

# Mesures de débits de l'oued Zeroud pendant les crues exceptionnelles de l'automne 1969

J. CRUETTE

Maître de Recherches à l'O.R.S.T.O.M.

J.-A. RODIER

Conseiller scientifique à E.D.F.

Chef du Service hydrologique de l'O.R.S.T.O.M.

G. DUBÉE

Hydrologue de l'O.R.S.T.O.M.

R. GUALDE

Hydrologue de l'O.R.S.T.O.M.

La mesure des débits de crues exceptionnelles pour la plupart des régimes méditerranéens est une opération très difficile qui décourage très souvent les hydrologues.

Elle est pourtant d'un intérêt capital. Quelle que soit la méthode d'estimation des crues que doivent supporter les ouvrages de génie civil, on utilise toujours, directement ou non, les valeurs des plus forte débits observés. On peut même dire que les deux facteurs les plus importants de cette estimation sont d'une part, la détermination correcte de ces débits observés, et, d'autre part, la bonne adaptation de la relation statistique choisie (méthode guère recommandable pour ce genre de régime) ou des relations précipitations-débits aux processus de l'écoulement propres aux rivières étudiées.

Des exemples nombreux ont montré que si les hydrologues se contentaient simplement de mesurer le tiers ou le quart du maximum moyen annuel au lieu du maximum réel lui-même, on était conduit à des erreurs atteignant facilement 100% sur la

crue décennale et beaucoup plus, bien entendu sur la crue centenaire ou la crue maximale probable.

Dans le cas particulier de l'Afrique du Nord, il est essentiel de pouvoir disposer de quelques chiffres sûrs pour la mise au point de très nombreux projets de barrages. Indiquons simplement qu'en une vingtaine d'années, l'estimation de la crue centenaire de l'Oued Zeroud est passée de 5 000 m<sup>3</sup>/s à peut-être 30 000 m<sup>3</sup>/s par suite du développement des mesures de débit de crue. On voit que l'entêtement de certains hydrologues à mesurer les débits de crues ne procède pas d'une recherche maladroite de la précision, mais qu'il s'agit tout simplement d'obtenir des bases correctes pour la mise au point des projets.

Ceci avait parfaitement été compris par les hydrologues tunisiens, français et allemands de la Direction tunisienne des Ressources en Eau et en Sol, qui, sous les ordres de son chef, M. Ahmed Khouadja, et de M. Habib Zebidi, chef de la Division des Ressources Hydrauliques, se sont efforcés depuis plusieurs années d'obtenir des mesures de crues correctes sur l'Oued Zeroud, un des cours d'eau les plus dangereux de la Tunisie.

Ce genre de mesures présente trois types de difficultés d'ordre différent.

- 1) Il faut être sur place au moment de la pointe de la crue.
- 2) La mesure des très fortes vitesses, par exemple plus de 5 m/s, est pratiquement impossible avec les appareils courants, tels que les moulinets.
- 3) Les rivières méditerranéennes sont souvent à lit mobile; dans ce cas, la connaissance du profil en travers au moment de la cote maximale ou de la vitesse maximale est indispensable et c'est là le plus grand obstacle à la bonne détermination du débit maximal.

La présente note expose comment, pour un des oueds les plus torrentiels de l'Afrique du Nord, les hydrologues de la Direction des Ressources en Eau et de l'O.R.S.T.O.M. ont surmonté ces difficultés au cours des crues de l'automne 1969, et les résultats qu'ils ont déduits de leurs mesures.

\*  
\* \*  
\*

## **1. Caractéristiques principales de l'Oued Zéroud et de la station principale de Sidi-Saad**

L'Oued Zeroud draine à la station de Sidi Saad Z/8 une partie importante (8 950 km<sup>2</sup>) du centre de la Tunisie (fig. 1).

Le climat est méditerranéen avec des tendances très nettes à l'aridité. La hauteur de précipitations annuelles varie en effet de 600 mm à un peu moins de 200 mm, plus de 60% du bassin recevant entre 200 mm et 400 mm par an. L'été est très sec avec des précipitations mensuelles très faibles en général de juin à septembre.

Les précipitations les plus fortes se produisent irrégulièrement entre fin septembre et mai. Celles qui donnent lieu aux crues importantes correspondent à des épisodes pluvieux de plusieurs jours couvrant de vastes surfaces. La neige n'est pas un phénomène négligeable pour l'hydrologie du bassin, mais elle ne joue pratiquement aucun rôle dans la genèse des fortes crues.

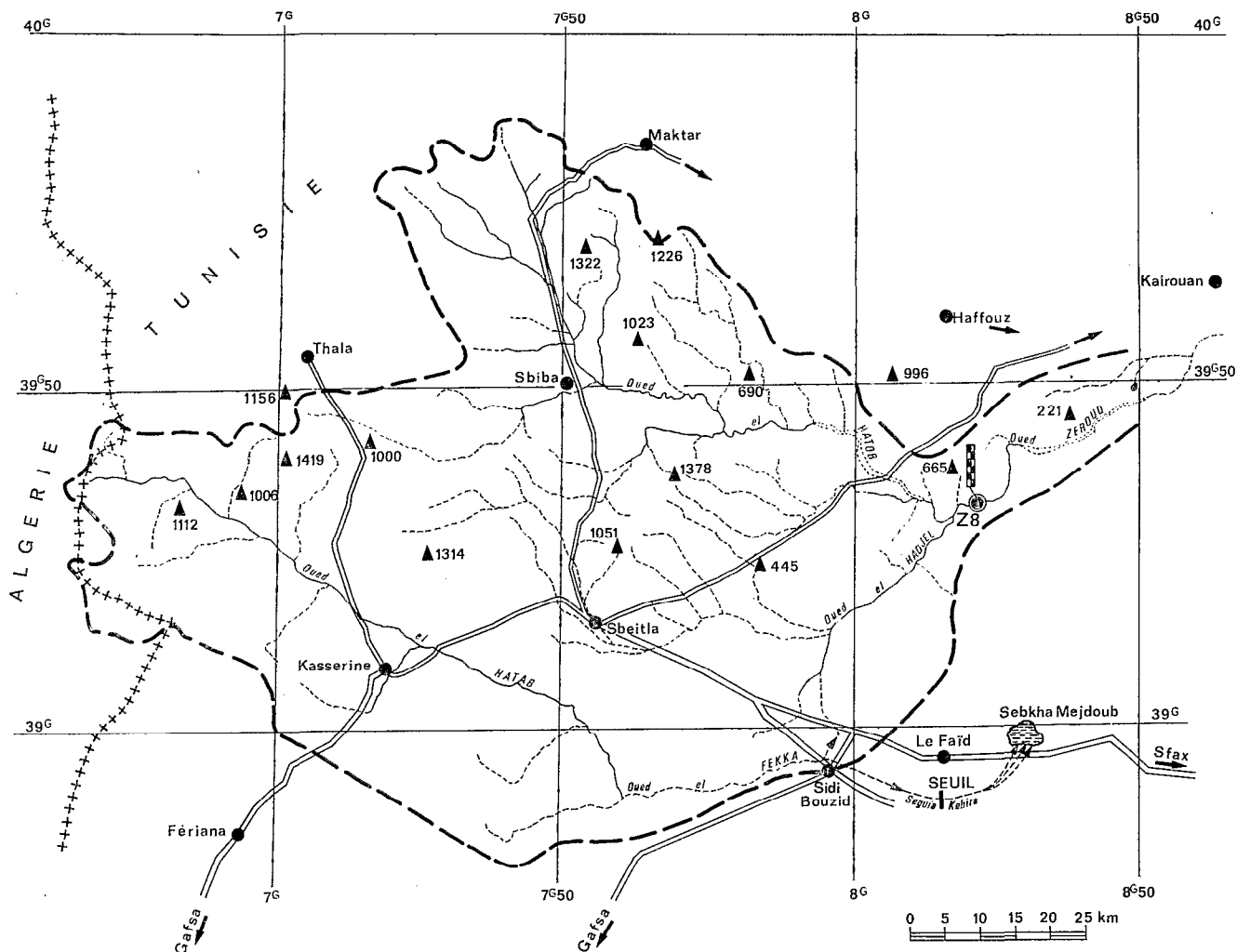


Fig. 1 — BASSIN VERSANT DE L'OUED ZEROUD.

Le bassin, dont l'altitude varie entre 200 et 1 350 mètres, présente des versants à assez forte pente, surtout vers la dorsale tunisienne où la plupart des tributaires prennent leur source.

La constitution géologique est complexe surtout dans la dorsale. Sur les croupes et les versants la perméabilité peut varier dans de larges limites; il y a même quelques zones karstiques dont le développement est assez faible mais, en général, les sols sont constitués de marnes ou de sables marneux ou argileux peu perméables. Dans les vallées, les alluvions sont souvent perméables et on trouve des nappes assez profondes particulièrement intéressantes, mais la superficie couverte par ces alluvions est insuffisante pour que le ruissellement provenant des versants y soit freiné de façon efficace. Le sol du bassin versant est donc dans l'ensemble favorable au ruissellement, et ce n'est ni la végétation naturelle assez clairsemée, ni les cultures assez maigres qui pourraient apporter une compensation.

Le régime hydrologique peut être présenté très brièvement comme suit:

A la station de Sidi Saad, la valeur médiane du volume annuel est de  $77,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  correspondant à un module annuel théorique de  $2,46 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit  $0,27 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ . En fait, ce module varie très largement d'une année à l'autre en relation avec l'importance des plus fortes crues; les valeurs décennales sèches et humides sont respectivement de  $0,98$  et  $6,34 \text{ m}^3/\text{s}$ . La distribution statistique est nettement asymétrique.

Les crues se produisent surtout à l'automne et sont particulièrement violentes. La valeur maximale annuelle du débit est généralement comprise entre  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ , mais elle peut occasionnellement être beaucoup plus élevée. Le débit d'étiage que l'on observe en août ou début septembre est compris entre  $100$  et  $250 \text{ l/s}$ ; il n'est jamais nul.

La distribution saisonnière des débits correspondant à la valeur médiane des modules, donnée plus haut, serait la suivante (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ):

S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
$\frac{4,4}{4,4}$	$\frac{8,3}{8,3}$	$\frac{1,7}{1,7}$	$\frac{1,0}{1,0}$	$\frac{1,1}{1,1}$	$\frac{1,1}{1,1}$	$\frac{1,6}{1,6}$	$\frac{1,6}{1,6}$	$\frac{2,16}{2,16}$	$\frac{2,56}{2,56}$	$\frac{1,4}{1,4}$	$\frac{2,56}{2,56}$

Ces valeurs sont peu significatives; on peut voir simplement que les crues se produisent en septembre et octobre, quelquefois en mai. Pour les autres mois, il suffit d'un certain nombre d'années avec des mois de juillet ou d'août abondants pour masquer l'étiage qui se produit pourtant bien régulièrement entre le 15 août et le 10 septembre.

De façon générale, le régime de l'Oued Zeroud est particulièrement capricieux; il passe parfois de  $100 \text{ l/s}$  à plus de  $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$  en quelques minutes et, fait aggravant, le flot de crue va inonder la ville de Kairouan. Une seule crue telle que celle de 1964 peut apporter en 48 heures 200 millions de mètres cubes, soit près de trois fois le volume annuel médian avec un débit maximum de  $8\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 2. Equipement de la station

La station principale est située à Sidi Saad et depuis vingt ans elle fait l'objet de soins attentifs de la part des hydrologues. La superficie contrôlée est, nous le rappelons, de  $8\,950 \text{ km}^2$ .

La première station a été installée le 21 mars 1945 sur la rive gauche (point S.-O. 18), sur un éperon rocheux qui coupe la vallée de l'Oued Zeroud, au niveau de la mine de Djebel Touila à  $47 \text{ km}$  au sud-ouest de Kairouan, juste avant la zone d'élargissement de l'Oued que l'on observe entre les rétrécissements correspondant à la traversée des deux derniers chaînons avant la plaine de Kairouan.

Le limnigraphe a été détérioré par une crue en 1946, remis en marche le 26 mars 1946, et démonté le 24 juillet 1952.

Une seconde station (S.-O. 20) a été installée en 1950 au pied de Djebel El Adina à  $1\,200 \text{ m}$  environ à l'amont de la précédente sur un seuil de contrôle rocheux généralement ensablé mais dégagé par certaines fortes crues, en particulier celle de septembre 1969. La station existait avant le 27 septembre 1969; elle a eu une histoire tourmentée.

Les échelles, un manomètre Richard et un téléphérique ont été installés le 17 mars 1950. Le manomètre a été supprimé le 1<sup>er</sup> septembre 1954.

Les échelles ont été :

<u>emportées</u>	<u>réinstallées</u>
— le 8 avril 1952 (?)	— le 25 avril 1952
— en 1953	— le 23 novembre 1953
— le 15 avril 1954	— le 19 mai 1954
— le 6 octobre 1957	— le 10 décembre 1957.

Le téléphérique a été emporté et réinstallé en octobre 1953, en octobre 1957, et définitivement emporté en octobre 1964.

Le 27 septembre 1969, la station a été submergée sous 5 ou 6 m d'eau. La crue a détruit ou emporté la maison de l'observateur, l'abri du téléphérique et le limnigraphe. Seuls ont résisté deux éléments d'échelle.

Une troisième station a été installée en 1967 sensiblement au même emplacement que la première, mais le limnigraphe et les échelles sont contre la petite falaise qui surplombe la rive droite de l'Oued. Le téléphérique de cette station est implanté à 160 m à l'aval du limnigraphe, exactement à l'aplomb de la barre rocheuse qui, sous le sable du lit, constitue lors de très grandes crues une section de contrôle; mais la plupart du temps, elle est recouverte et le lit est instable. On reviendra plus loin sur ces dispositions.

L'exploitation des résultats de la première station est impossible jusqu'ici, et celle de la seconde est difficile car le manomètre Richard n'a jamais fonctionné; la qualité des lectures de l'échelle est quelquefois mauvaise et les périodes pendant lesquelles les échelles étaient emportées donnent lieu à des lacunes aux moments les plus intéressants. Mais, étant donné les effets des crues de l'Oued Zeroud sur la ville de Kairouan, aucune crue vraiment importante n'aurait pu passer inaperçue.

Le téléphérique de cette seconde station a souvent été confié à des observateurs recrutés sur place, d'une formation insuffisante, et le saumon trop léger refusait d'entrer dans l'eau pour les fortes vitesses, de sorte qu'avant 1966 il n'existait pas de mesures de débits précises et sûres pour les fortes crues.

Une reconstitution des débits a été faite en 1965 pour quatorze années d'observations dans le dossier hydrométrique de la station de Sidi Saad. Cette étude sera reprise à la lumière des données recueillies en 1969.

La troisième station a été équipée avec des moyens plus importants et un plus gros effort a été fait en ce qui concerne le personnel.

Le limnigraphe OTT a été mis en service le 2 mai 1967 et le téléphérique lourd a été installé en juin 1967.

Le limnigraphe OTT donnait satisfaction dans la mesure où un enregistreur de niveau peut fonctionner dans les conditions extrêmement dures des crues exceptionnelles de l'Oued Zeroud. Le téléphérique OTT de 180 m de portée était équipé d'un saumon de 100 kg, poids minimum pour effectuer des jaugeages de crues.

Un poste radio, en liaison avec celui de Tunis, avait été installé pour l'annonce des crues et en particulier pour prévenir les autorités de Kairouan des risques d'inondation.

Depuis l'installation de la troisième station, G. DUBEE, hydrologue de l'O.R.S.T.O.M., était responsable du fonctionnement de ce dispositif et en très peu de temps il avait formé l'observateur en titre, Mohamed FAIDI, pour l'emploi du poste radio et du téléphérique.

En 1969, avant les crues, de nombreux jaugeages étaient effectués à la station, dont le lit, rappelons-le, est instable, au rythme de un tous les deux jours en étiage et environ un toutes les quatre heures en crue. De nombreuses petites pointes de crues ont pu être mesurées et le personnel était parfaitement rompu à la manœuvre du téléphérique.

Des vacances régulières de radio étaient assurées au rythme de deux par jour en période calme, et d'une toutes les heures ou toutes les deux heures en crue. L'annonce des crues était déjà convenablement organisée et avait eu de très nombreuses occasions de fonctionner avant les crues, de sorte qu'en septembre 1969 elle était tout à fait opérationnelle.

Au cours des crues de 1969, le fonctionnement régulier de cette station a exigé des efforts opiniâtres des hydrologues; en particulier, il a été nécessaire d'immobiliser une jeep dont le moteur a tourné sans arrêt plusieurs jours pour alimenter l'émetteur, l'approvisionnement en essence se faisant par hélicoptère. Ces vacances radio ont contribué à sauver de nombreuses vies humaines puisque les prévisions qu'elles permettaient laissaient aux autorités de Kairouan une dizaine d'heures (sept dans les cas les plus défavorables) pour prendre leurs dispositions.

### **3. Observations et mesures pendant l'automne 1969**

#### **3.1. Chronologie des crues de septembre et octobre 1969**

Nous n'étudierons pas systématiquement dans la présente note la genèse des crues de septembre et d'octobre 1969; nous nous contenterons, dans le chapitre « Résultats », de donner quelques indications.

Le 30 août, arrive à la station Z 8 une première crue qui se poursuit le 31, donnant lieu à un débit maximal de 2 400 m<sup>3</sup>/s, le débit redescend à 0,5 m<sup>3</sup>/s le 5 septembre.

Une nouvelle crue survient le 6 septembre avec un débit maximum de 290 m<sup>3</sup>/s, puis le débit revient à 0,4 m<sup>3</sup>/s jusqu'au 22 septembre où une crue secondaire atteint 104 m<sup>3</sup>/s.

Le 25 septembre, commence une série de crues dont la plus importante se produira le 27 à 13 h 30, avec une cote exceptionnelle de 10,90 m à l'échelle; un tarissement rapide ramène le débit à 2 m<sup>3</sup>/s le 1<sup>er</sup> octobre.

Après une petite crue de 250 m<sup>3</sup>/s le 3 octobre, on a observé le 6 une crue estimée à 11 400 m<sup>3</sup>/s, correspondant à 8 m à l'échelle. Il est bien évident que les sols du bassin sont saturés, de sorte que le coefficient de ruissellement dû aux derniers épisodes pluvieux est voisin du maximum possible. Le débit retombe le 15 à 2,3 m<sup>3</sup>/s.

Les 22 et 23 octobre, une nouvelle crue atteint la cote 6,50 m, correspondant à 7 800 m<sup>3</sup>/s. Le 26, le débit est redescendu à 3 m<sup>3</sup>/s.

Le 27, une dernière crue en plusieurs épisodes produit un débit maximal de 6 800 m<sup>3</sup>/s, correspondant à la cote 5,15 m.

Depuis le 26 septembre, quatre crues ont dépassé 6 500 m<sup>3</sup>/s. Parmi celles-ci, trois ont atteint ou dépassé 8 000 m<sup>3</sup>/s.

### **3.2. Personnel disponible à la station**

L'observateur, M. FAIDI, n'a pas quitté la station et a assuré les vacations radio toutes les heures, presque sans défaillance, du 24 septembre au 2 novembre. Comme on l'a indiqué plus haut, il connaissait parfaitement, avant les crues, son double métier d'opérateur radio et d'assistant hydrométriste.

Le dispositif d'annonce des crues a permis de prévenir les autorités de Kairouan de l'arrivée d'une crue cinq à huit heures avant que les inondations ne commencent au niveau de la ville. Il a permis aussi, avant la grande crue du 26 septembre, d'alerter le responsable, G. DUBEE, qui a rejoint la station en temps utile.

G. DUBEE, avec une expérience de quinze ans de mesures de débits de crues, a pu alors procéder à des mesures dont le caractère n'était plus classique. La formation acquise par M. FAIDI à cette occasion jusqu'à fin septembre lui a permis d'effectuer les mêmes opérations pour la crue du 6 octobre, après le départ de G. DUBEE.

Le 27 octobre, R. GUALDE, autre hydrométriste de l'O.R.S.T.O.M., qui a rejoint par hélicoptère la station pour apporter un groupe électrogène, est bloqué par la dernière série de crues. Comme on le verra plus loin, il pourra procéder à une série de mesures extrêmement importantes.

Ainsi, une des conditions essentielles à remplir: présence des spécialistes sur le terrain aux bons moments, a été remplie grâce à certaines circonstances heureuses, mais grâce surtout à l'organisation du B.I.R.H. où l'on s'était promis de mesurer les débits de crues de l'Oued Zeroud quelles qu'elles soient, et où toutes dispositions avaient été prises pour assurer le bon fonctionnement du service d'annonce des crues.

### **3.3. Mesures des hauteurs d'eau**

Les lectures à l'échelle limnimétrique ont été pendant toute la période des crues d'une très bonne régularité et d'une qualité satisfaisante. Si, par la suite, nous avons été amenés à faire quelques critiques sur la détermination précise des moments auxquels ont été effectuées certaines lectures, il faut se souvenir que M. Mohamed FAIDI a assuré une vacation radio toutes les heures pendant toutes les crues, et que l'opération n'était pas facile.

Pendant les plus hautes eaux, des vagues dépassant un mètre d'amplitude ont mis rapidement le limnigraphe hors d'usage. Les lectures faites étaient une moyenne entre le « haut » et le « bas » des vagues, ce qui demandait parfois d'observer l'échelle limnimétrique pendant plusieurs minutes. Si l'on ajoute que l'échelle et le limnigraphe sont à 160 m du téléphérique et du poste radio, et que la station ne dispose que d'un seul réveil, on comprendra que l'heure de chaque lecture n'est pas très précise et n'est connue qu'à cinq ou dix minutes près.

Les pointes des plus fortes crues se sont produites pendant que les opérateurs étaient en plein travail à la station; aucun maximum secondaire n'a pu leur échapper.

Nous pouvons considérer que le limnigramme de toutes les crues est connu avec une assez bonne précision. Nous en donnons le tracé en annexe pour toutes les crues importantes.

### 3.4. Mesures régulières de débit

Le 31 août, M. FAIDI a réussi une mesure complète au téléphérique (n° 101); le débit était de 1 050 m<sup>3</sup>/s, section mouillée 338 m<sup>2</sup>, vitesse moyenne 3,09 m/s. Dix-sept mesures régulières ont été faites entre le 31 août et le 25 septembre (nos 102 à 118) pour des débits beaucoup plus faibles que celui du jaugeage n° 101 (moins de 145 m<sup>3</sup>/s).

LISTE DES JAUGEAGES AU TÉLÉPHÉRIQUE  
(Période précédant les crues 1969)

N°	Dates	Heures		H		V moyenne	S. totale	S. réelle
101	31-08	3 h 00	6 h 50	313	220	3,090	787	338
102	31-08	8 h 10	10 h 20	220	222	1,530	738	50
103	31-08	12 h 00	13 h 55	210	210	1,300	725	35
104	01-09	8 h 10	9 h 45	227	225	1,660	744	37
105	01-09	12 h 40	13 h 35	222	218	1,010	737	36
106	01-09	17 h 00	17 h 58	217	217	1,150	733	26
107	06-09	1 h 10	4 h 00	240	276	1,600	782	88
108	06-09	4 h 30	8 h 00	276	266	1,600	798	90
109	06-09	8 h 00	10 h 10	260	260	1,715	785	65
110	06-09	13 h 55	15 h 04	243	242	1,290	764	30
111	09-09	1 h 00	2 h 30	248	244	1,230	768	32
112	09-09	8 h 07	9 h 20	240	243	0,870	762	24
113	09-09	11 h 00	13 h 10	241	241	0,830	762	22
114	09-09	16 h 30	16 h 50	239	239	0,815	759	15
115	22-09	7 h 30	11 h 00	242	245	1,010	764	38
116	22-09	12 h 55	14 h 50	255	252	1,300	777	48
117	22-09	17 h 20	18 h 50	255	249	1,216	775	28
118	25-09	08 h 20	9 h 45	243	243	0,780	764	13

Le 26 septembre, M. G. DUBEE tente des mesures au téléphérique, mais il est impossible de procéder à des mesures sur toute la profondeur et de trouver le fond. Les mesures sont donc effectuées en surface. Sept mesures ont pu être faites de 6 h 42 à 12 h 42. La vitesse moyenne de surface la plus élevée: 5,532 m/s, correspond à la mesure n° 2 entre 7 h 23 et 7 h 46, pour une cote comprise entre 5,40 m et 5,80 m à l'échelle, la vitesse maximale ponctuelle mesurée était de 6,28 m/s vers le milieu de la section. La mesure n° 7 a été faite entre 12 h 04 et 12 h 42 au moment d'une remontée des débits; la plus forte vitesse ponctuelle mesurée au moulinet atteignait 6,39 m, toujours vers le milieu de la section; au moment où cette mesure ponctuelle a été faite, le débit dépassait 4 000 m<sup>3</sup>/s.

A partir du 26 après-midi, les mesures ont été faites au flotteur. Pour plus de 5 m/s, les débris flottants et les paquets d'herbes rendaient extrêmement difficile l'emploi du moulinet.

Le 27 septembre, pour la cote 10 m, le saumon avec son équipement ne pouvait même plus rentrer dans l'eau.

A partir du 30 octobre, R. GUALDE reprenait les mesures au moulinet et effectuait trois jaugeages dont l'importance est capitale pour la connaissance des conditions de remblaiement de la section:

- 30 octobre 1969, de 8 h 30 à 11 h 15,  
débit: 426 m<sup>3</sup>/s; cote du fond: — 9 m;



- 30 octobre 1969, de 15 h 20 à 17 h 00,  
débit: 226 m<sup>3</sup>/s; cote du fond: — 8,15 m;
- 31 octobre 1969, de 8 h 30 à 10 h 45,  
débit: 45 m<sup>3</sup>/s; cote du fond: — 1,35 m.

Les vitesses moyennes dans la section étaient respectivement de 0,90 m/s, 0,69 m/s, 0,80 m/s, pour des hauteurs moyennes à l'échelle de: — 0,20 m, — 0,80 m et — 1 m.

### 3.5. Mesures de vitesse au flotteur

Le 26 septembre à 16 h 32, G. DUBEE et son équipe ont abandonné les mesures au moulinet et entrepris les mesures au flotteur.

Toute utilisation de flotteur artificiel était exclue. A supposer qu'on ait pu le lancer, on ne l'aurait pas vu au milieu des vagues. En outre, il est possible que ces petits flotteurs aient une vitesse supérieure à la vitesse superficielle de l'eau. On ne pouvait donc utiliser que des flotteurs naturels assez gros, principalement des arbres entiers; le fait qu'une partie importante était immergée garantissait une vitesse peu différente de celle de l'eau. On verra plus loin que la mesure a été faite au-dessus de la crête d'un déversoir naturel pas très épais qui, par moments, a émergé du sable. La vitesse d'un gros flotteur correspondait en fait à la vitesse moyenne longitudinale sur 150 m d'une ligne d'eau, vitesse peut-être un peu plus faible que la vitesse maximale sur cette ligne d'eau. Nous négligerons cet écart.

La base longitudinale était de 148 m, longueur un peu faible, mais c'était à la fois la longueur limite pour organiser avec les moyens disponibles une bonne détermination du temps de parcours et de la position du flotteur dans le profil en travers. La base était limitée à ses deux extrémités par une ligne idéale entre deux repères bien visibles d'une part, et le câble du téléphérique d'autre part.

Pour repérer la position des flotteurs, on avait abaissé le saumon à une cote assez voisine du plan d'eau, à 70 m exactement de la rive droite où se tenaient les hydrologues. On estimait à vue assez facilement les distances entre la rive droite et le saumon, et jusqu'à 100-110 m de la rive droite. Très peu de points ont été pris sur la rive droite. C'est sans importance, puisque, comme on l'a vérifié pour de nombreuses mesures (mesures 19 et 20), le courant était bien centré dans l'axe de la section et la vitesse vers la rive gauche était nettement plus faible qu'au centre, du même ordre de grandeur que la vitesse vers la rive droite.

L'estimation à vue conduisait peut-être à une erreur maximale de 10 m. Les variations de la vitesse dans le profil en travers étaient assez progressives, sauf à proximité des rives; il n'en résultait aucune erreur notable sur l'estimation de la vitesse moyenne.

Un dispositif très simple de signalisation permettait de mesurer convenablement le temps de parcours des flotteurs, toujours supérieur à 13 secondes, et plus généralement à 16 secondes.

Cette technique a été utilisée le 27 septembre de 6 h 24 à 18 h 07, et pendant les crues suivantes, soit par R. GUALDE et M. FAIDI, soit par M. FAIDI et un manoeuvre.

Au total, la vitesse de 600 objets flottants a été ainsi mesurée.

Toutes les mesures ont été regroupées par nombre de 5 à 10, en veillant à ce que dans chaque groupe les trajectoires soient bien réparties sur toute la largeur de l'Oued et les hauteurs à l'échelle ne varient pas trop. Nous disposons ainsi de 52 vitesses moyennes données dans le tableau des mesures.

OUED ZEROUD A SIDI SAAD  
TABLEAU DES MESURES DE VITESSES SUPERFICIELLES  
(Septembre-Octobre 1969)

N°	Date	Heures		H	V	N°	Date	Heures		H	V		
		h m	h m					h m	h m				
1	26-09	06,42	— 07,15	500	— 530	4,973	27	27-09	17,10	— 15,37	650	7,110	
2	26-09	7,23	— 7,46	540	— 580	5,532	28	27-09	17,38	— 18,07	550	6,330	
3	26-09	8,00	— 8,38	580	— 570	4,917	29	03-10	8,20	— 8,48	—120	—120	2,140
4	26-09	8,48	— 9,04	570	— 560	4,704	30	03-10	8,51	— 9,15	—120	—128	2,288
5	26-09	10,16	— 10,48	490	— 460	3,908	31	03-10	9,18	— 9,40	—128	—130	2,310
6	26-09	10,48	— 11,15	460	— 435	3,590	32	06-10	15,47	— 16,00	065	— 100	4,350
7	26-09	12,04	— 12,42	400	— 440	4,800	33	06-10	16,01	— 16,13	100	— 135	4,282
8	26-09	16,32	— 16,55	488	— 477	5,144	34	06-10	16,15	— 16,25	135	— 175	4,230
9	26-09	16,58	— 17,29	474	— 462	5,240	35	06-10	16,27	— 16,40	200	— 265	4,350
10	26-09	17,30	— 17,56	462	— 460	5,460	36	06-10	17,05	— 17,25	425	— 525	5,890
11	27-09	6,24	— 6,31	750	— 770	6,920	37	06-10	17,26	— 17,47	530	— 635	6,180
12	27-09	6,56	— 7,02	825	— 832	7,340	38	06-10	17,49	— 18,30	650	— 765	6,230
13	27-09	7,03	— 7,15	834	— 850	7,030	39	27-10	9,30	— 9,40	250	— 280	3,160
14	27-09	8,39	— 8,53	770	— 790	7,380	40	27-10	13,20	— 13,50	500	— 500	6,140
15	27-09	8,56	— 9,08	794	— 810	7,127	41	27-10	15,25		490	— 485	5,630
16	27-09	9,08	— 9,26	810	— 850	7,342	42	27-10		16,35	485	— 485	6,070
17	27-09	11,07	— 11,27	925	— 940	7,550	43	28-10	6,30	— 7,00	200	— 200	4,870
18	27-09	11,43	— 11,48	968	— 978	8,400	44	28-10	7,20	— 7,30	200	— 200	4,860
19	27-09	12,09	— 12,19	1018	— 1035	8,500	45	28-10	9,20	— 9,35	160	— 155	3,540
20	27-09	12,36	— 12,56	1070	— 1090	7,500	46	28-10	11,20	— 11,50	050	— 040	2,780
21	27-09	14,40	— 15,07	1075	— 1030	7,900	47	29-10	9,20	— 9,40	280	— 285	5,189
22	27-09	15,08	— 15,22	1024		7,800	48	29-10	10,45		250	— 250	4,160
23	27-09	15,24	— 15,34	810		7,550	49	29-10		11,00	250	— 250	4,850
24	27-09	15,36	— 15,50	756		7,400	50	29-10	12,45	— 13,50	210	— 210	4,528
25	27-09	15,52	— 16,11	723		7,400	51	29-10	13,50	— 14,20	210	— 205	4,170
26	27-09	16,47	— 17,07	656		7,230	52	29-10	14,20	— 14,30	205	— 200	4,210

On trouvera ci-dessous la reproduction du carnet des hydrologues pour les mesures n<sup>os</sup> 18 et 19 qui correspondent aux plus fortes vitesses moyennes.

Les cotes à l'échelle correspondent à des moyennes établies à partir des lectures et de l'examen du limnigramme. On les a données de 5 en 5 cm pour marquer la *progression* de la crue telle qu'elle apparaît sur le limnigramme qui n'est plus un trait mais une *large bande*. Il ne faudrait pas croire que les cotes sont connues à 10 cm près, alors que les vagues dépassaient 1 m de haut. Quand nous indiquons 10,35 m, cela veut dire simplement que la cote était *voisine* de 10,35 m.

MESURE N° 18

Heure de la mesure	Hauteur à l'échelle	Durée du parcours en secondes	Vitesse m/s	Position par rapport à la rive droite et observations
11 h 43	9,70	19,2	7,9	90 m arbre
11 h 44	9,70	17,5	8,5	130 m arbre
11 h 45	9,75	16,2	9,1	50 m arbre
11 h 46	9,75	16,0	9,3	80 m arbre
11 h 48	9,80	18,8	7,5	100 m arbre

MESURE N° 19

Heure de la mesure	Hauteur à l'échelle	Durée du parcours en secondes	Vitesse m/s	Position par rapport à la rive droite et observations
12 h 09	10,20	17,1	8,7	130 m arbre
12 h 10	10,20	17,8	8,3	100 m arbre
12 h 12	10,25	14,0	10,6	90 m arbre
		19,6	7,6	80 m arbre
12 h 15	10,30	16,2	9,1	50 m arbre
12 h 16	10,30	24,8	6,0	(150) R G remous?
12 h 17	10,35	14,3	10,3	70 m arbre
12 h 19	10,35	13,0	11,4	90 m arbre

Malgré une certaine dispersion, bien visible pour la mesure n° 19, on constate sur le tableau des mesures que la variation des vitesses moyennes est régulière pour la pointe de crue principale entre 11 h du matin et 18 h le 26 septembre. L'incertitude sur cette vitesse moyenne paraît être de 0,3 m/s en général, et de 0,5-0,6 m/s, dans les cas les plus défavorables (mesures n°s 19 et 20).

Notons que pour les mesures voisines de la pointe maximale, la durée était très courte: 5 mn pour la mesure n° 18, 15 mn pour la mesure n° 19, correspondant à la variation de 10 à 15 cm de ce que l'on est convenu d'appeler le plan d'eau, chiffre correspondant à l'erreur d'appréciation de la hauteur d'eau. Nous rappelons également que malgré la bonne organisation des mesures, il est possible que des décalages de quelques minutes se soient produits entre la mesure de la cote et la mesure de la vitesse.

Retenons que pour toutes ces mesures de vitesses, il faut s'attendre à une précision supérieure à 10% pour la quasi-totalité des mesures.

Pour passer à la vitesse moyenne *dans la section* on notera :

Les vitesses en surface sont en général supérieures aux vitesses moyennes dans la section pour des écoulements réguliers et de forts débits tels que ceux-ci. Un coefficient de réduction de 0,95 serait normal pour passer à la vitesse moyenne, mais lorsque la station fonctionne en déversoir, le rapport peut changer de sens, tout en restant voisin de 1.

Les mesures au flotteur ont été faites sur une longueur supérieure à la largeur du déversoir naturel. Ceci conduit donc à une légère sous-estimation de la vitesse dans la section de contrôle.

Pour cette raison, on a jugé inutile de considérer un coefficient de réduction. On admet que *la vitesse moyenne de surface est la même que la vitesse moyenne dans la section*. D'ailleurs les quelques mesures faites en profondeur le 22, n'indiquent pas de réduction significative de la surface au fond de la section, même pour des vitesses de 5 m/s.

La figure 2 donne deux exemples de variations transversales de la vitesse superficielle.

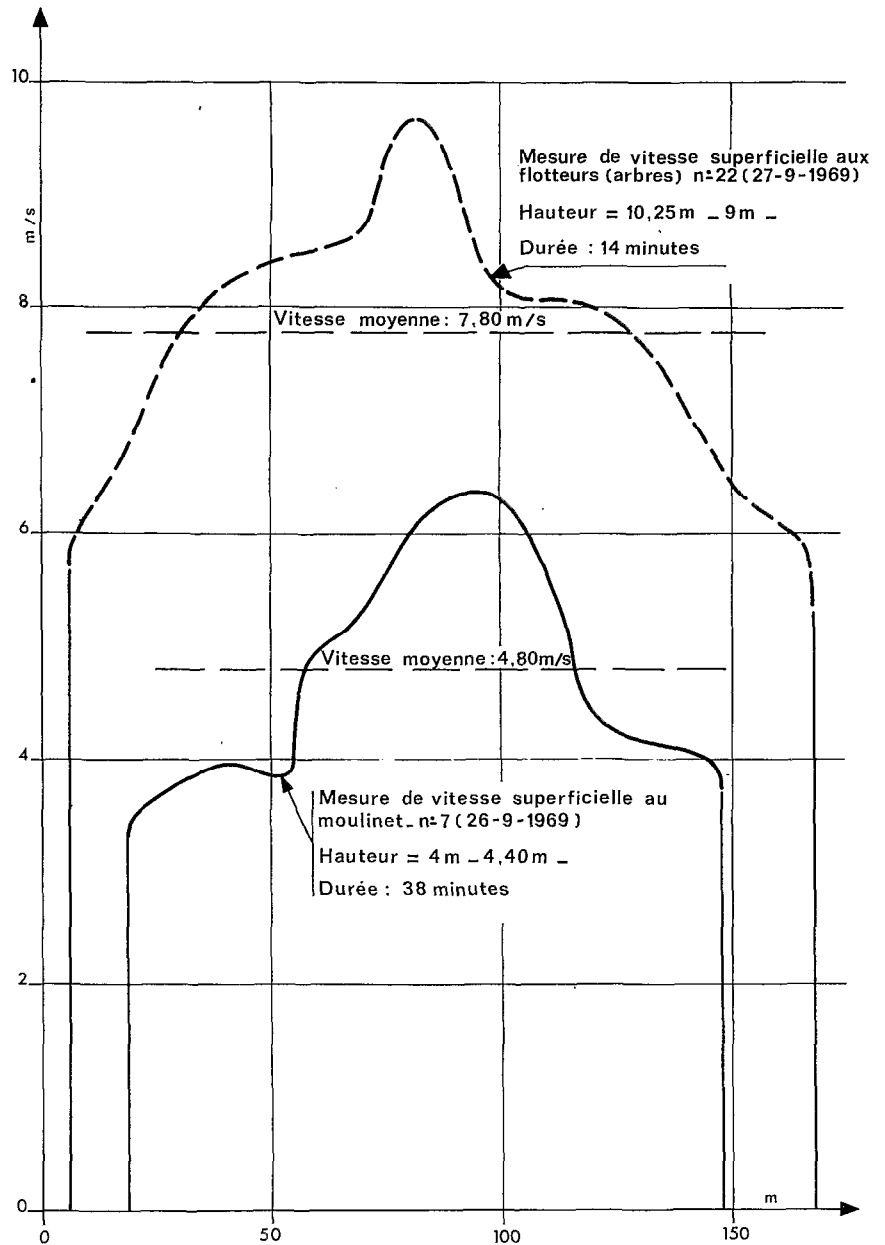


Fig. 2 — L'OUED ZÉROUD A SIDI SAAD - Station Z 8  
Mesures de vitesse superficielles (26 et 27-9-1969)

### 3.6. Détermination du profil en travers, variation du fond

Comme on le verra plus loin, le seuil rocheux est noyé en général dans le sable du lit, de sorte que la plupart du temps le fond est extrêmement instable.

On savait déjà que lors de la crue de 1964 le lit s'était abaissé de 2 m.

Les relevés de août-septembre et octobre 1969 sont très instructifs à cet égard.

Le 30 août, la cote à l'échelle est de 2,33 pour un débit de 243 l/s. Cette cote correspond pratiquement au niveau moyen du lit.

Après la crue du 31 août, dont la cote maximale à l'échelle est de 4,20 m, l'Oued Zeroud présente un débit voisin de l'étiage avec une cote de 2,00 m. Le lit a donc baissé en moyenne de 23 cm. Ceci n'est qu'un modeste début.

Le 25 septembre, la cote d'étiage est de 2,26 m, presque la même que le 30 août. Arrive alors la crue du 26, avec une cote maximale de 10,90 m vers 13 h.

Le 3 octobre, la cote la plus basse observée est de — 1,80 m, alors que le débit est encore voisin de 2 m<sup>3</sup>/s. Le niveau du lit a donc baissé de 4,10 m environ depuis le début de la crue.

La crue du 6 octobre conduit à une cote maximale de 8 m à l'échelle, et le 7 octobre on observe pendant une heure une cote de — 1,90 m. Ce niveau remontera ensuite pour atteindre — 1 m le 8 octobre.

Le 21 octobre, la cote, pour un débit de 2 m<sup>3</sup>/s environ, est de — 1,55 m; il y a certainement eu remontée du lit. Le 22, on observe une crue de 6,50 m à l'échelle. Après cette crue, on retrouve la cote — 0,70.

Le 27 octobre, une nouvelle crue atteint la cote 5,15 m à l'échelle; la cote la plus basse observée après est — 0,50 m.

Enfin, après la crue du 30 octobre (hauteur 4,50 m), on retrouve la cote de basses-eaux à — 1 m. Tout ceci est très visible sur les photos prises en juin 1967 alors que pour 40 m<sup>3</sup>/s la cote à l'échelle était de 2,30 m, le 26 octobre juste avant les dernières grandes crues, et, enfin, après les crues de 1969, sur la vue panoramique présentée ci-contre où on peut avoir une idée du décapage résultant de ces crues.

Les jaugeages du 30 et du 31 octobre montrent que, pour une cote voisine de zéro, le fond ne s'est remblayé que de 1 m. Le remblaiement peut être très lent: remontée de 15 cm par heure au début. Au contraire, le creusement peut être très rapide.

L'instabilité du lit de l'Oued rend impossible l'utilisation des méthodes habituelles pour passer des hauteurs aux débits.

Pour connaître le profil en travers on avait d'abord recommandé de prendre toutes dispositions pour déterminer un profil en travers précis avant et après les crues. Ceci était insuffisant.

On a alors adopté un procédé préconisé par le Dr Luna LEOPOLD du U.S. Geological Survey. Ce procédé consiste à enterrer profondément dans le lit des corps morts pourvus d'une chaîne verticale montant jusqu'à la surface du lit. La crue creuse le lit, courbe la chaîne, puis la recouvre de sable, la position du coude donne la cote minimale du lit pendant la crue.

Ce procédé avait été modifié comme suit: des colonnes de briques de 3 m de haut avaient été placées dans le sable tous les 40 m à l'aplomb du téléphérique. Après chaque crue, on recherchait ce qui restait des colonnes. Plusieurs profils en travers ont ainsi été déterminés par M. ZRIBI.

Mais, comme on le verra plus loin, les colonnes de briques ont été entièrement emportées par la grande crue du 26 septembre.

En effet, on a eu très vite l'impression que le lit avait été entièrement décapé jusqu'au rocher.

En octobre, vers les deux rives, le déversoir naturel était dégagé et il ne paraissait pas invraisemblable que ce déversoir se prolonge sur toute la largeur du lit et soit également dégagé au centre de la section. D'ailleurs, l'écoulement, lors de la grande crue du 27 septembre, était caractéristique à ce sujet; on voyait un ressaut tel que celui

qui a été photographié lors de la crue des 27 et 26 octobre pour des hauteurs à l'échelle de 3,10 m et 5 m. Mais le ressaut était un peu moins net, ce qui est normal, étant donné que l'épaisseur de la lame d'eau était de 5 m plus élevée.

Le 28 octobre 1969, R. GUALDE, étant au courant de ce qui précède et constatant des vitesses de surface beaucoup plus fortes que celles mesurées pour les mêmes cotes à l'échelle pendant le début de la crue de septembre, en arrive à la conclusion que le seuil naturel dont on soupçonnait l'existence était complètement dégagé, et décide de lever un profil en travers.

Entre 15 et 16 h, la cote du Zérout à l'échelle était redescendue entre 0 et — 0,10 m, la vitesse moyenne étant inférieure à 2,5 m/s.

Le profil en travers a pu être levé en utilisant le saumon de l'ensemble de mesures; après l'avoir dépouillé de tous ses accessoires (pédales, moulinet, queue, etc.), on le faisait entrer dans l'eau avec le maximum de vitesse verticale. Le câble reste alors pratiquement vertical. On a cherché à lever un point tous les 10 m. On a fait poser le saumon sur un fond qui restait stable, en répétant la même opération cinq fois pour chaque point. Les profondeurs trouvées ne varient pas de plus de 40 cm, la cote admise est la moyenne des cinq mesures. La profondeur maximale correspondait à — 10,07 m à l'échelle.

Par suite du travail consécutif de plusieurs équipes à Sidi Saad et du programme de travail très chargé de la période septembre-décembre 1969, l'époque à laquelle ce profil en travers a été effectué a été mal reportée dans la première édition de la note préliminaire, d'où une valeur erronée de la cote à l'échelle et des erreurs sur les variations du fond du lit dans un diagramme préliminaire de la crue du 27 au 30 octobre 1969.

Les sondages hydrauliques faits en octobre 1970 (forages par percussion rudimentaire) ont confirmé l'existence du seuil rocheux et conduit à un profil en travers très voisin de celui du 28 octobre. La profondeur maximale est de 9,50 m au lieu de 10,07 m. Le chenal rive droite est moins profond: 4,80 m au lieu de 6,70 m; c'est l'écart le plus important. Il correspond peut-être au fait que le saumon s'est posé au fond d'un trou de 1,80 m à l'aval de la ligne de sondage. Ce profil en travers a été levé à 2 m à l'amont du câble. Deux lignes de sondage ont été levées à 10 m à l'amont et à 10 m à l'aval du câble du téléphérique; elles ont conduit à des profondeurs beaucoup plus grandes, surtout pour le profil aval, bien entendu; la profondeur dans le chenal principal atteint 17,80 m. Tous ces profils sont reportés sur la figure 3 ci-contre.

La minceur relative de la barre rocheuse explique pourquoi le 26 septembre G. DUBEE n'a pas pu atteindre le fond; à — 15 m, le saumon et le moulinet étaient entraînés par le courant dans la fosse à l'aval de la barre; d'ailleurs, à deux reprises ce jour-là, en remontant le saumon, il a heurté des rochers, ce qui suppose un fort pendage à l'aval de la barre. Ceci montre aussi que le seuil était dégagé le 28 septembre.

Une campagne de prospection sismique entreprise avant les sondages hydrauliques n'a pas permis de déterminer avec précision le profil exact de la barre rocheuse (déterminé ensuite par les sondages hydrauliques). Elle a permis de préciser cependant que le pendage moyen de la paroi aval est d'environ 45°, que le sable a été remanié sur 20 m de profondeur à l'aval et 10 m de profondeur à l'amont.

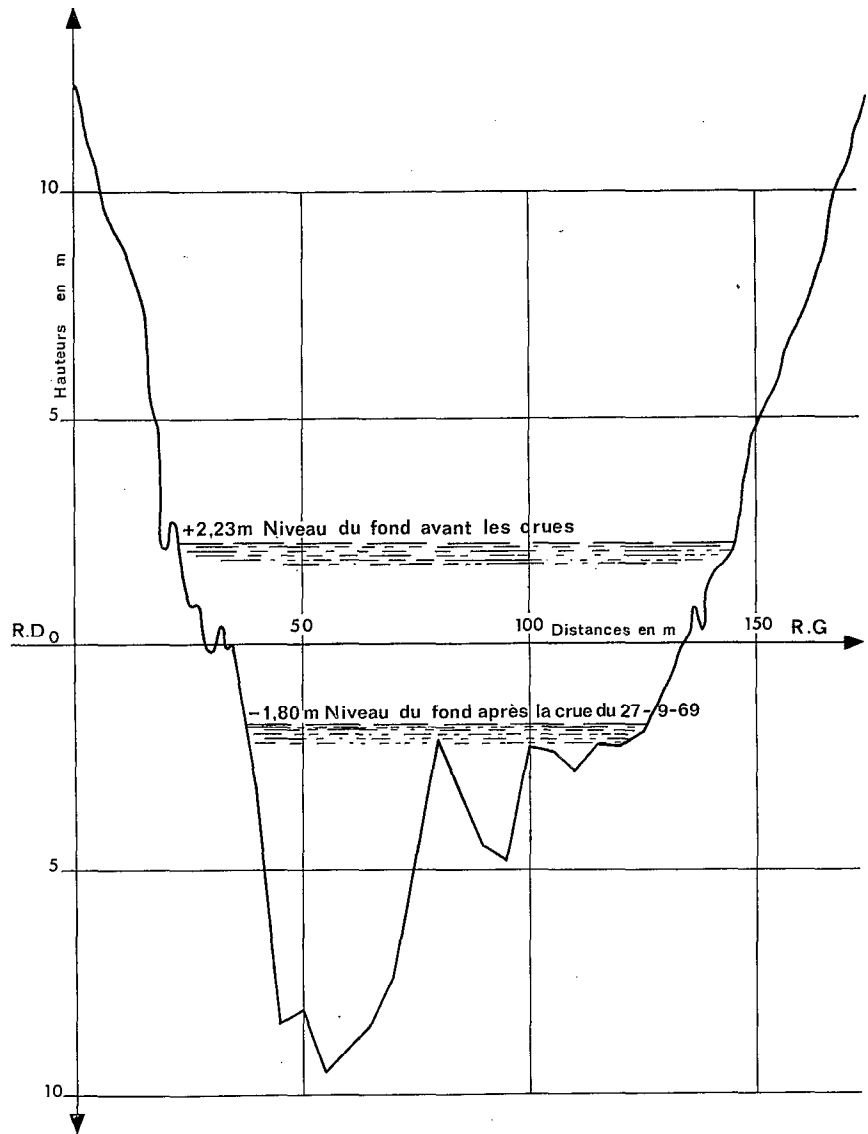


Fig. 3 — L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD - Station Z 8  
 Profil en travers du fond rocheux à 2 m amont du câble téléphérique (1<sup>e</sup> Quinz. Sept. 1970)

Plusieurs jaugeages complets au téléphérique ont été effectués à la fin des crues, ce qui a permis de suivre les variations du profil en travers.

On verra plus loin que l'étude des vitesses moyennes et des cotes permet certaines conclusions quant au dégagement du seuil rocheux; en particulier, il est certain que le seuil a été dégagé le 6 octobre.

En conclusion, on peut admettre que le seuil rocheux présente le profil relevé à 2 m en amont du câble, et qu'il était dégagé au moins à trois époques: du 26 septembre vers 11 h au 28 septembre dans la matinée, le 6 octobre à partir de 15 h, et du 27 octobre vers 15 h au 29 octobre 1969 à 5 h.

Un jaugeage effectué le 30 octobre à 9 h 30 donne encore une cote de fond de — 9 m, ce qui suppose un remblaiement insignifiant du seuil. Un autre jaugeage le même jour à 16 h laisse à penser qu'entre 9 h 30 et 16 h, le remblaiement a été inférieur à 1 m dans le chenal le plus profond qui traverse la barre. Le remblaiement est donc assez lent.

Ces éléments permettent de calculer les débits de pointe de ces deux crues; mais la détermination des débits, heure par heure, pour les autres crues, et les périodes entre les crues, n'est pas évidente, et la méthode de dépouillement s'avère difficile.

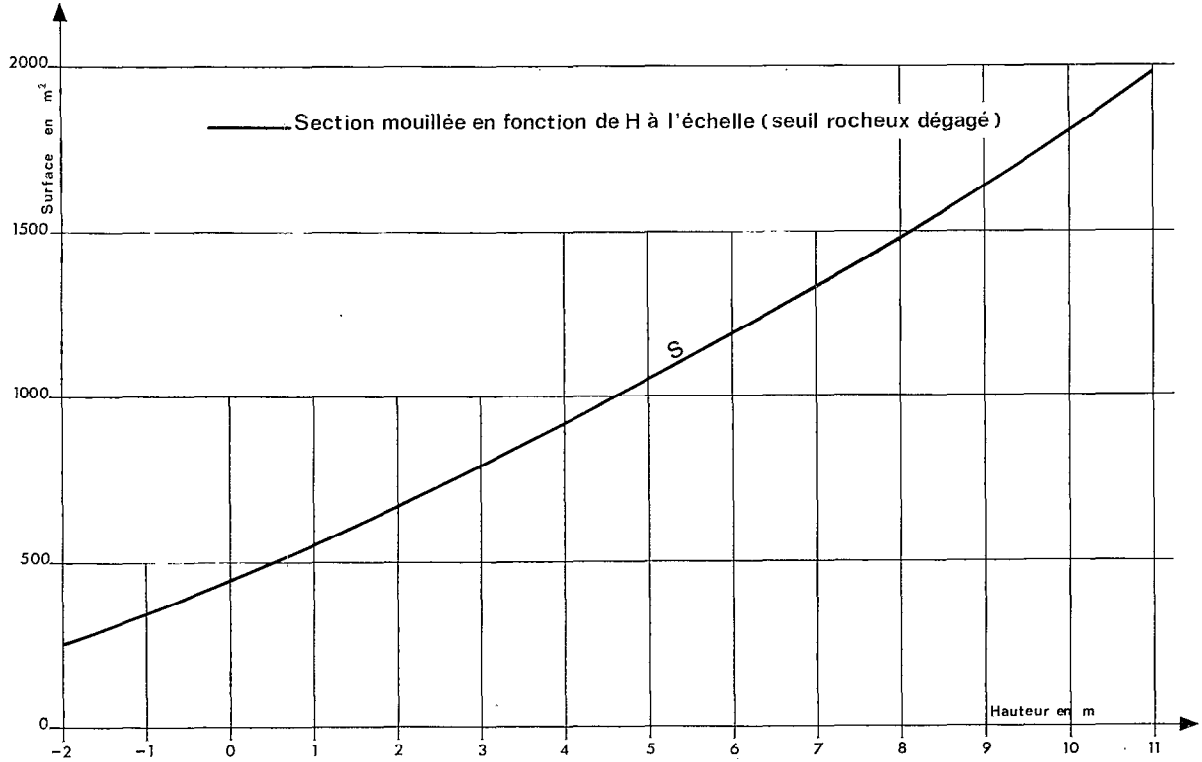


Fig. 4 — L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD

## 4. Méthode de dépouillement

Il résulte de ce qui précède qu'à priori la courbe d'étalonnage classique faisant correspondre un débit à une cote à l'échelle limnimétrique ne doit être employée que dans des conditions tout à fait particulières.

Nous disposons des données suivantes:

- le limnigramme complet;
- le profil en travers maximum correspondant à la section mouillée la plus grande possible quand tout le sable du fond du lit est en mouvement (fig. 4);
- cinquante-deux mesures de vitesses que nous admettons comme égales à la vitesse moyenne sur toute la section pour des raisons que nous avons exposées plus haut.



Etant donné une cote à l'échelle et une vitesse moyenne connue, la section mouillée dépend naturellement de la cote du fond au même moment.

La cote du fond peut être tout simplement celle du lit rocheux, toute la couverture de sable ayant été emportée par les eaux, ou la cote du lit sableux pour les périodes les plus fréquentes, où le fond rocheux est noyé sous le sable. Par « cote », nous entendons cote minimale. Mais cette relation entre section mouillée et vitesse moyenne n'est pas simple: supposons en effet qu'une première crue ait déblayé la section, et que cette forte crue ait été suivie d'une récession très rapide, comme c'est souvent le cas; le remblaiement qui doit suivre ne se fait pas instantanément; nous avons même vu plus haut qu'il était relativement lent; donc, le seuil restera dégagé plus longtemps que ne le nécessiterait le strict respect d'une relation simple entre surface mouillée et vitesse moyenne.

Après les crues de 1969, une étude rapide a été effectuée à la suite de laquelle une note sommaire a été publiée par le B.I.R.H. A cette époque, certains relevés topographiques et les jaugeages de fin octobre n'étaient pas encore dépouillés; il n'avait pas été possible de procéder à une étude systématique des mesures au flotteur, et, enfin, les sondages définissant le profil définitif du fond rocheux n'avaient pas encore été exécutés. Le manque d'éléments sur le fond avait conduit à adopter, à titre préliminaire, l'hypothèse simplificatrice suivant laquelle pour les forts et très forts débits la section mouillée était proportionnelle à la vitesse moyenne dans la section.

On a ainsi obtenu une première série de valeurs numériques, en particulier une bonne approximation des pointes de crues. Mais l'examen approfondi de la crue des 27 et 28 octobre, 29 et 30 octobre en particulier, a montré que cette méthode pouvait conduire à des valeurs nettement erronées pour le calcul des volumes de crue.

Il est possible que pour des variations très lentes de la hauteur à l'échelle, permettant au lit de passer par des positions successives d'équilibre, il y ait une relation simple, linéaire pour une bonne partie de la zone d'application, entre sections mouillées et vitesses moyennes, mais très souvent — et c'est ce qu'ont montré les jaugeages faits après la crue des 27, 28 et 29 octobre — le recouvrement de la barre rocheuse se fait assez lentement: 15 cm par heure pendant 15 heures, suivant la dernière crue du 29 octobre, puis 35 cm par heure ensuite.

Il en est de même pour le dégagement du sable au début des fortes crues. Les mouvements de sable ne sont pas assez rapides pour suivre les variations brutales du débit.

En outre, pour des débits correspondant à des sections mouillées de quelques centaines de mètres carrés, les modifications du lit entraînent des modifications de pente superficielle, donc des modifications de vitesse moyenne pour un débit donné.

Enfin, pour des vitesses superficielles inférieures à 3 m/s, on ne pouvait plus confondre vitesse superficielle moyenne et vitesse moyenne dans la section.

En conséquence, nous avons dû abandonner ces deux premières méthodes de calcul, et nous sommes inspirés des principes suivants:

Lorsque le lit rocheux est décapé, la relation hauteur-débit est sensiblement univoque. Nous négligeons l'influence des variations de pente qui se manifestent

au moment du maximum de la crue du 27 septembre 1969. De ce fait, nous ne changeons de façon significative ni la valeur du maximum, ni celle du volume de crue, et un tel raffinement serait ridicule lorsqu'on considère les difficultés rencontrées pour lire les hauteurs à l'échelle par exemple.

On a déterminé donc la courbe de variations des vitesses moyennes, en fonction de la hauteur à l'échelle (fig. 5). Pour ceci, n'ont été prises en considération que les mesures faites lorsque le seuil rocheux était dégagé, peu de temps avant ou peu de temps après. Si on met à part les mesures 1 à 10 et la mesure 39, on constate que les points représentatifs s'alignent sur une bande pas très étroite. Cette dispersion s'explique, les vitesses moyennes ne sont souvent connues qu'à 0,50 m/s près. La bande s'élargit vers la droite, indication d'une boucle classique dans des cas de ce genre, la diminution de pente qui suit immédiatement le maximum donnant lieu à une légère diminution de la vitesse que nous négligeons.

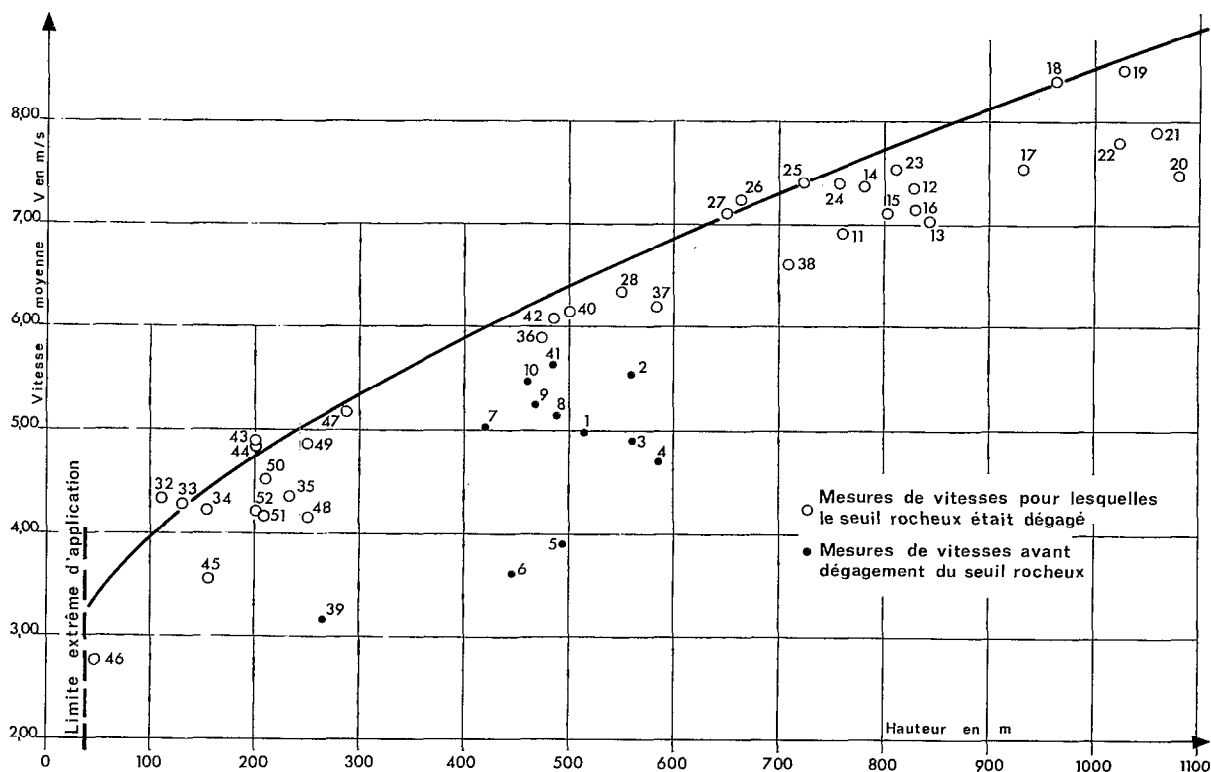


Fig. 5 — L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD  
Vitesse moyennes dans la section en fonction de la hauteur à l'échelle (seuil rocheux dégagé).

Les points 1 à 10, trop bas, montrent tout simplement que le seuil a dû être à peu près dégagé vers la mesure 7, et complètement avant la mesure 11.

On voit très nettement que lors de la crue du 6 octobre le seuil n'a été dégagé qu'après la mesure 39.

Pour des raisons de sécurité, nous prendrons comme courbe des vitesses moyennes la limite supérieure de la bande de points qui dessine une courbe du genre:

$$V = A + B \sqrt{H}$$

qui est bien conforme aux lois de l'hydraulique.

Notons que parmi ces points figurent à la fois des résultats de mesures superficielles aux flotteurs et de vitesses superficielles au moulinet.

Pour des valeurs de hauteurs inférieures à 0,50 m, il y a une forte dispersion, les jaugeages exécutés pour ces vitesses inférieures à 3 m/s montrent qu'il n'est plus possible de confondre vitesses superficielles moyennes et vitesses superficielles dans la section.

On trace de même la courbe des surfaces mouillées en fonction de la hauteur à partir du profil en travers rocheux relevé par sondage.

On en déduit la « courbe d'étalonnage » et le barème défini par les points suivants :

Hauteur en m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10,90
Débit en m <sup>3</sup> /s	2 195	3 170	4 220	5 400	6 690	8 120	9 690	11 390	13 220	15 170	17 050

Avec précaution (surtout à la décrue) pour les hauteurs inférieures à 2 m, on applique ce barème aux périodes où le seuil rocheux est dégagé, c'est-à-dire :

- du 27 septembre à 4 h au même jour à 23 h ;
- le 6 octobre à partir de 15 h ;
- du 27 octobre à 15 h au 28 octobre à 12 h ;
- du 29 octobre à 3 h au 30 octobre à 4 h.

Notons que lorsqu'il y a 2 m de sable sur le fond du seuil, la section mouillée est réduite seulement de 20 m<sup>2</sup> ; à la cote 0, elle est au total de 445 m<sup>2</sup>, ceci veut dire qu'à la décrue, il n'y a pas lieu de donner des indications précises sur le début du recouvrement.

Les hauteurs sont transformées en débit tous les 1/16 de jour et les valeurs maximales instantanées de chacun des grands points ont été calculées.

Notons que ce mode de calcul s'applique à la plus grande part du volume écoulé pour les trois grandes crues.

Pour le reste des hydrogrammes, nous avons tracé la ligne du fond :

1) en tenant compte des données directes des jaugeages (ceux du 31 août, du 25 septembre, du 30 octobre et du 31 octobre) ;

2) à la décrue, nous admettons que le remblaiement se fait suivant le processus lent, observé aux crues des 28, 29, 30 octobre et des 30, 31 août. Il n'y a pas de dépôt tant que la vitesse ne descend pas en-dessous de 3 m/s ;

3) à la crue, tous les hydrogrammes partent de débits de basses eaux correspondant à des débits de 3 à 20 m<sup>3</sup>/s. On suppose une profondeur variant de 10-15 cm suivant les cas, d'où la cote initiale du fond ;

4) tout tend à indiquer qu'à la crue, tout au moins à la première montée de chaque grande crue, il n'y a pas creusement du fond tant que la vitesse n'a pas atteint 2,50/3 m/s, ou tant que la dénivelée depuis le début de la crue n'a pas atteint 1,50 à 2 m ;

5) tout indique que le creusement est très rapide: 1 à 2 m par heure dès que la vitesse approche et dépasse 5 m/s;

6) de toute façon, le seuil rocheux est toujours dégagé lorsque la cote à l'échelle atteint 6 m.

Ceci a permis de tracer sans trop de difficulté les variations du fond du lit pour les trois grandes crues, dont deux sont représentées figures 6 et 7. Le seul point obscur est le remblaiement plus ou moins hypothétique au point bas entre les deux crues du 27 au 30 octobre et au même point bas pour la crue des 5, 6, 7 octobre.

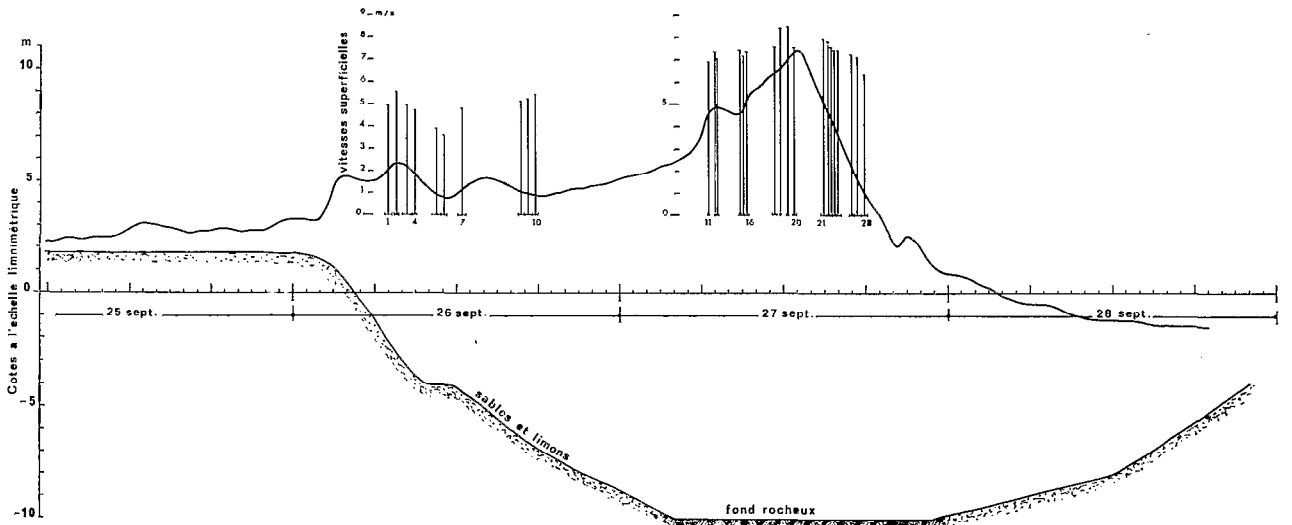


Fig. 6 — L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD  
Crue des 25, 26, 27 et 28 septembre 1969 - Limnigramme et cotes du fond

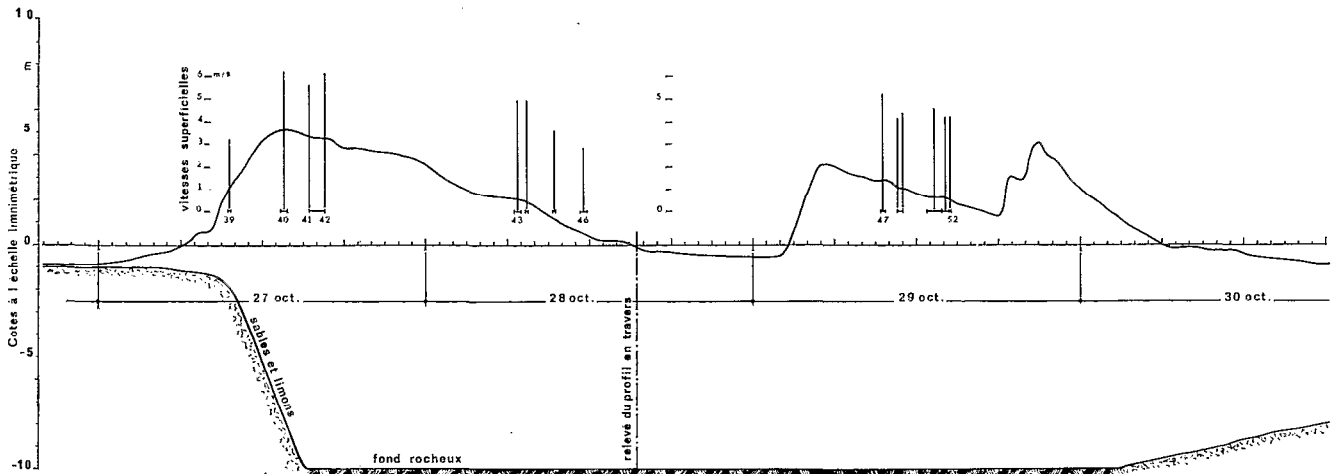


Fig. 7 — L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD  
Crue des 27, 28, 29 et 30 octobre 1969 - Limnigramme et cotes du fond

L'incidence de notre hypothèse conduit au maximum à une incertitude de 30 à 40 000 000 de m<sup>3</sup> sur le volume total, ce qui est insignifiant.

Le tracé du fond conduit à la connaissance des surfaces mouillées.

A la crue ou aux périodes à peu près étales, on multiplie cette section par la vitesse moyenne. Celle-ci est déterminée par les mesures de vitesses lorsqu'il y en a, ou par les interpolations de leurs résultats lorsque ces mesures sont proches et que la hauteur ne varie pas trop.

Lorsqu'il n'y a pas de mesure de vitesse, ce qui est souvent le cas au début des crues: pour les sections mouillées inférieures à 300 m<sup>2</sup>, on examine les résultats des jaugeages pour des valeurs voisines de cette section et des conditions de lit voisines, et on adopte la même vitesse moyenne. Pour les sections supérieures à 300 m<sup>2</sup>, toujours à la crue, on adopte des vitesses moyennes vaguement proportionnelles aux sections en veillant à ce que ces vitesses moyennes correspondent à une variation vraisemblable lorsqu'on les compare aux points de mesures les plus proches.

Aux décrues principales, en-dessous de 2 000 m<sup>2</sup>, on suit des courbes de récession analogues à celle de la crue du 30 octobre qui est assez bien « connue », en tenant compte de façon plus ou moins quantitative de la durée de cette récession.

## 5. Résultats

Outre les trois crues les plus importantes:

- du 25 au 28 septembre 1969;
- du 6 au 8 octobre 1969;
- du 27 au 30 octobre 1969;

trois autres crues ont fait l'objet d'un examen approfondi:

- celle du 30-31 août 1969;
- celle du 3 octobre 1969;
- et celle du 22 au 25 octobre 1969.

Si on met à part le débit de la pointe de crue du 22 octobre, dont la cote (8 m) a été telle que le seuil rocheux était dégagé ou bien près de l'être, les débits pour ces trois crues sont beaucoup plus difficiles à estimer: en particulier il est malaisé d'établir un ordre de grandeur pour les débits de la décrue du 23 octobre et pour la pointe du 31 août.

Les crues de la période août-septembre-octobre qui n'ont pas fait l'objet d'une interprétation spéciale sont beaucoup plus faibles. La plus forte, celle du 6 septembre, a certainement présenté un maximum inférieur à 500 m<sup>3</sup>/s. Les imprécisions sur l'évaluation de leur volume ne sauraient entraîner une erreur sensible sur les volumes mensuels.

### 5.1. Débits maximaux

Les valeurs maximales instantanées des six crues précitées sont données ci-dessous:

30 août à 21 h .....	2 400 m <sup>3</sup> /s
27 septembre à 13 h .....	17 050 m <sup>3</sup> /s

3 octobre à 6 h .....	250 m <sup>3</sup> /s
6 octobre à 19 h .....	11 400 m <sup>3</sup> /s
22 octobre à 20 h .....	7 800 m <sup>3</sup> /s
27 octobre à 13 h 30 .....	6 800 m <sup>3</sup> /s

Les deux derniers chiffres du maximum du 27 septembre n'ont pas de signification. Tout ce que l'on peut dire c'est que le débit maximum à cette date a 90 chances sur 100 d'avoir atteint une valeur comprise entre 16 500 m<sup>3</sup>/s et 18 000 m<sup>3</sup>/s. On retrouve une valeur très proche du chiffre de 18 300 m<sup>3</sup>/s annoncé dans les notes antérieures.

Le 6 et le 22 octobre, on retrouve également des chiffres légèrement inférieurs aux chiffres anciens. La différence provient en grande partie du fait que la section mouillée, que l'on connaît bien maintenant, est un peu plus faible que la section trouvée par M. GUALDE. Pour la partie inférieure du profil en travers, le câble auquel était amarré le saumon prenait une légère obliquité qui conduisait à surestimer les profondeurs.

Le maximum du 30 août est peu précis. Les faibles vitesses de remblaiement trouvées par les jaugeages effectués à la fin de cette crue et ceux du 30 octobre tendent à indiquer que le fond du lit sableux ne descendait pas en-dessous de la cote — 1 m. Mais une cote — 2 m ou même — 3 m n'est pas absolument exclue au moment du maximum, de sorte qu'au lieu de 2 400 m<sup>3</sup>/s, on pourrait trouver 3 000 m<sup>3</sup>/s environ; mais ceci est assez peu probable.

La crue du 27 septembre correspond à un débit spécifique maximal de 1 910 l/s . km<sup>2</sup>. Pour un bassin de 8 950 km<sup>2</sup> cela paraît être un record pour l'Afrique du Nord.

Pour la comparer aux autres valeurs de grandes crues connues dans le monde, on peut reporter le point représentatif sur le diagramme de Francou. On constate que la valeur du coefficient K qui est caractéristique de la violence de la crue, est égale à 5,61. Les records mondiaux (Texas, Japon, Corée, Taiwan) correspondent à K = 6 ou légèrement supérieur.

Pour K = 6, un cours d'eau alimenté par un bassin de 8 950 km<sup>2</sup> donnerait lieu à une crue de 28 000 m<sup>3</sup>/s. On peut dire que les crues représentées sur ce diagramme ont, en général, des périodes de retour de 50 à 100 ans, ce qui est à peu près le cas de la fréquence de la crue du 27 septembre, comme on le verra plus loin.

L'Oued Zéroud présente donc, fort heureusement, des crues nettement inférieures aux valeurs maximales mondiales.

En ce qui concerne la période de retour, signalons que depuis 1870 deux crues ont présenté des débits du même ordre de grandeurs: celles de 1904 et de 1931. Ceci tend à indiquer que la crue de 1969 est cinquantennale.

## 5.2. Volumes écoulés

Les volumes écoulés ont été déterminés en calculant à la main les débits tous les seizièmes de journée (fraction correspondant au pas de temps des cartes perforées). Le calcul a été fait à la main en s'inspirant des règles définies dans la quatrième partie: on les trouvera dans le tableau ci-contre. On notera que les décrues de la plupart

des hydrogrammes sont déterminées sans grande précision (sauf le 31 août et le 30 octobre).

Les valeurs moyennes journalières sont indiquées sous chaque colonne.

L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD  
Crues principales de septembre et octobre 1969 (débits en m<sup>3</sup>/s)

30-8	31-8	26-9	27-9	28-9	6-10	7-10	8-10	22-10	23-10	27-10	28-10	29-10	30-10
0,25	1 650	500	7 000	1 850	9	<i>4 400</i>	1 800	70	2 100	3	<i>4 500</i>	200	3 200
0,25	1 350	1 000	7 400	1 200	15	<i>3 670</i>	1 300	100	1 800	20	<i>3 950</i>	450	2 300
0,25	1 250	2 200	7 950	600	20	<i>3 040</i>	700	100	1 500	70	<i>3 450</i>	<i>4 220</i>	1 400
0,25	1 050	2 800	8 750	300	50	1 600	300	90	1 300	110	<i>3 320</i>	<i>4 790</i>	800
0,25	450	4 050	<i>11 750</i>	275	50	500	200	95	1 200	250	<i>3 170</i>	<i>4 510</i>	500
0,25	100	4 700	<i>11 600</i>	250	50	250	150	95	1 100	700	<i>2 800</i>	<i>4 150</i>	400
0,25	60	3 450	<i>13 400</i>	230	50	150	120	95	900	1 850	<i>2 200</i>	<i>4 100</i>	380
0,25	40	3 000	<i>15 000</i>	210	50	100	100	100	750	3 650	1 800	<i>3 600</i>	350
0,25	35	4 600	<i>16 600</i>	190	400	100	80	180	700	5 700	1 300	<i>3 300</i>	300
0,25	30	5 000	<i>14 700</i>	170	1 100	100	70	310	600	<i>6 700</i>	850	<i>3 150</i>	250
0,25	25	4 950	<i>10 200</i>	150	<i>1 700</i>	150	60	440	550	<i>6 500</i>	425	<i>2 800</i>	200
0,25	25	4 700	<i>7 000</i>	130	<i>6 400</i>	1 500	50	730	500	<i>6 250</i>	390	<i>2 550</i>	170
75	25	5 200	<i>5 050</i>	110	<i>11 000</i>	<i>3 700</i>	40	3 700	<i>450</i>	<i>5 700</i>	370	<i>3 700</i>	150
1 500	20	5 300	<i>3 500</i>	90	<i>9 300</i>	<i>3 600</i>	40	7 600	420	<i>5 650</i>	350	<i>5 100</i>	130
2 100	20	5 700	<i>3 200</i>	80	<i>6 900</i>	<i>3 000</i>	30	4 900	380	<i>5 400</i>	320	<i>5 400</i>	110
1 800	20	6 300	<i>2 100</i>	70	<i>5 400</i>	<i>2 340</i>	20	3 000	350	<i>5 230</i>	300	<i>4 170</i>	100
<i>342</i>	<i>51</i>	<i>3 980</i>	<i>9 080</i>	<i>370</i>	<i>2 660</i>	<i>1 716</i>	<i>315</i>	<i>1 350</i>	<i>810</i>	<i>3 370</i>	<i>1 850</i>	<i>3 510</i>	<i>675</i>

Les valeurs *en italique* ont été obtenues à partir de la courbe d'étalonnage (seuil rocheux dégagé)

Un second tableau donne les débits moyens et maximaux journaliers pour les mois d'août, septembre et octobre 1969.

Les volumes écoulés lors des six crues étudiées sont les suivants :

30 et 31 août .....	34 000 000 m <sup>3</sup>
25, 26, 27 et 28 septembre .....	1 170 000 000 m <sup>3</sup>
3 octobre .....	10 700 000 m <sup>3</sup>
6, 7 et 8 octobre .....	400 000 000 m <sup>3</sup>
22, 23 et 24 octobre .....	197 000 000 m <sup>3</sup>
27, 28, 29 et 30 octobre.....	815 000 000 m <sup>3</sup>

Les différences avec les estimations de mai 1970 sont faibles sauf pour la crue du 30 août.

On trouvait en effet respectivement pour ces six crues:

$73 \times 10^6 \text{ m}^3$   
 $1\,183 \times 10^6 \text{ m}^3$   
 $11,6 \times 10^6 \text{ m}^3$   
 $452 \times 10^6 \text{ m}^3$   
 $215 \times 10^6 \text{ m}^3$   
 $761 \times 10^6 \text{ m}^3$

L'écart est en général inférieur à 10%, ce qui prouve que *pour une estimation préliminaire* la méthode des vitesses proportionnelles aux surfaces mouillées donnait des résultats valables malgré les gros écarts en décrue.

### CRUES DE L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD

automne 1969

	AOÛT		SEPTEMBRE		OCTOBRE	
	Q moy. m <sup>3</sup> /s.	Q max. m <sup>3</sup> /s.	Q moy. m <sup>3</sup> /s.	Q max. m <sup>3</sup> /s.	Q moy. m <sup>3</sup> /s.	Q max. m <sup>3</sup> /s.
1	0,30		21,3	41	2,0	
2	0,29		4,5	11	2,7	
3	0,28		5,6		123	250
4	8,50		1,5		9,3	24
5	2,79		0,7		9,0	
6	0,50		175	290	2.660	11.400
7	20,0		58,9	90	1.716	5.000
8	12,5		3,0		315	
9	1,00		0,6		50,0	2.000
10	0,32		0,5		10,0	
11	0,29		0,5		2,7	
12	0,28		0,5		2,5	
13	0,26		0,5		2,4	
14	0,26		0,5		2,3	
15	0,25		0,4		2,2	
16	0,24		0,4		2,2	
17	0,24		0,4		2,1	
18	14,50		0,4		2,1	
19	0,70		0,4		2,0	
20	0,28		0,4		2,0	
21	0,27		0,4		2,0	
22	0,26		66,6	104	1.350	7.800
23	0,25		55,5	75	810	2.600
24	9,50		5,0		107	
25	0,50		140	480	4,5	
26	0,26		3.980	6.500	3,0	
27	0,25		9.080	17.050	3.370	6.800
28	0,25		370	1.950	1.850	4.900
29	0,24		30,0		3.510	4.800
30	342	2.400	9,0		675	3.800
31	51	1.700			11,5	



En ce qui concerne les débits journaliers, les écarts peuvent être importants car la note de mai 1970 considérait les débits de 20 h la veille à 20 h le jour même, alors que la présente étude calcule les débits de 0 à 24 h. Les maxima du 30 août, du 6 octobre, du 22 octobre, et le maximum secondaire du 29 octobre ont été observés précisément vers 20 h.

Pour les volumes mensuels, malgré les incertitudes sur les faibles débits, les estimations sont assez bonnes puisque les grandes crues apportent la quasi-totalité du volume mensuel, comme on va le voir ci-dessous.

En août, le volume écoulé est de  $40 \times 10^6 \text{ m}^3$  (crue du 30-31:  $34 \times 10^6 \text{ m}^3$ ).

En septembre, le volume écoulé est de  $1\,203 \times 10^6 \text{ m}^3$  (crue du 25 au 28:  $1\,170 \times 10^6 \text{ m}^3$ ).

En octobre, le volume écoulé est de  $1\,433 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Soit un total de  $2\,676 \times 10^6 \text{ m}^3$  (l'évaluation de mai 1970 se montait à  $2\,572 \times 10^6 \text{ m}^3$ ).

On notera qu'en septembre la troisième décade seule a apporté 97% du total, la journée du 27 correspondant à près de  $790 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

En octobre, si les volumes de crues sont chacun moins importants, le total mensuel est plus élevé.

Les périodes de retour de tels volumes mensuels sont plus grandes que pour les débits. Pour octobre, elle doit dépasser 100 ans. Pour septembre, la fréquence est encore plus faible.

Quant au volume total, il a une fréquence extrêmement faible, difficile à évaluer, l'échantillon statistique disponible étant tout à fait insuffisant pour donner même un ordre d'idée des fréquences au-delà de la fréquence centennale.

Il faut noter que dans ces volumes interviennent également les transports solides dont on parlera plus loin et dont le volume peut être estimé à 10% du volume d'eau. Ceci ramènerait à 2 500 millions de mètres cubes le volume d'eau écoulé pendant ces trois mois.

### 5.3. Transports solides

Les prélèvements faits pendant les crues mettent en évidence des turbidités variant entre 20 et 80 g/l, mais les prélèvements ont été faits sur les bords. Les turbidités moyennes pourraient être plus élevées. En outre, ces mesures ne donnent aucune idée des transports de sable par charriage sur le fond du lit, charriage qui a dû être considérable si on en juge par les variations de la section.

A la cote 2 m, le profil en travers de la section ensablée correspond à une section de 670 m<sup>2</sup>; or la section a été nettoyée quatre fois par le fleuve; le nettoyage ne se faisant pas uniquement dans la section, tout le lit s'abaisse sur un bon nombre de kilomètres. L'ancienne section à l'amont s'est comportée exactement comme celle de la station de jaugeage actuelle.

Une carte des dépôts dans la plaine de Kairouan a été établie par le service pédologique, en délimitant les zones par tranches d'épaisseur de dépôts. Ce document conduit à une estimation de  $90 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sable. Etant donné que cette carte ne couvre pas toute la surface intéressée par ce phénomène de sédimentation, qu'elle ne tient pas compte des sédiments déposés dans la Sebkha Kelbia et la Sebkha Sidi El Hani, nous pensons que l'estimation des 10% du volume total, soit  $275 \times 10^6 \text{ m}^3$  pour les transports solides, est vraisemblable.

La salinité au moment des grandes crues était de l'ordre de 1 g/l.

#### 5.4. Coefficients de ruissellement

L'estimation de la genèse de ces crues fera l'objet d'une étude ultérieure, le plus urgent étant la mise au point des valeurs des débits et des précipitations. Cependant, il a paru nécessaire de donner ici quelques indications sur les coefficients de ruissellement.

En utilisant les cartes d'isoyètes au 1/1 000 000<sup>e</sup> tracées dans les bulletins pluviométriques mensuels, nous avons calculé les hauteurs de pluies moyennes des mois de septembre, octobre, et celle de la troisième décade de septembre.

À partir des volumes écoulés cités plus haut, nous avons mis au point le tableau ci-après:

	Volume écoulé	Lame ruisselée	Pluie moyenne	Coefficient ruissellement	Coefficients réduits
	(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	(mm)	(mm)	(%)	(%)
Troisième décade septembre	1.184	133	230	58,0	52,0
Septembre	1.203	134	278	48,0	44,0
Octobre	1.433	160	400	40,0	36,0
Total septembre octobre	2.636	294	678	43,2	39,0

Les coefficients de ruissellement réduits tiennent compte de la déduction à effectuer par suite de la présence de 10% de produits solides.

En définitive, on retiendra pour une très forte crue, telle que celle de fin septembre, un coefficient de ruissellement de 55% environ. Notons que la crue de fin août était déjà assez loin, de sorte qu'une partie des précipitations a été utilisée pour saturer le sol.

On peut remarquer qu'un épisode pluvieux de 10 jours recevant plus de 230 mm n'apparaît pas impossible, ce qui indique bien que la crue de fin septembre 1969 ne doit pas être considérée comme un maximum maximorum pour la station de Sidi Saad.

Pour les deux mois de septembre et octobre, nous trouvons un coefficient de ruissellement réduit proche de 40%. Ceci montre que pour d'assez grands bassins tels que celui de l'Oued Zéroud, on ne doit pas s'attendre à des coefficients de ruissellement voisins des limites supérieures: 80%-90%, comme c'est le cas dans les régions montagneuses à cyclones de l'Extrême-Orient, qui reçoivent d'ailleurs des précipitations plus élevées.

On notera que pour le mois d'octobre, le coefficient de ruissellement est probablement sous-estimé, de 5 à 10%, car un des affluents de l'Oued Zeroud, l'Oued Fekka a débordé très largement et, à l'amont de la jonction avec l'Oued El Hadjel,

au niveau de Sidi Bouzid, la nappe d'inondation, par la Seguia Kebira, a quitté les limites habituelles du bassin versant, et a été rempli la Sebkhia Mejdoub.

Le volume qui a ainsi échappé aux estimations faites plus haut peut être estimé très grossièrement à 100 000 000/200 000 000 de m<sup>6</sup> (il n'y a pas de relevés topographiques de la Sebkhia).

Les valeurs trouvées dans le tableau sont très comparables à celles trouvées pour l'Oued Merguellil.

## 6. Conclusions

Les mesures effectuées en 1969 sur l'Oued Zéroud sont d'une importance capitale. A 10% près, elles donnent enfin un chiffre sûr pour une crue d'ordre cinquantennal d'un grand oued. Ce chiffre fournira une indication solide pour tous les projets envisagés sur les oueds difficiles.

Elles montrent aussi que moyennant certaines conditions pas trop défavorables, il est possible de recueillir sur le terrain les éléments du calcul de la crue même dans les cas de phénomènes redoutables comme ceux de septembre et d'octobre 1969.

L'enseignement à tirer de cet ensemble de mesures pour lequel tous les expérimentateurs se sont comportés de façon remarquable, est le suivant.

Pour une station de base pour laquelle on tient absolument à obtenir des mesures des plus fortes crues, les recommandations sont les suivantes :

1) Si les rives elles-mêmes sont instables, chercher un autre site, car s'il est possible avec difficulté de déterminer les débits d'une station à fond instable, on ne peut pas utiliser d'autres méthodes que la méthode chimique si la station elle-même se déplace. Or, cette méthode n'est pour le moment applicable que pour des débits inférieurs à 3 000 m<sup>3</sup>/s.

2) Pendant les périodes de crues, il faut la présence *continue* d'un agent hydro-métriste capable d'exécuter un jaugeage au téléphérique en période de crue moyenne avec des vitesses atteignant au moins 3 m/s. Cet agent, capable de prendre des initiatives, doit avoir cependant des consignes précises sur ce qu'il convient de faire.

3) Un hydrométriste particulièrement compétent et un ingénieur hydrologue confirmé doivent assister à une partie des crues au moins.

4) La station doit être équipée d'un téléphérique solide et bien conçu susceptible d'utiliser un saumon de 100 kg et, si possible, de deux limnigraphes et d'une échelle facile à suivre.

5) En période de très grande crue, l'observateur doit suivre régulièrement les niveaux sur l'échelle; il doit avoir des consignes pour recueillir les éléments nécessaires en vue de déterminer la hauteur lorsqu'il y a des vagues de 1 m et plus.

6) Toutes dispositions doivent être prises pour faire des mesures de vitesses aux *flotteurs à partir des arbres charriés* en prenant le câble du téléphérique pour extrémité amont ou aval de la base de mesure, le chariot étant mis au milieu permet de repérer la position des flotteurs dans le profil en travers. Ne pas oublier de prendre des flotteurs au voisinage des deux berges. Des consignes précises seront données aux hydrométristes sur ce point. Bien matérialiser la base de mesure.

7) A la décrue, dès que la vitesse descend en-dessous de 3 ou 4 m/s, procéder à des jaugeages réguliers. Ce qui importe surtout c'est la connaissance du profil en travers.

8) Faire fréquemment des jaugeages de basses eaux de façon à avoir débits et cotes du fond avant et après la crue.

9) Faire un lever régulier avec sondage si nécessaire du profil en travers rocheux.

10) Si le rocher est trop profond, employer le dispositif des piles de briques pour obtenir la profondeur maximale à posteriori.

11) Lorsqu'un hydrométriste très expérimenté ou un ingénieur hydrologue confirmé est là, tenter un profil en travers avec le saumon nu, comme cela a été fait le 28 octobre 1969. La méthode demande d'ailleurs à être perfectionnée. Il faut dissocier dans l'esprit des hydrologues et hydrométristes les mesures de vitesses et de profondeurs.

12) Une liaison radio permanente est extrêmement utile: elle permet, outre les avantages signalés plus haut, de supprimer l'impression d'isolement qui n'est pas sans influencer les exécutants aux moments les plus difficiles.

13) Ne pas perdre son calme et, si possible, sa bonne humeur.

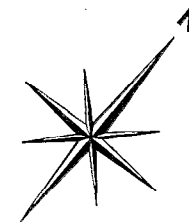
**Oued Zeroud  
à  
Sidi Saad  
après les crues de 1969**

Éperon rocheux

STATION 2 SO 20

Seuil de contrôle rocheux  
découvert par les crues  
de 1969

Éperon rocheux



Éperon rocheux

Limnigraphe

Téléphérique

STATION 3 SO 18

Terrasse emportée

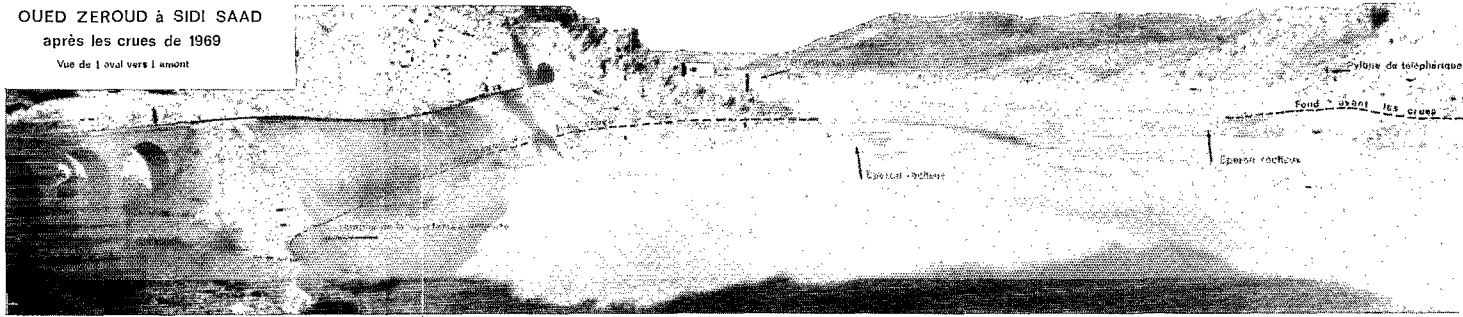
Pont

Éperon rocheux

Voie ferrée



OUED ZEROUD à SIDI SAAD  
après les crues de 1969  
Vue de l'aval vers l'amont



L'OUED ZEROUD A SIDI SAAD  
Après les crues de 1969 (Vue de l'aval vers l'amont)



L'OUED ZEROUD à SIDI SAAD  
Crue des 26 et 27 octobre 1969  
Écoulement caractéristique de déversoir sous le câble du téléphérique  
(hauteur à l'échelle : 5 m.)