

Le tracé des profils normés est, par contre, irrégulier, car, dans chacun des groupes définis, de nombreux facteurs de perturbation interviennent différemment en chaque point pour masquer une éventuelle évolution, ce qui ne permet de comparer que des groupes d'alluvions déposées dans des conditions identiques et, en particulier, d'écoulement non perturbé.

Depuis la haute vallée jusqu'à la mer, on constate seulement une faible tendance à l'augmentation des fractions fines ($A + L$) par rapport aux fractions grossières, tendance que seul un échantillonnage systématique permettrait de confirmer. La même restriction est à faire au sujet des particules calcaires qui tendent à présenter une diminution de taille de l'amont vers l'aval. La salure et les sels solubles présentent de faibles variations en haute et moyenne vallée mais une nette augmentation à partir de la basse vallée qui est probablement due à un enrichissement par lessivage des sols plus salés dans cette partie du bassin versant.

Latéralement, en comparant les profils de la basse vallée à ceux de la plaine, prélevés au même niveau longitudinalement, on constate que la granulométrie s'affine latéralement (augmentation des fractions 1 à 2μ et diminution corrélative des fractions 20 à 200μ) sauf pour les sables grossiers dont le taux reste constant. Ceci traduit probablement un dépôt régulier non perturbé par un obstacle susceptible de brasser les sédiments grossiers du fond du lit.

L'augmentation de salure latéralement depuis l'oued vers la plaine confirme un enrichissement en sels par lessivage des sols de plaine ; le même phénomène se produit dans l'ancien lit par rapport à l'émissaire.

Il est finalement difficile de conclure à une véritable évolution longitudinale ou latérale des alluvions elles-mêmes, tant les facteurs externes (microtopographie, nature des sols inondés...) ou internes (vitesse des eaux, nature des obstacles...) peuvent masquer cette évolution ; les différentes analyses effectuées avec l'échantillonnage que nous avons, mettent plus en évidence les variations apportées localement dans les dépôts par ces facteurs qu'une véritable variation continue.

4. CONCLUSION GÉNÉRALE

L'occurrence des événements de mars 1973 dans le nord de la Tunisie nous a permis d'analyser des phénomènes hydrologiques et sédimentologiques hors du commun, auxquels la catastrophe de 1969 dans le centre et sud du pays nous avait déjà préparés. Sans atteindre la violence et l'ampleur du «cataclysme» de l'automne 1969 dû à une série de précipitations torrentielles provoquant les formidables crues des oueds Zéroud, Merguellil et Leben, la crue de l'oued Medjerda en 1973 peut néanmoins être qualifiée d'événement exceptionnel à de nombreux égards.

Les conditions favorables réunies au mois de mars par des précipitations continues, générales sur l'ensemble du bassin, et abondantes en fin de mois puisque leur période de retour estimée est supérieure à 100 ans sur le cours principal de la Medjerda, tombant sur des sols très humectés au sortir de l'hiver, ont déclenché des écoulements importants concentrés par l'oued Medjerda.

Le débit maximum de $3\,500 \text{ m}^3/\text{s}$, mesuré à La Sloughia, est supérieur au débit centenaire estimé et le volume de $940 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ écoulé en six jours pour un bassin versant de $20\,000 \text{ km}^2$ est du même ordre de grandeur que le volume moyen annuel.

On imagine la puissance de transport d'une telle masse d'eau ; l'ampleur de la sédimentation constatée après le retrait des eaux sur les 470 km^2 inondés apparut effectivement énorme puisque le cubage effectué d'après les relevés de terrain permet d'estimer à $75 \cdot 10^6 \text{ t}$ le poids de matériaux déposés ; total impressionnant qui diffère en outre beaucoup de celui obtenu par la mesure globale des transports solides effectuée dans le cours d'eau. Après examen des différentes possibilités d'erreur entre les deux méthodes d'estimation, il apparaît que la mesure hydrologique directe sous-estime probablement nettement les transports solides dans le cas de gros débits, les principales raisons de cette sous-estimation étant l'ignorance de l'importance du charriage de fond et des éboulements de berge et le manque de représentativité des échantillons prélevés en surface de l'écoulement.

Il faut bien admettre que la Medjerda, au cours de ces six jours de crue, a pu transporter quelque $100 \cdot 10^6 \text{ t}$ de matériaux, ce qui représente une concentration moyenne dans les eaux de l'ordre de 100 g/l .

Ce sont des chiffres très forts qui, a priori, surprendront l'hydraulicien ou l'hydrologue, mais il ne faut pas perdre de vue que cette crue a une période de récurrence estimée entre 200 et 300 ans et qu'au cours de phénomènes exceptionnels de cette importance, les mécanismes de l'érosion, de l'affouillement, du transport dans les oueds et de

l'atterrissement dans les plaines atteignent un paroxysme. On sait que, dans ce domaine, une seule crue peut causer plus de remaniements que les écoulements cumulés de plusieurs années. Dans la Monographie, ces transports solides, pour une année moyenne, sont estimés à Medjez El Bab à $21,5 \times 10^6$ t de matériaux véhiculés, soit une concentration moyenne de 30 g/l et un taux d'érosion de 1 020 t/km². an.

Dans l'estimation de l'envasement de la retenue du barrage sur l'oued Mellègue, nous avons évalué à $126,7 \cdot 10^6$ m³ le total des sédiments entrés dans la retenue pendant 21 ans (dont $47,6 \cdot 10^6$ m³ y sont restés), ce qui représente (avec d_{#1,2}) $152 \cdot 10^6$ t, soit une moyenne annuelle pour 21 ans de $7,25 \cdot 10^6$ t de sédiments, pour un apport annuel moyen de $188 \cdot 10^6$ m³ d'eau, soit une charge moyenne de 38 g/l de matériaux, et un taux d'érosion de 703 t/km² an.

Il n'y a donc pas lieu de s'étonner que ces chiffres puissent tripler ou quadrupler au cours d'événements aussi exceptionnels que ceux de mars 1973.

On rejoint ainsi les estimations faites par l'amiral Barjot en 1952 [1], sur l'alluvionnement en basse Medjerda et le comblement du golfe d'Utique depuis la haute antiquité. Il estime que « la Medjerda en crue peut atteindre 2 500 m³/s et que ses eaux contiennent 10 à 20% de matières solides et quelquefois plus ». Une crue moyenne qui représente un apport de 200 millions de mètres cubes d'eau fournit un apport de 16 à 20 millions de mètres cubes d'alluvions.

Le débit solide de la Medjerda serait actuellement de $700 \cdot 10^6$ m³ par siècle, ($500 \cdot 10^6$ m³ dans l'antiquité, en raison du boisement du bassin versant), ce qui provoquerait une vitesse moyenne d'avancée de l'embouchure de 3 km par siècle et une vitesse de remblayage au-dessus du niveau de la mer de 15 à 20 km² par siècle.

On imagine difficilement les effets dévastateurs que peuvent avoir de tels écoulements si on ne les a constatés de visu et les plus apparents, sans parler des pertes en vies humaines, concernent l'infrastructure routière, ferroviaire, les habitations, les terres agricoles et forestières, le bétail, qui sont gravement endommagés ou détruits. Mais il est des effets sinon moins spectaculaires, parfois du moins plus difficiles à percevoir immédiatement et qui affectent le milieu naturel, les sols en particulier. La présente étude a surtout mis l'accent sur les sédiments déposés dans la partie aval du bassin, mais elle ne doit pas faire oublier la perte que représentent à l'amont ces $75 \cdot 10^6$ t d'alluvions auxquelles il faut ajouter toute la partie évacuée à la mer, qui est au minimum de $25 \cdot 10^6$ t, en admettant une concentration de l'ordre de 100 g/l. Ceci représente une perte pure ramenée aux 20 000 km² du bassin versant à La Sloughia, de 1 250 t/km² au minimum, sur les 5 000 t/km² érodés. Quant aux $75 \cdot 10^6$ t de sédiments déposés, on peut difficilement affirmer qu'ils sont un facteur très positif dans cet événement selon le point de vue duquel on en juge ; sur le plan agricole en particulier, ils ne représentent guère qu'un médiocre support très appauvri en comparaison avec les terres plus riches dont ils proviennent.

La présente étude est surtout axée sur les aspects pédologiques et hydrologiques du phénomène, mais les effets apportés à la *morphologie du terrain* par ces alluvions, sans constituer un véritable bouleversement comme dans le Kairouanais en 1969, n'en ont pas moins modifié de façon importante l'évolution du delta de la Medjerda et son embouchure.

— Le comblement partiel de l'ancien lit endigué et sa surélévation au-dessus de la plaine, le rendent actuellement impraticable par les eaux d'étiage alors qu'il était prévu qu'il en reçoive la moitié du débit. Actuellement, seules les eaux de crue peuvent atteindre la mer par cette voie. Ceci pose un problème aux nombreux agriculteurs-maraîchers qui, jusqu'ici, utilisaient l'eau de l'oued pour leurs irrigations d'été dans la plaine de Porto-Farina.

— L'abandon de cet ancien lit se fait au profit de l'émissaire qui constitue une voie plus directe d'accès à la mer, d'autant plus qu'il semble actuellement dans une phase de creusement dont la manifestation la plus visible est la cascade située à l'aval du pont de Galaat El Andless qui a régressé de quelques dizaines de mètres lors de la crue. La grande majorité des eaux et des transports solides transitent par cette voie artificielle largement calibrée, mais, au niveau de l'embouchure, la vitesse est sensiblement ralentie et un bouchon est en cours de formation constitué par l'abondante sédimentation mal évacuée par la mer et déjà s'amorce un bec du même type que celui de Porto-Farina, sous les influences marines.

— La grande plaine basse de la Garaa Mabtouha présente actuellement une inclinaison vers l'ouest par rapport à sa partie SE longeant l'oued qui est surélevé probablement par formation d'un vaste bourrelet alluvial dû aux débordements successifs. Lors de la crue de 1973 qui a très largement inondé cette plaine, c'est naturellement la partie basse qui a servi de réceptacle aux eaux chargées venues le long de la route de Mateur, en contournant le bourrelet qui n'a même pas été inondé par endroits et les dépôts les plus épais, 20 à 40 cm, se sont donc constitués dans la partie ouest par décantation lente des eaux. Hormis phénomène de subsidence, et sous le régime actuel de la Medjerda, l'inclinaison de la Garaa irait donc dans le sens d'un aplanissement par comblement de la partie la plus profonde, actuellement la plus facilement accessible aux eaux de forte crue et servant de piège à sédiments.

Les analyses pédologiques classiques auxquelles ont été soumises ces alluvions ont montré qu'il s'agissait de matériaux peu transformés mais seulement appauvris par rapport aux matériaux originels. (L'évolution de ces sols alluviaux jeunes est suivie depuis leur dépôt par des prélèvements régulièrement analysés). Les sédiments présentent une composition homogène du point de vue chimique et minéralogique qui reflète bien la nature des matériaux du bassin versant issus de roches-mères uniquement sédimentaires à dominance de calcaires et de marnes. Dans ces conditions, il n'a pas été possible de mettre en évidence au sein des dépôts des différences sur le plan chimique

ou minéralogique, en fonction de l'arrivée d'onde de crue des divers affluents par exemple. Par contre, les coefficients de variation très élevés que présentent les éléments de la granulométrie et les caractéristiques physiques qui lui sont liées, ont laissé pressentir des variations importantes au sein de ces dépôts, que la considération des seules moyennes arithmétiques ne faisait pas apparaître et que différents tests statistiques ont permis de préciser.

Sur le plan vertical, les analyses en composantes principales et les analyses discriminantes à plusieurs populations mettent en évidence de façon systématique un classement selon la dimension des particules granulométriques, calcaires et organiques, qui suit les lois de la sédimentation : les couches de profondeur étant les plus grossières, les couches de surface, les plus fines.

Ce classement permet, en outre, de confirmer de façon infaillible la différenciation du substratum par rapport aux couches alluviales, que les simples tests statistiques unilatéraux sur les moyennes des différentes rubriques analytiques avaient déjà mise en évidence de façon significative. Le substratum ayant lui-même dans la basse vallée une origine alluviale, il présente généralement un comportement granulométrique de couche de surface qui tranche d'autant mieux avec les couches alluviales profondes qui le recouvrent directement.

L'analyse des couches intermédiaires a, en outre, mis en évidence une anomalie dans la succession granulométrique verticale : une couche plus grossière repose sur une couche plus fine aux environs de 5 à 10 cm de profondeur en moyenne et laisse supposer l'existence de deux séries alluviales superposées nettement visibles sur les différents profils normés effectués sur les principales rubriques analytiques. L'interprétation de cette superposition a été recherchée sur le plan hydrologique par l'analyse de l'hydrogramme de la crue : l'existence d'une seule pointe sur la courbe ne permet pas d'attribuer les deux dépôts à deux crues successives mais à une seule crue ; par contre, la montée de crue très rapide, probablement très chargée en transport solide en raison de sa vitesse, correspondrait au premier dépôt de beaucoup le plus important, alors que la décrue plus lente, de capacité de transport plus faible, mais dans le cas présent très étalée et prolongée en raison des lâchures du barrage sur l'oued Mellègue, correspondrait au second dépôt. Il est évident que des mesures de transports solides effectuées tout au long de la crue et décrue eussent été utiles pour confirmer cette hypothèse.

Latéralement : on constate en général une distribution continue de plus en plus fine au fur et à mesure de l'éloignement du lit, selon les lois de la sédimentation, quelque peu perturbée par la microtopographie et les aménagements agricoles, mais allant toujours dans le même sens. Cette distribution se retrouve aussi bien dans le cas d'épandages dans la plaine alluviale que dans le lit majeur endigué.

Les analyses ont, en outre, montré une répartition granulométrique anormalement grossière à proximité d'obstacles ayant perturbé l'écoulement dans le lit. La dimension des particules déposées étant directement en relation avec l'importance et la morphologie de l'obstacle.

Longitudinalement : en raison de la présence de nombreux obstacles apportant de plus ou moins grandes anomalies dans la distribution granulométrique au sein des alluvions, il est difficile de trouver des conditions de dépôts identiques indispensables pour mettre en évidence une éventuelle variation longitudinale. En outre, des conditions externes, telles que la microtopographie ou la nature des sols inondés, peuvent intervenir pour influencer secondairement le dépôt. Néanmoins, les analyses permettent de constater au sein des alluvions une tendance à une diminution de la taille des particules granulométriques surtout calcaires, de l'amont vers l'aval, et en particulier dans l'ancien lit, qui pourrait correspondre, sinon à une usure, du moins à une vitesse plus lente et une sédimentation plus fine.

Ces différentes constatations montrent que la distribution granulométrique de tels dépôts alluviaux ne répond pas aux seules lois de la sédimentation mais est fortement influencée, soit par des facteurs externes au cours d'eau, soit par des facteurs internes tels que la vitesse des eaux et la nature des obstacles qui déterminent directement la dimension des particules en suspension dans la nappe de débordement.

Cette étude permet, en outre, de souligner l'importance de la méthodologie employée pour sa réalisation, en particulier au niveau des prélèvements qui doivent être systématiques sur toute la partie du bassin concernée, et au niveau des dépouillements, qui doivent obligatoirement passer par les méthodes statistiques qui sont les seules susceptibles d'analyser ces processus sédimentologiques très complexes car ils sont régis par des phénomènes évoluant dans chacune des trois dimensions. Il est en outre très recommandable que de telles études s'appuient sur le maximum de données hydrologiques de base qui, seules, permettent de confirmer ou d'infirmer les différentes interprétations formulées sur le plan sédimentologique.

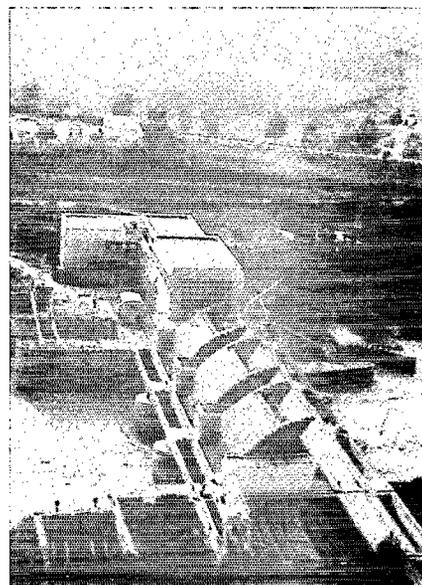
BIBLIOGRAPHIE

- [1] Amiral (P.) BARJOT — « Le golfe d'Utique dans l'antiquité. Le destin d'Utique, de Carthage et de Bizerte. Suivi d'une note sur la chronologie des remblayages de la Medjerda et le comblement du golfe d'Utique dans l'antiquité ». Extrait de la *Revue Générale d'Hydraulique*, mars-avril 1952.

- [2] COLLET (CL.) – « Les moyens mis en œuvre en Tunisie pour l'étude des crues de la Medjerda ». Extrait de *La Houille blanche*, n° 3, juin-juillet 1953.
- [3] CRUETTE (J.), DUBEE (G.), GUALDE (R.) et RODIER (J.A.) – 1971 – *L'oued Zéroud. Mesure de débits pendant les crues exceptionnelles de l'automne 1969*. ORSTOM/DRES, Tunis.
- [4] DURAND (J.H.) – 1958 – *Les sols irrigables*. S.E.S., Alger.
- [5] DURAND (J.H.) – 1973 – *Utilisation des eaux salines pour l'irrigation*, B.T.I. 276.
- [6] JAUZEIN (A.) – 1971 – *Les agents de la morphogénèse. 1 – Les eaux courantes. Document : Evolution récente du delta de la Medjerda*. E.N.S., Paris.
- [7] KALLEL (R.) et COLOMBANI (J.) – *Les crues exceptionnelles de mars 1973 en Tunisie*. DRE-Tunis, Ronéo, octobre 1973.
- [8] LEBRETON (J.C.) – 1974 – *Dynamique fluviale*. Collection de la Direction des Études et Recherches d'E.D.F. Eyrolles, Paris.
- [9] LELIAVSKY (S.) – 1961 – *Précis d'Hydraulique fluviale*. Dunod, Paris.
- [10] Ministère de l'Agriculture, DRES-ORSTOM – *Monographie de la Medjerda*. DRE-Tunis, ronéo, décembre 1974.
- [11] Neyrpic (Grenoble) – *Travaux Publics de Tunisie : Oued Medjerda – Synthèse des Campagnes de Mesures (1947 à 1949-50)*, ronéo, Tunis, décembre 1971.
- [12] PONCET (J.) – 1970 – « La catastrophe climatique de l'automne 1969 en Tunisie », *Annales de Géographie*, p. 581-595.
- [13] TIXERONT (J.) – 1960 – *Les débits solides des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie*. Secrétariat d'État à l'Agriculture, Tunis, H.A.R.
- [14] CLAUDE (J.), FRANCILLON (G.) et LOYER (J.Y.) – *Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors de la crue exceptionnelle de mars 1973*. Direction des Ressources en Eau et en Sols, Tunis, mai 1976.
- [15] Résultats de mesures et documents non publiés au Service Hydrologique de la Division des Ressources en Eau, Tunis.

PLANCHE I

Barrage d'El Aroussia le 31 mars 1973 les trois pertuis levés (photo Claude)



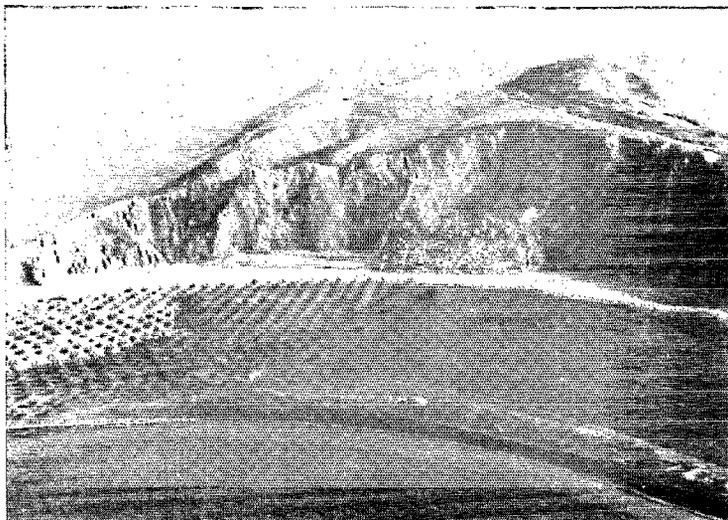
Coupure de méandre en haute vallée à l'aval de Bou Salem le 31 mars 1973 (photo Delhumeau)



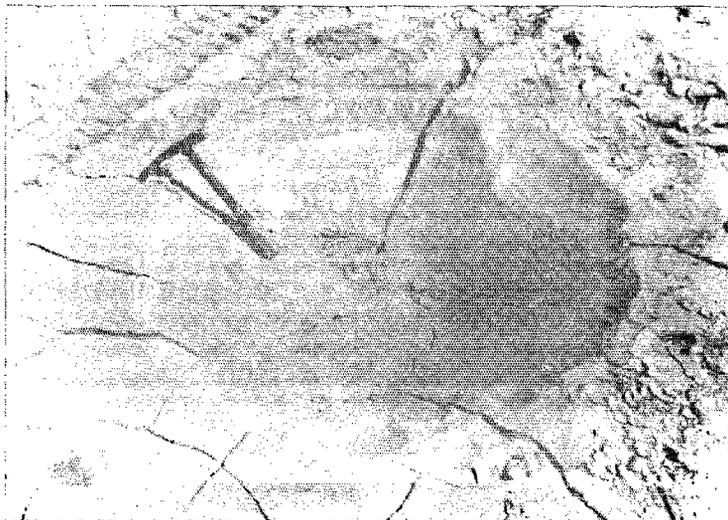
Barrage d'El Bathan. Vue générale du pont (2 avril 1973) (photo Gualde)

PLANCHE II

Effondrement de berges en moyenne vallée (photo Loyer)

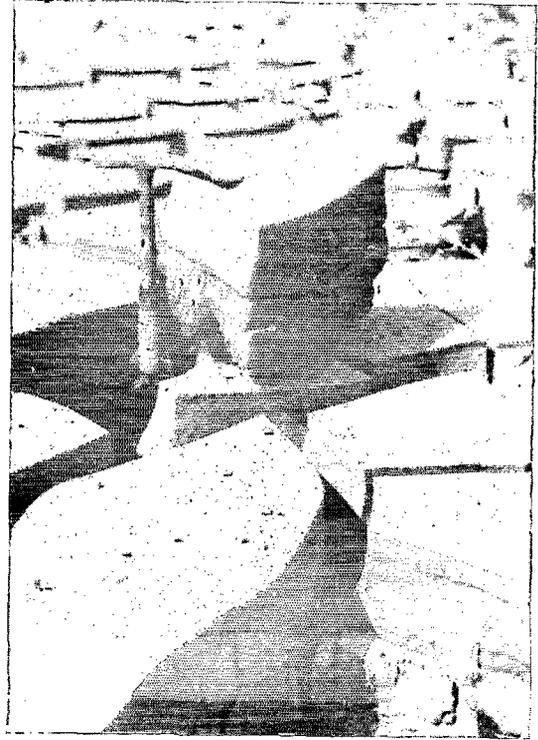


Orangerie d'El Bathan ensablée sous 1 m à 1,50 m d'alluvions (photo Loyer)



Forme de dépôt en cuvette (photo Loyer)

PLANCHE III Premier stade de fissuration des dépôts argilo-limoneux
(photo Loyer)



Deuxième stade de fissuration horizontale des dépôts argilo-limoneux (photo Loyer)

