

18790
O.R.S.T.O.M.

Service Hydrologique

Note technique n° 11

Diffusion interne

NOUVELLE METHODE de JAUGEAGE au CERCLE HYDROGRAPHIQUE

par

G. JACCON

Chargé de Recherches à l'ORSTOM

- 1 JUIN 1970

O. R. S. T. O. M.
Collection de Référence
n° 14064
B Septembre 1967

Cette note s'adresse aux hydrologues du Service de l'Hydraulique et plus particulièrement aux chefs de brigade.

L'exécution de jaugeages de hautes eaux est une opération délicate. L'opérateur a le choix entre deux méthodes pour le repérage des verticales de mesures : avec un câble gradué tendu en travers de la section ou avec un cercle hydrographique.

La première méthode est la plus couramment utilisée jusqu'à des largeurs de 300 à 400 m et même davantage si l'on utilise au lieu d'un câble une corde de nylon de 10 mm de diamètre, reposant de 100 à 100 m sur des bouées. Le grave inconvénient de cette méthode est le passage du câble d'une rive à l'autre, opération très difficile en hautes eaux.

La seconde méthode, normalement employée pour les sections très larges, n'est pas aimée des hydrologues, ainsi que nous avons pu le constater au MALI et ailleurs. Elle présente, elle aussi, de graves inconvénients : difficultés des mesures au cercle, longueur et fatigue qu'entraînent ces mesures puisqu'il faut mesurer 4 angles totalement différents et contrôler que leur somme totalise bien 360°, nécessité d'un levé topographique délicat des différents repères, lenteur du dépouillement.

Il est certain que le cercle et le rapporteur hydrographique sont des instruments dont l'emploi est vite fastidieux.

Nous proposons, dans la suite de cette note, plusieurs modifications à la méthode classique qui simplifient l'emploi du cercle et éliminent l'usage du rapporteur. Cette méthode, utilisée en 1961-1963 dans la basse vallée du SENEGAL par les hydrologues de l'ORSTOM, a donné de bons résultats. Nous l'avons appliquée en Octobre 1966 sur le NIGER à KOULIKORO (voir exemple en annexe) et, étant donné les excellents résultats obtenus, nous avons décidé de l'utiliser pour toutes les stations du réseau dont la largeur dépasse 250 mètres.

I - RAPPEL du PRINCIPE du CERCLE HYDROGRAPHIQUE et de la METHODE CLASSIQUE de JAUGEAGE au CERCLE

I.1. Principe du Cercle Hydrographique (GR. 1. A,B,C)

Le Cercle hydrographique est un appareil qui permet de mesurer l'angle sous lequel on voit deux repères. Le principe de cet appareil est basé sur une double réflexion sur deux miroirs, l'un fixe, l'autre mobile. L'opérateur voit dans le champ de la lunette 2 images (GR. 1-c):

- dans le demi-cercle supérieur, l'image directe du repère A
- dans le demi-cercle inférieur, l'image du repère B qui a subi une double réflexion sur les miroirs I mobile autour d'un axe vertical et II fixe.

Un système de vis sans fin et de vernier permet d'amener les images des repères A et B en coïncidence pour le réglage du Cercle. Le Cercle est gradué en degrés de part et d'autre du zéro. Il existe deux types de cercle :

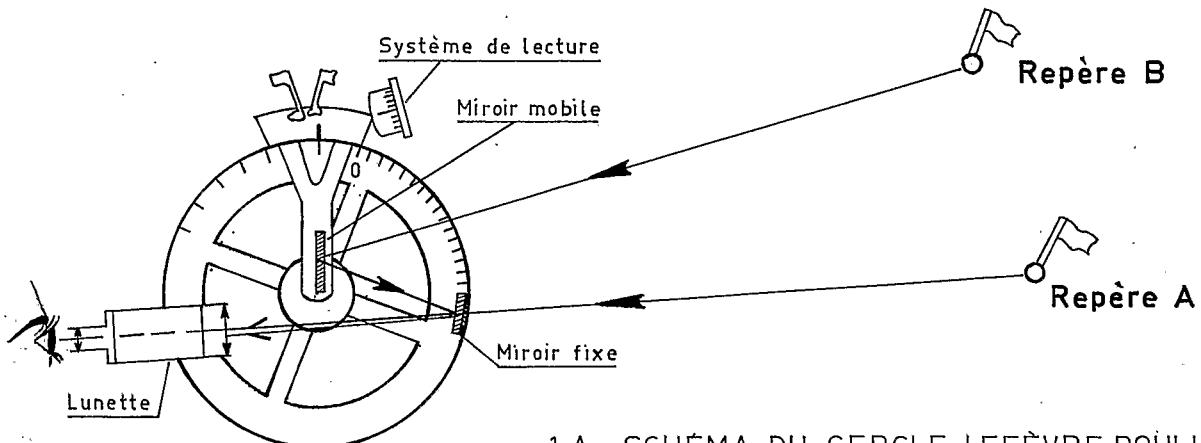
- le cercle RICARD qui permet de mesurer (d'un côté du zéro seulement) les angles jusqu'à 180° -
- le cercle LEFEVRE-POULIN dont les deux graduations de part et d'autre du zéro vont jusqu'à 160°. Ces deux graduations sont de couleurs différentes (blanche et jaune). C'est ce cercle que nous utilisons en raison de sa légèreté et de la facilité des lectures. Il est représenté sur le graphique 1. A -

Cet appareil est très précis : il permet de mesurer les angles à une minute près. Il n'est pas nécessaire pour cela qu'il soit réglé parfaitement. Il suffit, pour éviter toute erreur systématique due à un mauvais réglage du zéro, de faire deux mesures : l'une en prenant A, l'autre en prenant B comme base (visée directe). La lecture aura lieu une fois sur la partie blanche et la seconde fois sur la partie jaune du cercle. La valeur admise est la moyenne arithmétique des deux lectures.

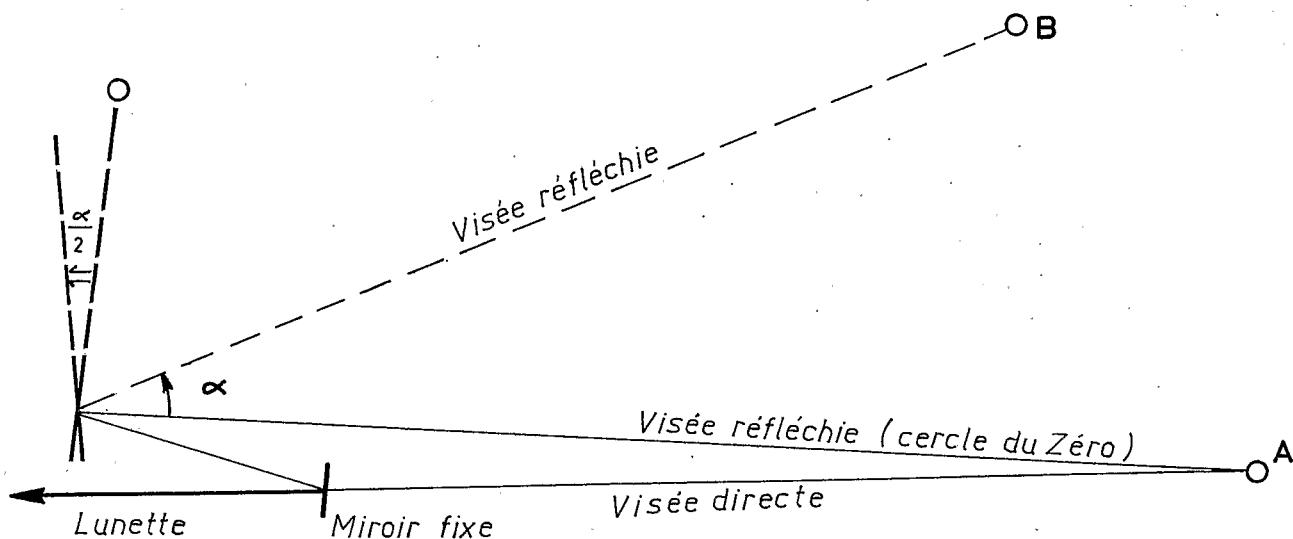
Il est bon néanmoins de procéder à un réglage approximatif du cercle, afin d'éviter deux lectures trop différentes. Il suffit pour cela de régler le cercle à zéro et de modifier la position du miroir fixe à l'aide des deux vis de réglage jusqu'à ce que les images (directe et reflétée) d'un même repère soient en coïncidence.

SCHÉMA ET PRINCIPE DU CERCLE HYDROMÉTRIQUE

Gr. 1



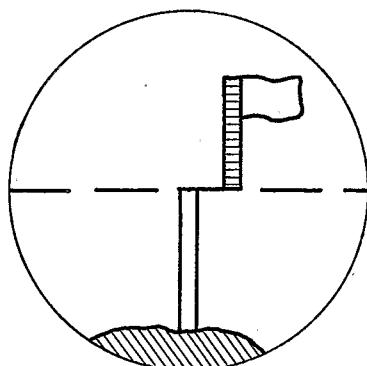
1.A_ SCHÉMA DU CERCLE LEFÈVRE POULIN



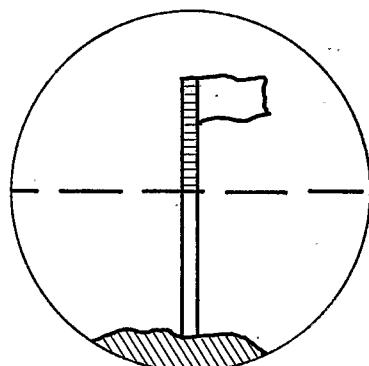
1.B_ PRINCIPE DU CERCLE HYDROGRAPHIQUE

RÉGLAGE DU CERCLE 1.C.

(Images vues dans le champ de la lunette.)



INCORRECT



CORRECT

Nous insistons néanmoins sur le fait que même avec un cercle bien réglé, il est indispensable de faire deux mesures successives, les deux repères étant pris l'un après l'autre comme base.

I.2. Principe de la méthode classique de jaugeage au cercle

Cette méthode est décrite dans le livre de M. ROCHE "Hydrologie de surface" pages 197 et 198.

Le graphique 2 A en schématise le principe : les repères A, B et C matérialisent la section et les repères D, E, F et G servent à déterminer la position O de la verticale de mesure. En effet, la mesure des angles $D\hat{O}B$, $B\hat{O}E$, $E\hat{O}F$, $F\hat{O}G$ et $G\hat{O}D$ permet de connaître le point O, point de concours des arcs capables correspondants. Le report graphique du point O est fait avec un rapporteur hydrographique : c'est une opération longue et fastidieuse qui est, pour une large part, la cause de l'hostilité des hydrologues à cette méthode.

Signalons aussi que tous les repères doivent faire l'objet d'un lever topographique précis.

II - MODIFICATIONS APPORTEES à la METHODE CLASSIQUE (GR. 2. B)

Les modifications portent sur la situation des repères E, F et G, H qui forment avec les repères B et C respectivement, un alignement perpendiculaire à la section de jaugeage et sont équidistants de cette section.

Dans l'exemple donné du NIGER à KOULIKORO, la base choisie est de 400 m. Une base est installée sur chaque rive, pour une même section de jaugeage.

La position du point O est fixée par la connaissance de l'angle (d'après la relation :

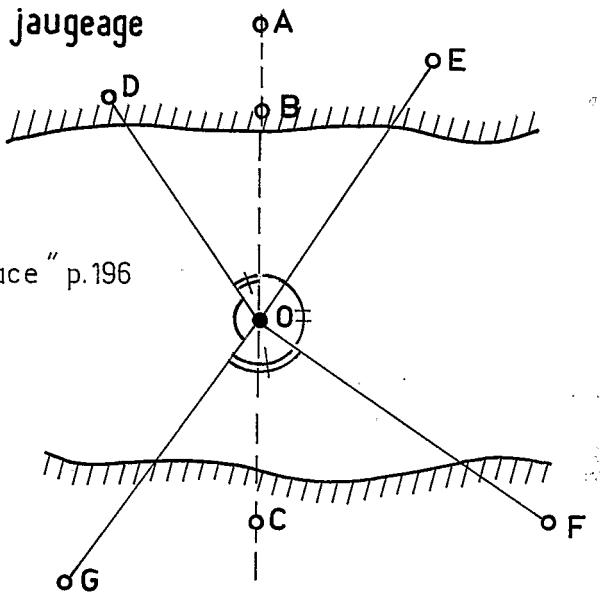
$$OC = GC \operatorname{Cotg}$$

Une seule mesure d'angle (en pratique on mesure 2,6°) suffit donc à déterminer la position de O. L'opérateur connaît immédiatement la distance OC à l'aide d'un tableau donnant la valeur de 2,6° pour des valeurs de OC de 5 m en 5 m (voir en annexe).

Nouvelle méthode de jaugeage au cercle

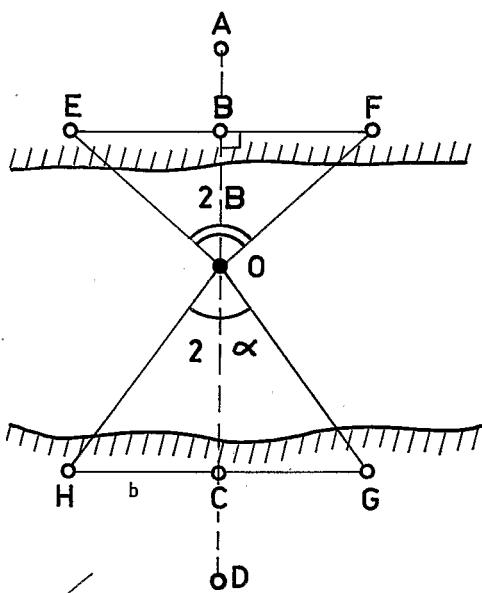
Gr. 2

2.A. D'après M. ROCHE
"Hydrologie de surface" p.196



O se trouve à l'intersection des arcs capables de $D\widehat{O}B$, $B\widehat{O}E$, $E\widehat{O}F$ etc.

2.B. Méthode modifiée



$$OC = D$$

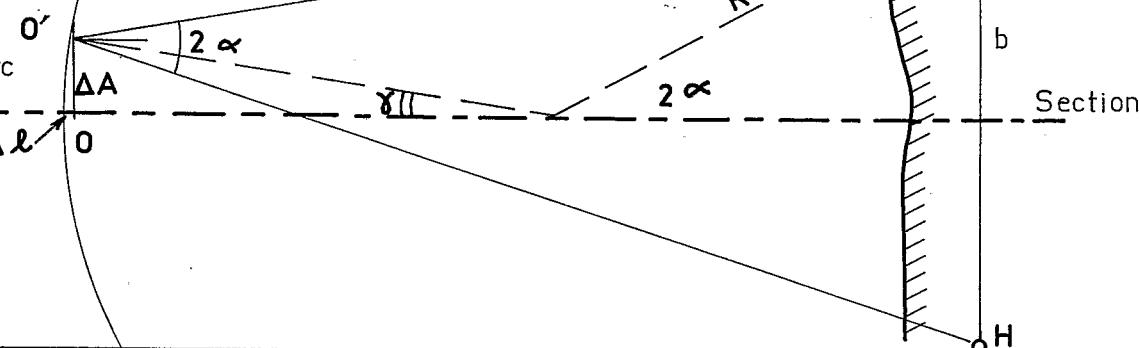
$$BF = BE = CG = CH = b$$

$$\tan \alpha = \frac{b}{D}$$

2.C. Calcul de l'erreur
d'alignement

$$R = \frac{b}{\sin 2\alpha}$$

R = rayon de l'arc
capable



III - CONSEILS PRATIQUES

III.1. Installation des repères

Lorsque la section de jaugeage est adoptée, les repères A, B, C et D sont mis en place. L'alignement de ces 4 repères est réalisé aisément avec l'aide d'un niveau ou d'un théodolite.

Avec un théodolite placé en B ou C, on détermine après rotation de 90°, la direction des repères E, F, G, H. Cette direction est jalonnée puis la distance correspondant à la demi-base choisie, piquetée et chaînée.

On procède alors, sur les 8 jalons mis en place, à des contrôles d'alignement et de direction (au cercle hydrographique réglé sur 90°).

Si la base est provisoire pour la durée du jaugeage, les repères constitués de jalons ou mieux de bambous de 3 à 4 m de long, munis d'un morceau de tissu blanc, sont plantés à la place des jalons.

Mais, dans la plupart des cas, les stations ainsi équipées font l'objet de plusieurs jaugeages annuels. Il est alors intéressant de matérialiser définitivement la position des repères. La méthode adoptée à KOULIKORO nous semble excellente : en chaque point a été construite une borne de béton d'une hauteur de 50 cm environ. L'axe de ces bornes est constitué par un tube métallique de 6 à 8 cm de diamètre, où est introduite la tige de bambou. Cette technique permet de mettre en place les bases du jaugeage dans un minimum de temps. Il faut veiller à ce que les bambous soient bien verticaux. Ces repères, souvent trop longs pour être transportés, sont confiés à la garde du lecteur d'échelle local.

La distance séparant les repères A et B ou C et D dépend surtout de la place dont on dispose et de la végétation. Elle est en principe de l'ordre de 50 à 100 m. Il est très important que l'on puisse voir tous les repères en tous points de la section ou du moins lorsqu'on se trouve à plus de 50 mètres d'une rive. Entre 0 et 50 m les mesures peuvent être faites uniquement sur la base de la rive opposée.

III.2. Ancrage du bateau

C'est là le seul point délicat de cette méthode de jaugeage, du moins pour les sections où les vitesses sont fortes (supérieures à 1,50 m/s) et les fonds rocheux. On utilise une ancre assez lourde (23 kg) et une corde longue (au moins 50 m pour des fonds de l'ordre de 10 mètres). Il faut une certaine habitude pour la manœuvre du moteur hors-bord. On doit

éviter un choc trop brutal au moment où l'ancre s'accroche (ce qui exige un excellent fonctionnement du moteur à bas régime).

Les bateaux utilisés à la Section Hydrologique sont tous des canots pneumatiques Zodiac Mark III. Il est difficile et, à notre avis, inutile d'y installer un tambour pour la corde de l'ancre. Quand les vitesses sont faibles le bateau a tendance à se mettre en "travers". Nous ne conseillons pas l'utilisation d'une ancre flottante (voir "Hydrologie de Surface" par M. ROCHE, page 197), d'une part en raison de l'encombrement et, d'autre part, du danger que présente cet engin et ses filins pour l'hélice du moteur. Il est facile de maintenir le bateau droit à l'aide d'une pagaie.

III.3. Repérage de la verticale de mesure

Lorsque l'ancre a "croché" au fond, il suffit de laisser filer la corde pour amener le bateau dans la section matérialisée par les repères A, B, C, D. Le contrôle de l'alignement se fait aisément à l'aide de jumelles ou de la lunette du cercle. Si l'on dispose d'un cercle gradué jusqu'à 180° ou d'une équerre optique (petit appareil constitué par deux prismes à réflexion totale "dos à dos"), on peut contrôler cet alignement à partir des points B et C, mais cette précaution est superflue ainsi que nous le montrerons plus loin.

L'opérateur effectue alors les mesures des angles 2α et 2β . L'angle 2α donne par le tableau de correspondance la distance OC et l'angle 2β la distance OB. L'opérateur peut ainsi contrôler immédiatement :

- si ses lectures sont correctes puisque la somme OC + OB est égale à la largeur totale connue une fois pour toute après la mesure de 2α depuis B et de 2β depuis C.
- si l'intervalle avec la verticale précédente est acceptable.

Rappelons que les angles 2α et 2β sont mesurées 2 fois (partie blanche et jaune du cercle LEFEVRE-POULIN) et que la moyenne arithmétique de ces 2 lectures est retenue. Il faut donc faire 4 lectures pour chaque verticale, mais ces lectures sont rapides puisque 2 à 2 très voisines. De plus, avec un peu d'habitude, l'opérateur évalue assez vite, d'une verticale à l'autre, la variation des angles 2α et 2β et le réglage du cercle est très rapide.

III. 4. Répartition des verticales de mesures

Il faut une grande habitude pour obtenir une bonne répartition des verticales, surtout lorsque la largeur totale dépasse 1 km comme à KOULIKORO. Il est néanmoins possible d'obtenir un espacement régulier en utilisant 2 petites bouées qui matérialisent chaque verticale successivement : la bouée 1 est laissée à la verticale N et la bouée 2 à la verticale N+1. Lorsque N+1 est terminée, on repasse par l'i pour récupérer la bouée 1 qui sera à nouveau immergée à N+2 etc... Cette méthode donne d'excellents résultats.

Nous rappelons ici, bien que cela ne soit pas particulier aux jaugeages au cercle, qu'il faut faire environ 20 verticales de mesures à chaque jaugeage. Nous estimons que la préparation d'un jaugeage (déplacements en véhicule, installation de la section) est suffisamment onéreuse et fatigante pour que le résultat ne soit pas gâché par une précipitation regrettable. Nous rappelons aussi que les verticales doivent être plus rapprochées près des rives ou lorsque le fond présente des variations bruitales de profondeur.

IV - PRECISION de cette METHODE - SOURCES d'ERREURS -

IV.1. Erreurs sur les mesures d'angles

La méthode classique recommande le contrôle des mesures par le test des 360°. Dans la méthode modifiée, nous conseillons après mesures sur les 2 bases, de contrôler si l'on retrouve bien la largeur totale c'est-à-dire la distance BC. Toute erreur grave de l'ordre du degré ou davantage est ainsi éliminée.

Un opérateur entraîné obtient des mesures avec la précision d'une minute. Pour une base de 400 m, une minute correspond à une distance à L d'environ :

0,05 m	à	100 m
0,20 m	à	500 m
0,70 m	à	1 000 m

Il n'est pas dans les prétentions de l'hydrologue de chercher à corriger une erreur relative inférieure à 1 % !

IV.2. Erreur due à un défaut d'alignement

Cette erreur ΔL peut être calculée facilement de la façon suivante (voir graphique II.c):

$$\Delta l = R (1 - \cos \gamma) \quad R = \text{rayon de l'arc capable de } 2x, \text{ de Centre } O$$

$$R = \frac{b}{\sin 2x} \quad b \text{ étant la } 1/2 \text{ base}$$

Or $\sin \gamma = \frac{\Delta A}{R}$ ΔA = distance à la section du point d'où la mesure est effectuée

$$\text{d'où } \cos \gamma = \sqrt{1 - \frac{\Delta A^2}{R^2}} = \frac{1}{R} \sqrt{R^2 - \Delta A^2}$$

$$\text{En définitive, on obtient : } \Delta l = R - \sqrt{R^2 - \Delta A^2}$$

Or R est supérieur à D , D étant la distance de la verticale de mesure à la base et ΔA est $\frac{2}{R^2}$ au pire de l'ordre de 2 m. ΔA^2 est donc négligeable par rapport à R^2 .

Nous trouvons là aussi une erreur absolument négligeable et dans tous les cas inférieure à 1 %.

IV.3. Erreur sur les bases

Sachant qu'un chaînage effectué avec soin a une précision (en terrains plat) de 1 cm pour 100 m soit 1/10 000, il est évident que là encore l'erreur sera très faible, même si l'on a seulement une précision de 2,5/1 000, soit 1 m d'erreur pour 400 m de base, la précision restera très suffisante.

Nous conseillons néanmoins aux chefs de brigade de contrôler avec le stadiomètre de leur théodolite s'il n'y a pas eu une erreur grossière de chaînage (de 20 m par exemple) qui serait alors beaucoup plus grave.

Nous pouvons conclure ce paragraphe en soulignant la précision du repérage des verticales, bien supérieure à celle de la méthode classique, très handicapée par le report graphique des points.

V - EQUIPEMENT des STATIONS des RESEAUX du NIGER et du SENEGAL

Nous admettons désormais les bases suivantes pour les jaugeages des stations du réseau :

- jusqu'à une largeur de 250 à 300 m : jaugeages au câble.
Cas des stations du SANKARANI (GOUALA, SELINGUE) du HAUT-BANI (BOUGOUNI, PANKOUROU, KOUORO), du SENEGAL (GALOUGO), du Haut-Bassin du SENEGAL et de la FALEME (BAFING à SOUKOUTALI, BAKOYE à OUALIA et TOUKOTO, BAOULE à SIRAMAKANA, FALEME à FADOUUGOU et GOURBASSY).
- entre 250 et 600 m jaugeages au cercle sur une base de 200 m sur chaque rive : station de KAYES.
- au-dessus de 600 m, jaugeages au cercle sur une base de 400 m sur chaque rive : stations du NIGER depuis BANANKORO (à la frontière guinéenne) jusqu'à DIRE.

IV - CONCLUSION

Pour illustrer cette note, nous donnons en annexe le jaugeage effectué par la brigade de BAMAKO les 7 et 8 Octobre 1966 à KOULIKORO. Ce jaugeage qui était le second effectué par cette brigade (après le jaugeage du 1er Octobre à cette même station effectué sous notre contrôle) a été réalisé entièrement sous la direction des deux chefs de brigade présents. Les résultats obtenus sont sinon excellents, du moins très satisfaisants.

ANNEXE 1

JAUGEAGE du NIGER à KOULIKORO

Date : 7 Octobre 1966 Cotes : 9 h 00 : 6,16 m
18 h 00 : 6,16 m

Repérage des verticales au cercle hydrographique

Bases : Rive Gauche (RG) = 400 m
Rive Droite (RD) = 200 m

TABLEAU de SITUATION des VERTICALES

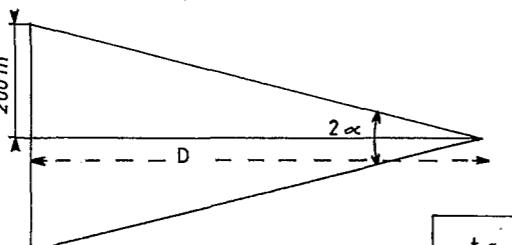
2α = angle sous lequel est vue la base RG, D = distance correspondante
 β = angle sous lequel est vue la base RD, D = distance correspondante

: N° Ver-	: 2α	: D α	: β	: D β	: D α + D β	: Ecart ⁽¹⁾	: Observation
: ticales	: en m	: en m	: en m	: en m	: en m	: en m	
:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----
: Balise RG		: 10°07'	: 1 131	: -	: -	: -	
: RG	à 9,80 m de balise RO						chainée
: V 1		: 10°16'	: 1 104	: -	: -	: -	
: V 2		: 10°19'	: 1 098				
: V 3	: 152°08'	: 50	: 10°29'	: 1 081	: 1 131	: 0	
: V 4	: 137°14'	: 78	: 10°46'	: 1 052	: 1 130	: -1	
: V 5	: 119°08'	: 118					
: V 6	: 105°30'	: 152	: 11°30'	: 983	: 1 135	: +4	
: V 7	: 93°08'	: 187	: 11°57'	: 945	: 1 132	: +1	
: V 8	: 79°04'	: 242	: 12°39'	: 891	: 1 133	: +2	
: V 9	: 68°03'	: 296	: 13°29'	: 834	: 1 130	: -1	
: V10	: 60°34'	: 343	: 14°17'	: 786	: 1 129	: -2	
: V11	: 54°37'	: 388	: 15°09'	: 739	: 1 127	: -4	
: V12	: 48°30'	: 444	: 16°15'	: 686	: 1 130	: -1	
: V13	: 44°02'	: 495	: 17°30'	: 634	: 1 129	: -2	
: V14	: 39°16'	: 561					
: V15	: 36°12'	: 612					
: V16	: 31°10'	: 701	: 24°51'	: 432	: 1 133	: +2	
: V17	: 27°56'	: 804	: 31°21'	: 328	: 1 132	: +1	
: V18	: 26°07'	: 864					$\leq E+ = +10$ m
: V19	: 24°42'	: 913					$\leq E- = -11$ m
: V20	: 23°39'	: 956					
: V21	: 22°46'	: 993					
: V22	: 21°55'	: 1032					
: RD	à 43,0 m de balise RD						chainée
: Balise RD	20°03':1131						
:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----	:-----

(1) Ecart = intervalle entre D α + D β et la distance séparant les balises RD et RG.

Jaugeage au cercle hydrographique

TABLEAU DES DISTANCES ET DES ANGLES
CORRESPONDANTS A UNE BASE DE 400 m



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\text{Demi-base}}{D} = \frac{200}{D}$$

$$\log D = \log 200 - \log \operatorname{tg} \alpha$$

$$\log \operatorname{tg} \alpha = \log 200 - \log D$$

(D en mètres)

D	2 α	D	2 α	D	2 α	D	2 α
0	180°00'	100	126°52'	200	90°00'	300	67°23'
5	177°08'	105	124°36'	205	88°35'	305	66°31'
10	174°16'	110	122°23'	210	87°12'	310	65°39'
15	171°25'	115	120°12'	215	85°52'	315	64°50'
20	168°35'	120	118°04'	220	84°32'	320	64°01'
25	165°45'	125	115°59'	225	83°16'	325	63°13'
30	162°56'	130	113°57'	230	82°00'	330	62°26'
35	160°09'	135	111°58'	235	80°48'	335	61°41'
40	157°23'	140	110°01'	240	79°37'	340	60°54'
45	154°38'	145	108°07'	245	78°27'	345	60°12'
50	151°56'	150	106°16'	250	77°19'	350	59°29'
55	149°15'	155	104°27'	255	76°12'	355	58°48'
60	146°36'	160	102°41'	260	75°08'	360	58°07'
65	144°20'	165	100°57'	265	74°05'	365	57°26'
70	141°26'	170	99°16'	270	73°03'	370	56°47'
75	138°53'	175	97°38'	275	72°03'	375	56°09'
80	136°24'	180	96°02'	280	71°04'	380	55°31'
85	133°57'	185	94°28'	285	70°07'	385	54°54'
90	131°33'	190	92°56'	290	69°11'	390	54°18'
95	129°11'	195	91°21'	295	68°16'	395	53°43'

D	2 α	D	2 α	D	2 α	D	2 α
400	53°08'	600	36°52'	800	28°04'	1000	22°37'
405	52°33'	605	36°35'	805	27°54'	1005	22°31'
410	52°00'	610	36°18'	810	27°44'	1010	22°24'
415	51°28'	615	36°02'	815	27°35'	1015	22°18'
420	50°56'	620	35°45'	820	27°25'	1020	22°11'
425	50°24'	625	35°29'	825	27°15'	1025	22°05'
430	49°53'	630	35°14'	830	27°06'	1030	21°59'
435	49°23'	635	34°58'	835	26°56'	1035	21°52'
440	48°53'	640	34°43'	840	26°47'	1040	21°46'
445	48°24'	645	34°27'	845	26°38'	1045	21°40'
450	47°55'	650	34°12'	850	26°29'	1050	21°34'
455	47°27'	655	33°58'	855	26°20'	1055	21°28'
460	46°59'	660	33°43'	860	26°11'	1060	21°22'
465	46°32'	665	33°29'	865	26°02'	1065	21°16'
470	46°06'	670	33°14'	870	25°54'	1070	21°10'
475	45°40'	675	33°01'	875	25°45'	1075	21°05'
480	45°14'	680	32°47'	880	25°37'	1080	20°59'
485	44°49'	685	32°33'	885	25°28'	1085	20°53'
490	44°24'	690	32°20'	890	25°20'	1090	20°48'
495	44°00'	695	32°07'	895	25°12'	1095	20°42'
500	43°36'	700	31°53'	900	25°03'	1100	20°37'
505	43°13'	705	31°41'	905	24°55'	1105	20°31'
510	42°50'	710	31°27'	910	24°47'	1110	20°26'
515	42°27'	715	31°15'	915	24°40'	1115	20°20'
520	42°05'	720	31°03'	920	24°32'	1120	20°15'
525	41°43'	725	30°51'	925	24°24'	1125	20°10'
530	41°21'	730	30°39'	930	24°16'	1130	20°04'
535	41°00'	735	30°27'	935	24°09'	1135	19°59'
540	40°39'	740	30°15'	940	24°01'	1140	19°54'
545	40°18'	745	30°03'	945	23°54'	1145	19°49'
550	39°58'	750	29°52'	950	23°47'	1150	19°44'
555	39°38'	755	29°41'	955	23°39'	1155	19°39'
560	39°18'	760	29°29'	960	23°32'	1160	19°34'
565	38°59'	765	29°18'	965	23°25'	1165	19°29'
570	38°40'	770	29°07'	970	23°18'	1170	19°24'
575	38°21'	775	28°56'	975	23°11'	1175	19°19'
580	38°03'	780	28°46'	980	23°04'	1180	19°14'
585	37°44'	785	28°35'	985	22°57'	1185	19°10'
590	37°27'	790	28°25'	990	22°51'	1190	19°04'
595	37°09'	795	28°15'	995	22°44'	1195	19°00'
						1200	18°56'