

TECHNIQUES HYDROMETRIQUES NON CONVENTIONNELLES

POSITIONNEMENT DU BATEAU

BATHYMETRIE

MESURAGE DU DEBIT PAR LES METHODES :

- DU BATEAU NON ANCRE,
- DU BATEAU MOBILE,
- ULTRASONIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE



Le rio Solimões à MANACAPURU

TECHNIQUES HYDROMETRIQUES NON CONVENTIONNELLES

POSITIONNEMENT DU BATEAU

BATHYMETRIE

MESURAGE DU DEBIT PAR LES METHODES :

- DU BATEAU NON ANCRE,
- DU BATEAU MOBILE,
- ULTRASONIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE

Février 1990

Cours donné au Centre AGRHYMET de NIAMEY
par Gilbert JACCON
Responsable du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM
Expert de l'Organisation Météorologique Mondiale

SOMMAIRE

| | page |
|--|-----------|
| Introduction | 2 |
| Chapitre 1 : Mesurage des distances horizontales | 4 |
| Chapitre 2 : Mesurage des profondeurs | 17 |
| Chapitre 3 : Levé bathymétrique | 26 |
| Chapitre 4 : Evaluation de la vitesse moyenne - Méthode des ultra-sons et méthode électromagnétique | 37 |
| Chapitre 5 : Jaugeage par la méthode dite des "Grands Fleuves" | 48 |
| Chapitre 6 : Jaugeage par la méthode du bateau mobile | 55 |

ANNEXES

| | |
|----------------------------|---|
| Fiche technique 1 : | Longueur et angle d'une base |
| Fiche technique 2 : | Positionnement d'un bateau avec deux théodolites |
| Fiche technique 3 : | Positionnement d'un bateau avec un sextant |
| Fiche technique 4 : | Méthode des "Grands Fleuves" |
| Fiche technique 5 : | Calcul du débit par la méthode de la section moyenne |

INTRODUCTION

Le *débit liquide* Q d'un cours d'eau, volume d'eau qui s'écoule en une seconde dans une section transversale, est le produit :

- de la section mouillée S , produit de la profondeur moyenne hm par la largeur superficielle l ;
- de la vitesse moyenne d'écoulement U , intégrale sur toute la section mouillée des vitesses des particules d'eau.

$$Q = l * hm * U$$

Les unités utilisées le plus couramment sont :

- le *mètre cube par seconde* (m^3/s) pour le débit, que l'on exprime avec TROIS chiffres significatifs étant donné qu'il n'est jamais mesuré avec une précision supérieure à 3%;
- le *mètre* (m) pour les distances horizontales et verticales, pour lesquelles la précision maximale espérée est de 1%;
- le *mètre par seconde* (m/s) pour la vitesse moyenne d'écoulement, que l'on exprimera avec 2 chiffres après la virgule (précision du cm/s), même si on prend toujours trois chiffres décimaux pour les calculs intermédiaires.

La mesure d'un débit comprend donc le mesurage de chacun de ces trois termes, avec la meilleure précision possible pour chacun d'eux. L'hydrométrie, ensemble des techniques utilisées pour le mesurage des différents paramètres qui caractérisent l'écoulement des fleuves et rivières, propose pour y parvenir différentes méthodes, dont certaines sont très utilisées et d'autres sont l'apanage de quelques spécialistes.

Par exemple, plus de 90% des jaugeages effectués en Afrique sont faits par la méthode de l'exploration du champ des vitesses avec un moulinet hydrométrique, les distances à la berge étant mesurées avec un câble tendu d'une rive à l'autre. Peu importe que cette méthode comporte un grand nombre de variantes, suivant que l'on utilise une perche ou un saumon suspendu pour les profondeurs, que l'on travaille dans un bateau ou avec un transporteur aérien pour les distances à la rive ou que l'on procède par intégration ou par mesure ponctuelle de la vitesse.

Il faut sortir du domaine de cette méthode, classique pour tous les hydrométristes, lorsque la géométrie du bief hydrométrique - tronçon du cours d'eau où se situent la section de l'échelle limnimétriques et la (ou les) sections de jaugeage(s) - est telle qu'elle n'est plus applicable :

- soit parce que la largeur ne permet pas de tendre un câble d'une rive à l'autre (l supérieure à 300m); on parle alors de "grand fleuve";
- soit parce que la profondeur et/ou la vitesse du courant sont telles que les sondages avec un saumon sont difficiles et trop imprécis;
- soit parce que la pente du lit et par suite la vitesse moyenne d'écoulement sont trop faibles (U inférieure à 10 cm/s) : l'utilisation d'un moulinet hydrométrique est alors très déconseillée;
- soit parce que les conditions de navigation (vitesses, matériaux flottants) sont dangereuses et empêchent tout ancrage d'un bateau;
- soit enfin parce que plusieurs des conditions limitatives précédentes se trouvent réunies, ce qui est un cas assez fréquent dans les grands fleuves.

Différentes techniques permettent de faire face à ces conditions particulières. Celles qui sont présentées dans ce cours ne sont ni nouvelles, ni occasionnelles. Elles sont au contraire assez largement utilisées dans certaines régions où les techniques classiques sont insuffisantes.

Ce document comprend les chapitres suivants :

- 1- MESURAGE DES DISTANCES HORIZONTALES
- 2- MESURAGE DES PROFONDEURS
- 3- LEVE BATHYMETRIQUE
- 4- EVALUATION DE LA VITESSE MOYENNE - METHODE DES ULTRA-SONS ET METHODE ELECTOMAGNETIQUE
- 5- JAUGEAGE PAR LA METHODE DITE DES "GRANDS FLEUVES"
- 6- JAUGEAGE PAR LA METHODE DU BATEAU MOBILE

Nous nous plaçons dans un contexte exclusivement hydrométrique, c'est à dire pour l'ensemble de ce cours :

- sur la rive d'un bief hydrométrique dont il faut mesurer le débit ou effectuer le profil transversal, ou bien encore sur le bord d'un réservoir de barrage dont il faut réaliser la carte bathymétrique;
- entouré d'une équipe de techniciens en hydrométrie, c'est à dire de personnes qui, sans être des spécialistes de la topographie ou de l'électronique, sont de bons professionnels expérimentés et connaisseurs des méthodes et des matériels conventionnels;
- avec des objectifs réalistes quant à la précision attendue : nous insisterons davantage sur les méthodes simples mettant en oeuvre des matériels peu coûteux, que sur des techniques trop sophistiquées, inutilisables dans le contexte de la gestion d'un réseau hydrométrique national ou régional.

De nombreux exemples et illustrations utilisés dans ce document proviennent des rapports techniques sur les différents Cours sur le Jaugeage des Grands Fleuves organisés au BRESIL entre 1985 et 1988 par le DNAEE (Département National des Eaux et de l'Energie Electrique, organisme responsable de la gestion du réseau hydrologique brésilien), avec le concours de l'ORSTOM. Il s'agit d'exemples et non de modèles à suivre sans aucune modification. Au contraire, nous pensons que l'hydrométrie des grands fleuves est un domaine où l'initiative personnelle est primordiale, la seule contrainte étant le respect des limites d'utilisation de chaque méthode.

Chapitre 1 - MESURAGE DES DISTANCES HORIZONTALES

Ce chapitre traite des méthodes et des matériels utilisés pour mesurer les distances horizontales afin de pouvoir répondre aux deux questions suivantes :

- 1- quelle est la *largeur totale* de la section transversale ?
- 2- quelle est la *position exacte* du bateau de jaugeage ou de tout autre objet flottant fixe (bouée) ou mobile ?

Avant de répondre à ces questions, il faut en premier lieu *choisir la section transversale de référence* et la *repérer*.

11. DEFINITION DE LA SECTION TRANSVERSALE

111- Choix de la section de référence

Dans le cas le plus simple, la section de référence est définie par un point origine situé sur une des deux rives et par une direction, qui est soit un repère sur l'autre rive, soit un azimuth (direction angulaire connue). Ce cas est celui, par exemple, d'un levé topographique ou bathymétrique de repérage (prospection d'un site, profil transversal d'une retenue,...).

Dans le cas d'une section de jaugeage, le problème est plus complexe. Outre les considérations habituelles sur le choix de la section (bief rectiligne, profil géométrique stable et de forme régulière), il est impératif que la transversale de mesurage soit *perpendiculaire à la direction de l'écoulement* (en admettant que celle-ci ne varie pas avec le marnage et qu'elle soit unique dans toute la largeur).

Cette contrainte n'est pas du tout facile à respecter dans les sections de grande largeur. Il faut se méfier particulièrement de ce que l'on peut observer à l'oeil nu depuis la berge. En premier lieu, celle-ci est rarement parallèle à l'écoulement à proximité du point origine choisi sur une des rives; en second lieu l'écoulement près des bords est très souvent perturbé par le modelé du fond et des berges, sur des distances importantes, vers l'amont ou vers l'aval.

Une méthode pour choisir une section, aussi perpendiculaire que possible à la direction de l'écoulement est, après avoir repéré le point origine par une balise, d'ancrer le bateau au milieu du fleuve en moyennes eaux et à l'aide d'un goniomètre (équerre d'arpenteur ou cercle hydrographique) de laisser dériver le bateau jusqu'à ce qu'un angle de 90° soit établi entre la direction de la balise et l'axe longitudinal du bateau, que l'on suppose stabilisé par la vitesse de l'eau (absence de vent). On fixe ensuite un repère sur la rive opposée, soit en utilisant la même méthode, soit avec un cercle hydrographique à 180° .

Cette méthode est assez laborieuse mais elle permet d'éviter de grossières erreurs. Elle peut être aussi utilisée pour une vérification, après l'installation "à vue" d'une balise provisoire sur la rive opposée.

La perpendicularité de la section de jaugeage avec la direction de l'écoulement peut être vérifiée aussi lors de l'exécution d'un jaugeage par la méthode du bateau mobile (voir chapitre 6).

112- Repérage de la section transversale

Par balisage.

La section transversale est localisée et repérée sur les deux rives par des balises, dont la forme, les dimensions et la couleur sont à choisir en fonction de la largeur totale et des conditions locales (végétation, nébulosité, orientation et position du soleil au moment de la mesure,...).

Figure 1 - BALISES DE REPERAGE (Rio Sotimões à MANACAPURU)



L'équipement minimal comprend DEUX balises sur la même rive et un repère, qui peut être une balise ou un objet naturel comme un arbre ou une maison sur l'autre rive.

Les deux balises situées sur la même rive sont :

- la balise **ORIGINE**, installée sur la berge au plus près possible de la limite des hautes eaux; c'est la *balise principale* du repérage et le point origine (zéro) pour le calcul des distances horizontales;
- la balise d'**ALIGNEMENT**, installée sur la rive, à une distance de la balise origine égale approximativement au dixième de la largeur totale, exactement dans la section transversale; la distance entre les deux balises est souvent imposée par différentes contraintes locales (végétation par exemple) mais elle ne doit jamais être inférieure à 50m.

Si l'on a accès aux deux rives, ce qui est le cas général, et si la section transversale est une section de jaugeage, il faut installer deux autres balises sur la rive opposée; la balise **EXTREMITE** est installée sur la berge et la balise d'**ALIGNEMENT** est positionnée suivant les mêmes règles.

Il est indispensable que les QUATRE balises :

- soient parfaitement alignées; une vérification doit être faite et elle est très facile à faire avec un théodolite installé à l'emplacement exact de la balise **ORIGINE**, qui est la dernière à être mise en place;
- soient parfaitement visibles en tout point de la section compris entre les balises **ORIGINE** et **EXTREMITE**.

Autre méthode de repérage

Nous citerons ici, pour mémoire, le *laser d'alignement*. Il s'agit d'un matériel utilisé par les géomètres, qui permet de matérialiser un sillon lumineux, visible à l'oeil nu. Le bateau est équipé d'un récepteur qui permet au pilote de savoir si son bateau se trouve exactement aligné et même avec certains types d'appareils, de connaître sa position par rapport à la section (amont ou aval) .

Ce matériel est en pratique assez peu utilisé pour les raisons suivantes :

- la portée est limitée à 2500m, par la puissance maximale d'émission autorisée par la loi; pour des raisons de sécurité, il est recommandé d'utiliser des verres protecteurs;
- le rayon lumineux est peu visible par temps clair et il est aussi nécessaire d'installer des repères sur la rive pour guider le pilote par signaux ou par radio;
- le coût du matériel qui est de l'ordre de 35000 à 50000 FF (6500 à 8500 US\$).

Il existe des équipements beaucoup plus sophistiqués de radio-positionnement, utilisés pour les grands travaux de topométrie (levé des cuvettes de grands barrage en projet par exemple). Ces équipements dont le coût est de l'ordre de 50000 à 150000 US\$ sont l'affaire de spécialistes et n'ont guère leur place en hydrométrie.

113- Graphique et notations

La section transversale, équipée de ses balises, constitue la base de référence de tous les mesurages. Il est utile, et recommandé après son repérage, d'en faire un graphique (figure 2) et d'identifier ses différentes composantes qui sont :

1. la balise **ORIGINE**, que nous désignerons par les lettres **PI** pour Point Initial;
2. la balise **EXTREMITE**, que nous désignerons par les lettres **PF** pour Point FINAL;
3. les balises d'alignement , dont le rôle est de permettre au pilote de placer son bateau dans la section transversale;

4. la section transversale elle-même qui est la ligne PI-PF et que nous considérerons pour le calcul des distances horizontales comme un *axe orienté de PI vers PF*, l'origine étant en PI;

5. la distance PI-PF désignée par L; c'est la largeur maximale qu'il ne faut pas confondre avec la largeur superficielle l comprise entre les deux rives; L est une valeur fixe alors que l varie avec le marnage.

Considérons un bateau ancré au milieu du fleuve hors de la section PI-PF. Nous utiliserons les notations suivantes :

- RD et RG sont les rives droite et gauche;
- D est la distance entre le bateau et PI; l'angle entre la direction du bateau et la section est désigné par a;
- X est la projection de cette distance sur la section; X est égal à D si le bateau est parfaitement aligné dans la section; X croît de RI à RF, RI et RF étant les distances des rives au PI;
- Y est la projection de D sur un axe orthogonal à la section en PI; Y est nul quand le bateau est parfaitement aligné.

Par simplification pour ce cours, nous placerons toujours PI en rive droite et orienterons l'axe Y vers l'aval, c'est à dire que Y est:

- . *négatif* quand le bateau est à l'amont de la section;
- . *positif* quand le bateau est à l'aval de la section.

On a les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 l &= RF - RI \\
 L &= XF \\
 X &= D \cos a \\
 Y &= D \sin a \\
 D &= [X^2 + Y^2]^{1/2}
 \end{aligned}$$

12. EQUIPEMENTS

Pour mesurer des distances, on utilise des procédés *directs* ou *indirects*; dans ce second cas, on procède par triangulation c'est à dire que l'on mesure aussi un (ou 2) angle(s) afin de déterminer un (ou 2) côté(s) d'un triangle dont la base est connue.

121- Mesurage direct des distances

Nous citerons, pour mémoire, l'ensemble des équipements utilisés en topographie : chaînes d'arpenteur, galons ou rubans d'acier, câbles gradués bien connus des hydrologues et les accessoires indispensables que sont les jalons. Ces instruments servent dans le domaine de l'hydrométrie des grands fleuves pour l'implantation de bases de triangulation.

Parmi les instruments de mesure directe des distances, sont utilisés :

- le *télémetre optique* simple, qui est un instrument léger, constitué de deux objectifs dont l'écartement est de 50 à 80cm suivant les modèles; le principe de la mesure est la mise en coïncidence des deux images d'un même objet visé (jalon, arbre,...) dont on veut déterminer la distance.

Il peut théoriquement servir à mesurer des distances jusqu'à 500m mais c'est un appareil très imprécis au-delà de 100m. Son utilisation est à proscrire lorsque un chaînage peut être réalisé. Par contre, le télémetre optique est souvent utilisé pour mesurer la distance à la rive des bouées qui délimitent la largeur utile de mesurage dans les jaugeages par la méthode du bateau mobile.

Figure 2 - SECTION TRANSVERSALE - Graphique et notations

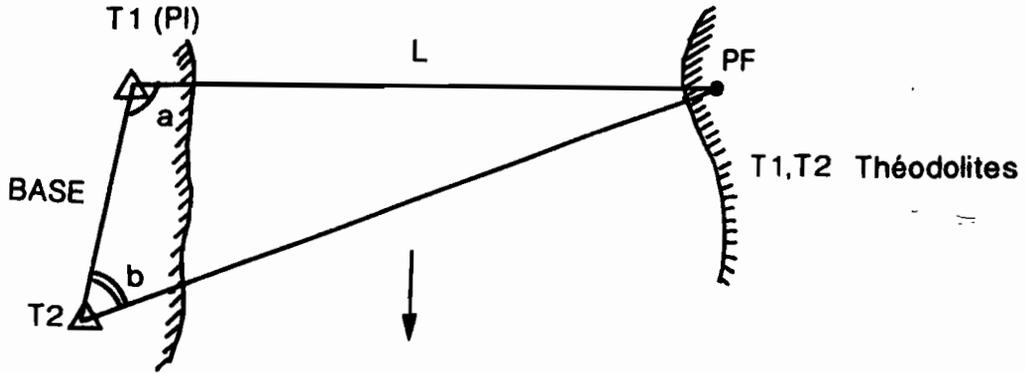
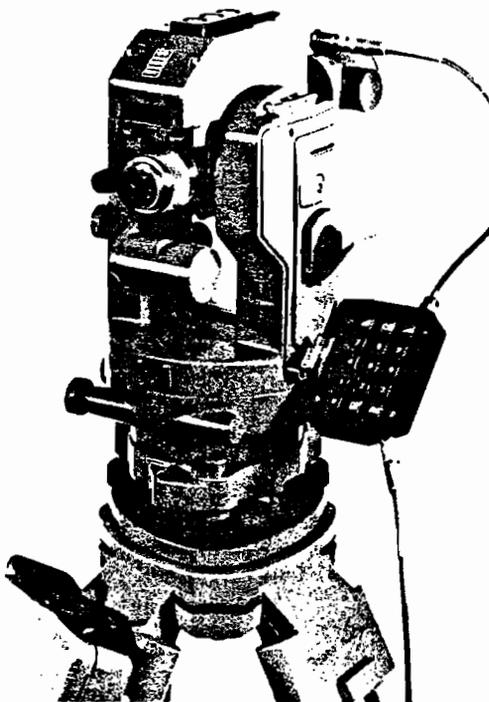


Figure 3 - TELEMETRE ELECTRONIQUE (documentation WILD S.A)

Di 4

Réf. 20/Di 4



Distomat Di 4 avec clavier

DISTOMAT DI 4 ET DI 4 L

Combine à un theodolite T1, T16 ou T2, le DISTOMAT DI 4 constitue un tachéometre électronique extrêmement performant sous une forme très compacte. Il est le digne successeur des DISTOMAT DI 10, DI 3, DI 3 S produits par WILD et SERCEL et réputés dans le monde entier pour leur qualité et leur précision.

Le DISTOMAT DI 4 est entièrement automatique et, grâce à son très faible encombrement, il se prête particulièrement bien aux travaux intensifs de lever et d'implantation. Sa portée de 2 000 m le rend également apte aux travaux de polygona-tion.

ACCESSOIRES POUR DISTOMAT ET CITATION

EQUIPEMENT ELECTRIQUE

- Chargeur de batterie GKL 11 0181.990
- Grande batterie 0349.641
- Petite batterie avec chargeur ... 0300.990

REFLECTEURS

- Prisme rond 0362.830
- Monture porte-prisme GPH 1 A pour DI4 0237.718
- Monture porte-prisme GPH 1 A pour CITATION 0362.820
- Canne à plomber GLS 11 0385.500
- Rallonge pour canne (0,50 m) GZW 5 0237.930
- Porte-reflecteur GRT 10 0325.722
- Monture GPH 3 pour 3 prismes, en coffret 0362.819
- Monture GPH 11 pour 11 prismes, en coffret 0376.233

EQUIPEMENT DI 4

- Equipement DI4 pour T1, T16, T2 0395.192
- Pièce de liaison GVS 20 pour T1 ou T16 0368.847
- Pièce de liaison GVS 19 pour T2 0346.530
- Clavier 0237.733
- Pièce de liaison clavier / T1 0395.182
- Pièce de liaison clavier / T16 0395.183
- Pièce de liaison clavier / T2 0395.181

Le DISTOMAT DI 4 L, avec une portée de 5 000 m (2 500 m avec un prisme), permet d'étendre encore l'usage du DISTOMAT, en particulier aux travaux de stéréopreparation. Ces deux modèles de DISTOMAT peuvent être équipés en option d'un petit clavier amovible adaptable au montant du theodolite. Ce clavier permet le calcul et l'affichage de la distance horizontale et de la dénivellation après introduction de l'angle vertical. Il permet également le calcul des différences de coordonnées (E, N). L'affichage de la distance s'effectue en 10 secondes avec une précision de 5 mm + 5 mm/km sur des diodes électroluminescentes. Pour les implantations, la distance peut être affichée automatiquement toutes les 4 secondes après une nouvelle mesure complète, avec une précision de l'ordre du centimètre.

Le DISTOMAT présente l'avantage de permettre les mesures d'angle et de distance entre 70° et le zénith. Avec les theodolites T1 et T16, il permet également le basculement de la lunette dans les deux positions. Sa très faible consommation permet de l'utiliser avec une petite batterie CdNi à chargeur incorporé, donnant une autonomie de 350 mesures.

- la *stadia* des niveaux topographiques, bien connue des hydrométristes et fort utile lors des travaux de nivellement ("trois lectures"), peut aussi être utilisée en installant un niveau sur la rive et une mire sur le bateau. C'est une procédure peu précise (verticalité de la mire sur un bateau ?) qui ne doit pas être employée pour des distances supérieures à 100m.

- le *télémetre électronique* (ou *géodimètre* ou *distancemètre*). On désigne sous ce nom toute une série d'appareils de création récente (une dizaine d'années). Le principe de base est la comparaison de phase entre l'émission d'une onde lumineuse modulée, généralement un rayon laser ou une onde infrarouge, et sa réception après réflexion sur un réflecteur à prismes installé au point précis, dont on veut connaître la distance (en l'occurrence le bateau). La précision de ces appareils est excellente : elle est de l'ordre de quelques centimètres pour des portées de 2 à 5km. Il existe un très grand nombre de modèles sur le marché; les plus intéressants pour les travaux d'hydrométrie sur les grands fleuves sont ceux qui se fixent sur un théodolite. Le coût de ces appareils est de l'ordre de 80000 FF à 150000 FF (15000 à 25000 US\$) suivant leurs performances (portée) et leur perfectionnement (affichage digital, sortie RS232,...).

122- Mesurage des angles

Les deux instruments les plus utilisés en hydrométrie sont le *théodolite* et le *sextant* ou *cercle hydrographique*. Nous y ajouterons pour mémoire les stations électroniques de fabrication récente dans lesquelles goniomètre (terme générique qui désigne tous les instruments pour mesurer les angles) et distancemètre sont combinés (voir chapitre 3 - Bathymétrie automatisée).

Théodolite

Cet appareil est très utilisé en topographie. Pour les hydrologues, beaucoup plus habitués au niveau à cercle gradué, la principale différence est la présence d'une lunette mobile dans un plan vertical, caractéristique très utile aussi bien pour les levés topographiques (cheminements) que pour le suivi d'un bateau sur un fleuve. Il est important de noter, en effet, que l'angle horizontal mesuré entre deux directions est un *angle dièdre* et non un angle plan : il s'agit de l'angle entre les deux plans verticaux qui contiennent les deux droites.

Il existe différents modèles de théodolites. On choisira, si on en a la possibilité un théodolite *directionnel*, muni d'un système de mise à zéro sur une direction de référence de façon à avoir directement la valeur de l'angle recherché. La précision obtenue varie suivant le modèle utilisé de 10" (modèle T1) à 1' d'arc (modèle T2).

Les théodolites doivent impérativement être mis en station sur un support parfaitement stable, ce qui exclut totalement son utilisation sur un bateau. En Amazonie, où les berges sont annuellement submergées en crue, des plateformes en bois sont construites pour recevoir les théodolites (voir figure 1). Ces plateformes sont doubles : la partie centrale où est installé le trépied est indépendante du reste, de façon à éliminer tout mouvement de l'appareil au cours du mesurage.

Sextant et cercle hydrographique

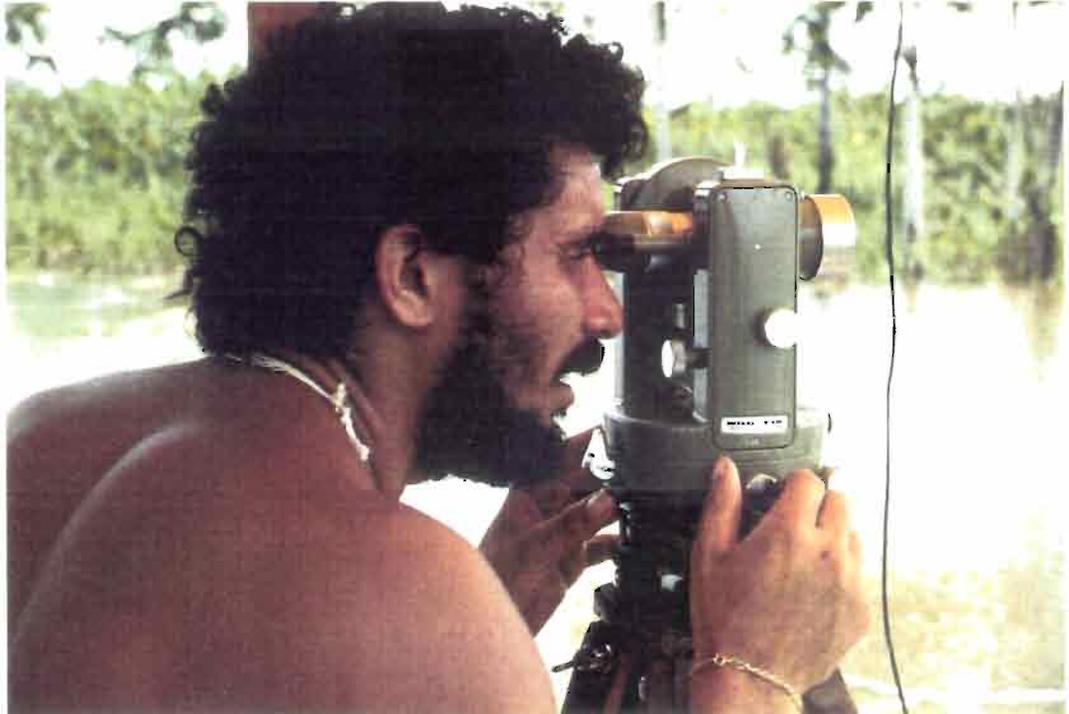
Ces deux appareils sont très semblables et sont basés sur le même principe : la mesure des angles par superposition des images de deux objets (jalons, balises), le premier étant visé directement, le second étant vu après réflexion sur deux miroirs, dont l'un est mobile et associé à un limbe gradué.

Le sextant, utilisé par les marins, permet de mesurer des angles verticaux et horizontaux de 0 à 120°. C'est un instrument assez lourd; mais muni d'une puissante lunette, il permet de faire des visées à grande distance (jusqu'à 5 km quand la visibilité le permet). La précision des modèles les plus précis est de 20" d'arc.

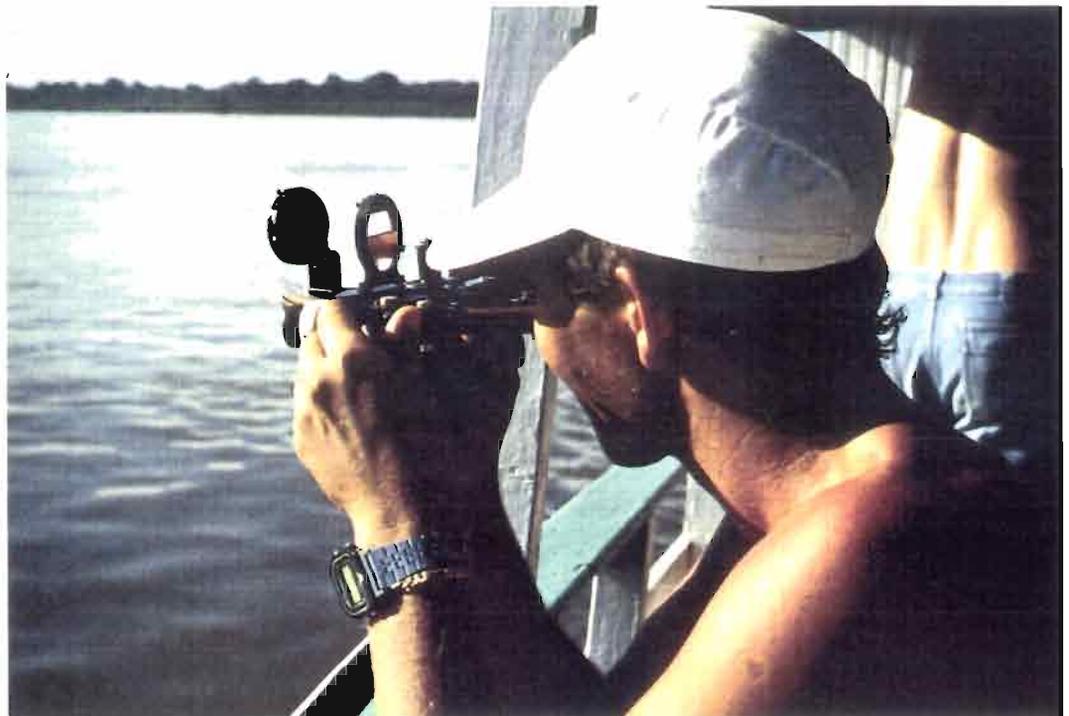
Le cercle hydrographique est un appareil plus léger, qui présente l'avantage de permettre la lecture d'angles de 180° (pour l'un des modèles existant) mais la portée maximale utile est de 2km et la précision de 1' d'arc.

Figure 4 - MESURAGE DES ANGLES (Solimões à MANACAPURU)

A. AVEC UN THEODOLITE



B. AVEC UN SEXTANT



En pratique, la précision du sextant est de l'ordre de $\pm 30''$ à $\pm 1'$. Elle est donc très inférieure à celle du théodolite mais le domaine d'utilisation n'est pas le même (voir paragraphe 14).

Les sextants et les cercles hydrographiques se dérèglent très facilement car le moindre choc modifie la position des miroirs. Il est indispensable de vérifier la *parallaxe* et le *règlage du zéro* (lecture exactement nulle pour la superposition exacte des images directe et réfléchie d'une même cible) avant chaque utilisation et de répéter cette opération périodiquement pour éviter toute erreur systématique.

13. TRIANGULATION

A l'exception du télémètre électronique, appareil d'usage peu fréquent en hydrométrie étant donné son coût assez élevé, le mesurage direct des distances supérieures à 300m sur un plan d'eau nécessite le recours à la méthode de triangulation.

131- Principe

Le principe en est simple (figure 5): à partir d'une base de longueur connue, on mesure les deux angles que fait cette base avec les deux droites joignant ses extrémités au point dont on veut déterminer la distance. Le triangle formé par la base et les deux droites est déterminé par un côté (base) et les deux angles mesurés.

Si B est la longueur de la base, a et b les angles mesurés, on peut calculer facilement L, distance PI-PF, par la règle des sinus. On a :

$$L = \frac{B \sin b}{\sin (180-a-b)}$$

Dans le cas *particulier* où la base est perpendiculaire à la section :

$$a = 90^\circ$$

$$L = B \operatorname{tg} b$$

132- Installation de la base

La base est caractérisée par sa *longueur* et sa *direction*.

La longueur de la base doit être aussi grande que possible : on choisira en pratique une longueur égale au tiers environ de la distance à mesurer. Il est en effet facile de calculer qu'un rapport de 3 à 1 entre L et B donne un angle de $71^\circ 34'$. Suivant l'appareil utilisé pour lire cet angle, on obtiendra les précisions suivantes :

| précision sur b | L = 1000m | 2500m | 5000m |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\pm 1'$ | $\pm 0,97\text{m}$ | $\pm 2,43\text{m}$ | $\pm 4,86\text{m}$ |
| $\pm 10''$ | $\pm 0,16\text{m}$ | $\pm 0,41\text{m}$ | $\pm 0,81\text{m}$ |

soit environ 2 pour mille avec un sextant et 1 pour 3000 avec un théodolite T2.

Figure 5 - MESURAGE DE LA LARGEUR PAR TRIANGULATION

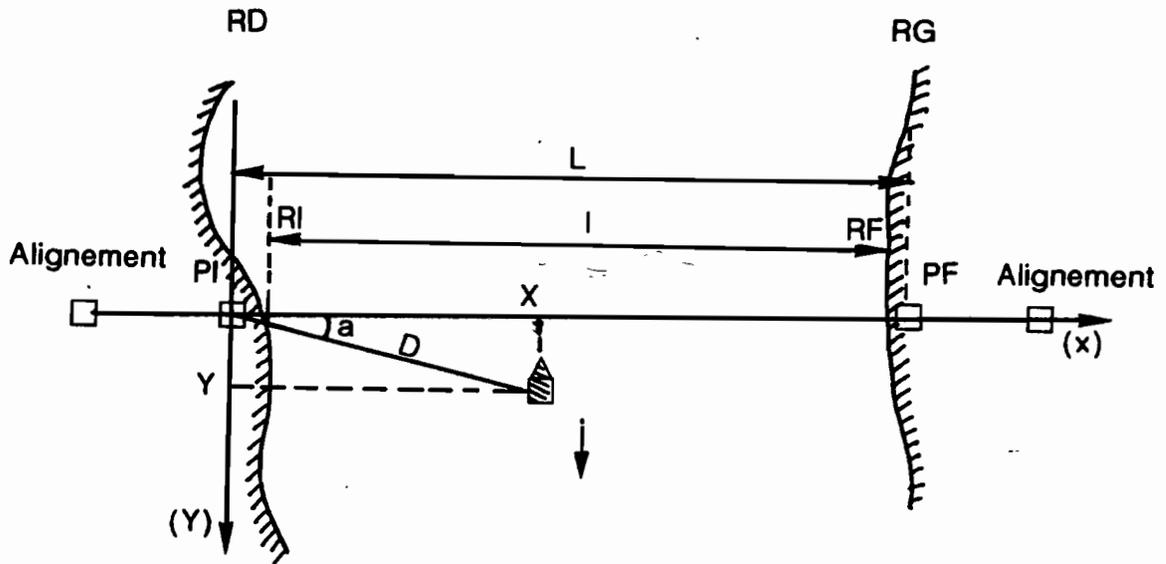
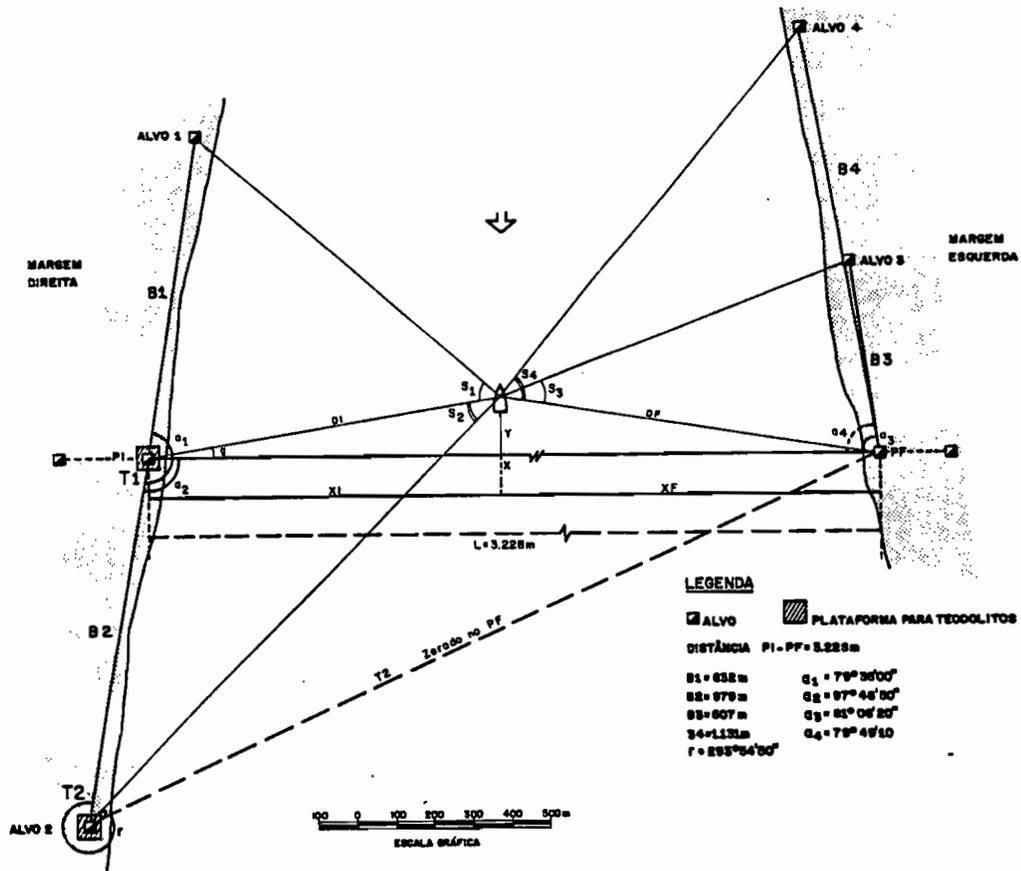


Figure 6 - EQUIPEMENT D'UNE SECTION DE TRES GRANDE LARGEUR (Rio Solimões à MANACAPURU / alvo = balise)



On choisira, chaque fois que cela est possible, une direction perpendiculaire à la section transversale, vers l'amont ou vers l'aval, afin de simplifier les calculs. Pour cela il faut que la rive le permette, c'est à dire qu'elle soit plate, sans végétation et elle-même perpendiculaire à la section transversale. Il est en effet indispensable, pour installer une base orthogonale que l'on puisse viser directement l'extrémité depuis l'origine (PI en général) avec un théodolite ou un laser d'alignement. Il faut aussi que la balise installée à l'extrémité soit située au plus près possible de la berge pour être bien visible.

Ces conditions sont bien difficiles à réunir sur le terrain lorsqu'il est nécessaire d'installer une base de plusieurs centaines de mètres, voire de plus d'un kilomètre. Dans ce cas, il est beaucoup plus simple d'installer d'abord une balise provisoire bien visible et à une distance du PI estimée, de vérifier par une triangulation rapide depuis la rive opposée si la distance est acceptable et de procéder ensuite à un cheminement à partir du PI afin d'en mesurer exactement sa longueur et sa direction. C'est cette méthode qui a été utilisée pour la plupart des stations du bassin amazonien.

L'installation de bases orthogonales à la section transversale n'est absolument pas nécessaire pour le positionnement d'un bateau dans une section de grande largeur. Il est beaucoup plus précis de s'appuyer sur des bases de longueur suffisante et de direction comprise entre 80° et 100°, que d'utiliser des bases trop courtes et dont l'orthogonalité à la section transversale n'est qu'approximative.

On trouvera dans la fiche technique n°1 en annexe tous les éléments nécessaires (formules, programmes HP et Basic,...) pour le calcul de la longueur et de la direction d'une base.

La figure 6 donne l'exemple des balises mises en place dans la section du rio Solimões à MANACAPURU. On observera la divergence des berges, bien apparente sur la figure car l'échelle des distances latérales n'a pas été conservée, qui rend impossible l'installation de bases perpendiculaires à la section transversale.

Remarque

Le levé direct par cheminement de chacune des 4 bases n'est pas nécessaire. Par triangulation, le connaissance de la longueur exacte et de la direction d'une seule base est suffisante. Pour les déterminer, on utilise très souvent une base auxiliaire plus courte (100 à 200m) parfaitement définie et la triangulation est faite avec un théodolite de précision (T2, mesure des angles à 1" d'arc près). L'expérience montre néanmoins que le levé direct et complet d'une base est une bonne précaution ou alors il faut utiliser deux bases auxiliaires, une sur chacune des rives. La précision de ces travaux préparatoires conditionne celle de toutes les autres opérations.

Les calculs sont faits à partir des formules classiques de résolutions des triangles (formules des sinus et du cosinus).

14. POSITIONNEMENT D'UN BATEAU

La détermination de la position exacte d'un bateau (d'une bouée ou d'un objet flottant quelconque) peut être faite :

- depuis la rive avec *deux théodolites* (ou un théodolite et un télémètre électronique);
- depuis le bateau avec un *sexant*.

Les deux méthodes sont décrites dans les fiches techniques 2 et 3 placées en annexe. Ces fiches donnent la procédure (description, graphique, formules) et les programmes de calcul HP (11C et 15C) et BASIC, avec un exemple numérique pour les tester.

Les deux méthodes sont totalement indépendantes. Chacune d'elles présente ses avantages et des inconvénients qui sont analysés ci-dessous.

141- Positionnement avec deux théodolites

La méthode est *précise*, même avec des théodolites à 10" et *rapide* avec des opérateurs habitués. Avec une liaison radio entre les deux opérateurs, on peut positionner un objet dérivant ou en marche (bateau) à un instant précis (seconde) et, dans un levé bathymétrique, faire des lectures toutes les 30 secondes (facilement) et même toutes les 15 secondes pour des opérateurs expérimentés.

Dans l'hypothèse d'un théodolite couplé à un télémètre électronique avec sortie digitale, l'intervalle entre les lectures peut encore être réduit (5 secondes).

Le principal inconvénient de la méthode est dans son *côût* en hommes et en matériel : deux à quatre opérateurs à terre, deux théodolites (2 fois 30000FF) et 3 équipements radio (10000FF) indispensables pour la synchronisation des lectures.

142- Positionnement avec un sextant

Le grand avantage de la méthode du sextant est son *autonomie* : l'appui sur les berges est constitué par les balises exclusivement. Aucun opérateur, aucun équipement de topographie et aucune liaison radio ne sont nécessaires. Le coût est ainsi fortement réduit : (5000 à 15000FF soit 1000 à 3000US\$ pour un cercle hydrographique ou un sextant.

Les inconvénients sont la *longueur des mesures*, qui rendent à notre avis impossible le positionnement précis d'un bateau en déplacement, et la *relative imprécision* de la méthode.

Le temps nécessaire pour faire les quatre mesures d'angles dépend exclusivement de l'opérateur et de la visibilité des balises lorsque les distances à mesurer dépassent 1km. Ceci n'est pas un obstacle lorsque le bateau est ancré et que l'on dispose de plusieurs minutes. Mais il est à peu près impossible, même avec 4 sextants et 4 opérateurs d'obtenir les valeurs des 4 angles à un instant donné.

Par ailleurs la précision du sextant est très inférieure à celle du théodolite et, pour que l'imprécision instrumentale soit négligeable, il faudrait théoriquement travailler avec des angles toujours supérieurs à 25° (suivant les recommandations de l'ISO 6420-184), en pratique *jamais inférieurs* à 15°. Cette limitation impose l'utilisation de bases de longueur au moins égales à la moitié de la largeur totale si une seule rive est utilisée et au tiers de la largeur totale quand on utilise les deux rives (ce qui à notre avis est indispensable quelle que soit la largeur !).

Le sextant est suffisamment précis pour les jaugeages avec ancrage du bateau dans la section transversale, lorsque l'alignement est correct. En d'autres termes, le sextant permet une bonne détermination des X (de l'ordre de 1% avec 2 bases opposées et de longueur suffisante)

Par contre la précision est faible, voire mauvaise, pour la détermination de Y, distance à la section transversale. La figure 7 en donne l'explication, à partir de l'exemple de la section de MANACAPURU où, pour des raisons didactiques, les bases ont été placées en opposition sur la rive droite et du même côté du PF sur la rive gauche. La position du bateau étant déterminée par l'intersection des arcs capables des deux angles mesurés, qui correspondent aux 2 bases, il est facile de voir que l'angle θ entre les tangentes au point d'intersection des arcs est beaucoup plus grand dans le cas de la rive droite (bases opposées) que dans le cas de la rive gauche (bases du même côté). Il est aisé de comprendre que l'erreur instrumentale est beaucoup plus sensible dans le second cas que dans le premier. C'est la raison pour laquelle il est impossible de suivre correctement la dérive d'un bateau sur 1 minute par exemple avec un (ou plusieurs) sextant.

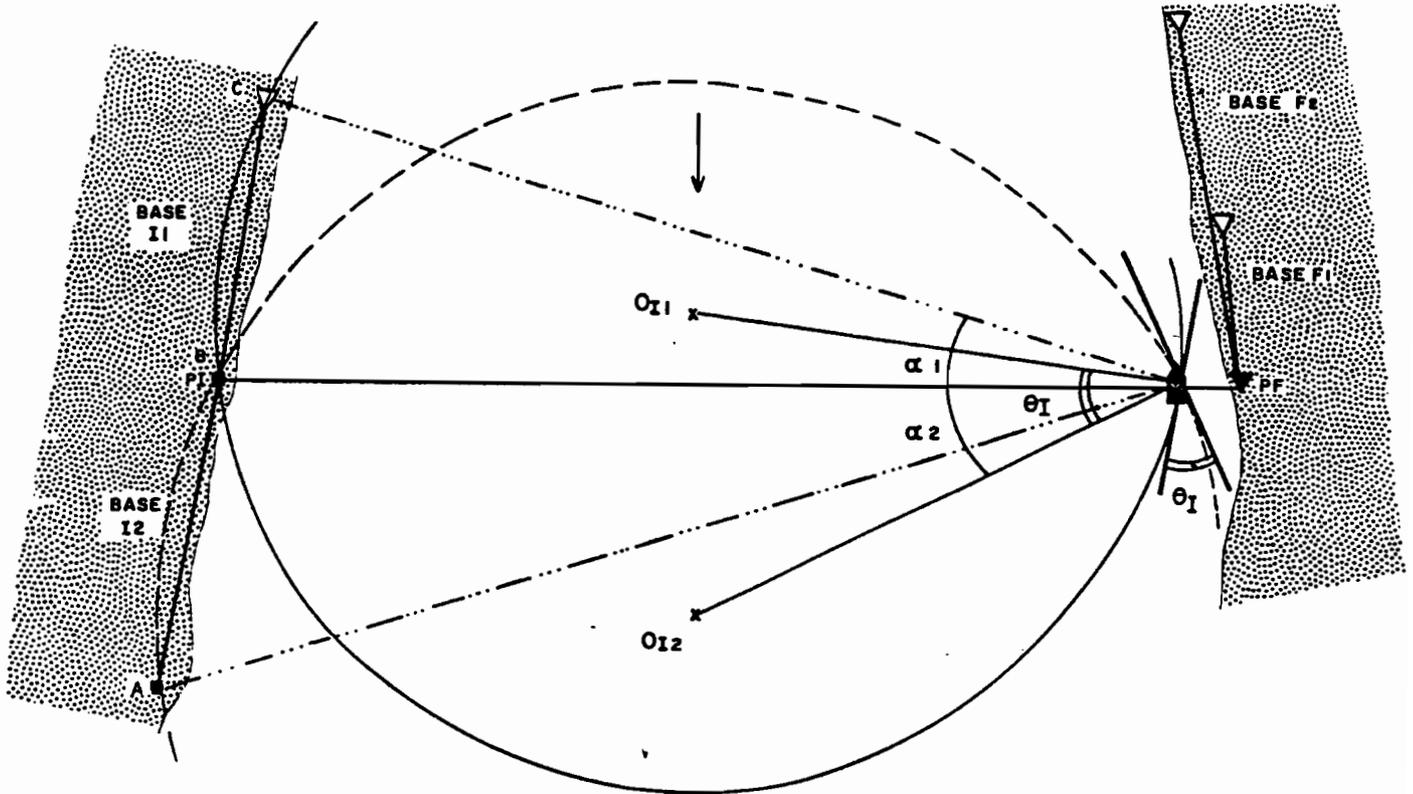
Lors de jaugeages réalisés à MANACAPURU, au cours desquels la position du bateau, ancré dans la section, a été déterminée à la fois avec 2 théodolites et un sextant, les valeurs suivantes ont été observées (en considérant la mesure des théodolites comme exacte, ΔX et ΔY sont les écarts relatifs à cette mesure) :

ΔX varie dans l'intervalle [-0,8 ; +2,9%] avec une moyenne de +1,1%

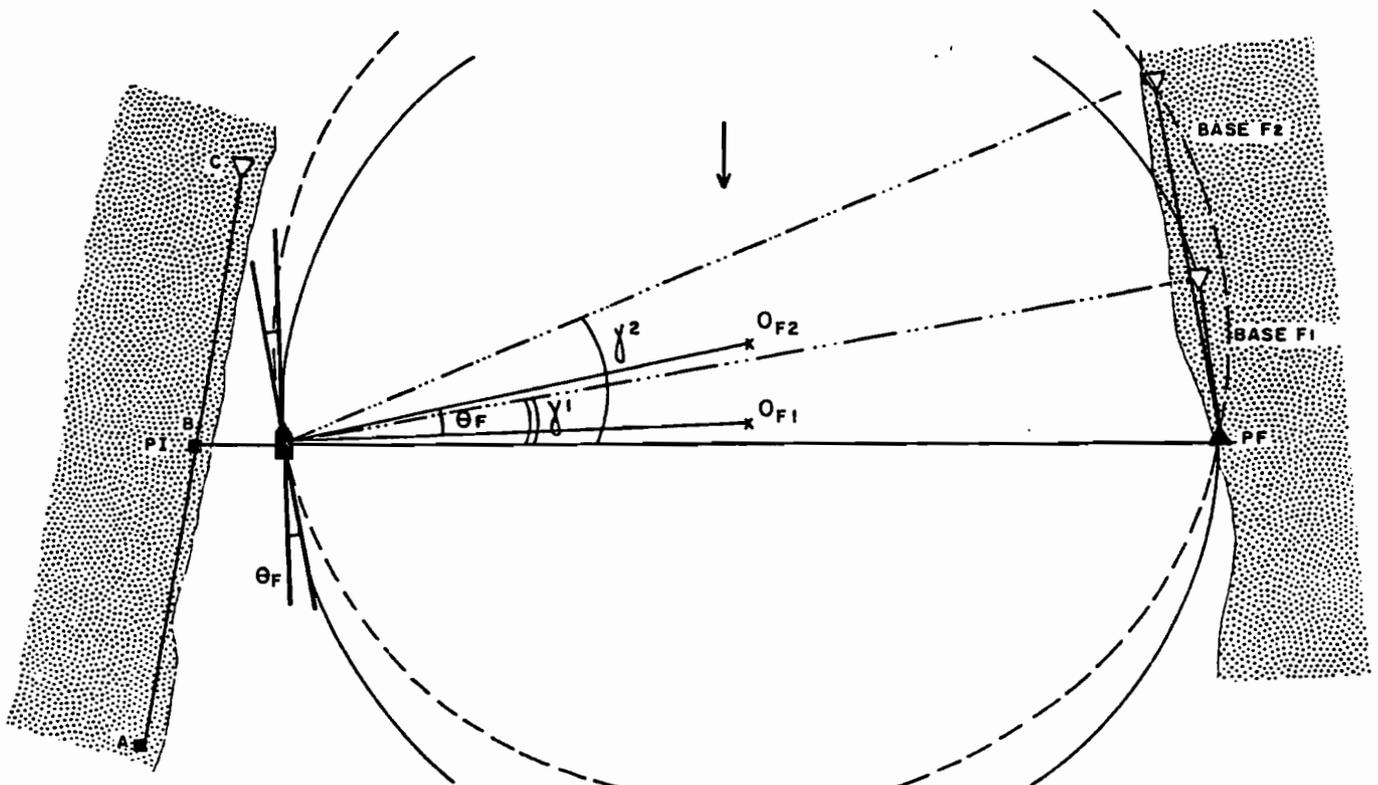
ΔY varie dans l'intervalle [\pm 300%], avec une moyenne sans signification.

Figure 7 - POSITIONNEMENT AU SEXTANT ET DISPOSITION DES BASES
 Section du Rio Solimões à MANACAPURU (PIPF = 3203m)

A. Bases opposées en rive droite (I1 = 852m et I2 = 976m)



B. Bases du même coté en rive gauche (F1 = 507m et F2 = 1132m)



Ces chiffres sont indicatifs car ils ne portent que sur une quinzaine de verticales et la synchronisation des mesures n'a pas été faite par radio. Ils confirment néanmoins la théorie. On observera aussi que la moyenne de ΔX de +1,1% dénote une erreur systématique de caractère instrumental, sans doute un mauvais réglage du zéro du sextant.

15. CONCLUSION

Le positionnement d'un bateau sur un fleuve de grande largeur est une opération techniquement facile mais qui doit être faite avec beaucoup de rigueur.

Rigueur dans la mise en place des bases de triangulation et rigueur dans la mesure des angles. Comme les erreurs de mesurage et de lecture sont absolument inévitables, surtout lors d'opérations qui durent plusieurs heures dans des conditions climatiques difficiles, il est impératif de faire des vérifications immédiates, sur le terrain. Les programmes donnés en annexe sont faits pour cela. Les minutes passées (une seule suffit pour chaque vérification) à faire des calculs simples, mais indispensables, peuvent éviter de refaire entièrement un jaugeage ou d'en jeter les originaux à la poubelle si les calculs, faits après le retour de l'équipe de mesurage à sa base, font apparaître des incohérences.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Recueil de normes ISO 16 1983

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts

Curso sobre Técnicas de Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios

Fiches techniques par G.JACCON - DNAEE/ORSTOM - 1984

Topométrie Générale

par E.P.LAUZON et R.DUQUETTE - Ed. Ecole Polytechnique de Montréal - 1980

Documentation technique

Wild, Kern, Geotronics

Chapitre 2 - MESURAGE DES PROFONDEURS

Après avoir positionné le bateau sur le plan d'eau et avoir déterminé avec la meilleure précision possible (1 à 2% pour un travail rigoureux) le terme l du débit, il convient de mesurer la seconde composante qui est la profondeur P .

Les deux méthodes de mesurage des profondeurs sont très classiques. Il s'agit :

- du sondage avec un *poids suspendu*, méthode très utilisée par les hydrométristes;
- du sondage avec un *écho-sondeur acoustique*, méthode très utilisée pour les levés bathymétriques de lacs, retenues et fonds marins mais aussi employée par les hydrométristes pour les jaugeages de fleuves de grande profondeur quand la stabilisation du bateau par câble ou ancrage est impossible ou n'est pas nécessaire (bateau mobile par exemple).

21. SONDAGE AVEC UN SAUMON

Le principe en est élémentaire : un poids profilé (appelé *saumon* en hydrométrie) est suspendu à un câble, commandé par un treuil muni d'un compteur centimétrique (voir photographie de la figure 8).

Le saumon est suspendu à un câble que l'on choisira de diamètre aussi petit que possible dans le cas d'écoulements à fortes vitesses ($> 1\text{m/s}$). Généralement on utilise des câbles conducteurs (ou électro-porteurs) pour le retour des impulsions émises par le moulinet mais ce n'est pas nécessaire. Le diamètre des câbles électro-porteurs utilisés en hydrométrie varie de 2,8 à 5 mm.

Le câble s'enroule sur le tambour d'un treuil manuel ou électrique, muni d'un compteur de profondeur centimétrique, solidaire soit du tambour, soit de la poulie de renvoi placée à l'extrémité du support (fer U ou madrier).

Le choix du poids du saumon est fait en fonction de la vitesse d'écoulement et de la profondeur. Les saumons utilisés en hydrométrie ont des poids qui varient de 10 à 150 kg, les plus courants étant 25, 50 et 100 kg. L.HORST (Cf. Bibl.) donne la règle suivante pour le choix du poids du saumon :

$$\text{Poids (kg)} = V_{\text{max}} (\text{m/s}) \times P_{\text{max}} (\text{m}) \times 5$$

soit, par exemple, pour $V_{\text{max}} = 1,5\text{m/s}$ et $P_{\text{max}} = 15\text{m}$, le poids du saumon est de $1,5 \times 15 \times 5 = 112,5$ kg. Cette règle est à appliquer avec discernement.

La seule règle est de limiter au maximum la *dérive* du saumon vers l'aval, dérive qui est une source d'erreur très importante et trop souvent négligée lors des mesurages. Elle est due à la force exercée par l'eau sur la portion du câble qui est immergée. Pour diminuer la dérive, il faut donc d'abord réduire au maximum le diamètre du câble de suspension et ensuite augmenter le poids du saumon. La limite théorique est fixée par la tension de rupture du câble (attention aux câbles électro-porteurs trop fins et de mauvaise qualité) et par le type de treuil utilisé. Travailler à la main avec un saumon de 100kg est un exploit physique réservés à quelques "hercules" de l'hydrométrie !

Pour les jaugeages de l'Amazone où les vitesses sont de l'ordre de 2m/s et les profondeurs de 40 à 70 mètres à l'époque des hautes eaux, on utilise des saumons de 120 kg avec des câbles de 4 mm et des treuils électriques dont la vitesse de remontée du saumon est de l'ordre de 40cm/s .

Correction de la dérive

La correction de la profondeur est indispensable lorsque l'angle du câble avec la verticale dépasse 8°. Cet angle est mesuré sous la poulie de renvoi avec un rapporteur muni d'un fil à plomb (Cf. ROCHE, page 200).

La dérive du saumon vers l'aval entraîne un accroissement de la longueur de câble qui a été déroulée : la correction va donc diminuer la valeur de la profondeur lue sur le compteur du treuil.

En pratique on calcule la correction par la somme de deux termes (Cf. notations de la figure 9):

- Δa correction sur la partie de câble exondé; elle est égale à $AE-AB$, soit $AE (1 - \cos \alpha)$
- Δd correction sur la partie de câble immergé; elle est égale à $EF * K$, K étant un facteur variant avec α , donné dans le tableau ci-dessous.

La correction totale Δp est égale à $\Delta a + \Delta d$. Cette correction doit être retranchée de la valeur de la profondeur lue sur le compteur du treuil.

Tableau 1 : Calcul de la correction de dérive du saumon

| α en degrés | $1 - \cos \alpha$ | K | α en degrés | $1 - \cos \alpha$ | K |
|--------------------|-------------------|--------|--------------------|-------------------|--------|
| 4 | 0,0024 | 0,0006 | 20 | 0,0627 | 0,0204 |
| 5 | 0,0038 | 0,0011 | 21 | 0,0664 | 0,0226 |
| 6 | 0,0055 | 0,0016 | 22 | 0,0728 | 0,0248 |
| 7 | 0,0075 | 0,0024 | 23 | 0,0795 | 0,0272 |
| 8 | 0,0097 | 0,0032 | 24 | 0,0865 | 0,0296 |
| 9 | 0,0123 | 0,0041 | 25 | 0,0937 | 0,0323 |
| 10 | 0,0152 | 0,0050 | 26 | 0,1012 | 0,0350 |
| 11 | 0,0184 | 0,0061 | 27 | 0,1090 | 0,0379 |
| 12 | 0,0219 | 0,0072 | 28 | 0,1171 | 0,0408 |
| 13 | 0,0256 | 0,0085 | 29 | 0,1254 | 0,0440 |
| 14 | 0,0297 | 0,0098 | 30 | 0,1340 | 0,0472 |
| 15 | 0,0341 | 0,0113 | 31 | 0,1428 | 0,0508 |
| 16 | 0,0387 | 0,0128 | 32 | 0,1520 | 0,0544 |
| 17 | 0,0437 | 0,0146 | 33 | 0,1613 | 0,0582 |
| 18 | 0,0489 | 0,0164 | 34 | 0,1710 | 0,0620 |
| 19 | 0,0545 | 0,0184 | 35 | 0,1808 | 0,0659 |
| 20 | 0,0627 | 0,0204 | 36 | 0,1910 | 0,0698 |

Erreurs fréquentes :

Mis à part la dérive, principale source d'erreur, le mesurage de la profondeur par sondage avec un saumon est une opération qui requiert de l'attention. Les erreurs les plus fréquentes sont dues :

- mauvais fonctionnement des compteurs;
- à l'oubli de la remise à zéro du compteur de profondeur lorsque le pied du saumon affleure la surface de l'eau;
- au mauvais enroulement du câble sur le tambour ou à un patinage du câble sur la poulie (en particulier lorsque le saumon repose sur le fond);
- à l'enfoncement du saumon dans un fond vaseux.

Une erreur plus rare, mais néanmoins observée et grave parce que systématique, peut provenir d'un diamètre de la poulie de renvoi qui ne correspond pas au compteur.

22. ECHO-SONDEUR

Le mesurage des profondeurs avec un sondeur à ultra-sons devient nécessaire lorsque le bateau ne peut être stabilisé. Cette méthode est de plus en plus utilisée en hydrométrie car la technique est désormais bien au point et les matériels disponibles nombreux et d'un prix assez bas (à partir de 5000FF ou 1000US\$ pour les modèles les plus simples).

Le plus grand avantage de la méthode est qu'elle est pratiquement instantanée et utilisable avec un bateau en déplacement à vitesse réduite.

221. Propagation des ondes sonores dans l'eau

Une onde sonore se propage dans l'eau, comme dans l'air, avec une certaine *fréquence* et une certaine *vitesse*. Dans l'eau, l'énergie de l'onde s'affaiblit rapidement au cours de sa propagation par dispersion et par absorption.

La gamme des fréquences audibles va de 50 à 15000 Hz (15kHz) et la gamme des *fréquences ultrasoniques* commence à partir de cette limite.

La vitesse de propagation du son dans l'eau dépend de la masse volumique ρ (masse par unité de volume) et de l'élasticité E , qui est définie comme le rapport entre une variation de la pression hydrostatique et la variation relative de volume qui lui correspond ("élasticité volumique").

La vitesse de propagation c est égale à $(E/\rho)^{1/2}$

Masse volumique et élasticité dépendent de nombreux facteurs, dont les plus importants sont la pression (donc la profondeur), la température, la salinité, la charge solide en suspension et les bulles d'air. En eau douce non chargée, la vitesse varie de 1400m/s environ à 0° à plus de 1500m/s lorsque la température atteint 35° (soit 8% d'augmentation).

Les pertes d'énergie sont importantes. Elles proviennent de la dispersion de l'énergie et de son affaiblissement du à la résistance de l'eau à la propagation de l'onde. Lorsque celle-ci rencontre un obstacle, comme le fond du lit, elle est réfléchi avec de nouvelles pertes. Le coefficient de réflexion est le rapport entre les énergies incidente et réfléchi. Il dépend du matériau et de la fréquence de l'onde.

222. Description et principe

Un écho-sondeur comprend deux parties principales :

- un boîtier de commande qui contient un circuit électronique; celui-ci engendre une énergie électrique de haute fréquence; outre le clavier des boutons de commande, il contient aussi, suivant le modèle, un compteur digital pour l'affichage de la profondeur ou en enregistreur graphique;

- un élément électro-acoustique en forme de sabot (appelé transducteur) qui joue le rôle de convertisseur d'énergie électrique en onde acoustique et vice-versa; il est relié au boîtier de commande par un câble.

Le transducteur est évidemment immergé de 30 à 40 cm sous la surface. Il doit être fixé sur la proue du bateau, aussi loin que possible du moteur pour limiter les vibrations parasites.

L'appareil mesure le temps qui s'est écoulé entre l'émission d'une impulsion et le retour de son écho, après réflexion sur le fond de la rivière.

Figure 10 : ECHO-SONDEUR DE MARQUE RAYTHEON

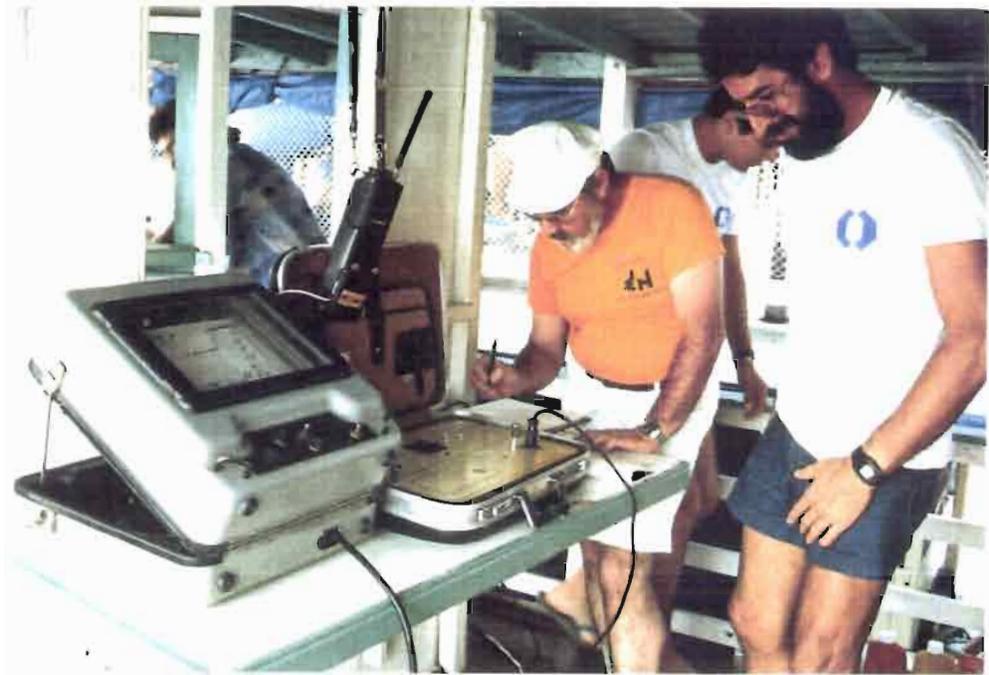


Figure 11 : PLAQUE METALLIQUE UTILISEE POUR L'ETALONNAGE DE L'ECHO-SONDEUR



On a :

$$d = c * t/2$$

avec : d, distance entre la base du transducteur et le fond;
c, vitesse du son dans l'eau;
t, temps de parcours entre l'émission et le retour de l'écho.

Il existe deux types d'appareils :

- les écho-sondeurs numériques à lecture directe, sans enregistrement, très utilisés pour les travaux de prospection;

- les écho-sondeurs enregistreurs, équipés d'une table déroulante avec enregistrement graphique, indispensables pour les travaux de bathymétrie et d'hydrométrie; ces appareils permettent d'enregistrer en continu la *ligne de fond*, qui correspond au profil du fond sur la trajectoire suivie par le bateau (Cf. figure 13).

Les appareils de qualité moyenne à supérieure sont tous équipés d'une sortie série type RS232, nécessaire pour les travaux de grande ampleur ou pour la bathymétrie automatisée (Cf. chapitre 3).

223. Matériels, portée et précision

Il existe de très nombreux matériels sur le marché dont le prix varie de 5000 à 100000 FF (1000 à 16000 US\$) suivant la portée de l'appareil et la précision recherchée.

Portée et précision dépendent de la gamme de fréquence utilisée et de la largeur du faisceau d'émission. Les fréquences utilisées varient de 5kHz (pour les sondeurs utilisés pour les très grandes profondeurs océaniques) à 200 kHz pour les sondeurs dont la portée ne dépasse pas 100m et qui sont ceux utilisés en hydrométrie, parce que le faisceau d'émission est plus étroit et donc plus précis pour détecter les ruptures de pente abruptes.

La précision du mesurage avec un sondeur à enregistrement dépend de deux termes : la *précision instrumentale* définie par les caractéristiques techniques de l'appareil et la *lisibilité* du diagramme. Ces valeurs sont fournies par le constructeur.

Le modèle de marque RAYTHEON (DE 719), utilisé en Amazonie et bien visible sur la photographie de la figure 10, présente les caractéristiques suivantes :

- enregistrement graphique avec 4 vitesses de déroulement du diagramme (1, 2, 3 et 4 pouces par minute) fourni en rouleaux de 18,2m (60 pieds);
- amplitude de 0 à 205 pieds (≈ 62,5 m) avec 4 gammes d'enregistrement (0-55, 50-105, 100-155 et 150-205 pieds) sur une largeur de bande de 17,8 cm (7 pouces);
- possibilité d'effectuer plus de 500 sondages par minute (soit plus de 8 à la seconde !);
- fréquence utilisée : 200 kHz;
- précision : 0,5% ± 2,5 cm de la profondeur indiquée (soit entre 7,5 et 12,5 cm pour 20 m);
- lisibilité du diagramme : ± 5 cm;
- alimentation : batterie 12 volts.

Le modèle léger de marque LOWRANCE EAGLE (Model Mach 1), présente des caractéristiques assez voisines (fréquence 192 kHz, plusieurs gammes d'utilisation) mais sa précision est deux fois plus faible (1% ± 5cm).

224. Etalonnage

Comme cela a été dit, la vitesse de propagation du son varie avec la masse volumique et l'élasticité de l'eau, donc avec sa température, la pression, la charge solide,...Il est donc **INDISPENSABLE** d'étalonner l'appareil avant et après toute utilisation, sur les lieux mêmes du mesurage..

Chaque écho-sondeur possède un bouton de réglage : il suffit donc pour l'étalonner de se placer à la verticale d'un point dont la profondeur est parfaitement connue.

La méthode usuelle consiste à utiliser une plaque métallique (photographie de la figure 11), suspendue à un câble gradué et immergée à la verticale du transducteur à différentes profondeurs connues : 2, 4,..., 10, 20m. L'écart entre la profondeur de la plaque et la valeur indiquée par l'écho-sondeur est progressivement annulé lors de la phase d'immersion de la plaque. A la remontée effectuée par paliers, la coïncidence doit être rigoureuse : la figure 12 reproduit l'enregistrement d'un étalonnage de l'écho-sondeur de marque RAYTHEON.

La figure 13 donne le profil transversal de la section de MANACAPURU levé à la vitesse maximale du bateau (environ 12 km/h), le déroulement du diagramme étant réglé au minimum. La largeur totale est de 3203m et la profondeur maximale dans le canal central est de 34,6 m.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Recueil de normes ISO 16 1983

Mesure des débits liquides dans les canaux découverts

Curso sobre Técnicas de Medição de Descarga Liquida em grandes Rios

Fiches techniques par G.JACCON - DNAEE/ORSTOM - 1984

Hydrologie de Surface

par M.ROCHE - Gauthier-Villars / Orstom - 1963

Hydrometry

par L.HORST - IIHEE - Delft Netherlands - Third Edition 1974

Figure 12 : ETALONNAGE DE L'ECHO-SONDEUR : DIAGRAMME

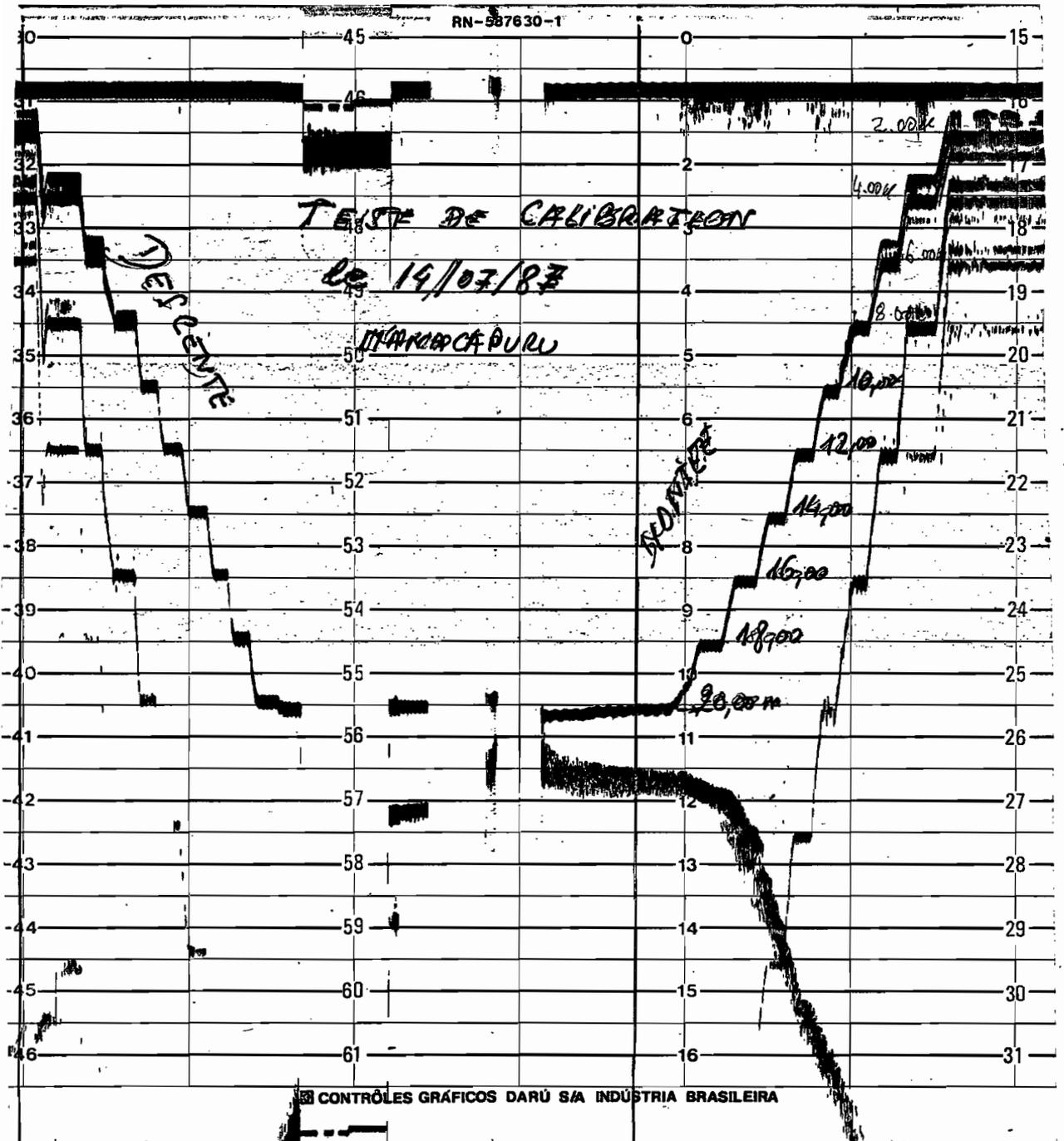
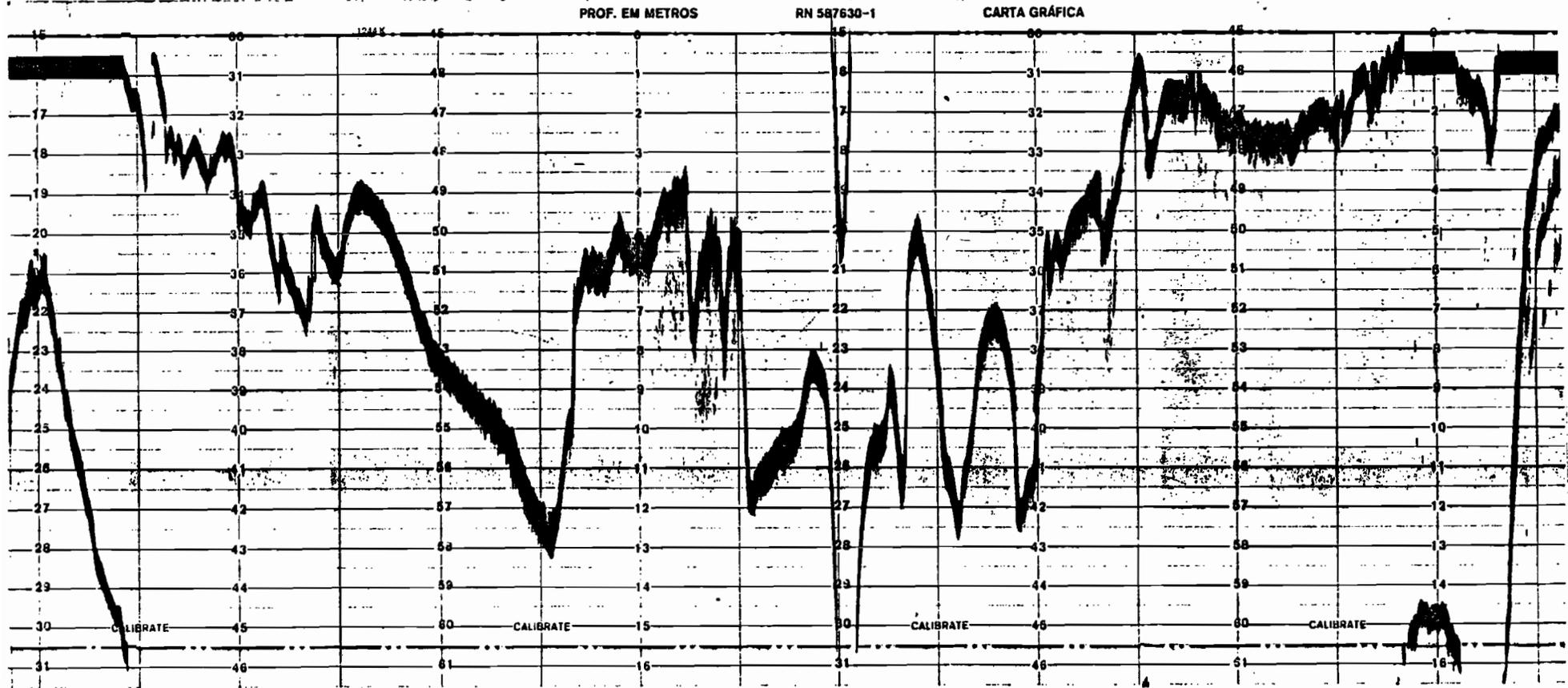


FIGURE 13 : ECHO-SONDAGE DE LA SECTION TRANSVERSALE DU RIO SOLIMÕES A MANACAPURU



Chapitre 3 - LEVE BATHYMETRIQUE

Ce terme assez général désigne toute opération de topométrie qui concerne le fond des rivières et des mers.

Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux méthodes de levé des sections transversales des fleuves de grande largeur et à la cartographie du fond des retenues de barrage dans le but d'en estimer la capacité réelle et le taux d'envasement.

On peut considérer qu'il existe aujourd'hui deux catégories de méthodes :

- les méthodes *artisanales* (sens noble du terme), c'est à dire celles qui mettent en oeuvre les moyens matériels courants d'une brigade hydrométrique : un bateau ZODIAC ou autre, des équipements de topographie et un écho-sondeur à ultra-sons;

- les méthodes modernes de *bathymétrie automatique*, qui mettent en oeuvre des matériels sophistiqués, sont utilisées pour des opérations de grande envergure et menées par des spécialistes.

31- METHODES ARTISANALES

Lorsque l'on sait positionner un bateau en déplacement sur un plan d'eau et mesurer la profondeur locale à un instant donné, la méthode consiste à effectuer un sondage autant de fois qu'il sera nécessaire pour obtenir un nombre de points suffisant pour le tracé des courbes de niveau.

321. Opérations sur le terrain

En pratique, on procède de manière systématique par des traversées successives, effectuées à vitesse constante, suivant une direction donnée et en réalisant des levés ponctuels à intervalles de temps constants (toutes les 30" par exemple).

Une mesure consiste à faire *au même instant* un sondage et un positionnement. La simultanéité de l'opération est absolument nécessaire et exige l'utilisation d'une liaison par radio entre le bateau et les observateurs postés sur la rive. Le signal de la mesure doit être commandé depuis le bateau par le responsable du levé qui prendra soin de répéter à chaque fois le numéro du point quelques secondes avant de donner le "top".

"ATTENTION POUR LE POINT 25.....TOP!"

Ce "top" déclenche :

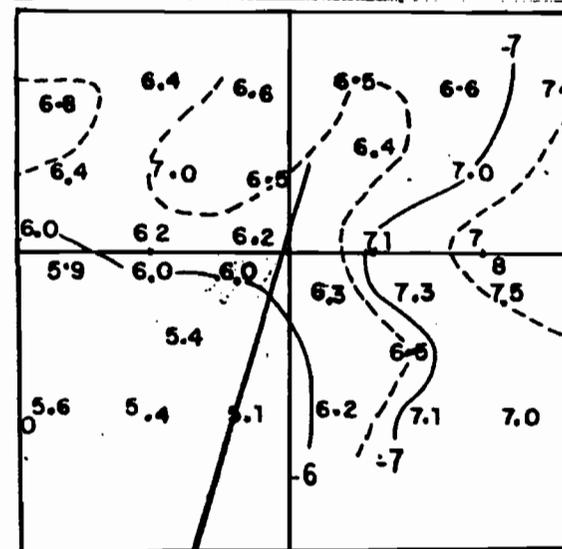
- la pression sur le bouton de commande du marqueur de l'écho-sondeur (trait vertical sur le diagramme);
- le blocage des théodolites pour permettre la lecture de l'angle.

Si l'un des observateurs de théodolites perd un point, cela n'a pas une grande importance, mais il est impératif qu'il n'oublie pas de laisser en blanc la case correspondante sur sa fiche de relevés.

Pour guider le pilote et lui permettre de suivre une trajectoire aussi rectiligne que possible, la mise en place de balises de repérage sur la rive est nécessaire. On utilise aussi le plus possible les repères naturels. Le guidage par radio depuis la rive (l'observateur suit le déplacement du bateau avec un théodolite et donne en permanence des instructions au pilote) ou avec un laser d'alignement (largeurs inférieures à 2500m) permet au pilote de suivre des trajectoires rectilignes.

Figure 14 - RESTITUTION DU LEVE BATHYMETRIQUE ET COURBES DE NIVEAU
 (altitudes en cote échelle, levé du 14/11/1984)

RIO SOLIMÕES EM MANACAPURU
 Cod: 14100000
 SEÇÃO DE MEDIÇÃO (PI - PF)
 COTA LINIMÉTRICA: 10,48m



Mais ceci n'est pas indispensable pour l'exécution d'une cartographie du fond. Pour la section du rio Solimões à MANACAPURU (exemple donné sur la figure 14), la cartographie du fond du lit a été faite sur la base de :

- 5 doubles traversées (aller et retour sur le même alignement) positionnées l'une sur la section de jaugeage déjà balisée et les autres à $\pm 25\text{m}$ et $\pm 50\text{m}$ de part et d'autre;
- ce que les opérateurs locaux appelaient des "zig-zag", c'est à dire des remontées du fleuves parallèlement aux berges, à 25m, 50m, 75m, 100m (distances "à vue") de celles-ci de manière à bien déterminer les ruptures de pentes près des rives; quelques "zig-zag" complémentaires étaient aussi effectués dans la zone du chenal principal profond et étroit (Cf. écho-sondage - figure 13).

Le système des doubles traversées permet de compenser les inévitables défaillances des observateurs de théodolites et d'augmenter le nombre de sondages car les trajectoires aller et retour ne sont jamais exactement les mêmes. Le nombre total de points levés varie de 600 à 800 suivant le nombre de "zig-zag".

J.CLAUDE et R.CHARTIER, dans leur étude sur l'envasement des barrages tunisiens (1977), ont utilisé une technique de levé bathymétrique encore plus simple, puisque sans appui topographique depuis les berges. Nous reproduisons ici l'extrait de leur rapport, où est décrite la méthodologie utilisée (Cf. Cahiers ORSTOM - Série Hydrologie, vol. XIV - 1).

Le principe de la méthode est le relevé des fonds de la retenue le long de profils transversaux préalablement repérés ; les profondeurs étant enregistrées par un écho-sondeur à bande déroulante.

II.1. MATÉRIEL UTILISÉ

Le matériel adapté à ce genre de mesures est facilement transportable et relativement peu onéreux, il comprend :

- 1 canot pneumatique gonflable type « Zodiac Mark II » ;
- 1 moteur hors bord de 20 cv ;
- 1 écho-sondeur à ultra-sons SIMRAD 160, qui se compose lui-même :
 - d'un nez de sonde, émetteur et capteur d'ultra-sons, que nous avons monté sur un petit saumon métallique de 20 kg suspendu dans l'eau sur le côté du canot par un porte à faux,
 - et d'un enregistreur sur papier thermosensible à vitesse de déroulement constante.

L'appareil est alimenté en courant continu 12 volts.

La mesure des profondeurs se fait sur une bande de mesure de 40 m dont on peut décaler l'origine par pas de 10 m pour atteindre 200 m de profondeur ; quelle que soit la profondeur mesurée la précision de la mesure est donc la même. La largeur de la bande de papier d'enregistrement est de 5 pouces soit 12,7 cm, l'échelle de l'enregistrement étant de 1 pouce pour 10 m soit 1 mm pour 39,4 cm ; comme il est possible d'apprécier le demi-millimètre sur la bande, la précision sur les mesures de profondeur est de 20 cm environ.

La vitesse de déroulement du papier peut être réglée, on choisit en général la vitesse de 1/2 pouce par minute, la vitesse du bateau au moment des relevés étant de l'ordre de 1 m/s, cela correspond à une distance couverte de 60 m par graduation de 1 minute soit à peu près 5 m pour 1 mm d'enregistrement. Ces valeurs sont évidemment réajustées pour chaque profil au moment du dépouillement. Ce matériel est peu compliqué et facile d'emploi, mais il n'est pas très précis et ne peut être utilisé systématiquement par des fonds de moins de 5 m. Cependant pour les six barrages qui ont été relevés la précision est largement suffisante. Un travail systématique de relevé des petites retenues nécessiterait l'acquisition d'un matériel plus performant du type sondeur scientifique sur lequel on peut faire varier la sensibilité en fonction de la gamme de mesures et obtenir une précision sur les profondeurs meilleure que 5 cm.

II.2. MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE

II.2.1. Opérations préliminaires

La première opération consiste à rassembler les documents cartographiques nécessaires qui sont :

- le plan coté de la cuvette du barrage avant ou au moment de la mise en eau. Ces plans sont levés topographiquement à l'échelle de 1/5 000^e ou 1/10 000^e ;
- les photos aériennes de la retenue du barrage après la mise en eau.

On procède alors au choix des profils à relever. Il n'y a pas de règle précise pour guider ce choix ; on cherche en général des sections transversales au lit de l'oued, en évitant les rétrécissements et en choisissant de préférence les sections les plus larges ; si la retenue se divise en plusieurs branches, on traite chacune indépendamment.

Les profils sont positionnés sur le plan côté de la retenue et sur les photos aériennes ; une reconnaissance sur le terrain est nécessaire pour identifier les points remarquables sur les photos aériennes, qui sont facilement repérables depuis la surface de l'eau et servent à positionner les profils sur le plan sans ambiguïté. Dans le cas où des mesures d'envasement ont déjà été faites sur des sections bien identifiées, nous avons conservé les profils déjà repérés (cas du barrage Mellègue).

Les profils choisis doivent être balisés sur le terrain de façon à ce que les repères matérialisant les extrémités de ces profils soient toujours visibles depuis le bateau quelle que soit la cote du plan d'eau. La meilleure solution consiste à implanter des fers IPN ou des morceaux de tuyaux en fonte sur les berges au niveau approximatif de la cote maximum ; peints en rouge et blanc ces jalons sont toujours bien visibles et faciles à retrouver.

Si la retenue est de petite taille, on peut se dispenser du balisage et se repérer uniquement grâce à des points caractéristiques identifiés sur les photos aériennes.

II.2.2. Réalisation des mesures

La réalisation des mesures est simple et ne demande que quelques précautions élémentaires. Deux personnes suffisent pour manœuvrer le bateau et manipuler l'écho-sondeur.

— On se place au départ du profil, dans l'alignement des deux jalons ou repères matérialisant le profil.

— On descend le saumon supportant le nez de sonde juste sous la surface de l'eau ; le bas de l'écho-sondeur est alors à 40 cm environ sous la surface.

— Au départ du bateau et simultanément :

— on met en marche l'enregistreur et on note sur la bande d'enregistrement directement les références du profil, la date et la cote du plan d'eau.

— on déclenche un chronomètre qui permettra un contrôle supplémentaire des vitesses.

— On dirige le bateau à allure constante et réduite vers le jalon opposé. Par temps calme, il est facile de se maintenir en ligne droite et de garder une allure constante avec le canot Zodiac qui est très maniable, mais dès qu'il y a du vent et un léger clapot sur la retenue cela devient problématique et l'on suit une trajectoire courbe qui peut être estimée par la suite, mais dont l'écart à la trajectoire rectiligne est moindre que celui d'un câble soutenu par des flotteurs et auquel s'amarré le bateau pour les mesures au lest par la méthode manuelle. De toute façon, passé un certain degré d'agitation de l'eau il est préférable d'abandonner les mesures, la rapidité de la méthode permettant d'attendre des jours de beau temps.

— Arrivés à l'autre extrémité du profil, on arrête l'enregistrement et le chronomètre, et on note sur la bande la fin du profil et le temps de parcours.

— En général, on effectue un retour sur le même profil en répétant les mêmes opérations.

II.2.3. Intérêt de la méthode

Les avantages de la méthode de la mesure à l'écho-sondeur sur la méthode de relevés point par point à l'aide d'un lest descendu au bout d'un câble gradué sont nombreux. Lors de la mise au point de la méthode nous avons fait des mesures comparatives avec l'équipe de l'EGTH sur le barrage Mellègue. La comparaison des profils levés par l'écho-sondeur à ceux relevés avec le lest faisait apparaître des disparités surtout lorsque le fond présentait des accidents (forte pente). En fait lorsque le bateau est amarré au câble, il ne s'immobilise pas et dérive facilement d'une dizaine de mètres, le point relevé n'est donc pas positionné exactement sur le profil, de plus le câble du lest, du fait de la dérive, n'est plus vertical au moment où le lest touche le fond, et le lest lui-même ne s'immobilise pas tout de suite sur le fond : un plongeur est allé observer le comportement du lest utilisé par l'équipe EGTH et a constaté que si le fond était plat le lest pouvait se poser à la verticale ou se coucher et s'enfoncer plus ou moins profondément dans la vase, et que si le fond était en pente, le lest pouvait glisser sur la pente avant de se stabiliser ; enfin si l'eau est agitée en surface et que le bateau monte et descende sur un léger clapot, le lest suit les mouvements du bateau et ne reste pas posé au fond.

Toutes ces causes d'incertitude étant levées, des mesures simultanées dans les meilleures conditions possibles ont permis de constater des écarts de moins de 10 cm entre les profondeurs relevées par les deux méthodes et ont montré que la précision des mesures d'un écho-sondeur assez simple comme celui que nous avons utilisé était facilement supérieure à celle des relevés manuels.

La méthode de relevé à l'écho-sondeur simplifie au maximum les opérations de mesures et les prises de notes sur le terrain, elle évite de matérialiser le profil relevé par un câble qui est souvent difficile à mettre en place si le profil dépasse 200 m. Le relevé du fond est fait de façon continue, on ne risque donc pas de passer au-dessus d'une anomalie et toutes les particularités du fond apparaissent.

Enfin et surtout la rapidité des relevés à l'écho-sondeur n'est en rien comparable à celle de la méthode point par point. Pour relever un profil de 200 m de long en deux passages aller et retour avec l'écho-sondeur, il faut 15 min au maximum alors qu'avec une sonde à main, en incluant le temps nécessaire pour déplacer et immobiliser le bateau le long du câble matérialisant le profil, il faut compter 15 min par point et une précision moyenne réclame au moins un point tous les 10 m.

Il faut cependant rappeler que l'écho-sondeur dont nous disposons ne peut être employé systématiquement pour des fonds de moins de 5 m (ce qui nous a fait abandonner l'idée de faire le cubage de la Sebkhia Kclbiat par cette méthode).

322. Dépouillement et restitution du levé

Le dépouillement du levé est assez long lorsque le nombre de points est important mais ne présente pas de difficultés. Dans un dépouillement manuel, la première chose à faire est de préparer un tableau avec 5 colonnes : numéro du point, coordonnées (X, Y), profondeur et altitude (ou cote absolue). Il faut bien vérifier, pour chaque traversée, la cohérence entre le nombre de sondages marqués sur le diagramme et le nombre de lectures pour chaque théodolite.

Le tableau étant préparé, on calcule d'abord les coordonnées X et Y de chacun des points sondés (avec l'un des programmes de la fiche technique n°2 annexée) sans recopier les lectures d'angles. Il est assez facile de détecter les erreurs de lecture (ou de report sur la fiche de terrain) des angles : en effet le bateau suit une trajectoire à vitesse constante et certains écarts de trajectoire sont impossibles.

Les profondeurs sont ensuite lues sur le diagramme de l'écho-sondeur et immédiatement transformées en altitude ou cotes absolues, en leur retranchant (ou ajoutant) une constante qui est souvent en hydrométrie la hauteur limnimétrique. Cette précaution est nécessaire si l'on veut comparer des profils ou des cartes bathymétriques d'un même lieu.

Les points sont ensuite reportés sur un papier millimétré, en inscrivant l'altitude de chacun d'eux.

Le tracé des courbes de niveau (du fond) est fait en s'appuyant sur la méthode classique de l'interpolation linéaire. Le résultat obtenu est une carte du fond, comme le montre la figure 14.

32 - METHODES AUTOMATIQUES

La bathymétrie automatique s'est considérablement développée depuis une quinzaine d'années avec la très rapide évolution des matériels de topométrie électronique. Il existe aujourd'hui des équipements qui permettent de cartographier en temps réel un fond marin ou fluvial.

La réalisation de levés précis, par exemple pour le suivi de l'envasement des barrages nécessite le recours à ces méthodes, dont la seule limitation d'utilisation est dans le coût des équipements (150 000 à 1 000 000 FF ou 25 000 à 180 000 US\$).

On peut distinguer 3 niveaux d'automatisation :

- dans le niveau 1, le suivi du bateau reste manuel; par rapport à la méthode artisanale décrite précédemment, on note l'utilisation d'un géodimètre (télémètre électronique + théodolite) avec stockage sur un micro-ordinateur de poche de la distance et de l'azimut du bateau à intervalles de temps constants assez courts (5 à 10"); le bateau, qui est équipé d'un réflecteur, se déplace à vitesse constante et réduite suivant des trajectoires aussi rectilignes que possible, repérées sur les rives, éventuellement avec guidage par radio depuis la berge; un écho-sondeur enregistre la ligne de fond et les valeurs numériques sont stockées par l'écho-sondeur (ou sur un micro-ordinateur) à intervalles constants.

La méthode présente un début d'automatisation dans la phase de dépouillement grâce au stockage direct des données sur mémoires magnétiques.

- dans le niveau 2, l'équipement précédent est complété par une liaison radio entre la berge et le bateau; les angles et les distances mesurés par le géodimètre sont transmis automatiquement au bateau et immédiatement traité : le pilote peut suivre la trajectoire du bateau sur un écran d'ordinateur placé devant lui. Il est possible de programmer des trajectoires avant le levé et le pilote peut ainsi comparer sa position au parcours idéal; les points sondés peuvent être pointés en temps réel par une table traçante (Cf. figure 15)

- dans le niveau 3, l'automatisation est totale dans la mesure où le géodimètre sur la berge est équipé d'un système de suivi automatique du bateau et, dans des systèmes plus performants encore, les mouvements du bateau sont automatiquement contrôlés par l'ordinateur de bord.

Les figures 15, 16 et 17 reproduisent quelques pages extraites des très nombreuses documentations techniques existantes.

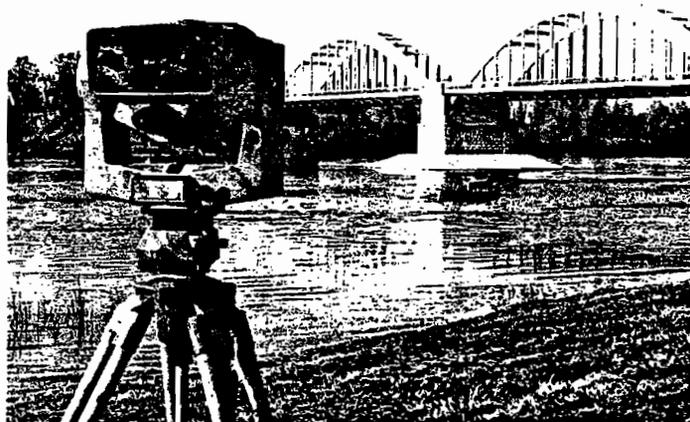
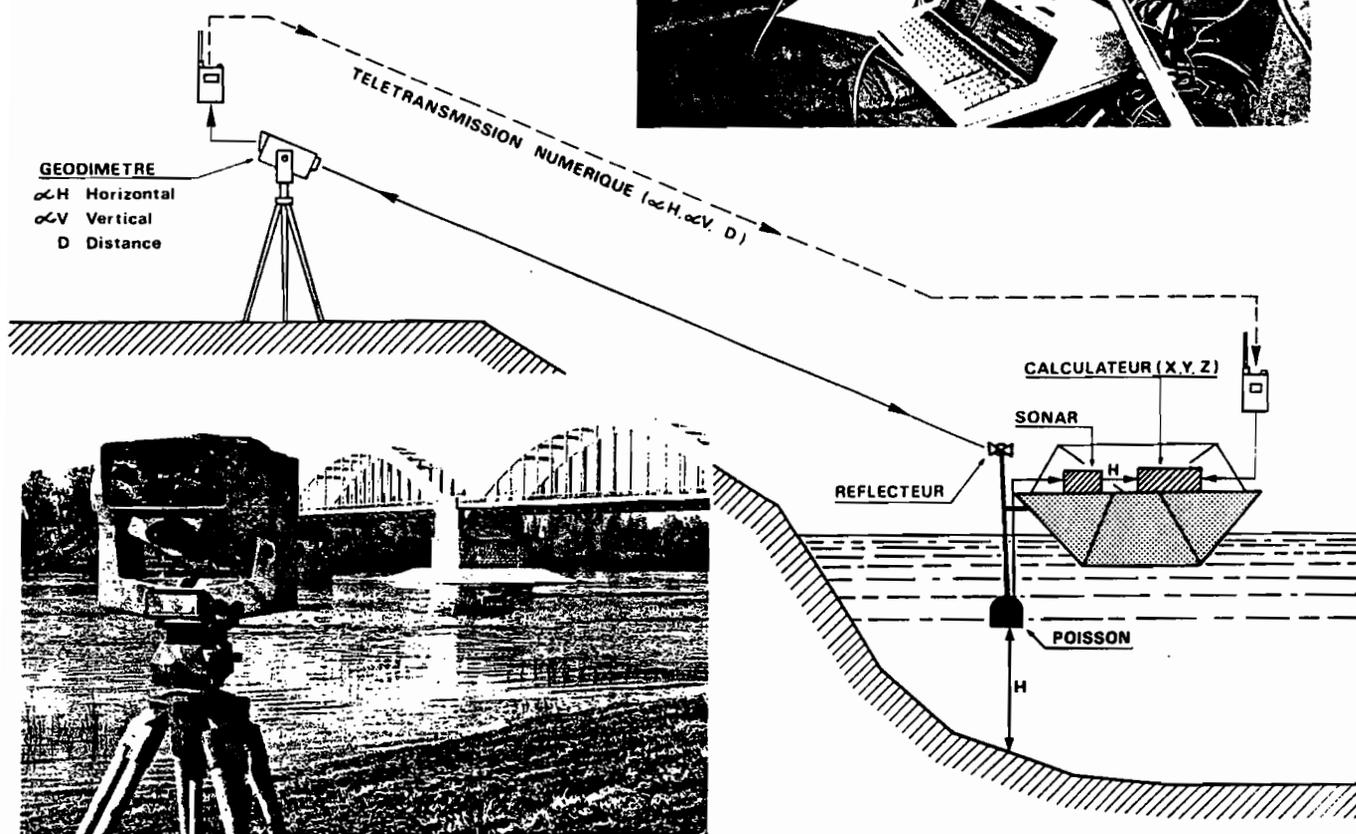
FIGURE 15 - CARTOGRAPHIE DES FONDS AQUATIQUES - SYSTEME THETIS
(source : Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois)

Principe :

A terre un géodimètre électronique suit le bateau en continu.

Une télétransmission assure le transfert des données au calculateur de bord, celui-ci saisit par l'intermédiaire du sonar les cotes du fond et les stocke sur support magnétique.

Une table traçante permet au pilote un suivi de la couverture.



Le traitement informatique est effectué par un logiciel approprié, relié à une sortie graphique.

Cet ensemble permet d'obtenir :

- des cartes en courbes de niveau et en points cotés,
- des profils,
- des vues tridimensionnelles,
- des cartes et des cubatures différentielles entre deux états.

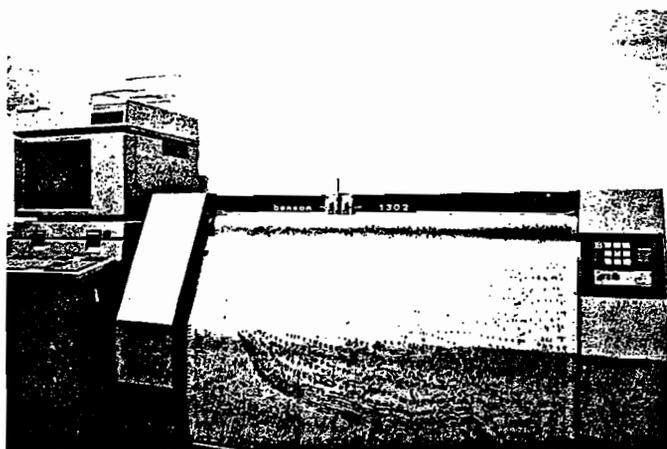


FIGURE 16 - BATHYMETRIE AUTOMATIQUE DE NIVEAU 2
(source : Hydrographic Positioning -
Société GEOTRONICS AB)

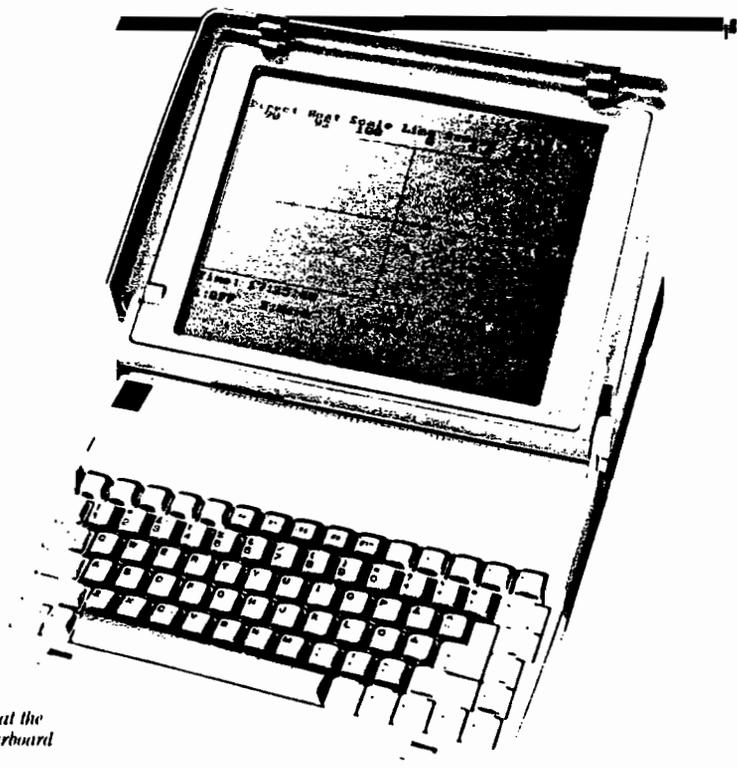
EQUIPMENT ON SHORE

- Geodimeter total station
- Communication radio
- Telemetry equipment

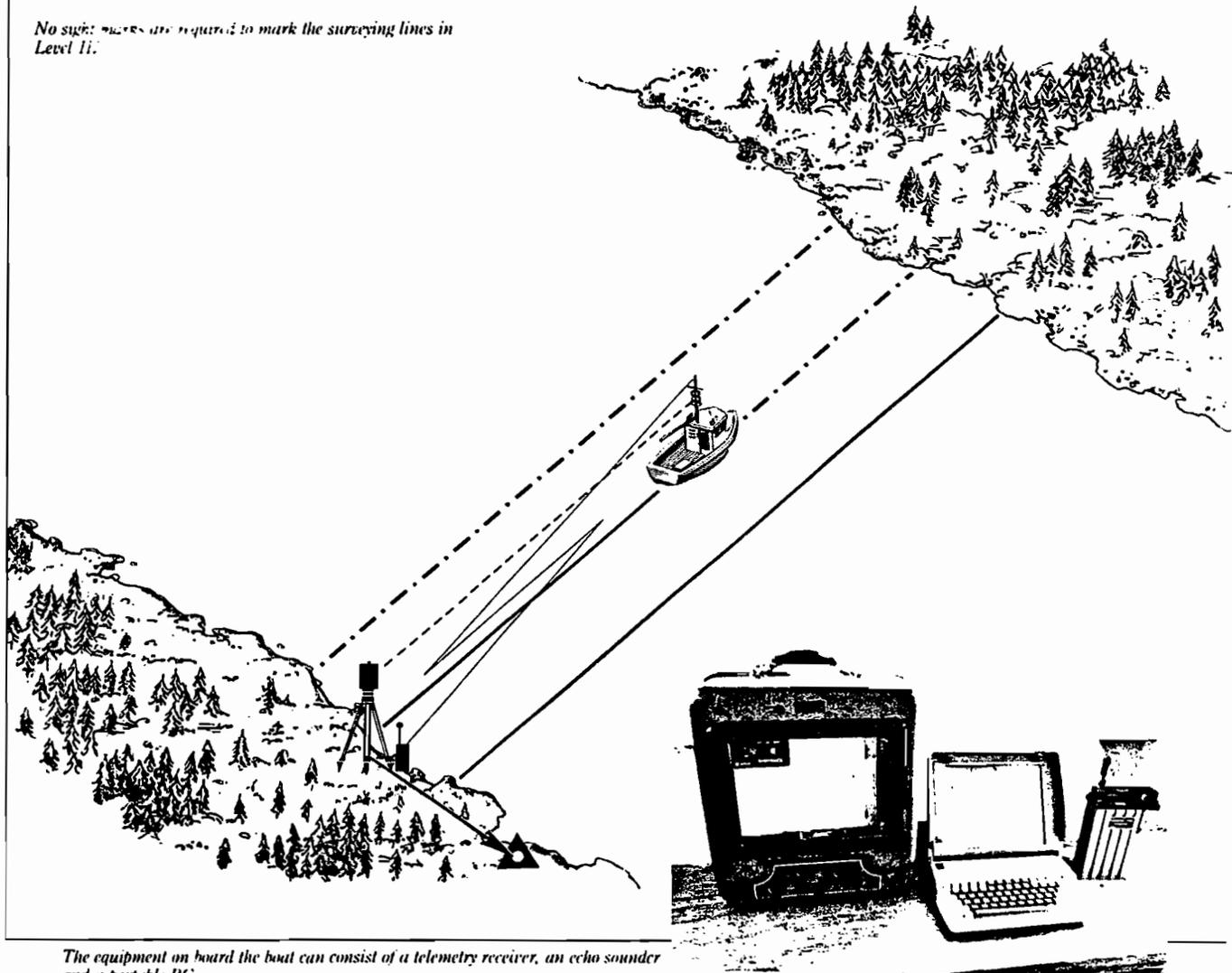
EQUIPMENT ON BOARD

- Reflector
- Echo sounder
- Computer with software
- Communication radio
- Telemetry equipment

The display screen shows that the boat is located slightly to starboard of the surveying line.



No sight markers are required to mark the surveying lines in Level II.



The equipment on board the boat can consist of a telemetry receiver, an echo sounder and a portable PC.

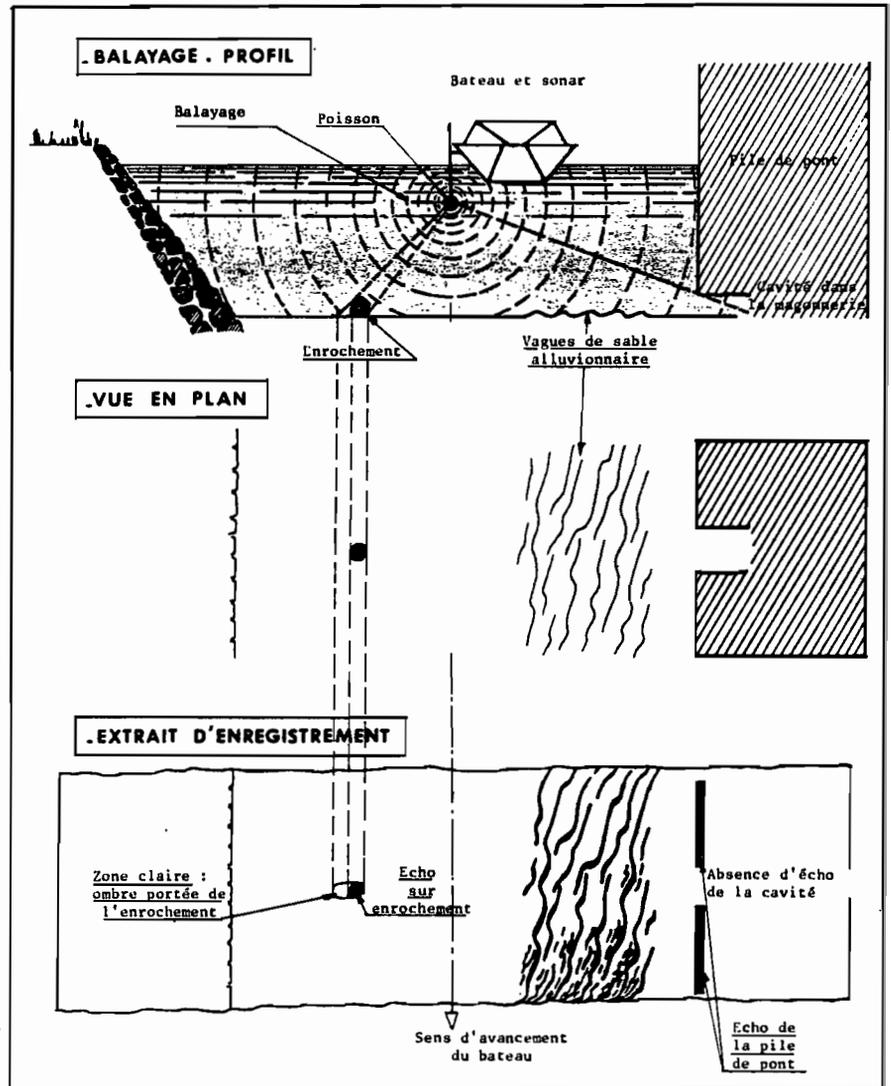
FIGURE 17 - RESTITUTION GEOMORPHOLOGIQUE PAR ECHOGRAPHIE AVEC UN SONAR LATÉRAL
(source : Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois)

Principe :

Le sonar latéral effectue un balayage des fonds aquatiques par l'émission d'un faisceau ultrasonique de 500 kHz.

Les images sont restituées point par point sur papier.

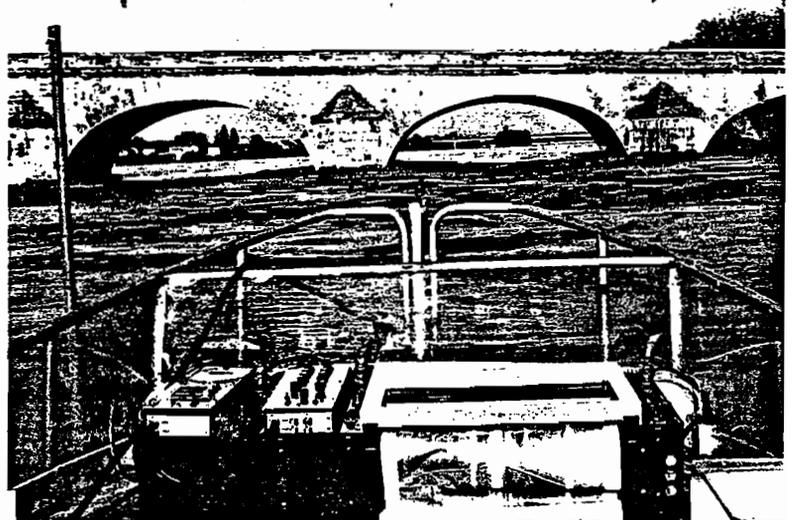
On obtient ainsi une véritable « photographie structurale du fond ».



Interprétation

L'interprétation est de deux types :

- qualitative quant à la nature des éléments (vase, sable, graviers, blocs),
- quantitative quant à la forme des blocs, des épaves, des constructions et des figures géomorphologiques.



323. CALCUL DES VOLUMES DES RETENUES

L'objectif normal recherché dans une opération de levé bathymétrique d'un lac ou d'une retenue de barrage est évidemment d'en calculer le volume total ou la diminution de la capacité utile par envasement.

Il existe différentes méthodes. Elles sont décrites par J.CLAUDE et R.CHARTIER dans le document déjà présenté et dont nous reproduisons ici la partie correspondante. Dans cette étude, l'objectif recherché était l'évaluation de l'envasement des barrages en Tunisie. Les auteurs disposaient pour chacune des retenues étudiées de la carte topographique de la cuvette avant sa mise en eau. La mesure de l'envasement est faite par différence entre deux levés.

II.3. DÉPOUILLEMENT DES MESURES. CALCUL DE L'ENVASEMENT

Les dépouillements des mesures sont assez longs et demandent quelques précautions.

II.3.1. Etablissement des profils

Il s'agit de déterminer sur chaque profil l'importance de l'envasement.

a) Pour chaque profil, on établit d'abord la section en travers d'origine, d'après les plans disponibles où l'équidistance des courbes de niveau est de 2 m ou de 5 m, ce qui selon la taille de la retenue donne une précision acceptable. Ces profils sont tracés jusqu'à la cote maximale d'eau (cote de déversement).

b) D'après la cote du plan d'eau au moment des mesures on détermine la longueur du profil mesuré, ce qui permet sur la bande d'enregistrement de transformer l'échelle des temps en échelle des distances, d'après la durée de la traversée. Si, comme c'est souvent le cas, la longueur du profil sur la bande est différente à l'aller et au retour à cause de l'effet du vent sur le bateau, on modifie l'échelle au moment de la transcription.

c) A l'aide d'un calque transparent, on relève les profondeurs enregistrées, et en tenant compte de la profondeur d'immersion du nez de sonde et de la cote du plan d'eau on reporte sur le profil d'origine le nouveau profil envasé. A ce moment, doivent s'effectuer différentes vérifications : comptabilité des profondeurs mesurées, calage des points les plus bas etc.

d) Les deux profils ainsi obtenus sont planimétrés et l'on en déduit la surface envasée du profil, c'est-à-dire des m² d'envasement d'une section à la cote du plan d'eau à laquelle les mesures ont été faites.

La partie exondée des profils est souvent constituée par des berges à forte pente, souvent hors d'eau, où l'envasement est négligeable. On a tout intérêt à faire des mesures au moment où les réservoirs sont à leur cote la plus élevée, en général à la fin du printemps. Cependant, pour des profils hors d'eau où l'envasement est important, seule une campagne de relevés topographiques peut restituer le profil envasé : c'est le cas des profils amont du barrage Mellègue où nous avons dû nous livrer à une estimation.

II.3.2. Calcul des volumes de sédiments

A partir des surfaces envasées par profil plusieurs méthodes sont possibles pour calculer les volumes déposés dans la retenue.

Rappel de quelques méthodes

[4]

1) Méthode de Kolmogorov

Le volume compris entre les profils non parallèles Pa et Pb, le terrain naturel et la cote du plan d'eau est partagé en deux parties par un profil auxiliaire virtuel Pc mené à partir du point A et parallèle au profil Pb (voir fig. 1). On calcule séparément les volumes PaPc et PcPb, le volume total est la somme des deux.

Pour cela on calcule tout d'abord les surfaces des sections Sa et Sb par planimétrie simple. Pour déterminer Sc on suppose qu'il y a proportionnalité entre surfaces et largeurs c'est-à-dire $Sc = Sa \frac{lc}{la}$.

Le volume total est alors donné par la formule

$$V = V_1 + V_2 = \frac{Sb + Sc}{2} h_1 + \frac{Sc h_2}{2}$$

avec h_1 = longueur de la perpendiculaire commune aux 2 plans parallèles Pb et Pc,

h_2 = longueur de la normale abaissée du point A au profil virtuel Pc.

2) *Méthode de la hauteur moyenne*

On assimile chacun des profils Pa,... de surface Sa,... à un rectangle de longueur l_a , et de hauteur moyenne h_a .

La longueur l_a étant la longueur du profil Pa à la cote de mesure Sa, représentant les superficies d'envasement dans les profils Pa,... Par planimétrie on détermine ensuite la surface d'eau entre les deux profils Pa et Pb (à la cote de mesure) soit Sab.

Le volume des apports entre les deux profils est alors donné par :

$$V_{ab} = S_{ab} \frac{h_a + h_b}{2}$$

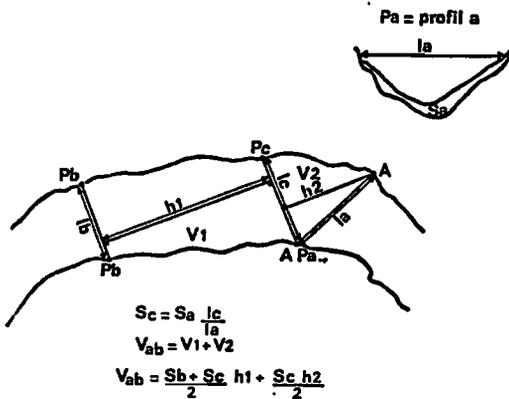


Fig. 1. — Méthode de Kolmogorov

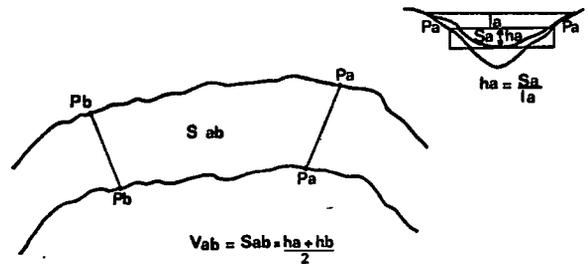


Fig. 2. — Méthode de la hauteur moyenne

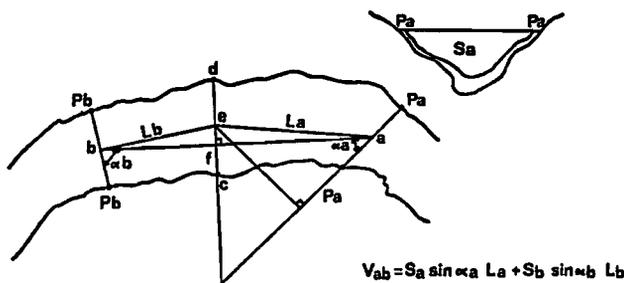


Fig. 3. — Méthode générale

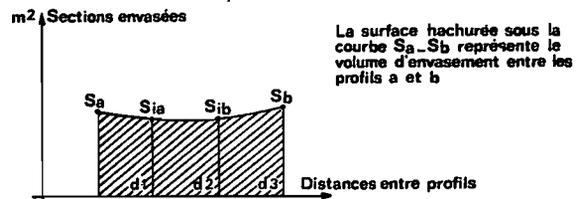
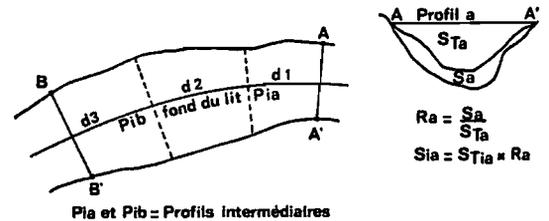


Fig. 4. — Méthode dérivée de la méthode générale

Fig. 1, 2, 3, 4. — Calcul du volume de sédiments

3) *Méthode générale*

On détermine les surfaces envasées Sa et Sb des deux profils Pa et Pb, puis on calcule la distance entre ces deux profils (voir fig. 3). Pour cela :

- on trace une droite ab entre les milieux de Pa et Pb ;
- on trace la droite cd perpendiculaire au segment ab en son milieu ;
- les distances entre le milieu du segment cd et les points a et b donnent les longueurs La et Lb.

Pour déterminer le volume total on tient également compte de l'inclinaison des sections Pa et Pb par rapport aux droites ea et eb.

Le volume total Vab sera alors :

$$V_{ab} = S_a \sin \alpha_a L_a + S_b \sin \alpha_b L_b$$

4) Méthode dérivée de la méthode générale

C'est une simplification de la méthode générale qui tient compte de particularités de la retenue en utilisant des profils intermédiaires.

Pour chaque profil mesuré on calcule le rapport d'envasement $R = \frac{\text{section envasée}}{\text{section totale d'origine}}$.

Entre les profils mesurés, on trace des profils intermédiaires auxquels est affecté le rapport d'envasement du profil le plus proche.

On trace ensuite un profil en long de la retenue, qui passe par les points les plus bas de chaque profil transversal ; tous les profils sont positionnés sur le profil en long.

On trace alors un graphique comportant en abscisse les distances entre sections relevées sur le profil en long, en ordonnées les surfaces d'envasement mesurées ou calculées.

Le planimétrage de l'aire comprise entre la ligne brisée joignant les points représentatifs de chaque section et l'axe des abscisses donne le volume d'envasement.

Cette méthode est surtout applicable aux retenues longiformes.

III. RÉSULTATS DES MESURES

Nous avons rassemblé dans le tableau ci-dessous, les résultats bruts des mesures d'envasement que nous avons faites. Puis sous forme d'une fiche par barrage nous essayerons de relier ces résultats aux autres données dont nous disposons pour ces barrages de façon à estimer l'importance de l'érosion et des transports solides sur les bassins versants contrôlés.

TABLEAU II
RÉSULTATS DES MESURES D'ENVASEMENT

| Nom du barrage | Superficie du BV (km ²) | Date de mise en eau ou débuts des observations | Volume maximum stocké (× 10 ⁶ m ³) | Volume stocké au moment des mesures (× 10 ⁶ m ³) | Taux de remplissage correspondant (%) | Volume des sédiments déposés (× 10 ⁶ m ³) | Taux d'envasement du barrage (%) |
|----------------|-------------------------------------|--|---|---|---------------------------------------|--|----------------------------------|
| Mellègue | 10 300 | avril 1954 | 268,06 | 176,8 | 65,9 | 47,6 | 17,75 |
| Nebaana | 855 | 1965 et 1967-1968 | 86,4 | 75,6 | 87,5 | 12,90 | 14,94 |
| Bezirk | 73 (84) | décembre 1960 | 6,46 | 6,46 | 100,0 | 1,68 | 26,01 |
| Chiba | 64 | 1963-1965 novembre 1967 | 7,86 | 7,70 | 98,0 | 2,65 | 33,71 |
| Masri | 40 (53) | février 1968 | 6,82 | 6,78 | 99,4 | 1,32 | 19,3 |
| Lakhmess | 131 | avril 1966 | 8,00 | 7,90 | 98,7 | 2,01 | 15,1 |

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Recueil de normes ISO 16 1983

Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts

Curso sobre Técnicas de Medição de Descarga Líquida em grandes Rios

Fiches techniques par G.JACCON - DNAEE/ORSTOM - 1984

Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, vol. XIV, n°1, 1977

Mesure de l'envasement des retenues de six barrages en Tunisie par J.CLAUDE et R.CHARTIER

Chapitre 4 - EVALUATION DE LA VITESSE MOYENNE METHODES ULTRASONIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE

L'évaluation de la vitesse moyenne de l'écoulement dans la section transversale d'un cours d'eau est réalisée le plus souvent par des mesures ponctuelles au moulinet hydrométrique. Mais il existe d'autres méthodes moins connues qui ne font pas appel au moulinet. Les plus utilisées sont :

- la *méthode ultrasonique* (on dit aussi acoustique) qui permet de mesurer la vitesse moyenne sur une distance donnée, à une profondeur donnée : cette méthode pose donc le problème du terme correctif à appliquer à la vitesse mesurée pour obtenir la vitesse moyenne dans la section (problème équivalent à celui des jaugeages superficiels aux flotteurs ou avec un bateau mobile);

- la *méthode électromagnétique* est une méthode qui peut être ponctuelle mais est le plus souvent appliquée globalement à la section, ce qui est son principal avantage.

Il est important de retenir :

- que ces deux méthodes ne sont pas simples à mettre en oeuvre, coûteuses par les équipements sophistiqués qu'elles utilisent;
- qu'elles sont les seules utilisables dans certaines situations très particulières comme les biefs à écoulement très lent ou à inversion de courant.

41 - VITESSES PONCTUELLES ET VITESSE MOYENNE

411. Aspects théoriques

Dans un écoulement naturel, les particules d'eau ont un mouvement qui n'est pas constant dans le temps. Ce fait est facilement observable avec un moulinet hydrométrique ou même visuellement ("le fleuve respire...").

La vitesse locale diffère d'un point à l'autre de la section mouillée. Le dessin du champ des vitesses varie avec la forme du bief et de la section transversale, le tracé des rives, la rugosité du fond. Les valeurs maximales se situent près de la surface (et non en surface, sans oublier que dans une section de grande profondeur la tranche superficielle peut avoir un mètre ou plus d'épaisseur), généralement près de la verticale de plus grande profondeur et les vitesses décroissent latéralement vers les rives et verticalement vers le fond, d'abord lentement puis très rapidement à cause de la rugosité.

Tout ceci ne facilite pas la tâche de l'hydrométriste dont l'objectif est de connaître la vitesse moyenne U dans toute la section.

En désignant par V la vitesse locale en un point quelconque de la section mouillée S , U est la moyenne des vitesses locales.

$$U = \frac{1}{S} \iint V \, dS$$

Cette double intégration est faite en deux étapes :

- soit en commençant par les verticales pour calculer les vitesses moyennes par verticale V_j (avec P_j , profondeur totale de la verticale) que l'on intègre ensuite sur toute la largeur l de la section; c'est la méthode dite des "paraboles de vitesses" qui s'écrit :

$$V_j = \frac{1}{P_j} \int_0^{P_j} V \, dP \quad \text{et} \quad U = \frac{1}{l} \int_0^l V_j \, dl$$

- soit en commençant par le calcul des aires de section mouillée s_i s'écoulant à une vitesse supérieure ou égale à une valeur donnée puis en intégrant ces aires suivant le vecteur de vitesse maximale; c'est la méthode dite des "isotaches" qui s'écrit :

$$s_i = \int_0^l p \, dl \quad \text{et} \quad U = \frac{1}{S} \int_0^{V_{\max}} s_i \, dv$$

En pratique, l'intégration est faite graphiquement ou arithmétiquement (pour la méthode des paraboles seulement).

412. Aspects pratiques

On ne peut pas mesurer les vitesses en une multitude de points mais il faut respecter deux règles essentielles :

- prendre le maximum possible de points sachant que la précision du résultat varie avec ce nombre en tendant vers une valeur limite, variable pour chaque section transversale;
- ne pas exagérer inutilement la durée de la mesure (variation de la hauteur, fatigue,...).

Nombre de verticales

Les vitesses sont mesurées :

- suivant les verticales, soit ponctuellement, soit par intégration;
- suivant des horizontales (profondeur constante), soit par points, soit par intégration;
- soit en trajectoires obliques ou zig-zag (rarement employées sauf en URSS).

La méthode par verticales est, de loin, la plus utilisée. Les règles à respecter pour le choix des verticales sont bien connues : elles sont à peu près identiques pour les petites et les grandes sections de jaugeage. Il est intéressant de constater néanmoins que chaque pays suit des normes qui diffèrent. L.HORST (Cf. bibliographie) cite les exemples suivants :

| | |
|-------------------|--|
| Australie : | au minimum 20 verticales |
| Grande Bretagne : | de 10 à 50 verticales suivant la largeur |
| | distance < 1/15 pour les profils réguliers |
| | < 1/20 pour les profils irréguliers |
| Canada : | au moins 20 tranches de section mouillée égale |
| Tchécoslovaquie : | 7 à 15 verticales suivant le rapport l / P_m |
| Hollande : | distance de 5m entre verticales pour les grands fleuves |
| USA : | 20 à 30 sections réparties telles que $q_i < Q/10$ (idéal $q_i < Q/20$) |
| | au minimum 30 verticales si l'on jauge d'un pont ou d'un bateau |
| OMM : | distance entre verticales < 1/20 |
| | $q_i < Q/10$ |
| | 10 verticales peuvent suffire pour les lits très réguliers |

Nous ajouterons à cette liste :

Brésil : au moins 25 verticales avec égale répartition des surfaces partielles
ORSTOM : distance $< 1/15 + 1$ verticale supplémentaire près de chaque rive
 ajouter des verticales intermédiaires pour toute discontinuité du profil.

Nombre de points par verticale

En désignant par $V_{0,n}$ la vitesse locale mesurée à $P_j \times 0,n$ (par exemple $V_{0,2}$ = vitesse mesurée à 20% de la profondeur), on mesure U_j la vitesse moyenne sur la verticale suivant différentes méthodes qui sont ::

Méthodes à 1 point -

- $U_j = V_{0,6}$ - utilisée en général pour les faibles profondeurs ($P_j < 0,5m$);
- $U_j = 0,96 V_{0,5}$ - utilisée pour les très faibles profondeurs;
- $U_j = 0,88 V_{0,2}$ - utilisée aux Etats Unis pour les écoulements très rapides.

Méthode des 2 points -

- $U_j = (V_{0,2} + V_{0,8})/2$ - très utilisée aux Amériques pour tous les jaugeages de routine

Méthodes à 3 points -

- $U_j = (V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8})/4$, moins utilisée que la précédente mais plus sûre;
- $U_j = (V_s + V_{0,2} + 2V_{0,8})/4$, méthode utilisée quelquefois dans les sections où la détermination du rapport U/U_s (vit. moyenne superficielle) est nécessaire pour le calcul des jaugeages par flotteurs superficiels ou par la méthode du bateau mobile.

Méthode des 5 points -

- $U_j = (V_s + 3V_{0,2} + 2V_{0,6} + 3V_{0,8} + V_f)/10$; il s'agit déjà d'une exploration détaillée de la verticale.

Méthode des points multiples -

- mesure détaillée par points équidistants (6 à 10 points par verticale) ou à profondeurs constantes (exploration du champ des vitesses par horizontales); la vitesse est calculée par intégration graphique ou par une formule de moyenne pondérée par les distances entre chaque point :

$$U_j = \frac{P_1 V_1 + \sum_{i=2}^n \frac{V_i + V_{i-1}}{2} (P_i - P_{i-1}) + 0,75 V_n (P_t - P_n)}{P_t}$$

Ces méthodes ne sont pas équivalentes. Elles ne donnent des résultats identiques que si la répartition verticale des vitesses est effectivement très régulière, pseudo-parabolique.

La méthode des 2 points est très utilisée dans de nombreux pays pour plus de 90% des jaugeages au moulinet hydrométrique. Les 10% restants sont des jaugeages complets. L'inconvénient de la méthode des 2 points est que la moindre erreur sur l'un d'eux est grave. Pour les très grands fleuves comme l' Amazonie , nous avons constaté une différence systématique de + 2% environ entre la vitesse moyenne avec deux points et la vitesse moyenne détaillée (10 points et plus). La différence est inférieure à + 1% avec 3 points. Ces observations demandent néanmoins à être vérifiées sur d'autres sections.

Lorsque l'exploration du champ des vitesses est incomplète, il est essentiel d'étalonner la méthode utilisée avec un ou plusieurs jaugeages complets afin de déterminer le coefficient de correction K_v permettant de passer de la vitesse moyenne mesurée à la vitesse moyenne réelle U dans la section.

42. MESURE DES VITESSES

421. Moulinets hydrométriques

Cités pour mémoire.

Rappelons simplement qu'il existe des moulinets à axe vertical (moulinets à coupelles type PRICE) et des moulinets à axe horizontal (moulinets à hélice type OTT).

Pour ces derniers, le *pas théorique* correspond à la distance parcourue par le moulinet quand l'hélice fait un tour (en supposant que l'hélice a été fixée et que le moulinet est projeté vers l'avant dans l'eau). Cette notion est importante car nous verrons qu'un moulinet peut servir aussi à mesurer des distances (par exemple pour mesurer la vitesse d'un bateau ou son déplacement comme dans la méthode du bateau mobile).

Le *pas réel* d'un moulinet, différent mais très proche du pas théorique, est déterminé et périodiquement vérifié dans un canal d'étalonnage.

422. Courantomètre à ultra-sons

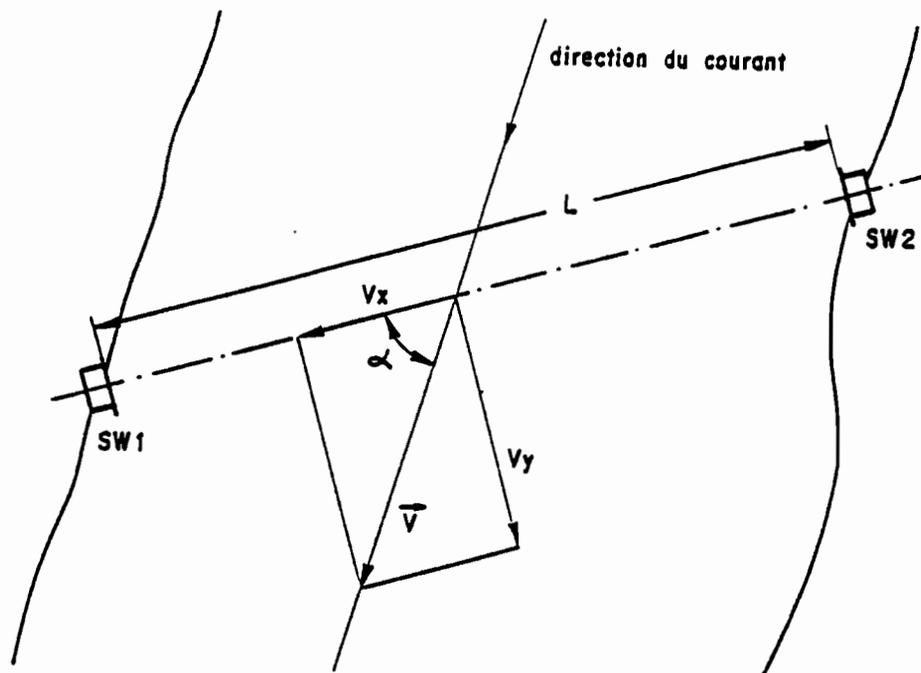
Nous avons déjà vu, avec les écho-sondeurs, une première application des ultra-sons. Cette technique est utilisée aussi pour la mesure des niveaux (limnimètre à ultra-sons) et pour la mesure des vitesses avec le courantomètre à ultra-sons. Pour les caractéristiques de la propagation du son dans l'eau on se reportera au paragraphe 221 de la page 20.

Principe

Il est basé sur la modification apportée à la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore (fréquence $> 15\text{kHz}$) par le courant. Pour cela, on envoie avec un transducteur des impulsions acoustiques dans une direction oblique par rapport à l'écoulement de vitesse V (Cf. figure 18).

Les transducteurs SW1 et SW2 sont placés de chaque côté de la rivière, à une distance L l'un de l'autre, à une même profondeur et de telle manière que la ligne qui les joint fasse un angle α de 30° à 60° avec la direction du courant.

Figure 18 - COURANTOMETRE A ULTRA-SONS - PRINCIPE



La méthode la plus utilisée généralement pour les rivières est celle de la mesure du temps de parcours. Elle s'exprime par les formules suivantes :

- dans le sens SW1 → SW2 : $t_1 = L / (C - V_x)$
- dans le sens SW2 → SW1 : $t_2 = L / (C + V_x)$

avec : C = vitesse de propagation du son dans l'eau
 V_x = composante transversale de la vitesse de l'eau = $V \cos \alpha$

soit en éliminant C entre les deux équations :

$$V = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left\{ \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right\}$$

Il n'est donc pas nécessaire de connaître la valeur de C qui, rappelons-le, varie avec de nombreux facteurs (pression, température, salinité, charge solide, bulles d'air,...).

L et α sont connus. La mesure ne porte donc que sur t_1 et t_2 . La vitesse V mesurée est la vitesse moyenne "en ligne". On peut la mesurer à plusieurs profondeurs différentes mais dans tous les cas il faut déterminer par des jaugeages complets le coefficient de correction K_v pour obtenir U .

Matériel utilisé

L'équipement se compose de quatre éléments reliés entre eux (Cf. figures 19 et 20, correspondant à la station du pont Alexandre III à Paris):

- deux oscillateurs immergés émettent et reçoivent alternativement une onde sonore de fréquence définie (de l'ordre de 200kHz pour des sections d'une centaine de mètres de largeur); ces transducteurs sont soit fixés à une profondeur donnée soit mobiles sur des glissières et positionnés de manière automatique à 0,6 Pm (60% de la profondeur moyenne) ou à tout autre profondeur choisie;

- un limnimètre à ultra-sons (ou à pression) pour la détermination exacte du niveau de l'eau;

- un système électronique comprenant la centrale de calcul de vitesses, le calculateur de la hauteur limnimétrique et un ordinateur pour le calcul automatique du débit; en général on y ajoute aussi des enregistreurs graphiques de sécurité.

Ces matériels sont disponibles sur le marché (Sociétés ATLAS KRUPP en Allemagne, ULTRA-FLUX en France). L'équipement complet d'une section varie de 60 000 à 200 000 F (10000 à 35000 US\$) suivant l'équipement que l'on y installe.

Limites et précision de la méthode

La méthode est applicable dans une très large gamme de vitesses mais elle est surtout utilisée pour les sections à très faibles vitesses d'écoulement, par exemple en étiage (cas de la Seine à Paris). Elle est utilisable aussi dans les biefs où le sens du courant s'inverse (inversion du signe de la différence t_2-t_1).

Par contre elle n'est pas utilisable dans les sections où la propagation des ondes est perturbée (végétation, ondes parasites,...). Il faut disposer d'une source d'énergie à proximité de la section et le bief de mesurage doit être rectiligne et à écoulement pseudo-uniforme.

La précision sur la détermination de la vitesse moyenne sur une horizontale dépend exclusivement de celle avec laquelle les temps de parcours sont mesurés. La différence t_2-t_1 est de l'ordre de quelques microsecondes.

Figure 19 - SCHEMA DE L'EQUIPEMENT DE LA STATION DU PONT ALEXANDRE III A PARIS

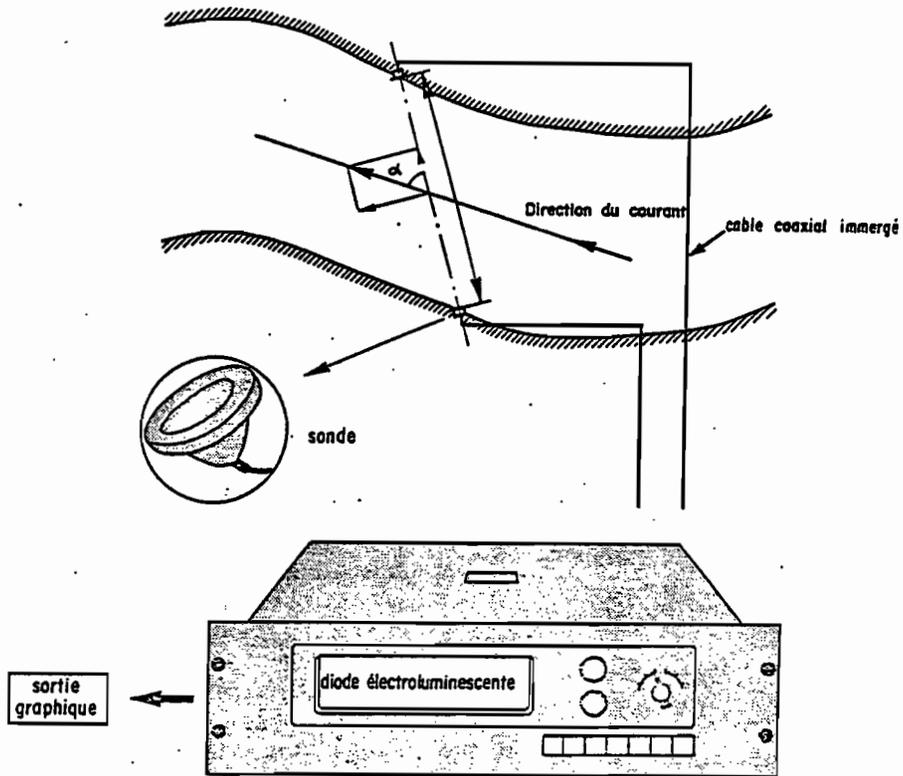
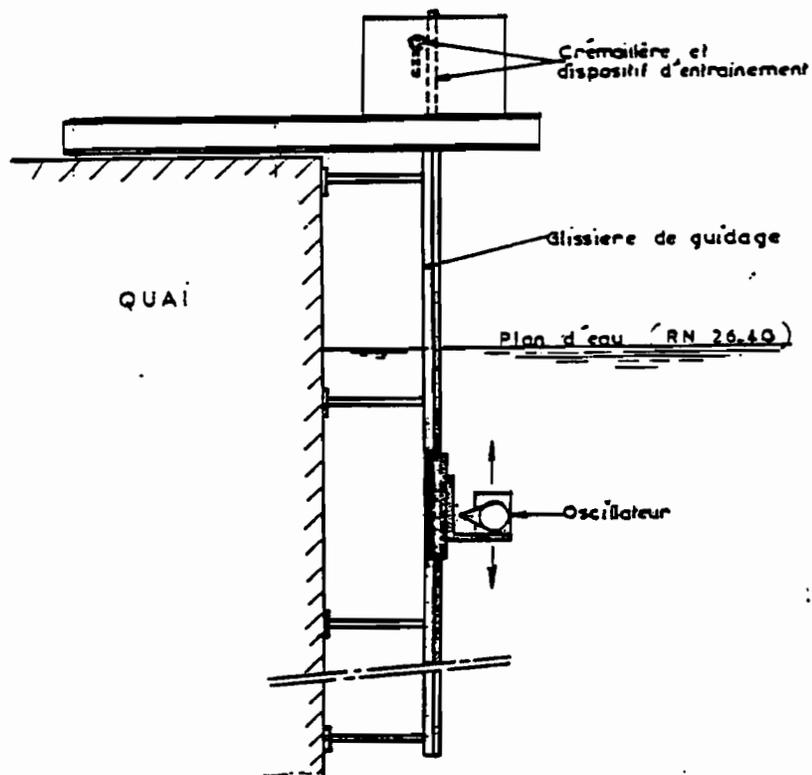


Figure 20 - PLAN D'INSTALLATION D'UN TRANSDUCTEUR (PONT ALEXANDRE III)



Pour le calcul du débit, il est nécessaire de déterminer la fonction $K_v(h)$, K_v étant le rapport U/V . Cette fonction, équivalente à un tarage de la station, doit être définie à partir de jaugeages détaillés ou, si les transducteurs sont installés sur des rails et mobiles, par une exploration du champ des vitesses par intervalles de faible amplitude. Il est bien évident que si V est mesuré sur 2 ou 3 horizontales, l'évaluation du débit est beaucoup plus précise.

La figure 21 reproduit une figure (extraite de la norme ISO 6416-1985) qui donne la courbe de variation du coefficient de vitesse K_v en fonction de la profondeur de la mesure.

Le débit Q pour une hauteur h donnée est calculé par le produit $V \times K_v \times S$. Les fonctions $S(h)$ et $K(h)$ étant déterminées, un courantomètre à ultra-sons peut être considéré comme un débitmètre. Il faut pour cela que le profil transversal soit stable.

423. Méthode électromagnétique

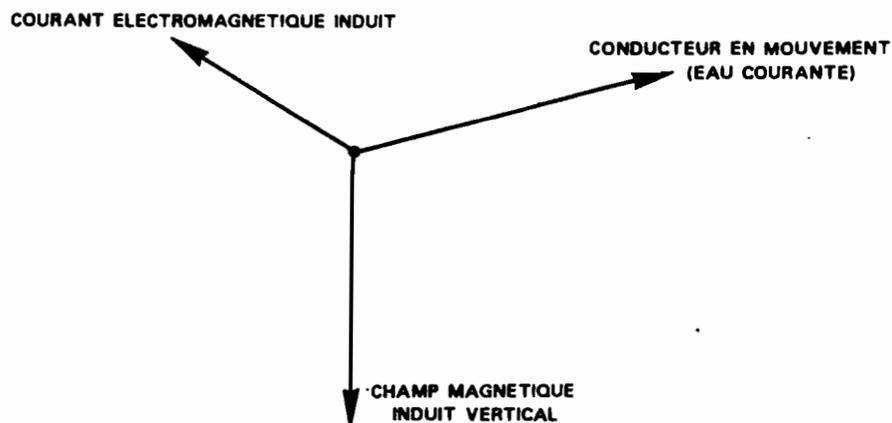
La méthode électromagnétique repose sur le phénomène bien connu en physique de l'induction électromagnétique. C'est ce principe qu'utilisent les compteurs de vitesse disponibles dans le commerce et sur lui qu'est basée la méthode de jaugeage globale qui porte ce nom.

Principe

Le principe de base, découvert par Michael FARADAY aux alentours de 1830 est le suivant : tout conducteur en mouvement dans un champ magnétique est traversé par un courant électrique. Ce phénomène est appelé induction électromagnétique. Le sens du courant induit dépend du sens du déplacement et son intensité est proportionnelle à la vitesse de déplacement.

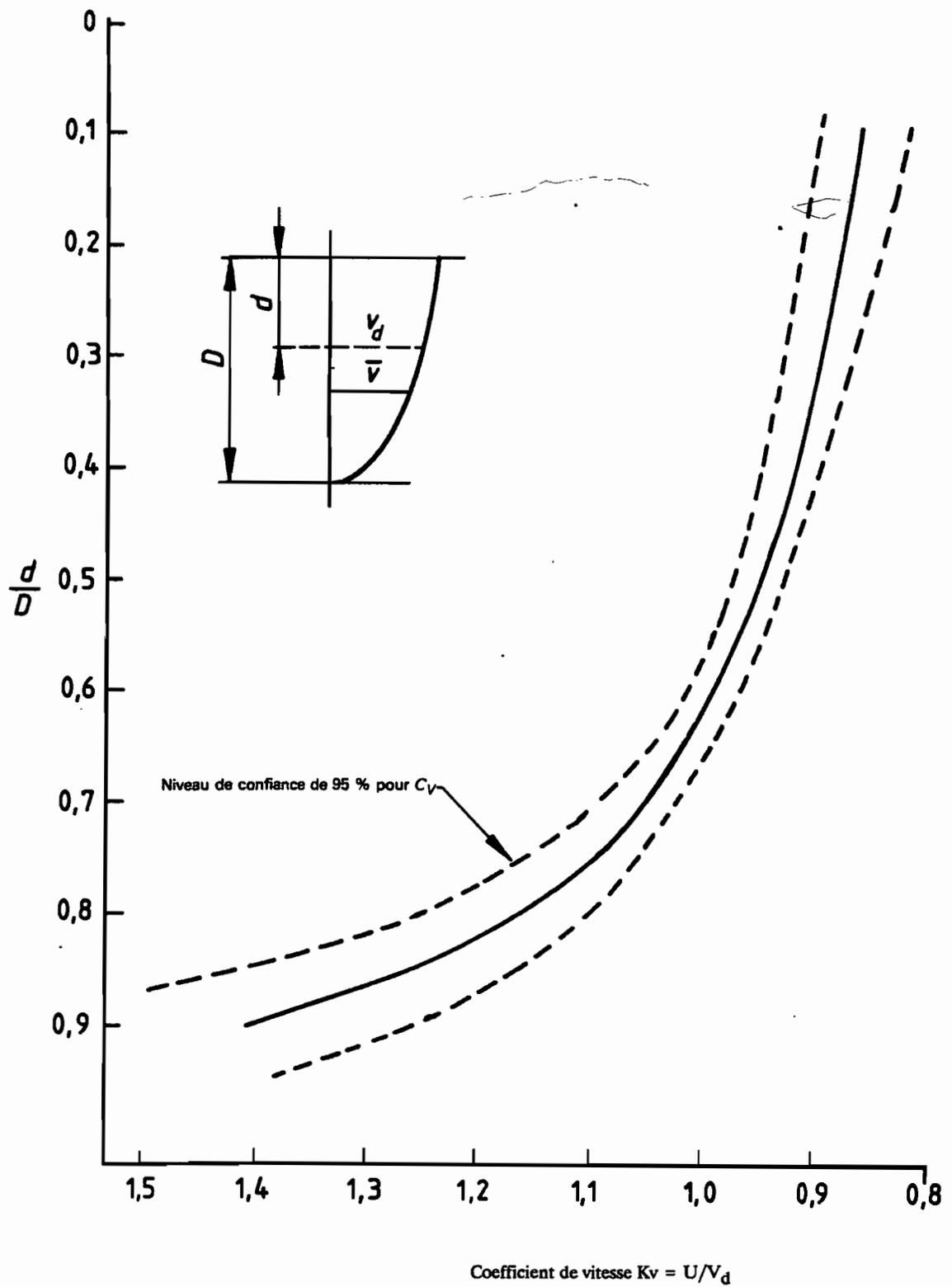
Si l'on considère que l'eau est un conducteur se déplaçant à une vitesse moyenne U dans un champ magnétique vertical qui est le champ terrestre, le principe de Faraday dit qu'il doit exister une différence de potentiel entre les deux rives ou entre deux particules d'eau prises dans une direction perpendiculaire au courant.

Figure 22 - PRESENTATION SCHEMATIQUE DU PRINCIPE DE FARADAY



Le champ magnétique terrestre étant beaucoup trop faible pour produire des différences de potentiel électrique mesurables et surtout différenciables des autres potentiels énergétiques dus à des interférences, il est nécessaire de renforcer le champ magnétique par une bobine d'induction.

Figure 21 - COURBE DE VARIATION DU COEFFICIENT K_v AVEC LA PROFONDEUR



(source : norme ISO 6416)

La loi de Faraday s'écrit :

$$E = H U l$$

avec : E = énergie induite (en volts)
 H = intensité du champ magnétique (en Teslas)
 U = vitesse moyenne d'écoulement (en m/s)
 l = longueur du conducteur (largeur ou distance entre électrodes en m)

$$\text{d'où } U = E / H l$$

Le champ magnétique étant lui-même créé par une bobine d'induction, H est proportionnel à I, intensité du courant et aux caractéristiques de la bobine. E est la différence de potentiel entre deux électrodes.

En pratique, un courant naturel est parcouru par de nombreux potentiels de faible importance mais néanmoins suffisants pour rendre nécessaire leur prise en compte.

Compteur de vitesse

Le compteur de vitesse électromagnétique se présente comme une tube relié à un compteur et monté sur une perche. Dans les compteurs de ce type, le sens du courant envoyé dans la bobine d'induction est inversé périodiquement pour éliminer tous les effets parasites d'origine thermique, électrochimique ou autres.

Dans le modèle SENSEA fabriqué par la firme anglaise AQUA DATA SYSTEM, le solénoïde est placé à l'intérieur d'un tube en résine époxy très dur et les deux électrodes, en titane, sont fixées sur la paroi et diamétralement opposées.

Les caractéristiques de cet appareil fournies par le constructeur sont les suivantes :

- gamme de mesures de 0 à 6m/s;
- indicateur d'inversion du flux;
- très robuste, pas de pièce mobile;
- précision supérieure à 1%;
- alimentation par piles rechargeables (32h d'autonomie);
- coût de l'ordre de 30000FF (5000US\$)

Jaugeage global par la méthode électromagnétique

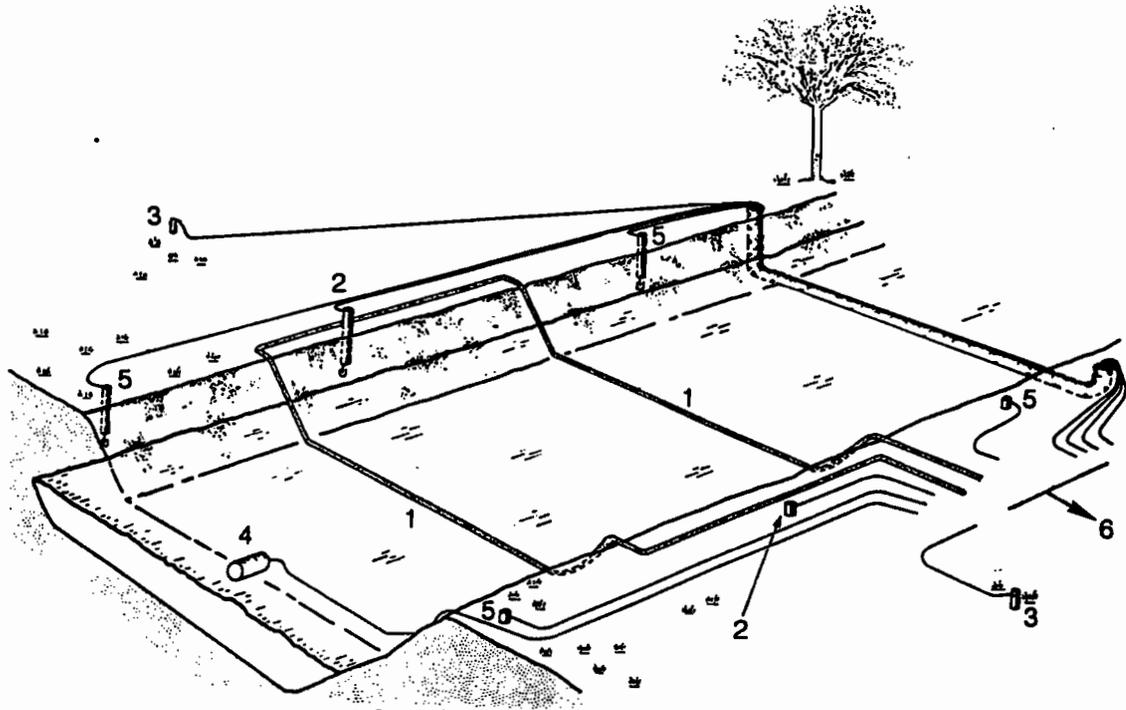
L'idée d'utiliser l'énergie induite par le champ magnétique terrestre dans un cours d'eau revient à M.J.GREEN et R.W.HERSHY en 1974 et c'est J.D.NEWMAN qui en a développé les aspects techniques et électroniques. C'est en Grande Bretagne que la méthode est la plus utilisée.

Le problème que ces inventeurs ont cherché à résoudre est celui des stations hydrométriques à très faible pente, régulièrement envahie par la végétation, dans lesquelles les méthodes classiques sont inutilisables.

Le principe de la méthode est le même mais, en pratique, c'est la totalité du bief hydrométrique qui est équipé, comme le montre la figure 23.

Il est évident qu'il ne s'agit pas d'une méthode de jaugeage mais d'un véritable débitmètre enregistreur : l'électronique associée permet une mesure périodique (à chaque envoi d'un courant inducteur dans le solénoïde) de la vitesse moyenne U. Associé à la relation S(h), le débit peut être immédiatement calculé.

Figure 23 - METHODE DE JAUGEAGE ELECTROMAGNETIQUE



- Légende :
- 1 . bobine d'induction (solénoïde)
 - 2 . voltmètres (mesure du courant induit)
 - 3 . sondes pour la mesure de la résistivité du sol
 - 4 . conductivimètre (resistivité de l'eau)
 - 5 . sondes électriques "anti-bruits"
 - 6 . câble principal vers les enregistreurs
- (source : HYDROMETRY par Hershy)

On notera la mesure simultanée de la conductivité de l'eau et du sol, nécessaires pour le calcul et la vitesse (termes correctifs). Les sondes placées aux extrémités des sections amont et aval mesurent les courants induits parasites, qui peuvent ainsi être décomptés.

La méthode est théoriquement applicable à toute section, quelle que soit sa largeur, pourvu qu'il existe une source d'énergie électrique à proximité. En pratique, il est facile d'imaginer l'importance des travaux nécessaires pour une installation complète. Il faut aussi utiliser un appareillage de très haute précision pour la mesure de potentiels électriques, dont la valeur ne dépassent pas quelques millivolts et même nanovolts.

Le coût total pour une station de 25 m de largeur a été de l'ordre de 250 000 F (55000 US\$) en 1978, pour une précision estimée de l'ordre de 10% sur les débits. Ceci explique sans doute le faible développement de cette méthode, malgré son grand intérêt technique (méthode globale).

44 - CONCLUSION

Les méthodes de jaugeage qui viennent d'être décrites sont des méthodes dont le champ d'application est très spécifique et par suite très limité. Elles mettent en oeuvre des moyens techniques assez inhabituels dans le domaine de l'hydrométrie conventionnelle.

Elles apparaissent surtout utiles dans le cas de biefs hydrométriques à vitesse d'écoulement très faible et soumis à des inversions de courant comme c'est le cas dans les secteurs influencés par la marée. S'il est utile de connaître leur existence, on ne saurait néanmoins conseiller leur utilisation sans discernement. Leur mise en oeuvre est coûteuse et difficile et les résultats obtenus souvent décevants, même s'ils sont bien supérieurs à ceux que l'on obtiendrait par les méthodes de jaugeages habituelles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Norme ISO 6416

Mesure de débit à l'aide de la méthode ultrasonique

Hydrometry

par L.HORST - IIHEE Delft 3ème édition 1974

Station de jaugeage à ultra-sons de Paris-Alexandre III

Note de présentation - Premiers résultats

Utilisation d'un courantomètre à ultrasons en rivière

par JF.NOUVELOT - Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse

Hydrometry

Ouvrage collectif édité par R.W.HERSHY

Chapitre 5 - JAUGEAGE PAR LA METHODE DU BATEAU NON ANCRE

Cette méthode, très utilisée aujourd'hui sur tout le cours moyen (rio Solimões) et inférieur de l'Amazone, a été employée pour la première fois - du moins dans cette région - par une équipe américano-brésilienne à OBIDOS ("la plus grande station hydrométrique du monde") en 1963. Depuis elle a été quelque peu perfectionnée mais son principe reste le même.

Le bateau est positionné dans la section de jaugeage par deux théodolites installés sur la berge. Les vitesses sont mesurées en deux points (jaugeage de routine) ou cinq points de chaque verticale (jaugeage complet) durant un laps de temps de 40" à 1 minute. Le bateau est stabilisé le mieux possible pendant chaque mesurage de la vitesse mais son déplacement est contrôlé par les théodolites. Grâce à la liaison radio entre le bateau et les deux observateurs, le bateau peut être repositionné à quelques mètres près sur la même verticale.

Cette méthode a été appliquée en juillet 1987 à la station d'OBIDOS pour un débit de 223 000 m³/s. Ce jaugeage est décrit dans un article publié dans la Revue d'Hydrologie Continentale (volume 2, n°2, 1987) que nous reproduisons presque intégralement ci-après.

Cet article contient :

- la description du principe de la méthode;
- la description du matériel utilisé;
- les résultats obtenus et leur critique.

La fiche technique n°4 donnée en annexe reprend le descriptif rapide de la méthode ainsi que la formulation des calculs et les programmes HP et BASIC correspondants.

Ces deux documents contiennent tous les éléments théoriques nécessaires pour le jaugeage du Niger à NIAMEY qui sera fait par cette méthode.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Medição de Descarga e seus Problèmas Técnicos no Maior Rio do Mundo
DNAE/DA - Rio de Janeiro 1968

Curso sobre Técnicas de Médição de Descarga Líquida em Grandes Rios
Fiches Techniques par G.JACCON DNAEE/ORSTOM 1984

Programas para Calculos Hidrométricos
Manuel de Calcul par G.JACCON DNAEE/ORSTOM 1986

Revue d'Hydrologie Continentale Vol.2 n°2 1987
Jaugeage de l'Amazone à Obidos par G.JACCON

G. JACCON

1. L'AMAZONE À ÓBIDOS

La petite ville de Óbidos est située sur la rive droite de l'Amazone, à peu près à mi-chemin du parcours de celle-ci vers l'océan (fig. 1). En effet, suivant la norme brésilienne, l'Amazone reçoit le nom de « Amazonas », à partir de la confluence des rios Solimões et Negro, à une dizaine de kilomètres à l'aval de Manaus, et son extension totale est d'environ 1 150 km.

Les coordonnées géographiques d'Óbidos sont $1^{\circ}54' S$ et $55^{\circ}30' W$. L'altitude du zéro de l'échelle limnimétrique n'est pas connue mais elle ne dépasse pas quelques mètres puisqu'en basses eaux le limnigraphe enregistre une marée de quelques dizaines de centimètres, bien que l'embouchure se trouve à plus de 600 km.

L'échelle limnimétrique actuelle a été installée en février 1968. Elle est constituée de 8 éléments métriques verticaux, fixés sur un pilier en maçonnerie dans l'enceinte du port. Une autre échelle a été mise en place, un an plus tard, tout près de la section de jaugeage, située à deux kilomètres à l'aval de la ville (photo 1). Cette seconde échelle, placée en rive droite, a été calée (en théorie) au même zéro que l'échelle du port.

La forme du profil transversal, à la section de jaugeage, est très régulière, presque trapézoïdale. En basses eaux (cote 100 cm) la largeur est de 2 290 m et la profondeur moyenne est de 49 m. La section mouillée atteint 130 000 m² en très hautes eaux (cote 800) mais cette valeur est assez variable ($\pm 10\%$) car la dynamique du fond du lit est importante (dunes de 4 à 5 mètres de hauteur).

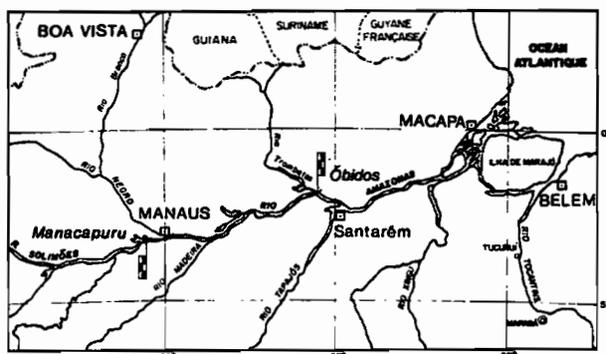


FIG. 1. - Carte de situation

Dessin : Daniel de SOUZA VABO

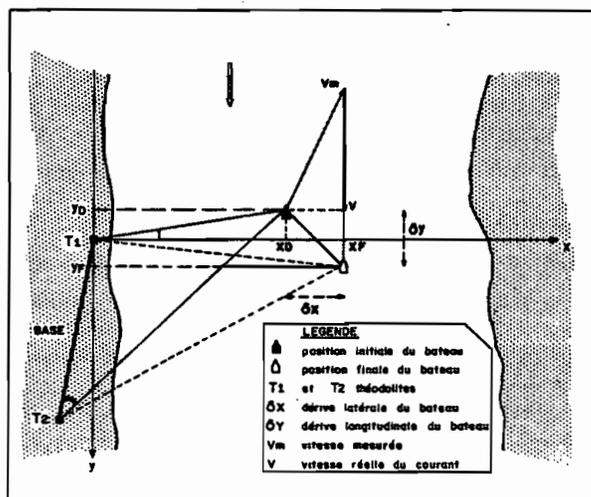


FIG. 2. - Principe de la méthode des « grands fleuves »

Dessin : Daniel de SOUZA VABO

2. JAUGEAGES DE JUILLET 1987

Deux jaugeages ont été réalisés du 13 au 15 juillet 1987 dans la phase de décrue (cote maximale de 695 cm le 18 mai) : l'un, routinier, par la méthode du bateau mobile, l'autre, exceptionnel, par la méthode dite des « grands fleuves ».

2.1. MÉTHODE DU BATEAU MOBILE

Le jaugeage a été fait entre 10 h et 14 h le 13 juillet et comprend 4 passages aller et retour (8 traversées) entre deux bouées ancrées près des berges (largeur jaugée de 2 250 m, sur une largeur totale de 2 402 m).

La distance de référence utilisée a été de 45,72 m. Elle correspond à 341,33 rotations de l'hélice de pas réel égal à 0,1339 m. Cette valeur conduit à 71,25 « verticales » en moyenne par traversée, soit au total 570 mesures ponctuelles :

- de la vitesse à 1 m de profondeur ;
- de la profondeur (écho-sondeur) ;
- de l'angle moulinet/section transversale (eu principe voisin de 45°).



PHOTO 1. – La section de jaugeage de l'Amazone à Obidos, avec l'échelle de rive droite

Avec la valeur 0,994 du coefficient de correction de vitesse K_v , rapport entre les vitesses moyenne totale et moyenne à 1 m de profondeur entre les bouées, obtenues par le jaugeage détaillé, les résultats du jaugeage sont les suivants :

| | |
|--|-----------------------------|
| Cote à l'échelle du port | : 624 cm |
| Débit | : 229 000 m ³ /s |
| Aire de la section mouillée | : 124 000 m ² |
| Vitesse moyenne | : 1,847 m/s |
| Moyenne arithmétique des vitesses mesurées à 1 m | : 1,747 m/s |

Le jaugeage s'est déroulé sans aucun incident technique et dans des circonstances favorables (absence de vent, peu d'îles ou troncs d'arbre flottants, aucun passage de navire), ce qui nous permet d'affirmer que ce mesurage est d'excellente qualité.

2.2. MÉTHODE DES GRANDS FLEUVES

Un total de 11 heures de travail effectif, réparti entre les 14 (5 verticales) et 15 juillet (11 verticales), a été nécessaire pour effectuer ce jaugeage.

Étant donné la grande régularité du profil transversal (voir fig. 4), nous avons décidé de limiter à 16 le nombre de verticales, à 6 le nombre de points par verticale et d'augmenter de 40 à 60 secondes la durée des mesures ponctuelles (40 s étant la durée « normalisée » dans l'ensemble du Brésil mais, à notre avis, très insuffisante dans des fleuves de cette envergure). La première verticale a été placée à 100 m de la rive droite et les autres sont distantes entre elles de 150 m.

2.2.1. Principe de la méthode

Les mesures sont faites *sans ancrer* le bateau, qui est maintenu, autant que possible, à la fois dans la section de jaugeage et à la distance choisie pour la verticale.

La position du bateau est déterminée depuis la rive avec deux théodolites, l'un exactement dans l'alignement et l'autre installé à 476 m à l'aval. Les deux observateurs sont en liaison radio permanente avec le bateau et l'observateur du théodolite « aval » reçoit, avant le début des mesures, la valeur des angles correspondant aux 16 verticales. La tâche des deux observateurs est de donner au pilote toutes les indications nécessaires pour placer le bateau sur la verticale de mesure, puis, aux signaux de début et fin de mesure (radio), d'effectuer une visée précise.

La bonne entente entre observateurs, pilote et chef d'équipe est fondamentale.

G. JACCON

La vitesse VM, mesurée pendant le temps t, doit être corrigée, en fonction de la dérive du bateau. Désignant par (XI, YI) et (XF, YF) les coordonnées initiales et finales du bateau (fig. 2), la vitesse de l'eau Va recherchée est égale à :

$$V_a = \sqrt{[VM^2 - (\delta X/t)^2] + \delta Y/t}$$

avec $\delta X = XF - XI$
 $\delta Y = YF - YI$

Cette formule admet comme hypothèse que la vitesse mesurée VM est effectivement la résultante des vitesses Va et ($\delta X/t$). Comme cette hypothèse est assez théorique (comment vérifier que l'ensemble saumon-moulinet s'oriente effectivement ainsi ?), il est essentiel que les deux termes correctifs soient faibles, en regard de la vitesse mesurée par le moulinet. En pratique, nous avons fixé des valeurs limites de 15 m pour δX et δY , ce qui veut dire que toute dérive supérieure à cette valeur implique que la prise de vitesse soit refaite. Ceci suppose évidemment que les calculs de δX et δY soient faits sur le bateau, durant le jaugeage.

La profondeur totale est relevée avec un écho-sondeur au début et après chaque mesure de la vitesse. Outre la profondeur de 1 m, essentielle pour le calcul du coefficient de correction Kv, les autres profondeurs sont prises à 20 %, 40 %, 60 %, 80 % et 95 % de la profondeur totale. Après la mise en place du moulinet à la profondeur calculée, l'angle de dérive du saumon est mesuré et la correction est immédiatement appliquée.

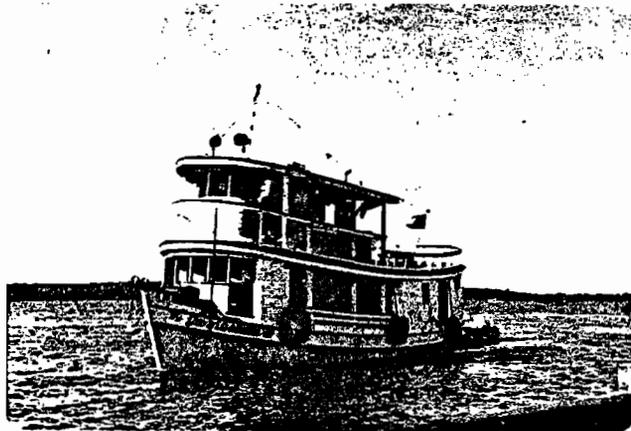


PHOTO 2. - Le bateau Gamboinha III, utilisé pour le jaugeage complet

2.2.2. Matériel utilisé

Le bateau utilisé pour ce jaugeage, le Gamboinha III (photo 2), est une embarcation de 14 m de longueur, tout à fait caractéristique du bassin amazonien, où elle est, tout à la fois, « autobus, camionnette, voire bétailière... ».

Les seuls équipements spéciaux sont un groupe électrogène de 2KVA et un treuil électrique installé sur la proue. Ce treuil contient environ 120 m de câble électro-porteur de 6 mm de diamètre, valeur beaucoup trop élevée qui explique les angles de 40 à 45° de dérive du saumon. Ce bateau, lourd et encombrant, très bruyant, ne comporte même pas de manettes de commande du moteur dans le poste de pilotage. Le pilote « communique » avec le mécanicien par un long fil relié à une sonnette : un appel = « au ralenti », deux appels = « plus vite » trois appels = « changement de marche », etc. Il est incroyable que, dans ces conditions, le pilote arrive à placer le bateau correctement sur une verticale et à limiter la dérive à quelques mètres, pendant les mesures de vitesse.

Les équipements hydrométriques n'ont aucune originalité :

- moulinet à axe horizontal de fabrication brésilienne (marque IH), muni d'un engrenage donnant un contact pour 10 rotations de l'hélice, dont le pas est de 25 cm ;
- le moulinet, fixé sur un support muni d'un gouvernail, est suspendu à 35 cm au-dessus d'un saumon de 120 kg, en fonte ;
- le compteur d'impulsions, de type mécanique, présentant des défaillances, a été remplacé par un simple « couineur ».

2.2.3. Résultats du jaugeage

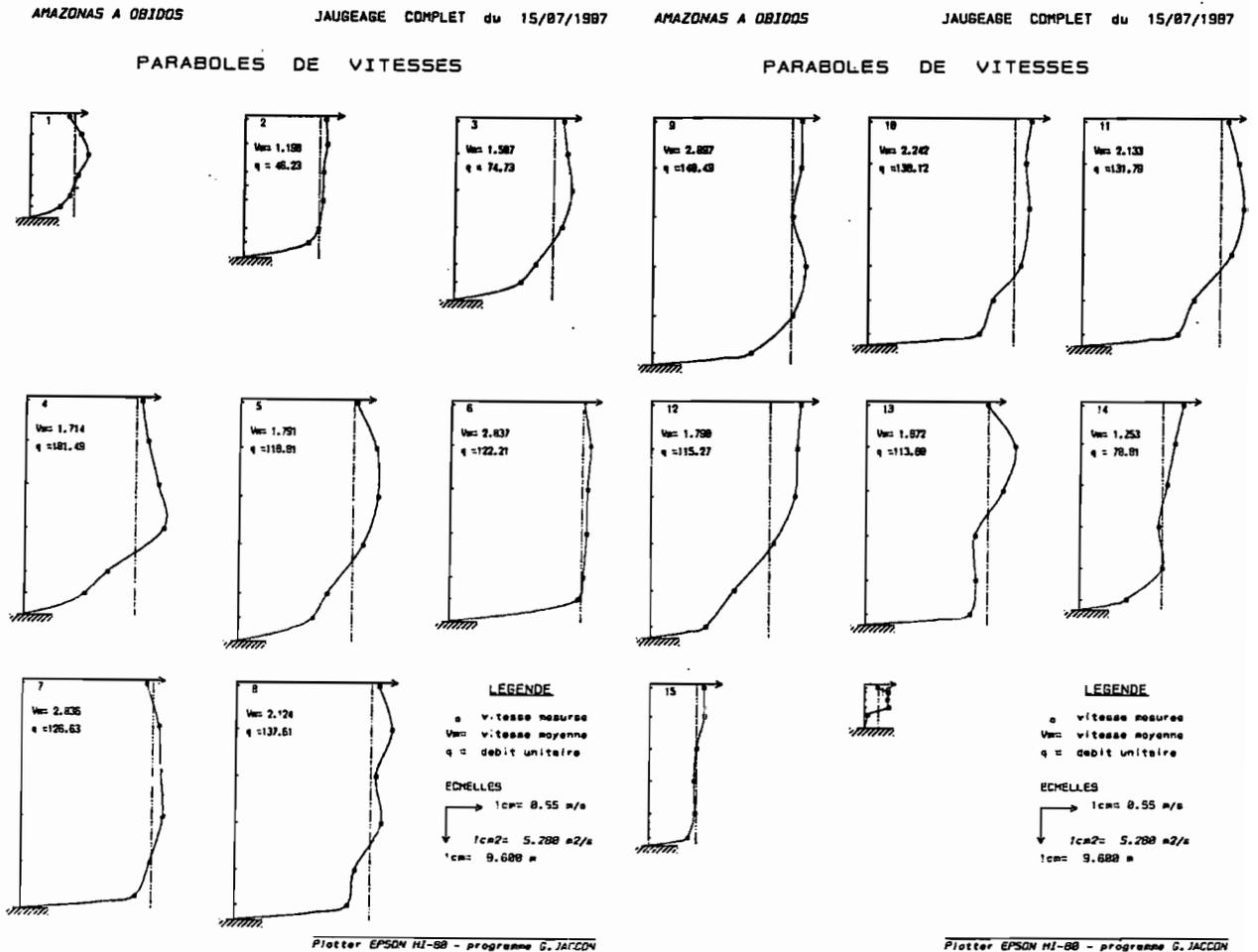
Au total, 95 mesures ponctuelles de la vitesse ont été faites : elles sont réparties en 16 verticales. Les figures 3 et 3 bis montrent la forme des paraboles de vitesses et la figure 4 donne la répartition des points dans la section transversale et les courbes des débits unitaires et de la vitesse moyenne superficielle.

Tous les résultats (partiels dans les paraboles et totaux en haut de la figure 4) ont été obtenus par calcul (méthode des trapèzes pour les débits unitaires, méthode de la section moyenne pour le débit et la superficie mouillée). Les courbes isotaches, représentées sur la figure 4, ont été tracées « à la main ».

Un dépouillement graphique manuel par la méthode des paraboles a donné les résultats définitifs suivants :

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Cote à l'échelle du port | : 620 cm |
| Débit | : 223 000 m ³ /s |
| Aire de la section mouillée | : 126 500 m ² |
| Vitesse moyenne U | : 1,763 m/s |
| Vitesse moyenne à 1 m entre rives | : 1,672 m/s |
| Rapport U/V _{1m} | : 1,054 |

La vitesse moyenne à 1 m de profondeur entre les deux bouées utilisées dans le jaugeage par la méthode du bateau mobile est nettement supérieure à la vitesse V_{1m} donnée ci-dessus car il existe une zone de contre-courant, sur une centaine de mètres près de la rive gauche (d'où la valeur 0,994 du coefficient K_v, utilisée pour la correction du jaugeage « bateau mobile »).



G. JACCON

AMAZONAS A OBIDOS

JAUGEAGE COMPLET du 15/07/1987

CALCUL DU DEBIT

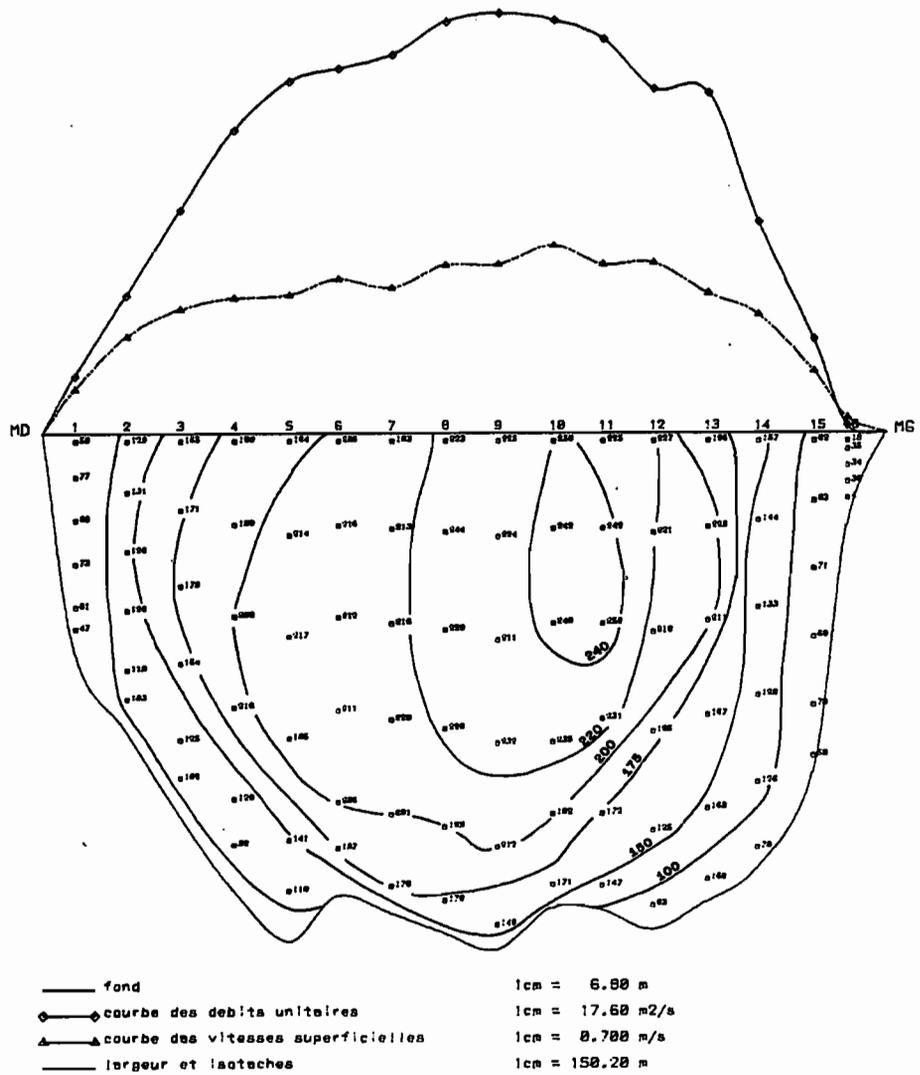
$Q = 221900 \text{ m}^3/\text{s}$

$A = 125900 \text{ m}^2$

$V_m = 1.761 \text{ m/s}$

$V_{ms} = 1.669 \text{ m/s}$

$V_m/V_{ms} = 1.055$



Plotter EPSON HI-80 - programme G.JACCON

FIG. 4

2.2.4. Commentaires

A - Malgré l'absence d'ancrage, le positionnement du bateau, et son maintien sur une « verticale », ont été tout à fait corrects, comme le montrent les valeurs suivantes, calculées à partir des coordonnées du bateau au début de chaque prise de vitesse.

| N° vert. | Abcisse théorique | Abcisse réelle | | | | Ordonnée réelle | | |
|-------------|----------------------|----------------|------|------|-------|-----------------|------|-------|
| | | moy. | mini | maxi | écart | amont | aval | écart |
| 1 | 100 | 102 | 100 | 104 | 4 | -0.5 | +0.3 | 0.8 |
| 2 | 250 | 250 | 248 | 252 | 4 | -0.5 | +1.0 | 1.5 |
| 3 | 400 | 400 | 396 | 404 | 8 | -1.5 | +2.6 | 4.1 |
| 4 | 550 | 552 | 548 | 557 | 9 | -2.1 | +7.6 | 9.7 |
| 5 | 700 | 707 | 701 | 713 | 12 | -2.6 | +1.8 | 4.4 |
| 6 | 850 | 848 | 843 | 856 | 13 | -1.6 | +1.2 | 2.8 |
| 7 | 1000 | 1003 | 998 | 1009 | 11 | -2.7 | +1.4 | 4.1 |
| 8 | 1150 | 1152 | 1142 | 1160 | 18 | -4.7 | +0.1 | 4.7 |
| 9 | 1300 | 1304 | 1289 | 1325 | 36 | -3.7 | +2.7 | 6.4 |
| 10 | 1450 | 1466 | 1457 | 1471 | 14 | -4.4 | +1.3 | 6.7 |
| 11 | 1600 | 1603 | 1596 | 1615 | 19 | -2.5 | +0.7 | 3.2 |
| 12 | 1750 | 1744 | 1740 | 1750 | 10 | -4.1 | +0.8 | 4.9 |
| 13 | 1900 | 1903 | 1909 | 1897 | 12 | -1.3 | +0.9 | 2.2 |
| 14 | 2050 | 2047 | 2043 | 2059 | 16 | -1.7 | +1.0 | 2.7 |
| 15 | 2200 | 2201 | 2188 | 2209 | 19 | -2.1 | +1.4 | 3.5 |
| 16 | 2300 | 2296 | 2294 | 2298 | 4 | 0 | +3.2 | 3.2 |

moy. = moyenne des 6 points d'une même verticale
écart = différence entre les valeurs minimale et maximale
Toutes les valeurs ci-dessus sont exprimées en mètres.

Les chiffres des 6^e et 9^e colonnes du tableau donnent les dimensions du rectangle de base de la pyramide verticale dans laquelle ont été faites les mesures. Si l'on excepte la verticale 9, dont la « largeur » de 36 m est excessive, les autres données sont très correctes. Il ne faut pas en effet, seurrer sur la stabilisation totale d'un bateau par un ancrage en un seul point. Des tests de contrôle faits, durant des jaugeages à Manacapuru, ont permis de vérifier que le déplacement latéral d'un bateau ancré par 40 m de fond et avec 200 m de câble (nécessaire pour l'alignement) pouvait atteindre 15 à 20 m sous l'effet conjugué du vent et du courant.

On pourra observer aussi l'excellent alignement du bateau.

B - Une statistique rapide de la dérive du bateau, pendant les 60 secondes de la mesure de la vitesse, a donné les résultats suivants :

Dérive latérale δX - moyenne des 95 mesures : 3,8 m
minimum : 0,1 m
maximum : 14,5 m
4 valeurs supérieures à 10 m (5 %)
36 valeurs supérieures à 5 m (38 %)

Dérive longitudinale δY - moyenne des 95 mesures : 3,6 m
minimum : 0,0 m
maximum : 22,5 m
4 valeurs supérieures à 10 m (5 %)
22 valeurs supérieures à 5 m (23 %)

Nous jugeons ces résultats tout à fait excellents, surtout si l'on considère qu'aucune mesure n'a été refaite (ce jaugeage étant inclus en supplément dans une tournée normale, le temps nous était compté) et que le pilote ne disposait pas d'une commande directe du moteur (nous l'avons vu à plusieurs reprises se précipiter dans la soute pour réveiller le mécanicien à coups de poing...).

C - La forme de certaines paraboles de vitesses (fig. 3 et 3 bis) peut paraître un peu curieuse (n° 4, 13...). Nous ne pensons pas que la méthode en soit la cause. Il est plus probable que ce soit la durée de la mesure : 60 secondes est encore un temps beaucoup trop court, étant donné l'irrégularité de l'écoulement. Il est possible, aussi, que certains décomptes des impulsions (avec le compteur sonore) soient erronés...

Chapitre 6 - JAUGEAGE PAR LA METHODE DU BATEAU MOBILE

Cette méthode ("moving-boat") a été inventée par G.J.SMOOT et Ch. E.NOVAK en 1969. Depuis cette date, elle a été très largement diffusée et utilisée, en particulier sur le continent américain. Le matériel utilisé à l'origine a été modernisé par des équipes américaines et canadiennes et l'on peut désormais, pour un coût de l'ordre de 10 000 US\$, acquérir un équipement presque totalement automatisé.

Il s'agit d'une méthode basée sur la mesure simultanée de la vitesse d'écoulement sub-superficielle avec un moulinet et du fond par écho-sondage. Le champ des vitesses n'est donc exploré que très partiellement et, comme dans le cas de la méthode ultrasonique, on se trouve confronté au problème du coefficient de correction K_v .

Ceci dit, cette méthode est facile à mettre en oeuvre et n'exige ni un matériel sophistiqué, ni un personnel spécialisé. Elle peut être très utile sur les fleuves de moyenne à grande largeur quand les conditions d'écoulement rendent dangereuses l'ancrage d'un bateau ou l'immersion d'un saumon.

61 - PRINCIPE DE LA METHODE

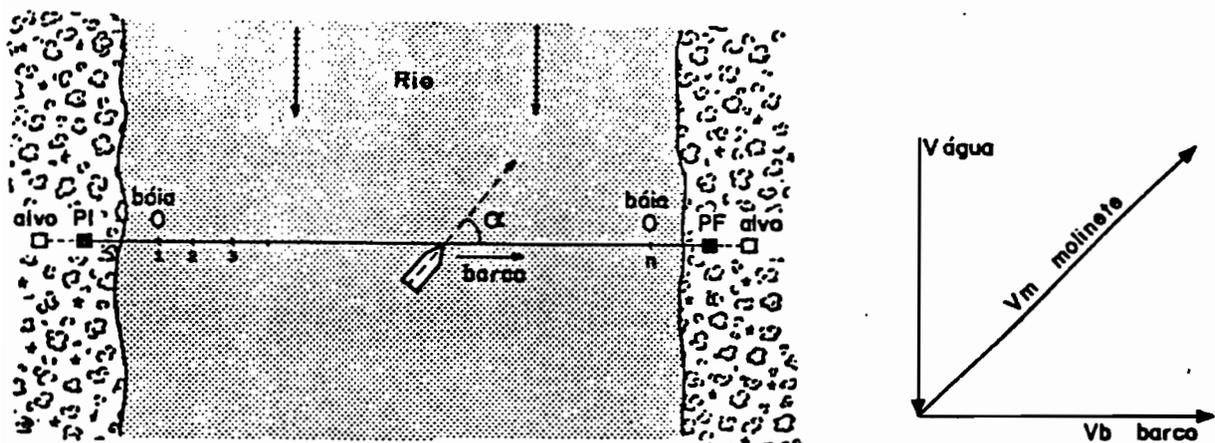
Dans cette méthode, vitesses d'écoulement et distances horizontales sont mesurées avec un moulinet hydrométrique et les profondeurs avec un sondeur acoustique.

Le jaugeage consiste à effectuer plusieurs traversées successivement d'une rive à l'autre, à vitesse constante, le moulinet fixé sur une perche à l'avant du bateau étant maintenu exactement (en théorie) dans la section transversale. Pour faciliter les manoeuvres du bateau, la distance effective de mesurage est définie par deux bouées ancrées à une quinzaine de mètres à l'amont de la section et à quelques dizaines de mètres de chaque rive.

Pour maintenir le moulinet exactement dans la section transversale, il est nécessaire que le bateau se déplace "en crabe", à une vitesse égale ou aussi voisine que possible de la vitesse d'écoulement. Ce qui signifie que l'angle α entre la direction du courant et la direction du bateau doit être voisin de 45° (figure 24).

Au cours de la traversée, le moulinet et l'échosondeur fonctionnent en permanence de telle façon que la vitesse, la profondeur et l'angle α soient mesurés en plusieurs verticales successives (de 40 à 60). La distance entre les verticales correspond à un nombre constant de tours d'hélice, nombre choisi à l'avance, en fonction de la largeur totale de la section.

Figure 24 - JAUGEAGE PAR LA METHODE DU BATEAU MOBILE - PRINCIPE



Il est important de bien comprendre le principe de la méthode : le moulinet mesure la vitesse résultante de la composition du vecteur V_a qui correspond à l'écoulement et du vecteur V_b qui correspond à la vitesse du bateau (Cf. figure 24). Si l'on choisit un nombre constant de tours d'hélice du moulinet, par exemple 200 et que cette hélice a un pas de 0,125 m, la distance parcourue théorique est $0,125 \times 200 = 25$ m et la distance réelle parcourue par le bateau l_b est $25 \times \cos \alpha$ (par exemple 17,68m si $\alpha = 45^\circ$). Nous désignerons cette distance théorique par L_t . Elle n'est égale à la distance effectivement parcourue par le bateau si $\alpha = 0^\circ$, c'est à dire si le bateau suit exactement la transversale, ce qui en termes de navigation est impossible quand V_a n'est pas nul.

A chaque verticale, la vitesse V_m est mesurée à une seule profondeur qui est celle du moulinet (en général 50 cm à 1 m). La vitesse de l'eau V_a est égale à $V_m \times \sin \alpha$

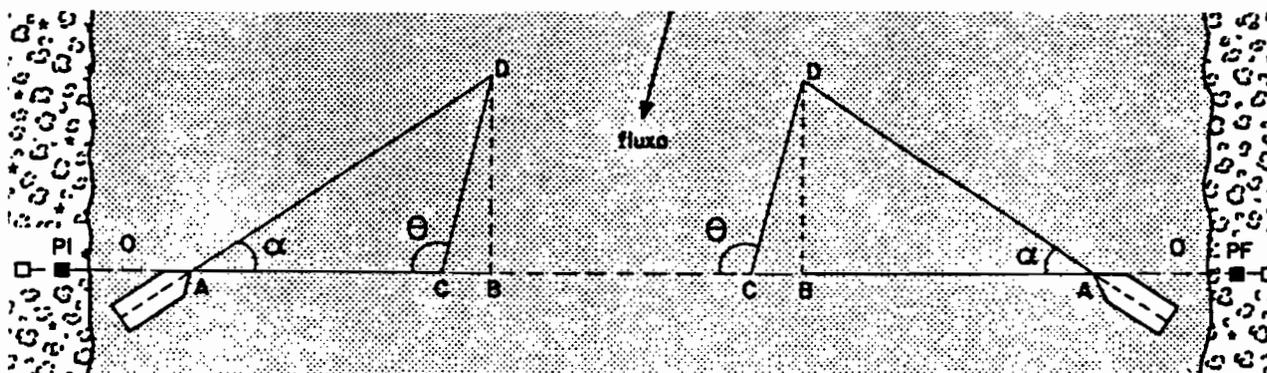
On considère que l'angle α reste constant entre deux verticales (ce qui est inexact sauf si le pilote du bateau est excellent) et la distance entre chaque verticale est donc la distance parcourue par le bateau.

En résumé :

- à chaque verticale, on mesure V_m , α et P_t (profondeur totale à la verticale)
- $V_a = V_m \sin \alpha$ (vitesse ponctuelle à la profondeur d'immersion du moulinet)
- $l_b = L_t \cos \alpha$ (distance entre deux verticales)
- $D = \delta B_1 + \sum l_b$ (distance depuis la rive, δB_1 étant la distance rive → bouée de départ).

Les relations ci-dessus ne sont exactes que si la direction du courant est exactement perpendiculaire à la section transversale. Lorsque cette condition n'est pas respectée (cas assez fréquent pour les fleuves de grande largeur), les valeurs de l_b sont différentes, suivant que le bateau se déplace dans un sens (aller) ou dans l'autre (retour), comme le montre la figure 25.

Figure 25 - CORRECTION DE LARGEUR



AB = distance théorique (calculée) parcourue par le bateau

AC = distance réellement parcourue par le bateau

L'erreur faite est systématique et, par accumulation sur toute la largeur, la différence entre la largeur utile L_u (largeur entre les bouées) et les largeurs mesurées L_m dans chaque sens peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Prenons l'exemple d'une section utile de 2000m faisant un angle de 2° avec la direction principale de l'écoulement et un mesurage effectué avec une distance théorique L_t de 50m. On calcule :

- $l_b = 50 \times \cos 45^\circ = 35,33$ m soit 56,6 verticales
 - dans un sens : $L_m = 50 \times \cos 47^\circ \times 56,6 = 1930$ m
 - dans l'autre sens : $L_m = 50 \times \cos 43^\circ \times 56,6 = 2070$ m
- La différence est de 140 m pour 2° seulement.

Le coefficient de correction de largeur Kl est égal à L_u/L_m .

Cette rapide description du principe de la méthode montre que le mesurage est complet pour la géométrie de la section transversale (section mouillée) mais que la vitesse est mesurée par points (40 à 50) sur une seule horizontale sub-superficielle. La vitesse moyenne mesurée doit donc être corrigée pour le calcul de la vitesse moyenne U et du débit.

62 - MATERIEL

L'équipement est composé de deux perches cylindriques emboîtées, placées exactement à la proue du bateau, d'un compteur d'impulsions et d'un sondeur acoustique.

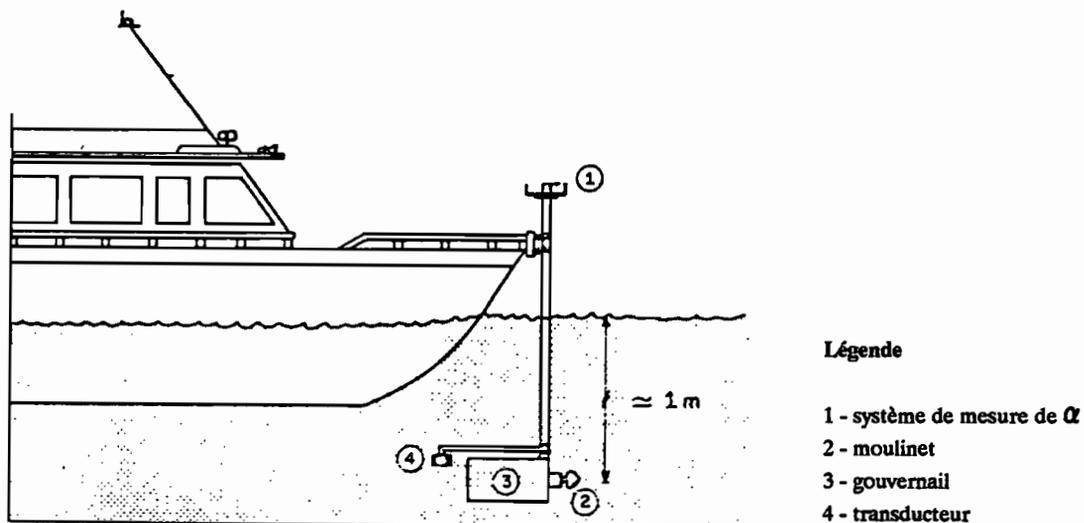
La perche extérieure, d'un diamètre de l'ordre de 40mm est fixe et supporte (cf figure 26) :

- à sa base le transducteur de l'écho-sondeur, fixé à l'extrémité d'une tige, pour que le faisceau d'ondes soit situé hors du champ du gouvernail;
- à son sommet, un cercle métallique gradué en degrés et muni de deux repères pour la visée des balises matérialisant la section transversale.

La perche intérieure est plus longue et pivote librement. Elle porte :

- dans sa partie inférieure (immergée), une palette métallique qui sert de gouvernail et un support de fixation du moulinet, diamétralement opposé au gouvernail;
- à son extrémité supérieure, un indicateur de direction du moulinet ou un compas magnétique (quand la mesure de α est automatisée).

Figure 26 - INSTALLATION DE L'EQUIPEMENT DE JAUGEAGE



Les trois photographies réunies sur la page suivante montrent le gouvernail et le moulinet, le système de mesure de l'angle α (remarquer la position inconfortable de l'observateur) et enfin la claviers de commande du système automatisé fabriqué par le WATER RESOURCES BRANCH canadien..

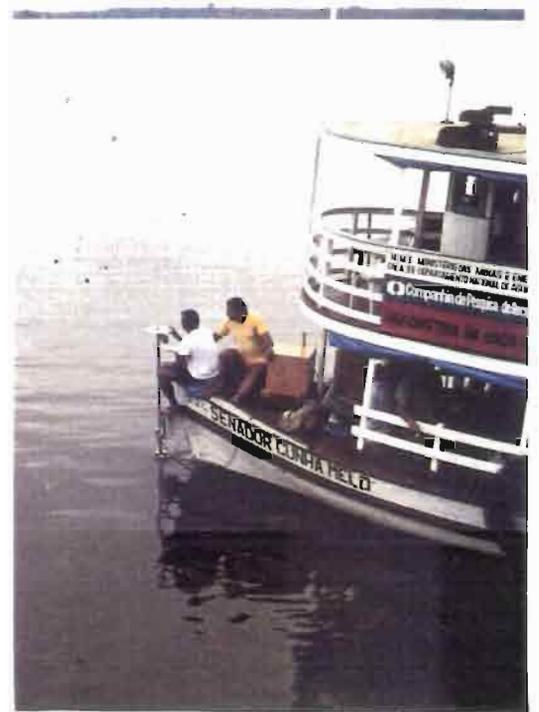
Dans le système conçu par les auteurs de la méthode, le moulinet hydrométrique a un pas théorique de 0,125m et il fournit 24 impulsions par tour d'hélice. Il s'agit donc d'un véritable générateur de courant continu. Ce courant est mesuré par un compteur analogique, qui assume une double fonction :

- l'affichage du nombre instantané de tours d'hélice;
- le décompte du nombre total de tours d'hélice entre deux verticales (mesure de la distance théorique L_t).

Figure 27 - MATERIEL UTILISE DANS LA METHODE DU BATEAU MOBILE.



A - Perche et moulinet



B - Palette pour la mesure de α



C - Calculateur pour la mesure automatisée

Lorsque le compteur analogique totalise le nombre de tours d'hélice (ou d'impulsions) sélectionné avant le jaugeage (5 gammes disponibles entre 1024 et 16384 impulsions, pour un moulinet à 24 imp./tour), il déclenche une sonnerie qui alerte l'opérateur. Ce dernier fait une lecture de la vitesse instantanée, appuie sur le bouton "Marqueur" pour pointer la verticale sur l'échogramme et annote la valeur de l'angle α qui lui est communiqué par un auxiliaire placé à l'avant du bateau. Cette opération est répétée à chaque verticale.

Avec le système automatisé (voir figure 26, photo C), toutes ces opérations sont faites automatiquement (saisie des données sous forme numérique en sortie du compas magnétique, de l'échosondeur et du compteur d'impulsions) et le débit est calculé en temps réel.

63 - CALCUL DU JAUGEAGE

Le débit est calculé par la méthode de la section moyenne (Cf. fiche technique n° 5 en annexe) à partir des 3 paramètres mesurés à chaque verticale : V_m (calculée par l'équation du moulinet), α et P_t . Le calcul, lorsqu'il est effectué à la main, est très long mais ne présente absolument aucune difficulté.

Nous rappelons les formules utilisées :

$$\begin{aligned} V_m &= c N + o && \text{avec } c \text{ et } o, \text{ constantes du moulinet} \\ &&& \text{et } N \text{ nombre d'impulsions} \\ V_a &= V_m \sin \alpha \\ l_b &= l \cos \alpha \end{aligned}$$

Le coefficient de correction de largeur K_v obtenu pour chaque traversée est appliqué aux valeurs brutes obtenues pour la section mouillée et le débit. Ce débit, rappelons-le, ne correspond pas au débit réel puisque la vitesse est mesurée à 1 mètre de profondeur.

Il est bien rare que toutes les traversées soient parfaites, soit par suite d'écarts trop importants dans la trajectoire du bateau, soit en raison d'un incident technique quelconque. On élimine généralement deux traversées, souvent sur la base de la valeur anormale du coefficient de correction de largeur K_l (une traversée dans chaque sens obligatoirement pour les raisons déjà évoquées liées à la non-perpendicularité courant/section transversale) et le résultat final est égal à la moyenne des résultats obtenus pour les traversées qui ont été conservées.

Exemple

Pour illustrer cette présentation, nous donnons un exemple de jaugeage réalisé en juin 1987 à MANACAPURU. Cet exemple comprend trois tableaux édités par ordinateur :

- le premier (page 60) rassemble toutes les caractéristiques du jaugeage : date, cotes, nombre de traversées, caractéristiques de la station, équipement utilisé.

- le second tableau (page 61) donne les valeurs mesurées et calculées pendant la première traversée, qui comprend 49 verticales; D est la distance cumulée depuis la rive de départ (rive gauche dans ce cas), S_j et Q_j sont les sections et débits partiels;

Les valeurs indiquées "Coefficients des Bouées" au-dessus du tableau sont des termes correctifs. Il est évident que les intervalles extrêmes près des bouées ne correspondent pas à des distances théoriques entières : le coefficient 0,5 par exemple indique que le bateau est parvenu au droit de la seconde bouée alors qu'il n'avait parcouru que la moitié de L_t (la valeur du coefficient est "estimée" sur l'échogramme).

Au bas du tableau, sont donnés tous les résultats partiels correspondants à la traversée.

- le troisième tableau (page 62) donne le récapitulatif des résultats pour les dix traversées réalisées et les résultats définitifs; le tableau inférieur appelé "Critique du jaugeage" donne la répartition des angles α . C'est, à notre avis, le critère le plus sûr pour juger de la façon dont a été mené le mesurage. Dans le cas de ce jaugeage, on appréciera la performance du pilote qui s'est rarement écarté de l'intervalle $40^\circ < \alpha < 50^\circ$. Ce qui est absolument remarquable dans une section de 3200 m de largeur et avec une vitesse moyenne d'écoulement de l'ordre de 1,7m/s.

JAUGEAGE PAR LA METHODE DU BATEAU MOBILE

FLEUVE : SOLIMDES
 STATION : MANACAPURU

CODE : 14100000

JAUGEAGE No 104 du 10/06/1987

COTES : Début = 1863 Fin = 1863
 Nombre de traversées = 10

CARACTERISTIQUES de la SECTION

DISTANCES : PIFF = 3228 m
 Rive droite à PF = 23.1 m
 Bouée Rive Droite = 33.9 m
 Rive gauche à PF = 11 m
 Bouée Rive Gauche = 24 m
 Largeur entre bouées = 3136 m

MOULINET

Numéro = A-18038
 Profondeur = 1 m
 Equation = .00558 N + .0237

ECHOSONDEUR

Numéro = 56533710
 Profondeur du Transducteur = .8 m

COMPTEUR ANALOGIQUE

Numéro = 03108320
 Classe = 5
 Distance théorique = 91.44 m

JAUGEAGE n° 104

TRAVERSEE n° 1

HEURE : Début = 10.50 Fin = 11.30 SENS : RG/RD
 COEFFICIENTS BOUEES : 1ère Bouée = .8 2ème Bouée = .5

| Ver. | ANG. | Pt m | N | Va m/s | lb m | D. Acm. m | Sj m ² | Qj m ³ /s |
|------|------|---------|-----|-----------|---------|--------------|----------------------|-------------------------|
| 1 | 49 | 9.4 | 230 | 0.99 | 24.0 | 24.0 | 368.3 | 363.3 |
| 2 | 42 | 13.0 | 260 | 0.99 | 54.4 | 78.4 | 766.2 | 756.0 |
| 3 | 46 | 24.5 | 355 | 1.44 | 63.5 | 141.9 | 1527.6 | 2202.8 |
| 4 | 48 | 23.4 | 365 | 1.53 | 61.2 | 203.1 | 1498.3 | 2294.2 |
| 5 | 43 | 23.6 | 360 | 1.39 | 66.9 | 269.9 | 1538.7 | 2132.8 |
| 6 | 46 | 24.1 | 380 | 1.54 | 63.5 | 333.5 | 1530.8 | 2361.0 |
| 7 | 46 | 24.9 | 365 | 1.48 | 63.5 | 397.0 | 1537.7 | 2279.1 |
| 8 | 49 | 25.4 | 390 | 1.66 | 60.0 | 457.0 | 1583.0 | 2628.3 |
| 9 | 45 | 25.8 | 390 | 1.56 | 64.7 | 521.6 | 1710.7 | 2661.1 |
| 10 | 42 | 26.2 | 395 | 1.49 | 68.0 | 589.6 | 1722.3 | 2567.4 |
| 11 | 46 | 26.2 | 390 | 1.58 | 63.5 | 653.1 | 1693.8 | 2680.4 |
| 12 | 44 | 25.9 | 395 | 1.55 | 65.8 | 718.9 | 1674.4 | 2591.2 |
| 13 | 46 | 25.3 | 400 | 1.62 | 63.5 | 782.4 | 1635.6 | 2653.9 |
| 14 | 44 | 25.7 | 385 | 1.51 | 65.8 | 848.2 | 1646.6 | 2484.4 |
| 15 | 47 | 26.3 | 385 | 1.59 | 62.4 | 910.5 | 1624.6 | 2580.8 |
| 16 | 48 | 26.2 | 390 | 1.63 | 61.2 | 971.7 | 1633.6 | 2670.7 |
| 17 | 46 | 27.0 | 400 | 1.62 | 63.5 | 1035.2 | 1745.5 | 2832.3 |
| 18 | 44 | 27.7 | 420 | 1.64 | 65.8 | 1101.0 | 1806.5 | 2970.8 |
| 19 | 45 | 27.7 | 400 | 1.60 | 64.7 | 1165.7 | 1742.9 | 2780.0 |
| 20 | 48 | 30.6 | 395 | 1.66 | 61.2 | 1226.9 | 1872.3 | 3099.7 |
| 21 | 48 | 32.9 | 465 | 1.95 | 61.2 | 1288.0 | 2088.5 | 4064.0 |
| 22 | 44 | 29.8 | 470 | 1.84 | 65.8 | 1353.8 | 1960.1 | 3603.3 |
| 23 | 44 | 30.5 | 440 | 1.72 | 65.8 | 1419.6 | 1989.1 | 3425.2 |
| 24 | 45 | 30.0 | 430 | 1.71 | 64.7 | 1484.3 | 1922.7 | 3294.3 |
| 25 | 46 | 33.6 | 510 | 2.06 | 63.5 | 1547.8 | 2134.3 | 4405.4 |
| 26 | 46 | 38.7 | 490 | 1.98 | 63.5 | 1611.3 | 2389.9 | 4741.3 |
| 27 | 49 | 36.0 | 500 | 2.12 | 60.0 | 1671.3 | 2263.8 | 4807.2 |
| 28 | 44 | 31.8 | 470 | 1.84 | 65.8 | 1737.1 | 2037.4 | 3745.3 |
| 29 | 47 | 33.6 | 480 | 1.98 | 62.4 | 1799.4 | 2075.6 | 4101.8 |
| 30 | 48 | 30.9 | 500 | 2.09 | 61.2 | 1860.6 | 1908.8 | 3991.3 |
| 31 | 47 | 28.0 | 520 | 2.14 | 62.4 | 1923.0 | 1729.7 | 3700.5 |
| 32 | 48 | 27.4 | 510 | 2.13 | 61.2 | 1984.2 | 1692.6 | 3609.4 |
| 33 | 47 | 28.3 | 510 | 2.10 | 62.4 | 2046.5 | 1781.2 | 3738.1 |
| 34 | 46 | 28.9 | 540 | 2.18 | 63.5 | 2110.0 | 1819.0 | 3973.7 |
| 35 | 47 | 30.4 | 520 | 2.14 | 62.4 | 2172.4 | 1913.4 | 4093.6 |
| 36 | 46 | 38.0 | 520 | 2.10 | 63.5 | 2235.9 | 2413.7 | 5079.2 |
| 37 | 46 | 35.2 | 520 | 2.10 | 63.5 | 2299.4 | 2235.9 | 4704.9 |
| 38 | 46 | 31.0 | 530 | 2.14 | 63.5 | 2363.0 | 1969.1 | 4222.6 |
| 39 | 46 | 30.4 | 520 | 2.10 | 63.5 | 2426.5 | 1965.3 | 4135.5 |
| 40 | 44 | 30.6 | 460 | 1.80 | 65.8 | 2492.3 | 1995.6 | 3591.2 |
| 41 | 45 | 29.4 | 440 | 1.75 | 64.7 | 2556.9 | 1867.2 | 3272.9 |
| 42 | 47 | 27.6 | 450 | 1.85 | 62.4 | 2619.3 | 1768.3 | 3278.0 |
| 43 | 44 | 26.0 | 450 | 1.76 | 65.8 | 2685.1 | 1710.2 | 3011.2 |
| 44 | 44 | 24.0 | 450 | 1.76 | 65.8 | 2750.8 | 1551.6 | 2731.9 |
| 45 | 46 | 26.3 | 360 | 1.46 | 63.5 | 2814.3 | 1592.0 | 2327.6 |
| 46 | 51 | 26.6 | 275 | 1.21 | 57.5 | 2871.9 | 1547.1 | 1873.4 |
| 47 | 50 | 25.3 | 295 | 1.28 | 58.8 | 2930.7 | 1603.1 | 2050.6 |
| 48 | 42 | 22.0 | 290 | 1.10 | 68.0 | 2998.6 | 1035.9 | 1138.1 |
| 49 | 55 | 15.0 | 250 | 1.16 | 26.2 | 3024.8 | 450.9 | 524.0 |

RESULTATS DU CALCUL

(sans correction de la vitesse)

Q = 155528.6 m³/s
 Pm = 27.6 m

S = 88067.0 m²
 Lm = 3000.8 m

V1m = 1.707 m/s
 K1 = 1.045

64 - COMMENTAIRES

641. Répartition des vitesses V_a

Par rapport à un mesurage classique, le nombre de verticales est important : de 40 à 60. Mais les vitesses ponctuelles V_a ne sont pas mesurées directement. La précision du résultat dépend du nombre instantané d'impulsions au moment de la lecture et de la valeur de α . Ces deux paramètres sont mesurés de manière très approximative, l'un sur un cercle gradué après visée sur une balise qui peut se trouver à 3 km comme à MANACAPURU, l'autre sur un cadran de voltmètre dont l'aiguille oscille en permanence. On peut donc s'interroger sur la signification du résultat.

La figure 28 apporte des éléments de réponse à cette interrogation. Elle représente, pour le jaugeage donné en exemple, la variation des vitesses V_a mesurées au cours des 5 premières traversées (trait continu) et à titre de comparaison les vitesses mesurées à 1m de profondeur aux 21 verticales du jaugeage complet avec le bateau ancré (trait interrompu).

On remarque l'aspect irrégulier, en dents de scie, qui est caractéristique de cette méthode de mesurage : les écarts relatifs entre les deux courbes atteignent jusqu'à 30%. Mais on voit aussi que, EN MOYENNE sur toute la largeur, les résultats sont très proches.

642. Correction de largeur

La moyenne des coefficients de correction de largeur K_l de toutes les traversées est, en principe, égale à 1 quand le nombre des "retours" égale le nombre des "allers". Toute tendance systématique d'un côté ou de l'autre est significative d'une dérive dans l'étalonnage de l'ensemble compteur/moulinet. Ceci arrive fréquemment car, si la vérification de l'étalonnage d'un moulinet est relativement facile pour un hydrométriste, celui d'un compteur d'impulsions (qui est en fait un voltmètre) requiert la compétence d'un électrotechnicien.

643. Calcul de l'angle "section/écoulement"

La comparaison des coefficients "Kl aller" et "Kl retour" permet de calculer la valeur de l'angle θ que fait la section de jaugeage avec la direction de l'écoulement (moyenne dans la section transversale).

En se reportant à la figure 25, on peut écrire :

a) CB est l'écart moyen entre les largeurs mesurées dans une direction et dans l'autre; on le calcule par :

$$CB = \left| L_m \text{ allers} - L_m \text{ retours} \right| / \text{nombre total de verticales}$$

b) DB est calculé par $AB \times \sin \alpha$ (α est la moyenne de tous les α mesurés); AB correspond à L_t , distance théorique.

c) DC a pour module la distance parcourue par l'eau pendant l'intervalle de temps moyen t_m entre deux verticales; cette distance est égale au produit de t_m par la moyenne des vitesses V_a .

A titre d'exercice, le calcul de θ pour la section de MANACAPURU sera fait à partir des éléments des tableaux de la page précédente.

644. Coefficient de correction de vitesse K_v

Ce point constitue le "talon d'Achille" de cette méthode, comme celui de tous les mesurages incomplets (ultra-sons, flotteurs superficiels). K_v doit être déterminé à partir de jaugeages complets, au cours desquels on prend soin de bien mesurer la vitesse à 1m de profondeur.

Les auteurs de la méthode pensent qu'il suffit de déterminer K_v en quelques verticales "représentatives". Cette définition est très imprécise. Nous avons pu constater sur une dizaine de jaugeages complets à MANACAPURU, que le rapport V_j/V_{1m} variait beaucoup d'une verticale à l'autre (de 0,75 à 1,06), sans doute en raison de l'imprécision des mesures ponctuelles.

Par contre pour un jaugeage considéré dans sa totalité, les erreurs ponctuelles se compensent et la dispersion des valeurs est beaucoup plus faible. Pour l'ensemble des 10 mesurages de MANACAPURU, K_v est compris entre 0,901 et 0,928 (écart d'environ 3%). Cet intervalle s'explique par la différence des cotes entre les jaugeages.

Le coefficient K_v varie d'une section à l'autre : à OBIDOS par exemple, sur la base de cinq jaugeages complets, on a trouvé un intervalle de 0,982 à 1,001. Peut-être peut-on expliquer la différence entre les deux stations par le fait qu'un mètre à OBIDOS correspond à moins de 2% de la profondeur moyenne, contre plus de 4% à MANACAPURU.

65 - CONCLUSION

La méthode de jaugeage du bateau mobile est une méthode originale et performante, qui s'applique aux rivières assez larges (au moins 200m) et assez profondes pour y manoeuvrer facilement.

C'est une méthode très utile en crue lorsque les vitesses d'écoulement et les matériaux transportés rendent difficile ou dangereux l'ancrage d'un bateau. Il faut toutefois que l'on puisse naviguer sans péril et suivre une trajectoire directe d'une rive à l'autre. Il faut aussi que la charge solide n'empêche pas le bon fonctionnement de l'échosondeur, encore que l'on puisse se contenter de mesurer les vitesses superficielles dans certaines situations exceptionnelles. Elle présente l'énorme avantage de n'exiger aucune installation sur les berges : on peut très bien utiliser des repères naturels pour guider la trajectoire du bateau.

Le matériel utilisé, bien que spécifique, n'est pas d'une très haute technicité, ni d'un coût excessif. Enfin, la méthode est assez simple à pratiquer. L'opérateur le plus important est le pilote du bateau : c'est de son habilité à suivre la trajectoire et à maintenir son "angle" à 45° que dépend la qualité du mesurage.

Le point faible réside dans la valeur du coefficient K_v . De toutes manières, le rapport U/V_{ms} (vitesse moyenne superficielle) est un paramètre dont la détermination est essentielle dans toute section hydrométrique. Il faut le calculer pour chaque jaugeage afin de préparer les mesurages de très hautes eaux où, le plus souvent, seul les flotteurs naturels, ou le canot mobile, sont utilisables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Recueil de normes ISO 4369-1979

Méthode du canot mobile

Curso sobre Técnicas de Medição de Descarga Liquida em grandes Rios

Fiches techniques par G.JACCON - DNAEE/ORSTOM - 1984

Curso sobre Técnicas de Medição de Descarga Liquida em grandes Rios

Rapport technique du Cours de 1987 - DNAEE/ORSTOM - 1987

Measurement of Discharge by the Moving-Boat Method

G.F.SMOOT et Ch.E.NOVAK - USGS, Book 3, Chapter A11

Hydrometric Field Manual - Flow Measurement Method - Automated Moving Boat Measurement System Inland Waters Directorate - Water Resources Branch - Ottawa, Canada, 1985

ANNEXE

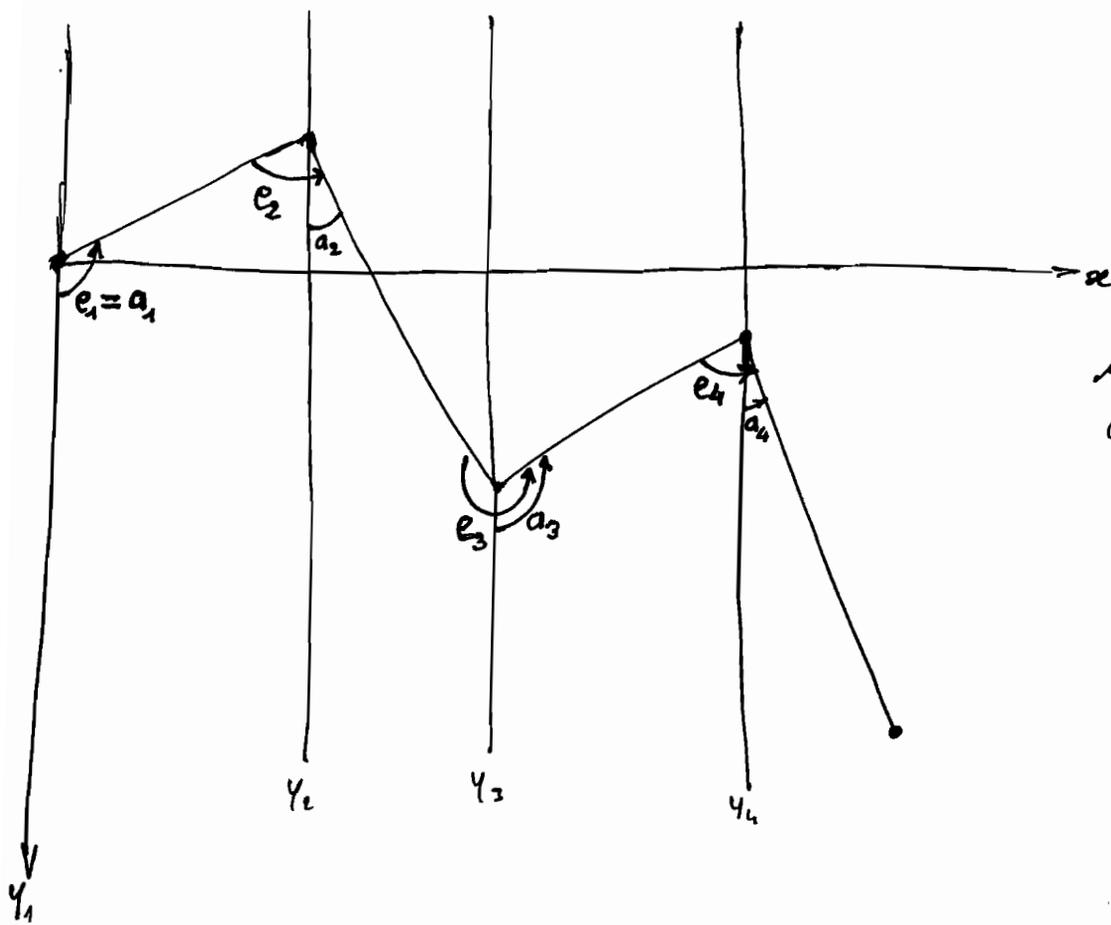
Fiche technique 1 : CALCUL DE LA LONGUEUR ET DE L'ANGLE D'UNE BASE

**Fiche technique 2 : POSITIONNEMENT D'UN BATEAU SUR UN PLAN D'EAU DE GRANDE
LARGEUR AVEC DEUX THEODOLITES**

**Fiche technique 3 : POSITIONNEMENT D'UN BATEAU AVEC UN SEXTANT ET QUATRE BASES
NON PERPENDICULAIRES A LA SECTION**

**Fiche technique 4 : JAUGEAGE PAR LA METHODE DES "GRANDS FLEUVES" - CALCUL DE L'ABSCISSE
ET DE LA VITESSE MOYENNE D'UNE VERTICALE**

Fiche technique 5 : CALCUL DU DEBIT PAR LA METHODE DE LA SECTION MOYENNE



$$\sin(\pi - x) = \sin x$$

$$\cos(\pi - x) = -\cos x$$

FICHE TECHNIQUE n°1 : CALCUL DE LA LONGUEUR ET DE L'ANGLE D'UNE BASE

1. OBJECTIF

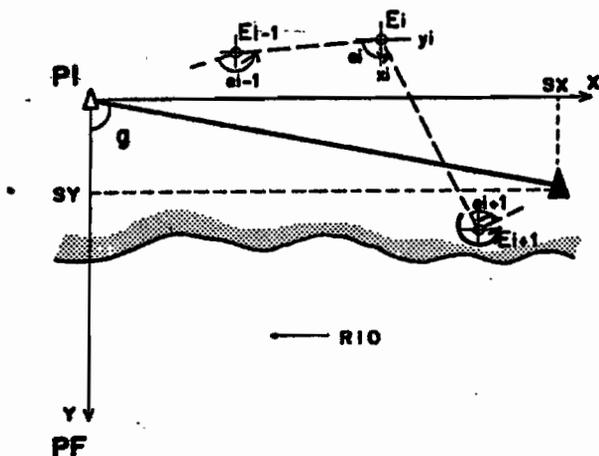
Pour connaître la position exacte d'une embarcation dans une section de jaugeage de grande largeur, on installe sur les berges des théodolites ou des balises pour la lecture des angles avec des sextants.

La distance entre 2 théodolites ou deux balises est appelée **BASE**.

La longueur et l'angle de cette base avec la section de jaugeage sont définis par un levé topographique, appelé **cheminement**. A partir du point de départ (généralement le point initial PI de la section de jaugeage), plusieurs étapes successives sont nécessaires pour atteindre l'extrémité de la base.

Pour chacune des n étapes du cheminement, on mesure :

- la distance D_i entre les stations i et $i+1$,
- l'angle e_i entre les stations $i-1$ et $i+1$.

2. FIGURE**3. LEGENDE**

- Δ théodolite au départ
- \circ station
- base
- ~ cheminement

PI, PF = point initial et point final de la section de jaugeage

4. FORMULES

$a_i =$ angle entre l'axe y_i et la droite $(i, i+1)$

En posant :

$$a_i = e_i - (180^\circ - a_{i-1}) \text{ avec } a_0 = 180$$

$$X_i = D_i \sin a_i$$

SX = somme des X

$$Y_i = D_i \cos a_i$$

SY = somme des Y

pour i variant de 1 à n (nombre de stations)

$$\text{BASE} = (SX^2 + SY^2)^{1/2}$$

$$\cos g = SY / \text{BASE}$$

5. PROGRAMME pour Calculatrices HP11C et HP15C

Réf:T10

| E C R A N | | | C O M M A N D E | | | E C R A N | | | C O M M A N D E | | |
|-----------|----------|---------|-----------------|---------|------------|-----------|------|--|-----------------|------|--|
| No | Code | | No | Code | | No | Code | | No | Code | |
| 000 | | | 030 | 42.21.2 | f LBL 2 | | | | | | |
| 1 | 42.21.11 | f LBL A | 1 | 45 8 | RCL 8 | | | | | | |
| 2 | 42.7.4 | f FIX 4 | 2 | 31 | R/S | | | | | | |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 45 8 | RCL 8 | | | | | | |
| 4 | 8 | 8 | 4 | 20 | x | | | | | | |
| 005 | 0 | 0 | 035 | 45 7 | RCL 7 | | | | | | |
| 6 | 44 0 | STO 0 | 6 | 31 | R/S | | | | | | |
| 7 | 44 6 | STO 6 | 7 | 45 7 | RCL 7 | | | | | | |
| 8 | 0 | 0 | 8 | 20 | x | | | | | | |
| 9 | 44 5 | STO 5 | 9 | 40 | + | | | | | | |
| 010 | 44 7 | STO 7 | 040 | 11 | \sqrt{x} | | | | | | |
| 1 | 44 8 | STO 8 | 1 | 31 | R/S | | | | | | |
| 2 | 42.21.1 | f LBL 1 | 2 | 45 7 | RCL 7 | | | | | | |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 10 | : | | | | | | |
| 4 | 44.40.5 | STO +5 | 4 | 15 | 1/x | | | | | | |
| 015 | 45 5 | RCL 5 | 045 | 43 24 | g COS-1 | | | | | | |
| 6 | 31 | R/S | 6 | 42 2 | f →HMS | | | | | | |
| 7 | 34 | x > < y | 7 | 31 | R/S | | | | | | |
| 8 | 43 2 | g →H | 8 | 22 11 | GTO A | | | | | | |
| 9 | 45 6 | RCL 6 | | | | | | | | | |
| 020 | 40 | + | | | | | | | | | |
| 1 | 45 0 | RCL 0 | | | | | | | | | |
| 2 | 30 | - | | | | | | | | | |
| 3 | 44 6 | STO 6 | | | | | | | | | |
| 4 | 34 | x > < y | | | | | | | | | |
| 025 | * 42 1 | f →R | | | | | | | | | |
| 6 | 44.40.7 | STO +7 | | | | | | | | | |
| 7 | 34 | x > < y | | | | | | | | | |
| 8 | 44.40.8 | STO +8 | | | | | | | | | |
| 9 | 22 1 | GTO 1 | | | | | | | | | |

* pour HP11C, le code est 42 26

Si GRD lignes 3, 4, 5. mettre . 2 0 0

Utilisation des mémoires

0 : constante 180

5 : nombre total de stations pour le cheminement

6 : a_i 7 : somme des Y_i 8 : somme des X_i Occupation de la mémoire "Programme"

HP11C : 48 lignes - n'occupe aucun registre réservé aux données

HP15C : 51 octets, soit 7 mémoires complètes ÷ 2 octets.

Labels utilisés : A, 1 et 2.

6. TEST DU PROGRAMME

Ref:T10

Données

| Station | Angle e | Distance D |
|---------|------------|------------|
| 1 | 114°32'20" | 48,3 m |
| 2 | 131°05'45" | 36,8 m |
| 3 | 149°42'30" | 34,7 m |
| 4 | 262°57'03" | 28,8 m |

Opérations

1. Lancer le programme avec la commande **f A**
2. La valeur **1,0000** s'inscrit sur l'écran.
3. Entrer les deux valeurs de la première station, dans l'ordre angle e et distance D.
Dans l'exemple : **14.3220 ENTER 48.3 R/S**
4. Quand la valeur **2,0000** s'inscrit sur l'écran, entrer les deux valeurs de la seconde station, et ainsi de suite jusqu'à la fin du tableau.
5. Quand apparaît sur l'écran, une valeur supérieure au nombre total de stations (**5,0000** dans l'exemple), entrer :

GSB 2

puis lire les résultats du calcul :

| | |
|----------|-----|
| 122,8920 | R/S |
| 9,7763 | R/S |
| 123,2803 | R/S |
| 85,2706 | |

Les résultats définitifs sont :

| | | |
|----------------|---|--------------------|
| SX | = | 122,89 m |
| SY | = | 9,78 m |
| BASE | = | 123,3 m |
| Angle g | = | 85° 27' 06" |

7. PROGRAMME BASIC (Calculateur SHARP PC-1430)

```

10 "T10"
15 PRINT "CALC.BASE":DEGREE:O=.005
20 INPUT "NOM.STA.=";K:B=180:S=0:T=0
25 FOR I=1 TO K
30 USING "####":PRINT "STATION :";I
35 INPUT "ANG.=";E:INPUT "DIST.=";D:E=DEG E
40 C=E-(180-B):B=C
45 X=D*SIN C:S=S+X
50 Y=D*COS C:T=T+Y
55 NEXT I
60 B=√(S*S+T*T): C=S/B
65 G=DMS ASN C+.00005: B=B+O:S=S+O:T=T+O
70 USING "####.##":PRINT "SOM.X=";S:PRINT "SOM.Y=";T
75 PRINT "BASE=";B:USING "####.####":PRINT "ANG.G=";G
80 GOTO 20

```

Variables utilisées

K = nombre de stations

| | |
|---------------------------|---------------------|
| E = angle mesuré (azimut) | } pour la station i |
| D = distance chaînée | |
| X = abscisse | |
| Y = ordonnée | |

S = somme des X

T = somme des Y

B = longueur de la base

G = azimut de la base

Occupation de la mémoire : 318 octets**Test du programme :**

Le test de fonctionnement du programme peut être fait avec les données de la page précédente. Le programme est lancé avec la commande **RUN "T10"** (ou **RUN 10**) et l'identification du programme est faite avec l'affichage du message **CALC. BASE** sur l'écran.

L'application du programme se fait sans difficulté et les résultats obtenus sont les suivants :

| | | | |
|--------------|----------|----------------|--------------|
| SOM.X | = | 122.89 | ENTER |
| SOM.Y | = | 9.78 | ENTER |
| BASE | = | 123.28 | ENTER |
| ANG. | = | 85.2706 | |

REMARQUE :

Les micro-ordinateurs de poche utilisent un langage BASIC qui varie un peu d'une machine à l'autre. Il pourra donc être nécessaire d'ajuster le programme ci-dessus qui a été écrit pour un ordinateur de marque SHARP modèle PC-1430.

FICHE TECHNIQUE n°2 : **POSITIONNEMENT D'UN BATEAU SUR UN PLAN D'EAU DE GRANDE LARGEUR AVEC DEUX THEODOLITES**

1. OBJECTIF

Calculer les coordonnées X et Y d'un bateau ancré, ou en déplacement, dans la section transversale d'un fleuve de grande largeur, à partir des deux angles mesurés depuis la rive avec deux théodolites.

Calculer les angles t1 et t2, qui doivent être lus sur deux théodolites pour positionner un bateau en un point précis choisi à l'avance (problème inverse du précédent).

2. DISPOSITIF

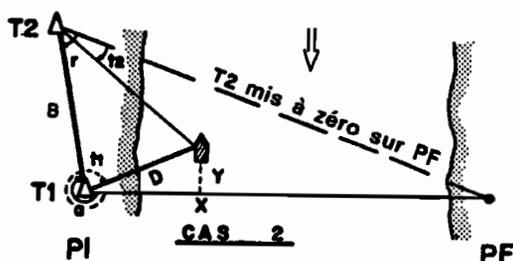
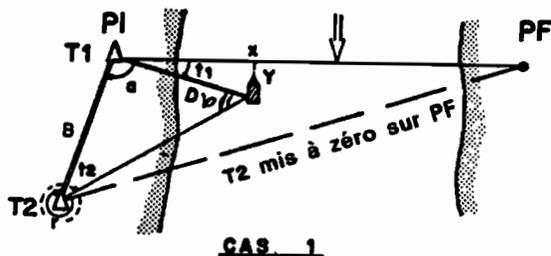
Les théodolites sont installés sur la berge. Le premier, désigné par T1, est situé au point initial PI, origine des coordonnées. Le second T2 est placé à l'extrémité d'une base dont la longueur est égale au tiers environ de la largeur totale et qui fait un angle a quelconque avec la section transversale (considérée comme l'axe des abscisses).

Les théodolites visent un point précis du bateau (mât par exemple) et mesurent les angles t1 et t2 entre cette ligne de visée et la section transversale d'une part (pour T1) et la base d'autre part (pour T2).

Les théodolites sont mis à zéro :

- sur la balise située de l'autre coté du fleuve pour T1 (point final PF sur la figure ci-dessous);
- sur le théodolite T1 pour T2 quand cela est possible (T1 visible de T2) ou sur la même balise placée en PF quand T1 est invisible depuis T2 (cas général).

3. FIGURES



4. LEGENDE

PIPF section transversale
emplacement des théodolites

a angle entre la section et la base
r angle entre la direction T2/PF et la base

D distance du bateau à l'origine

 bateau

B base
X,Y coordonnées du bateau

t1,t2 angles lus

5. FORMULES

5.1: pour calculer les coordonnées à partir des angles t1 et t2

$$\begin{aligned} \text{En posant :} \quad t2' &= t2 - r \\ b &= 180^\circ - (a - t1 - t2') \end{aligned}$$

$$D = \frac{B \sin t2'}{\sin b'}$$

$$X = D \cos t1 \qquad Y = D \sin t1 = X \operatorname{tg} t1$$

5.2: pour calculer les angles t1 et t2 à partir des coordonnées X et Y

$$t1 = \operatorname{arctg} (Y/X)$$

$$D^2 = X^2 + Y^2$$

$$t2' = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{D \sin (a - t1)}{B - D \cos (a - t1)} \right\}$$

$$t2 = t2' + r$$

6. REMARQUES

6.1: En pratique, les théodolites sont mis à zéro, dès leur installation, en visant la balise placée en PF sur la rive opposée et les lectures d'angles croissent de 0 à 360° (ou 400 grades) lorsque l'appareil tourne vers la DROITE.

Ceci signifie que:

- a < 180° et r > 180° quand B est à l'AVAL du PI (CAS 1)
- a > 180° et r < 180° quand B est à l'AMONT du PI (CAS 2)

6.2: Signe de Y

Par convention Y est :

- NEGATIF quand le bateau est à l'AMONT de la section et POSITIF quand le bateau est à l'AVAL, si la base et les theodolites sont sur la rive DROITE
- POSITIF quand le bateau est à l'AMONT de la section et NEGATIF quand le bateau est à l'AVAL, si la base et les theodolites sont sur la rive GAUCHE

7. PROGRAMME pour Calculatrices HP11C et HP15C

Réf: T30

| E C R A N | | | C O M M A N D E | | | E C R A N | | | C O M M A N D E | | |
|-----------|----------|-------------------|-----------------|---------|---------------------|-----------|------|--|-----------------|------|--|
| No | Code | | No | Code | | No | Code | | No | Code | |
| 000 | | | 040 | 45 5 | RCL 5 | | | | | | |
| 1 | 42.21.12 | f LBL B | 1 | 20 | x | | | | | | |
| 2 | 42. 7. 4 | f FIX 4 | 2 | 40 | + | | | | | | |
| 3 | 31 | R/S | 3 | 11 | \sqrt{x} | | | | | | |
| 4 | 43 2 | g \rightarrow H | 4 | 44 5 | STO 5 | | | | | | |
| 005 | 45 4 | RCL 4 | 045 | 33 | R \downarrow | | | | | | |
| 6 | 30 | - | 6 | 43 25 | g TAN-1 | | | | | | |
| 7 | 44 25 | STO I | 7 | 44 25 | STO I | | | | | | |
| 8 | 34 | x><y | * 8 | 43.30.2 | g TEST 2 | | | | | | |
| 9 | 43 2 | g \rightarrow H | 9 | 32 3 | GSB 3 | | | | | | |
| 010 | 44 5 | STO 5 | 050 | 42 2 | f \rightarrow HMS | | | | | | |
| 1 | 16 | CHS | 1 | 31 | R/S | | | | | | |
| 2 | 40 | + | 2 | 45 25 | RCL I | | | | | | |
| 3 | 45 3 | RCL 3 | 3 | 16 | CHS | | | | | | |
| 4 | 40 | + | 4 | 45 3 | RCL 3 | | | | | | |
| 015 | 23 | SIN | 055 | 40 | + | | | | | | |
| 6 | 45 25 | RCL I | 6 | 44 25 | STO I | | | | | | |
| 7 | 23 | SIN | 7 | 23 | SIN | | | | | | |
| 8 | 45 2 | RCL 2 | 8 | 45 5 | RCL 5 | | | | | | |
| 9 | 20 | x | 9 | 20 | x | | | | | | |
| 020 | 10 | : | 060 | 45 2 | RCL 2 | | | | | | |
| 1 | 15 | 1/x | 1 | 45 25 | RCL I | | | | | | |
| 2 | 45 5 | RCL 5 | 2 | 24 | COS | | | | | | |
| 3 | 24 | COS | 3 | 45 5 | RCL 5 | | | | | | |
| 4 | 20 | x | 4 | 20 | x | | | | | | |
| 025 | 31 | R/S | 065 | 30 | - | | | | | | |
| 6 | 45 5 | RCL 5 | 6 | 10 | : | | | | | | |
| 7 | 25 | TAN | 7 | 43 25 | g TAN-1 | | | | | | |
| 8 | 20 | x | 8 | 45 4 | RCL 4 | | | | | | |
| 9 | 22 12 | GTO B | 9 | 40 | + | | | | | | |
| 030 | 42.21.13 | f LBL C | 070 | 42 2 | f \rightarrow HMS | | | | | | |
| 1 | 42. 7. 4 | f FIX 4 | 1 | 22 13 | GTO C | | | | | | |
| 2 | 31 | R/S | 2 | 42.21.3 | f LBL 3 | | | | | | |
| 3 | 44 5 | STO 5 | 3 | 3 | 3 | | | | | | |
| 4 | 34 | x><y | 4 | 6 | 6 | | | | | | |
| 035 | 10 | : | 075 | 0 | 0 | | | | | | |
| 6 | 43 36 | g LSTx | 6 | 40 | + | | | | | | |
| 7 | 36 | ENTER | 7 | 43 32 | g RTN | | | | | | |
| 8 | 20 | x | | | | | | | | | |
| 9 | 45 5 | RCL 5 | | | | | | | | | |

* pour HP11C, le code est 43 10 et la commande g x<0

Utilisation des mémoiresConstantes

2: base B
3: angle a
4: angle r

Variables

I: t2-r, D, t1
5: t1, X, D

ATTENTION : Le programme est divisé en deux parties INDEPENDANTES :

- lignes 1 à 29 pour le calcul de X et Y
- lignes 30 à 77 pour le calcul de t1 et t2

8. TEST DU PROGRAMME

Ref.T30

Données

| | | |
|---|---|---|
| $99^{\circ}37'20''$ $295^{\circ}34'40''$ | Base = 976 mètres <==== angle a ====> <==== angle r ====> | $260^{\circ}22'40''$ $64^{\circ}25'20''$ |
| <u>CAS 1</u> | | <u>CAS 2</u> |
| t1 = $354^{\circ}17'22''$ | X = 500 m | t1 = $354^{\circ}17'22''$ |
| t2 = $319^{\circ}11'04''$ | Y = - 50 m | t2 = $38^{\circ}01'50''$ |
| t1 = $0^{\circ}45'50''$ | X = 1500 m | t1 = $0^{\circ}45'50''$ |
| t2 = $346^{\circ}25'17''$ | Y = 20 m | t2 = $14^{\circ}36'40''$ |

Opérations

0. Avant de lancer le programme, entrer les 3 constantes dans les mémoires réservées :

976 STO 2

CAS 1 ==> 99.3720 g →H STO 3 et 295.3440 g →H STO 4
 CAS 2 ==> 260.2240 g →H STO 3 et 64.2520 g →H STO 4

A- CALCUL DES COORDONNEES

1. Lancer le programme avec la commande f B
2. Entrer les deux angles : t1 ENTER t2 R/S
3. Lire les coordonnées : X R/S Y

Exemples du CAS 1

| | | | |
|----|------------------------|-------|---------------|
| | - entrer 354.1722 | ENTER | 319.1104 R/S |
| | - lire 499,9997 | R/S | (valeur de X) |
| | | | (valeur de Y) |
| 2: | - entrer .4550 | ENTER | 346.2517 R/S |
| | - lire 1.500,0008 | R/S | (valeur de X) |
| | | | (valeur de Y) |
| | | | 19,9998 |

B- CALCUL DES ANGLES t1 ET t2

1. Lancer le programme avec la commande f C
2. Entrer les coordonnées : X ENTER Y R/S
3. Lire les angles t1 et t2 : t1 R/S t2

Exemples du CAS 2

| | | | |
|----|-----------------------|-------|------------------------------|
| 1: | - entrer 500 | ENTER | 50 CHS R/S |
| | - lire 354,1722 | R/S | (t1 = $354^{\circ}17'22''$) |
| | | | (t2 = $38^{\circ}01'50''$) |
| 2: | - entrer 1500 | ENTER | 20 R/S |
| | - lire 0,4550 | R/S | (t1 = $0^{\circ}45'50''$) |
| | | | (t2 = $14^{\circ}36'40''$) |
| | | | 14,3640 |

Occupation de la mémoire "Programme"

HP11C : 77 lignes - déborde sur les mémoires .9 et .8
 HP15C : 79 octets, soit 11 mémoires complètes + 2 octets

Labels utilisés : B, C, 3

9. PROGRAMME BASIC (Calculateur SHARP PC-1430)

```

100  "T30"
105  PRINT "2 THEO.":DEGREE:O=.00005
110  INPUT "BASE=";B:INPUT "ANG.A=";A:INPUT "ANG.R=";R
115  A=DEG A:R=DEG R

120  PRINT "COORDONNEES"
125  INPUT "T1=";F:INPUT "T2=";G
130  F=DEG F:G=DEG G-R:E=A-F
135  D=B*SIN G/SIN(E+G)
140  X=D*COS F:Y=X*TAN F
145  USING "####.###":PRINT "X=";X:PRINT "Y=";Y:GOTO 120

150  PRINT "ANGLES"
155  INPUT "X=";X:INPUT "Y=";Y
160  F=ATN(Y/X):D=√(X*X+Y*Y): E=A-F
165  G=ATN(D*SIN E/(B-D*COS E))
170  G=DMS(G+R)+O:IF F<0 LET F=360+F
175  F=DMS F+O:USING "####.###":PRINT "T1=";F:PRINT "T2=";G
180  GOTO 150

```

Variables utilisées

A, R = angles a et r
B = base B

D = distance du bateau au PI
F, G = angles lus sur les théodolites T1 et T2
X, Y = coordonnées du bateau

Occupation de la mémoire : 386 octets

Test du programme

Le test de fonctionnement du programme peut être fait avec les données de la page précédente. Le programme est lancé avec la commande **RUN "T30"** (ou **RUN 100**) et est identifié par l'affichage **2 THEO.** sur l'écran.

Après avoir entré les trois constantes, on accède directement à la routine de calcul des coordonnées identifiée par le message **COORDONNEES** sur l'écran. Le test peut alors être fait. Les résultats obtenus peuvent être un peu différents pour les dernières décimales suivant les machines.

Si l'on désire accéder directement à la routine de calcul des angles, il suffit d'entrer la commande **RUN 150**. Le message **ANGLES** apparait sur l'écran et le test peut être fait.

La machine garde les constantes en mémoire, même si elle a été arrêtée : on peut accéder directement à l'une ou l'autre des routines de calcul par les commandes :

- **RUN 120** pour les **COORDONNEES**
- **RUN 150** pour les **ANGLES**

FICHE TECHNIQUE N°3 - POSITIONNEMENT D'UN BATEAU AVEC UN SEXTANT ET QUATRE BASES NON PERPENDICULAIRES A LA SECTION

1. OBJECTIF

Calculer les coordonnées XI et YI et XF et YF d'un bateau ancré dans la section transversale d'un cours d'eau de grande largeur, à partir des angles mesurés avec un sextant ou un cercle hydrographique sur quatre bases (deux sur chaque rive) non perpendiculaires à la section de jaugeage.

2. DISPOSITIF

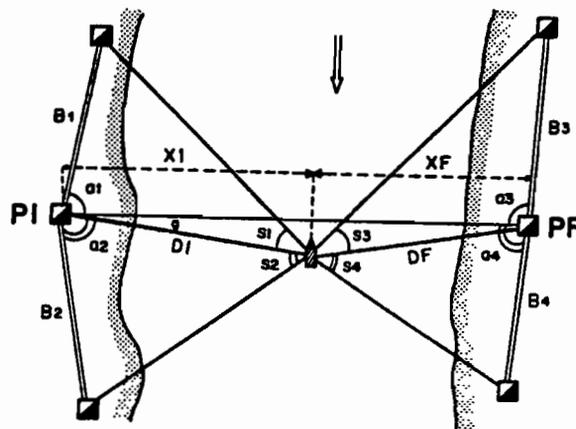
Le dispositif de repérage et les notations utilisées sont données sur la figure ci-dessous. La section transversale est la ligne PI-PF et les lettres I et F se réfèrent respectivement au point Initial et au point Final.

Le double calcul des coordonnées du bateau permet de détecter les erreurs de lecture des angles qui sont très fréquentes avec les sextants (erreur d'une minute, voire d'un degré) lors des opérations de terrain. La vérification est faite en comparant la somme $XI + XF$ à L , qui est la distance PI-PF.

Par convention, on admettra que Y est :

- *négatif* quand le bateau est à l'amont de la section;
- *positif* quand le bateau est à l'aval de la section.

3. FIGURE



4. LEGENDE

| | | | |
|---|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| PIPF | section transversale |  | bateau |
|  | emplacement des théodolites | B1, B2, B3, B4 | bases |
| a1, a2, a3, a4 | angles entre la section et les bases | D1, DF | distances du bateau au PI et au PF |
| s1, s2, s3, s4 | angles mesurés avec le sextant | | |

5. FORMULES**A. POUR CALCULER LES COORDONNEES (notations pour XI et YI)**

Pour simplifier les écritures, on définit les variables de travail suivantes :

$$g = 180^\circ - (a1 + s1 + b1)$$

g est équivalent à t2 dans la fiche technique précédente; g est nul quand le bateau est parfaitement aligné et son signe est celui de Y

$$O = b1 + b2 = 360^\circ - (a1 + a2 + s1 + s2)$$

On calcule par la règle des sinus :

$$DI = B1 \frac{\sin b1}{\sin s1} = B2 \frac{\sin b2}{\sin s2}$$

soit :

$$\frac{\sin b2}{\sin b1} = \frac{B1 \sin s2}{B2 \sin s1}$$

$$\frac{\sin (O - b1)}{\sin b1} = \frac{\sin O \cos b1 - \sin b1 \cos O}{\sin b1} = K$$

$$\text{tg } b1 = \frac{\sin O}{K + \cos O} \quad \text{d'où la valeur de } \sin b1, DI \text{ et } g$$

Enfin : $XI = DI \cos g$ et $YI = DI \sin g = XI \text{ tg } g$

B. POUR VERIFIER L'EXACTITUDE DES LECTURES

On calcule : - la somme $XI + XF$

- l'erreur relative par rapport à L

$$E = \frac{(XI + XF) - L}{L} * 100$$

En pratique , toute valeur de E supérieure à 1% est *excessive* et une vérification des 4 angles mesurés doit être faite.

5. PROGRAMME pour Calculatrices HP11C et HP15C

Réf: T45

| E C R A N | | COMMANDE | E C R A N | | COMMANDE |
|-----------|----------|----------|-----------|---------|----------|
| No | Code | | No | Code | |
| 000 | | | 040 | 44.40.6 | STO +6 |
| 1 | 42.21.14 | f LBL D | 1 | 23 | SIN |
| 2 | 42.7.2 | f FIX 2 | 2 | 34 | x><y |
| 3 | 0 | 0 | 3 | 43 2 | g →H |
| 4 | 44 8 | STO 8 | 4 | 44.40.6 | STO +6 |
| 005 | 45 1 | RCL 1 | 045 | 44.40.7 | STO +7 |
| 6 | 45 3 | RCL 3 | 6 | 23 | SIN |
| 7 | 45 0 | RCL 0 | 7 | 44.10.5 | STO :5 |
| 8 | 44 5 | STO 5 | 8 | 10 | : |
| 9 | 45 2 | RCL 2 | 9 | 45 25 | RCL I |
| 010 | 32 6 | GSB 6 | 050 | 20 | x |
| 1 | 42.21.15 | f LBL E | 1 | 45 6 | RCL 6 |
| 2 | 45,1 | RCL .1 | 2 | 24 | COS |
| 3 | 45,3 | RCL 3 | 3 | 40 | + |
| 4 | 45,0 | RCL 0 | 4 | 45 6 | RCL 6 |
| 015 | 44 5 | STO 5 | 055 | 23 | SIN |
| 6 | 45,2 | RCL 2 | 6 | 10 | : |
| 7 | 32 6 | GSB 6 | 7 | 15 | 1/x |
| 8 | 45 8 | RCL 8 | 8 | 43 25 | g TAN-1 |
| 9 | 31 | R/S | 9 | 16 | CHS |
| 020 | 45 4 | RCL 4 | 060 | 44.40.7 | STO +7 |
| 1 | 30 | - | 1 | 23 | SIN |
| 2 | 45 4 | RCL 4 | 2 | 45 5 | RCL 5 |
| 3 | 10 | : | 3 | 20 | x |
| 4 | 1 | 1 | 4 | 45 7 | RCL 7 |
| 025 | 0 | 0 | 065 | 24 | COS |
| 6 | 0 | 0 | 6 | 16 | CHS |
| 7 | 20 | x | 7 | 20 | x |
| 8 | 31 | R/S | 8 | 31 | R/S |
| 9 | 22 14 | GTO D | 9 | 44.40.8 | STO +8 |
| 030 | 42.21.6 | f LBL 6 | 070 | 45 7 | RCL 7 |
| 1 | 10 | : | 1 | 25 | TAN |
| 2 | 44 25 | STO I | 2 | 16 | CHS |
| 3 | 33 | R↓ | 3 | 20 | x |
| 4 | 40 | + | 4 | 31 | R/S |
| 035 | 44 6 | STO 6 | 075 | 43 32 | g RTN |
| 6 | 34 | x><y | 6 | | |
| 7 | 44 7 | STO 7 | 7 | | |
| 8 | 31 | R/S | 8 | | |
| 9 | 43 2 | g →H | 9 | | |

Utilisation des mémoiresConstantes

0: base B1 .0: base B3
1: angle a1 .1: angle a3
2: base B2 .2: base B4
3: angle a2 .3: angle a4
4: L

Variables

5: DI ou DF
6: O
7: g
8: XI + XF
I: B1/B2 ou B3/B4

Labels utilisés: D, E, 6

6. TEST DU PROGRAMME

Ref : T45

Données

| Bases | B1 = 852m | B2 = 976m | B3 = 507m | B4 = 1131m | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|-------|-----|------|
| Angles | a1 = 80°10'50" | a2 = 99°37'20" | a3 = 81°06'20" | a4 = 79°49'10" | | | | |
| L = distance PI → PF = 3203 m | | | | | | | | |
| Exemple | Angles | | | | Coordonnées | | | |
| | s1 | s2 | s3 | s4 | XI | XF | YI | YF |
| 1 | 32°08' | 29°25' | 17°11' | 36°03' | 1500m | 1703m | 50m | -50m |
| 2 | 31°22' | 30°39' | 17°03' | 36°57' | 1500m | 1703m | 50m | 50m |
| 3 | 63°34' | 53°14' | 10°03' | 24°29' | 560m | 2561m | 2m | 910m |

* l'exemple 3 contient une erreur "volontaire"

Opération

0. Avant de lancer le programme, entrer les 9 constantes dans les mémoires réservées :

3203 STO 4

852 STO 0 80.1050 g →H STO 1 976 STO 2 99.3720 g →H STO 3
 507 STO .0 81.0620 g →H STO .1 1131 STO .2 79.4910 g →H STO .3

1. Lancer le programme avec la commande **f D**
2. Entrer les deux premiers angles : **s1 ENTER s2 R/S**
3. Après environ 11s d'attente ("RUNNING" sur l'écran), lire les coordonnées dans l'ordre **XI R/S YI**
4. Entrer **f E** (ou **R/S**) et répéter les items 2 et 3 avec les angles **s3** et **s4** pour calculer **XF** et **YF**
5. Appuyer sur la touche **R/S** pour lire la somme **XI+XF** puis la valeur de l'erreur relative **E**

Par exemple : - entrer **f D** puis **32.08 ENTER 29.25 R/S**
 - lire **1500,37** =====> valeur de **XI R/S**
 -49,67 =====> valeur de **YI**
 - entrer **f E** puis **17.11 ENTER 36.03 R/S**
 - lire **1703,90** =====> valeur de **XF R/S**
 -48,74 =====> valeur de **YF**
 - taper **R/S**
 - lire **3204,27** =====> valeur de **XI + XF R/S**
 0,04 =====> erreur relative de **0,04%**

En répétant la même séquence avec les deux autres exemples, on trouve les résultats suivants :

Exemple 2 : XI = 1500,59 YI = 50,37 XF = 1703,08 YF = 49,60
 XI + XF = 3202,67 Erreur = 0,02
 Exemple 3 : XI = 559,83 YI = 2,05 XF = 2560,89 YF = 909,53
 XI + XF = 3120,72 Erreur = -2,57

Il est évident que, dans ce dernier exemple, la valeur de **YF** est impossible; l'un des angles **s3** ou **s4** (ou les deux) a été mal mesuré. Refaire le calcul avec **s3 = 11°03'**Occupation de la mémoire "Programme"

HP11C : 75 lignes - déborde sur les mémoires de données .9 et .8

HP15C : 77 octets, soit 11 mémoires complètes

9. PROGRAMME BASIC (Calculateur SHARP PC-1430)

```

400  "T45"
405  PRINT "SEXTANT-T45":DEGREE:USING
(410 DIM A(22) ==> nécessaire pour certaines machines)
415  INPUT "PIPF=";L
420  FOR I=1 TO 4
425  PRINT "BASE";I:INPUT A(I+4)
430  PRINT "ANG.A";I:INPUT K:A(I)=DEG K
435  NEXT I

450  PRINT "COORDONNEES":USING
455  J=18:FOR I=1 TO 4
460  PRINT "ANG.S";I:INPUT K:A(I+J)=DEG K
465  NEXT I

470  I=1:J=19:GOSUB 500
475  I=3:J=21:GOSUB 500:USING "#####"
480  X=A(19)+.5:PRINT "XI=";X:Z=A(21)+.5:PRINT "XF=";Z
485  PRINT "YI=";A(20):PRINT "YF=";A(22)
490  M=A(19)+A(21):N=(M-L)/L*100+.005
495  M=M+.5:PRINT "XI+XF=";M
498  USING "###.##":PRINT "ERREUR=";N:GOTO 450

500  O=360-A(I)-A(I+1)-A(J)-A(J+1)
505  K=A(I+4)*SIN A(J+1)/A(I+5)/SIN A(J)
510  P=ATN(SIN O/(K+COS O)):M=A(I+4)*SIN P/SIN A(J)
515  Q=180-(P+A(I)+A(J))
520  A(J)=M*COS Q:A(J+1)=M*SIN Q
525  RETURN

```

Variables utilisées

$$A(I) \begin{cases} = \text{angles } a & \text{avec } 1 \leq I \leq 4 & (\text{par ex. : } A(1) = a1) \\ = \text{bases } B & \text{avec } 5 \leq I \leq 8 & (\text{par ex. : } A(6) = B2) \\ = \text{angles } s & \text{avec } 19 \leq I \leq 22 & (\text{par ex. : } A(22) = s4) \end{cases}$$

L = distance PI → PF

Occupation de la mémoire : 496 octets

Test du programme

Le test de fonctionnement du programme peut être fait avec les données de la page précédente. Le programme est lancé avec la commande **RUN "T45"** (ou **RUN 400**) et est identifié par l'affichage **SEXTANT-T45**

Après avoir entré les 9 constantes (L, 4 bases et 4 angles a en alternance), la routine de calcul des coordonnées est identifiée sur l'écran par le message **COORDONNEES**. Il suffit alors d'entrer les 4 angles s en séquence puis de lire dans l'ordre **XI XF YI YF XI+XF** et l'erreur **E**.

On peut accéder directement à la routine de calcul par la commande **RUN 450** lors d'une mise en route si la machine n'a pas été utilisée depuis le dernier calcul.

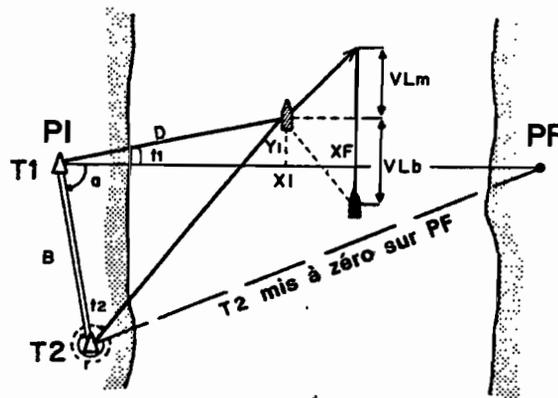
FICHE TECHNIQUE n°4 : JAUGEAGE PAR LA METHODE DES "GRANDS FLEUVES"
CALCUL DE L'ABSCISSE ET DE LA VITESSE MOYENNE D'UNE VERTICALE

1. OBJECTIF

Calcul de la distance D_j du bateau au PI, des vitesses ponctuelles $V_{20\%}$ et $V_{80\%}$ mesurées respectivement à 20% et à 80% de la profondeur totale et de la vitesse moyenne V_j d'une verticale lors d'un jaugeage effectué par la méthode dite des "Grands Fleuves".

Dans cette méthode, les mesures de vitesse sont effectuées sans ancrer le bateau, dont la dérive pendant la durée de la mesure est contrôlée depuis la berge par deux théodolites. La dérive du bateau est déterminée par ses composantes latérale ΔX et longitudinale ΔY , qui interviennent comme termes correctifs dans le calcul de la vitesse ponctuelle mesurée avec un moulinet. La méthode classique utilisée en Amazonie comprend deux points par verticale mais cette méthode permet aussi de faire des jaugeages complets. Les profondeurs sont mesurées avec un écho-sondeur.

2. FIGURE



3. LEGENDE

| | | | |
|----------|--|--------|-----------------------|
| PIPF | section transversale | | bateau au début |
| | | | et à la fin |
| Δ | emplacement des théodolites | B | base |
| a | angle entre la section et la base | X, Y | coordonnées du bateau |
| r | angle entre la direction T2/PF et la base | t1, t2 | angles lus |
| D | distance du bateau à l'origine | | |
| V_m | vitesse ponctuelle mesurée avec le moulinet | | |
| V_{Lm} | composante longitudinale de la vitesse mesurée V_m | | |
| V_{Lb} | composante longitudinale de la dérive du bateau | | |

4. FORMULES

A- pour le calcul des coordonnées du bateau

Consulter la fiche technique n°2 pour le détail du calcul.

Avec les notations utilisées dans la légende, on a :

$$D = \frac{B \sin t_2}{\sin (a - t_1 + t_2)}$$

Les coordonnées du bateau sont :

$$X = D \cos t_1$$

$$Y = D \sin t_1 = D \operatorname{tg} t_1$$

B- pour le calcul de la vitesse ponctuelle V_{20} ou V_{80}

On a :

$$V_m = c N/t + o \quad \text{avec : } \begin{array}{l} N = \text{nombre de rotations} \\ t = \text{durée de la mesure} \\ c \text{ et } o = \text{constantes du moulinet, pour lequel l'équation} \\ \text{peut être double :} \\ \quad k < N/t \quad V = c_1 N/t + o_1 \\ \quad k > N/t \quad V = c_2 N/t + o_2 \end{array}$$

$$V_{Lm} = (V_m^2 - \Delta X^2)^{1/2} \quad \text{avec : } \Delta X = (XF - XI)/t$$

$$V_{Lb} = \Delta Y \quad \text{avec : } \Delta Y = (YF - YI)/t$$

C- pour le calcul de la distance D_j et de la vitesse moyenne V_j

$$D_j = \frac{XI_{20\%} + XF_{20\%} + YI_{20\%} + YF_{20\%}}{4}$$

$$V_j = \frac{V_{20\%} + V_{80\%}}{2}$$

REMARQUES

- si la convention $Y > 0$ à l'aval de la section et $Y < 0$ à l'amont est inversée, alors : $\Delta Y = (YI - YF)/t$
- si l'équation du moulinet est unique, entrer deux fois les mêmes constantes, soit : $c_2 = c_1$ $o_2 = o_1$ et k quelconque;
- si l'équation est triple, choisir les deux équations correspondant à la gamme des vitesses mesurées (de toute façon l'erreur est faible).

5. PROGRAMME pour Calculatrice HP15C

Ref:M40

| ECRAN No | Code | COMMANDE | ECRAN No | Code | COMMANDE |
|----------|----------|------------------|----------|----------|------------------|
| 000 | | | 060 | 32 8 | GSB 8 |
| 1 | 42.21.14 | f LBL D | 1 | 34 | x><y |
| 2 | 43. 5. 0 | g CF 0 | 2 | 31 | R/S |
| 3 | 0 | 0 | 3 | 44.40.1 | STO +1 |
| 4 | 44 0 | STO 0 | 4 | 45 8 | RCL 8 |
| 005 | 44 1 | STO 1 | 065 | 31 | R/S |
| 6 | 2 | 2 | 6 | 30 | - |
| 7 | 0 | 0 | 7 | 45 25 | RCL I |
| 8 | 42.21. 7 | f LBL 7 | 8 | 10 | : |
| 9 | 42. 7. 0 | f FIX 0 | 9 | 43 11 | g x ² |
| 010 | 31 | R/S | 070 | 16 | CHS |
| 1 | 43 2 | g →H | 1 | 45 7 | RCL 7 |
| 2 | 44 5 | STO 5 | 2 | 40 | + |
| 3 | 42. 7. 4 | f FIX 4 | 3 | 11 | √x |
| 4 | 31 | R/S | 4 | 34 | x><y |
| 015 | 43 2 | g →H | 075 | 31 | R/S |
| 6 | 45 4 | RCL 4 | 6 | 45 9 | RCL 9 |
| 7 | 30 | - | 7 | 31 | R/S |
| 8 | 44 6 | STO 6 | 8 | 30 | - |
| 9 | 31 | R/S | 9 | 16 | CHS |
| 020 | 43 2 | g →H | 080 | 45 25 | RCL I |
| 1 | 36 | ENTER | 1 | 10 | : |
| 2 | 31 | R/S | 2 | 40 | + |
| 3 | 43 2 | g →H | 3 | 44.40. 0 | STO +0 |
| 4 | 45 4 | RCL 4 | 4 | 31 | R/S |
| 025 | 30 | - | 085 | 43. 6. 0 | g F? 0 |
| 6 | 36 | ENTER | 6 | 22 9 | GTO 9 |
| 7 | 31 | R/S | 7 | 8 | 8 |
| 8 | 36 | ENTER | 8 | 0 | 0 |
| 9 | 31 | R/S | 9 | 43. 4. 0 | g SF 0 |
| 030 | 44 25 | STO I | 090 | 22 7 | GTO 7 |
| 1 | 10 | : | 1 | 42.21. 9 | f LBL 9 |
| 2 | 45 2 | RCL 2 | 2 | 45 1 | RCL 1 |
| 3 | 43 10 | g x<=y | 3 | 4 | 4 |
| 4 | 22 5 | GTO 5 | 4 | 10 | : |
| 035 | 33 | R↓ | 095 | 31 | R/S |
| 6 | 45 0 | RCL 0 | 6 | 45 0 | RCL 0 |
| 7 | 20 | x | 7 | 2 | 2 |
| 8 | 45 1 | RCL 1 | 8 | 10 | : |
| 9 | 40 | + | 9 | 31 | R/S |
| 040 | 22 6 | GTO 6 | 100 | 22 14 | GTO D |
| 1 | 42.21. 5 | f LBL 5 | 1 | 42.21. 8 | f LBL 8 |
| 2 | 33 | R↓ | 2 | 36 | ENTER |
| 3 | 45 3 | RCL 3 | 3 | 33 | R↓ |
| 4 | 20 | x | 4 | 23 | SIN |
| 045 | 45 4 | RCL 4 | 105 | 43 33 | g R↑ |
| 6 | 40 | + | 6 | 43 33 | g R↑ |
| 7 | 42.21. 6 | f LBL 6 | 7 | 30 | - |
| 8 | 43 11 | g x ² | 8 | 45 3 | RCL 3 |
| 9 | 44 7 | STO 7 | 9 | 40 | + |
| 050 | 33 | R↓ | 110 | 23 | SIN |
| 1 | 32 8 | GSB 8 | 1 | 10 | : |
| 2 | 44 9 | STO 9 | 2 | 45 2 | RCL 2 |
| 3 | 34 | x><y | 3 | 20 | x |
| 4 | 44 8 | STO 8 | 4 | 34 | x><y |
| 055 | 44.40. 1 | STO +1 | 115 | 24 | COS |
| 6 | 45 5 | RCL 5 | 6 | 20 | x |
| 7 | 36 | ENTER | 7 | 36 | ENTER |
| 8 | 36 | ENTER | 8 | 43 33 | g R↑ |
| 9 | 45 6 | RCL 6 | 9 | 25 | TAN |
| | | | 120 | 20 | x |
| | | | 1 | 43 32 | g RTN |

Utilisation des mémoiresConstantes

2 : base B .0 : c1 .3 : c2
3 : angle a .1 : o1 .4 : o2
4 : angle r .2 : k

Variables

5 : t1 init. 8 : t1 final
6 : t2 init. 9 : t2 final
7 : Vm * Vm I : t

Labels utilisés : D, 5, 6, 7, 8, 9

Occupation de la mémoire "Programme" HP15C : 129 octets, soit 18 mémoires + 3 octets

6. TEST DU PROGRAMME

Ref:M40

Données

Equation du moulinet : $V = 0,2426 N/t + 0,0150$ pour $N/t < 4,76$
 $V = 0,2640 N/t + 0,0070$ pour $N/t \geq 4,76$

Base : 976 mètres
 Angle a : $99^{\circ}37'20''$
 Angle r : $295^{\circ}34'40''$ (T2 a été mis à zéro en visant PF)

| Verticale | t1I | t2i | t1F | t2F | N | t |
|-----------|------------|------------|------------|------------|-----|------|
| 1 20% | 359°59'00" | 312°04'55" | 359°54'00" | 312°05'40" | 260 | 41,1 |
| 80% | 0°02'00" | 312°12'40" | 0°08'50" | 312°04'25" | 200 | 42,8 |
| 2 20% | 0°00'40" | 340°53'10" | 359°58'25" | 340°57'15" | 320 | 41,0 |
| 80% | 359°58'50" | 341°05'50" | 0°04'30" | 341°07'05" | 290 | 42,9 |

Opération

0. Avant de lancer le programme, entrer les 8 constantes dans les mémoires réservées :

976 STO 2 99.3720 g →H STO 3 295.3440 g →H STO 4
 .2426 STO .0 .0150 STO .1 4.76 STO .2
 .2640 STO .3 .0070 STO .4

1. Lancer le programme avec la commande f D

2. Le chiffre 20, s'inscrit sur l'écran

3. Entrer les 4 angles, N et t en appuyant sur la touche R/S entre chaque valeur

Par exemple : 359.59 R/S (sur l'écran : 359,9833
 312.0455 R/S 16,5042
 359.54 R/S 359,9000
 312.0540 R/S 16,5167
 260 R/S 260,0000
 41.1 R/S

"RUNNING" 13 sec.)

4. Lire les résultats de la mesure de vitesse à 20% de Pj

Par exemple : 308,8649 ==> XI R/S
 309,3463 ==> XF R/S
 -0,0898 ==> YI R/S
 -0,5399 ==> YF R/S
 1,6661 ==> V R/S

5. Le chiffre 80, s'inscrit sur l'écran. Entrer les 6 valeurs de la mesure à 80%

6. Lire les résultats de cette mesure et les résultats finaux :

309,4739 ==> distance de la verticale au PI R/S
 1,4133 ==> vitesse moyenne

Résultats complets du test

| | XI | XF | YI | YF | V | Dj | Vj |
|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| V1 20% | 308,9 | 309,3 | -0,09 | -0,54 | 1,666 | | |
| 80% | 311,4 | 308,3 | 0,18 | 0,79 | 1,161 | 309,5 | 1,413 |
| V2 20% | 1207,3 | 1211,8 | 0,23 | -0,56 | 2,045 | | |
| 80% | 1219,0 | 1217,2 | -0,41 | 1,59 | 1,838 | 1213,8 | 1,942 |

7. PROGRAMME BASIC (Calculateur SHARP PC-1430)

```

600  "M40"
610  PRINT "GRANDS FLEUVES":E=.0005
620  INPUT "C1=";L:INPUT "O1=";O:INPUT "K=";K
630  INPUT "C2=";M:INPUT "O2=";R:INPUT "BASE=";B
640  INPUT "ANG.A=";A:A=DEG A:INPUT "ANG.R=";C:C=DEG C
650  Z=0:W=0:PRINT "20%":USING "####.###":GOSUB 700:GOSUB 800
660  PRINT "80%":GOSUB 700:GOSUB 800
670  D=Z/4+E: V=W/2+E:PRINT "DJ=";D:PRINT "VJ=";V
680  GOTO 650

700  INPUT "T1 INIT=";F:F=DEG F
710  INPUT "T2 INIT=";G:G=DEG G
720  INPUT "T1 FIN=";H:H=DEG H
730  INPUT "T2 FIN=";I:I=DEG I
740  INPUT "N=";N:INPUT "T=";T
750  RETURN

800  P=B*SIN (G-C)/SIN (G-C+A-F)
810  Q=B*SIN (I-C)/SIN (I-C+A-H)
820  X=P*COS F:Y=Q*COS H:Z=Z+X+Y:P=X+E:Q=Y+E
830  PRINT "XI=";P:PRINT "XF=";Q
840  U=N/T:V=U*M+R:IF U<K LET V=L*U+O
850  U=(Y-X)/T:IF U>V THEN V=-10:GOTO 870
860  V=√(V*V-U*U)
870  X=X*TAN F:Y=Y*TAN H
880  PRINT "YI=";X:PRINT "YF=";Y
890  V=V+(Y-X)/T:W=W+V: V=V+E:PRINT "V=";V
895  RETURN

```

Variables utilisées

Constantes : A, B, C (angle a, base B, angle r)
 K, L, O, M, R (constantes k, c1, o1, c2 et o2 du moulinet)

Variables : F, G, H, I (angles t1 et t2 à 20%, t1 et t2 à 80%)
 N, T (nombre de tours d'hélice et durée de la mesure)
 D, X, Y (distance au PI et coordonnées du bateau)
 Z, W (somme des X et des Y)
 V (Vm vitesse mesurée par le moulinet)

Occupation de la mémoire : 591 octets

Test du programme

Le test de fonctionnement du programme peut être fait avec les données de la page précédente. Le programme est activé par la commande **RUN "M40"** (ou **RUN 600**) et est identifié par l'affichage **GRANDS FLEUVES** sur l'écran.

Le test peut alors être fait, en prenant soin de respecter l'ordre d'entrée des données, donné par les messages qui s'inscrivent sur l'écran.

Les résultats obtenus pour chacune des verticales doivent être notés pour le calcul du débit qui sera fait avec le programme M20 donné dans la fiche technique n°5.

FICHE TECHNIQUE n°5 : CALCUL DU DEBIT PAR LA METHODE DE LA SECTION MOYENNE

1. OBJECTIF

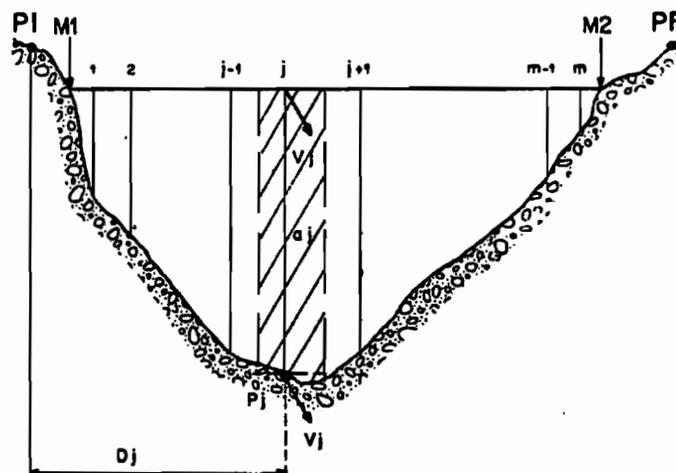
Calcul du débit Q jaugé par exploration du champ des vitesses. La méthode utilisée est celle de la section moyenne, dans laquelle l'aire attribuée à chaque verticale a pour largeur la somme des demi-distances aux verticales qui l'encadrent et pour profondeur la profondeur mesurée (voir figure ci-dessous).

Le programme calcule aussi la section mouillée S , la vitesse moyenne U , la largeur l et la profondeur moyenne P_m .

Les données de départ sont :

- les distances $DM1$ et $DM2$ des deux berges au PI ;
- pour chaque verticale j :
 - . la distance D_j au PI ;
 - . la vitesse moyenne V_j ;
 - . la profondeur P_j .

2. FIGURE



3. LEGENDE

- PI point initial, origine des distances
- PF point final
- M1 rive initiale
- M2 rive finale

4. FORMULES

Pour chaque verticale on a :

$$s_j = \frac{D_{j+1} - D_{j-1}}{2} * P_j$$

$$q_j = s_j * V_j$$

Au total : $S = \sum s_j$ $Q = \sum q_j$ $U = Q / S$ $l = DM2 - DM1$ $P_m = S / l$

5. PROGRAMME pour Calculatrices HP11C et HP15C

Réf:M20

| E C R A N | | COMMANDE | E C R A N | | COMMANDE |
|-----------|----------|-----------|-----------|---------|----------|
| No | Code | | No | Code | |
| 000 | | | 040 | 34 | x><y |
| 1 | 42.21 15 | f LBL E | 1 | 44 7 | STO 7 |
| 2 | 42 34 | f CLEAR R | 2 | 33 | R↓ |
| 3 | 43 35 | g Clx | 3 | 34 | x><y |
| 4 | 31 | R/S | 4 | 45 9 | RCL 9 |
| 005 | 44 0 | STO 0 | 045 | 43 33 | g R↑ |
| 6 | 44 25 | STO I | 6 | 30 | - |
| 7 | 42.21.0 | f LBL 0 | 7 | 43 36 | g LST x |
| 8 | 1 | 1 | * 8 | 42.4.25 | f x><y I |
| 9 | 44.40.5 | STO +5 | 9 | 44 9 | STO 9 |
| 010 | 45 5 | RCL 5 | 050 | 33 | R↓ |
| 1 | 31 | R/S | 1 | 16 | CHS |
| 2 | 32 4 | GSB 4 | 2 | 20 | x |
| 3 | 22 0 | GTO 0 | 3 | 2 | 2 |
| 4 | 42.21.1 | f LBL 1 | 4 | 10 | : |
| 015 | 36 | ENTER | 055 | 1 | 1 |
| 6 | 36 | ENTER | 6 | 45 5 | RCL 5 |
| 7 | 32 4 | GSB 4 | * 7 | 43.30.5 | g TEST 5 |
| 8 | 45 4 | RCL 4 | 8 | 43 32 | g RTN |
| 9 | 31 | R/S | 9 | 33 | R↓ |
| 020 | 45 3 | RCL 3 | 060 | 33 | R↓ |
| 1 | 31 | R/S | 1 | 44.40.3 | STO +3 |
| 2 | 10 | : | 2 | 31 | R/S |
| 3 | 31 | R/S | 3 | 20 | x |
| 4 | 45 25 | RCL I | 4 | 44.40.4 | STO +4 |
| 025 | 45 0 | RCL 0 | 065 | 31 | R/S |
| 6 | 30 | - | 6 | 43 32 | g RTN |
| 7 | 31 | R/S | 7 | | |
| 8 | 45 3 | RCL 3 | 8 | | |
| 9 | 34 | x><y | 9 | | |
| 030 | 10 | : | 070 | | |
| 1 | 31 | R/S | 1 | | |
| 2 | 22 15 | GTO E | 2 | | |
| 3 | 42.21.4 | f LBL 4 | 3 | | |
| 4 | 45 6 | RCL 6 | 4 | | |
| 035 | 34 | x><y | 075 | | |
| 6 | 44 6 | STO 6 | 6 | | |
| 7 | 33 | R↓ | 7 | | |
| 8 | 34 | x><y | 8 | | |
| 9 | 45 7 | RCL 7 | 9 | | |

* pour HP11C, les codes sont 42 4 (ligne 048) et 42 40 (commande f x=y pour la ligne 057)

Utilisation des mémoires

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| 0: marge initiale | 6: P _{j-1} |
| 3: somme des s _j | 7: V _{j-1} |
| 4: somme des q _j | 8: D _j |
| 5: j | 9: D _{j-2} |
| | I: D _{j-1} |

Labels utilisés : E, 0, 1, 4

6. TEST DU PROGRAMME

Réf:M20

Données

| Verticale | Dj (en m) | Vj (en m/s) | Pj (en m) |
|-----------|-----------|-------------|-----------|
| PI | 0 | | |
| MD | 4,5 | | 0 |
| 1 | 6,0 | 1,20 | 1,9 |
| 2 | 9,0 | 1,45 | 2,3 |
| 3 | 12,0 | 1,56 | 2,75 |
| 4 | 16,0 | 1,62 | 2,9 |
| 5 | 18,5 | 1,13 | 1,45 |
| ME | 19,5 | | 0 |
| PF | 20,2 | | |

Opération

- Lancer le programme avec la commande **f C**. Le chiffre **0,00** s'inscrit sur l'écran.
- Entrer la distance de la première rive : **4,5 R/S**. Le chiffre **1,00** s'inscrit sur l'écran.
- Entrer les valeurs de la verticale 1 suivant la séquence **D1, V1 et P1**.
Soit : **6 ENTER 1.2 ENTER 1.9 R/S**
Le chiffre **2,00** s'inscrit sur l'écran.
- Entrer les valeurs de la seconde verticale : **9 ENTER 1.45 ENTER 2.3 R/S**
Lire les valeurs de la section mouillée et du débit de la **PREMIERE VERTICALE**
soit : **4,28 (==>s1) R/S 5,13 (==>q1) R/S**
Le chiffre **3,00** s'inscrit sur l'écran.
- Continuer ainsi avec toutes les verticales.
Les résultats partiels sont les suivants :

| | |
|-----------|------------|
| s2 = 6,90 | q2 = 10,01 |
| s3 = 9,63 | q3 = 15,02 |
| s4 = 9,43 | q3 = 15,27 |
- Quand s'inscrit sur l'écran une valeur supérieure au nombre de verticales, entrer la valeur de la distance de la seconde rive et la commande **GSB 1**
soit : **19,5 GSB 1**
- Lire la valeur de la section mouillée et du débit de la **DERNIERE VERTICALE**
soit : **2,54 (==>s5) R/S 2,87 (==>q5) R/S**
puis les résultats définitifs :

| | | |
|--------------|------------------|------------------------------------|
| 48,29 | ==> Q | débit en m ³ /s |
| 32,76 | ==> S | section mouillée en m ² |
| 1,47 | ==> U | vitesse moyenne en m/s |
| 15,00 | ==> l | largeur en m |
| 2,18 | ==> Pm | profondeur moyenne en m |

Remarque : suivant la valeur du débit, on ajustera le nombre de décimales **n** (3 chiffres significatifs) avec la commande **f FIX n**

Occupation de la mémoire "Programme"

HP11C : 66 lignes - utilise la mémoire .9

HP15C : 69 octets, soit 9 mémoires complètes + 6 octets

7. PROGRAMME BASIC (Calculateur SHARP PC-1430)

```

900 "M20"
905 PRINT "SECTION MOY":A=.005
910 INPUT "NUM.VERT=";M
915 INPUT "RIVE 1=";E:F=E:S=0:R=0

920 FOR J=1 TO M:PRINT USING "###";"VERT.:";J
925 INPUT "DIST.=";H:INPUT "VIT.=";V:INPUT "P=";P
930 IF J=1 GOTO 940
935 GOSUB 980:F=G
940 G=H:Q=P:W=V
945 NEXT J

950 INPUT "RIVE 2=";H:GOSUB 980
955 V=S/R:L=H-E:P=R/L:V=V+A:S=S+A:R=R+A:P=P+A
960 PRINT "Q=";S:PRINT "S=";R:PRINT "U=";V
965 PRINT "L=";L:PRINT "PM=";P:END

980 T=Q*(H-F)/2:R=R+T:U=T*W:S=S+U:T=T+A:U=U+A
985 PRINT USING "#####.##";"SJ-1=";T:PRINT "QJ-1=";U
990 RETURN

```

Variables utilisées

| | | |
|---------|---|--|
| M | = | nombre de verticales |
| J | = | indice de la verticale, varie de 1 à M |
| E | = | distance de la première rive au PI |
| H, G, F | = | distances des verticales d'indices J, J-1 et J-2 au PI |
| V, W | = | vitesse moyenne des verticales d'indices J et J-1 |
| P, Q | = | profondeur des verticales J et J-1 |
| T, R | = | section mouillée partielle et cumulée |
| U, S | = | débit partiel et cumulé |
| L | = | largeur entre rives |

Occupation de la mémoire : 396 octets

Test du programme

Le test de fonctionnement du programme peut être fait avec les données de la page précédente. Après avoir lancé le programme avec la commande RUN "M20" (ou RUN 900), identifier le programme par le message SECTION MOY et entrer les données suivant la séquence indiquée sur l'écran.

Attention !

Les résultats partiels donnés au cours du calcul concernent toujours la verticale antérieure (SJ-1 et QJ-1).