



Institut de recherche
pour le développement

Centre de Montpellier
911, avenue Agropolis
BP 5045
F - 34032 Montpellier cedex 1

TÉL. : 33 (0)4 67 41 61 00
FAX : 33 (0)4 67 54 78 00
WEB : www.mpl.ird.fr

DEA NATIONAL DE L'EAU

CAMP TERRAIN

UNIVERSITE MONTPELLIER II

Laboratoire d'Hydrologie

B. THEBE
Novembre 99

L'HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS VERSANTS

Le bassin versant de la Jasse

L'origine

En 1986, avec l'aide de partenaires publics ou semi-publics (1) faisant partie du groupement VERSEAU (Valorisation des Etudes et des Recherches dans les Sciences de l'EAU) permis d'installer le bassin versant de la Jasse à l'ouest du pic Saint Loup, sur le ruisseau du Patus près de la commune de saint Martin de Londres.

Début 1989, tenant compte de l'expérience acquise au cours de quatre années d'exploitation, l'équipement de ce bassin a été profondément modifié afin de mieux l'adapter aux nouveaux objectifs.

Depuis l'origine, les différents membres du groupement VERSEAU ont investi près de cinq cent mille francs en matériel de terrain.

La Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône Languedoc s'est chargée de l'aménagement de la fosse à sédiments, de l'ouvrage en maçonnerie et du limnigraphie de la fosse à sédiments. Toutes les autres installations sont l'œuvre de l'ORSTOM, y compris la reconstruction de la fosse à sédiments, excepté la construction du barrage dont le coût n'entre pas dans l'estimation ci-dessus.

Les objectifs

Dans le cadre des stages organisés par l'ORSTOM, le bassin de la Jasse sert de support à la formation des étudiants sur le terrain.

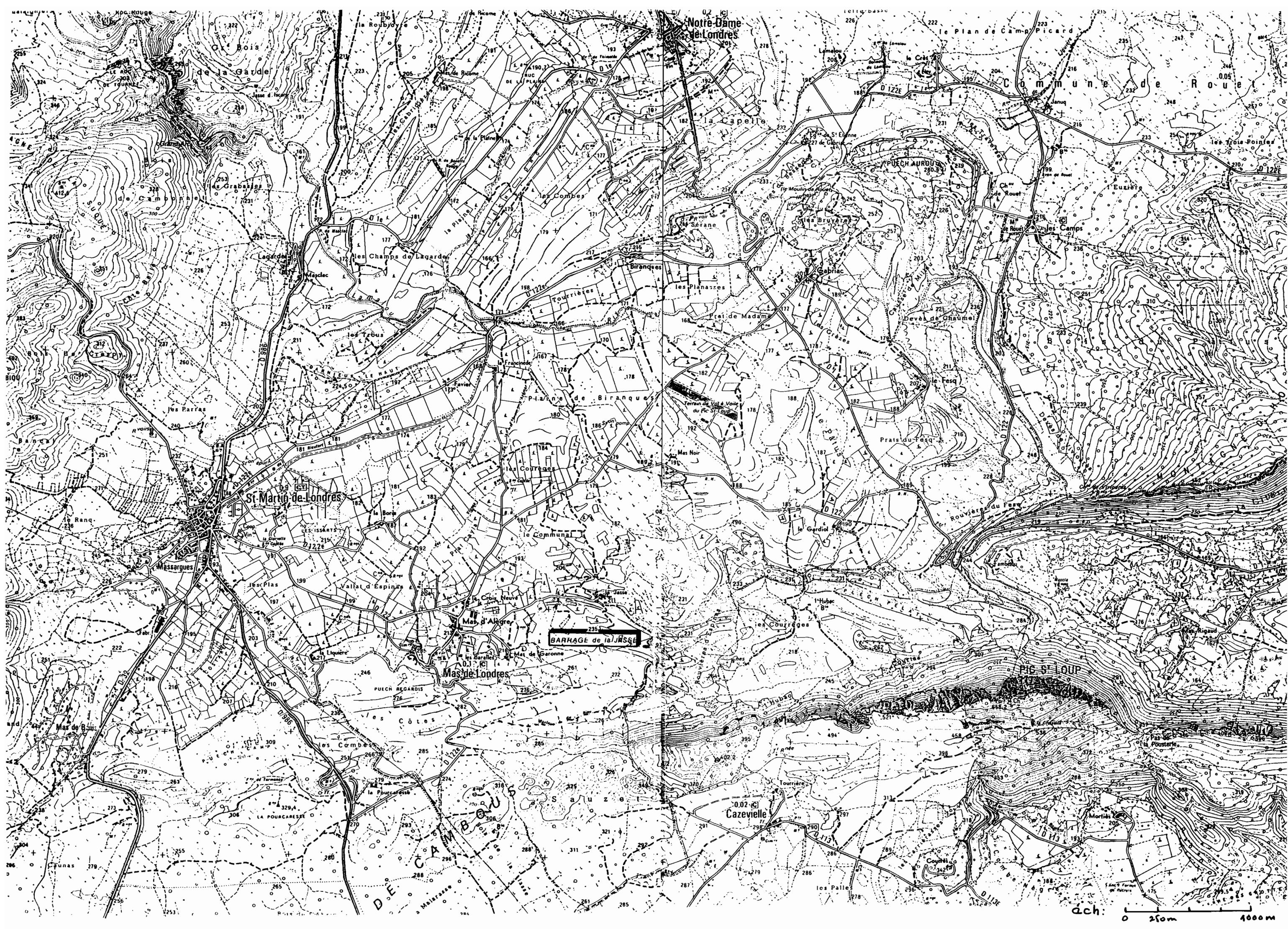
La variété des équipements - du traditionnel pluviomètre « association » à la retransmission des données par satellite - en fait une bonne vitrine du matériel et des techniques utilisées en hydrologie de surface. C'est également un banc-test pour la mise au point d'appareillages nouveaux.

Sur le site de la Jasse est observée l'évolution d'une retenue collinaire dans des conditions à risques dues à la fissuration du sous-sol, ainsi que l'érosion par piégeage des sédiments. Des démonstrations avec un mini-simulateur de pluie y sont effectuées.

Procès-verbal d'installation du B.V.

Etat	France
Région administrative	Languedoc-Roussillon
Bassin hydrographique	Hérault
Commune	Mas de Londres
Nom du bassin	Lamalou
Sous-bassin	La Jasse
Code de la station	435 259 521
Date de la mise en service	Janvier 1996
Localisation	voir carte

(1) Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône Languedoc (BRL)
Météorologie Nationale
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie - Montpellier (ENSA-M)
Centre d'Etudes et de Recherche de la Géologie et de ses Applications (CERGA)
DIREN - SEMA



Présentation et situation

Le bassin versant de la Jasse se trouve à l'ouest du pic Saint Loup et au sud-est de Saint Martin de Londres. Le sud du bassin domine avec des calcaires du jurassique les marnes et brèches du Bartonien situées en contrebas.

Répartition hypsométrique

entre etm il y a% de la superficie du BV.

180	200	4
200	220	23
220	260	40
260	300	14
300	340	10
340	380	7
380	+	2

Station barrage

En service depuis janvier 1986 - N° de code 435 259 5210

1- Localisation

Cette station se situe à l'exutoire du bassin de la Jasse, en rive gauche de la retenue. On y accède par le Mas de Londres en prenant la direction de la ferme de la Jasse. Un chemin de terre conduit ensuite au barrage.

2- Le barrage

- Maître d'ouvrage : Département de l'Hérault
- Maître d'œuvre : Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône Languedoc

Les objectifs sont principalement l'étude de la réponse du béton roulé lors de la mise en eau, et la mise à disposition d'un lac pour pêcheurs et aménagement touristique.

2.1. Caractéristiques techniques de l'ouvrage initial

a) dimensions :

longueur : 75 m
hauteur : 6 m
largeur en crête : 4 m
largeur à la base : 13 m

b) matériaux de construction :

Volume de béton roulé utilisé : 1400 m³

Composition du béton roulé en % :

sables (de 0 à 2 mm de diamètre) 8.6
gravats (de 2 à 31.5 mm de diamètre) 86
ciment Rolac (ciment + cendres volantes) 5.4
quantité de ciment par m³ de béton : 150 kg

L'ouvrage a été réalisé par l'étalage de couches de béton roulé de 20 à 30 cm d'épaisseur compactées au rouleau vibrant. Il a été conçu pour être stable après ennoyement.

c) conduite et déversoir de l'ouvrage

longueur du déversoir : 10 m

une conduite de vidange de la retenue de 600 mm de diamètre
des conduites de 200 mm destinées aux branchements pour l'irrigation

2.2. Aspect piézométrique

Huit piézomètres sont répartis sur et autour du barrage, leur suivi a été assuré pendant la première période d'exploitation du site, avec une interruption de mai à octobre 1987.

Côtes des piézomètres rapportées à la borne IGN située en rive droite du barrage (206.90NGF).

Piézomètres	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Côtes NGF	204.101	201.212	200.971	197.509	200.812	200.944	204.932	204.936

2.3. Le système drainant du barrage

Dix drains amonts, centraux et avalss évitent une éventuelle mise en charge de l'ouvrage par les resurgences qui se situent dans les fondations. Le débit de ces drains, ainsi que la conductivité et la température ont été suivis pendant plus de trois ans. Le schéma du dispositif drainant est donné en page XXX

2.4. La station hydrométrique

Les variations de niveau du lac sont enregistrées depuis le début de l'année 1986 par une centrale électronique d'acquisition des données ELSYDE type CHLOE A puis CHLOE C. En 1995 un limnigraphie pneumatique HYDROLOGIC type LPN 8 a également été installé dans l'enceinte de la station météo pour diversifier les équipements présentés.

Un élément d'échelle de 2 à 4 mètres a été installé début 1986 sur la rive droite du barrage, en contrebas de la station météo. Le 13/08/1987 l'échelle unique a été remplacée par une batterie de trois éléments de un mètre qui permet de lire les hauteurs d'eau entre les cotes 3.00 m et 6.00 m.

Côtes de déversement du barrage :

- 200.00m (NGF) ; soit 3.34 m à l'échelle jusqu'au 31/09/86
- 200.07 (NGF) ; soit 3.41 m à l'échelle du 01/10/86 au 13/08/87 et 5.00m à l'échelle à compter du 13/08/87.

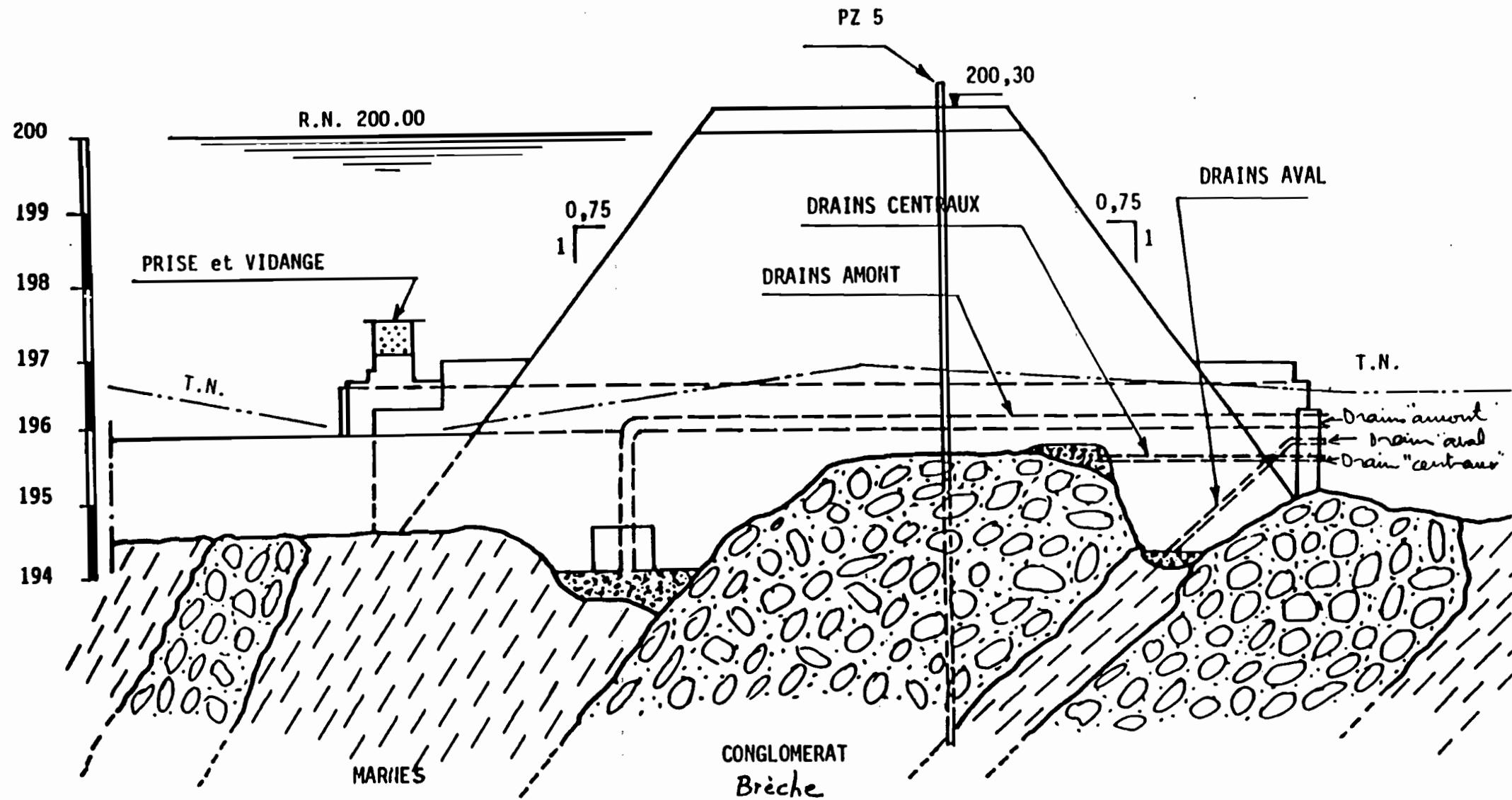
6.46 m été 1994 (203,12m IGN à confirmer).

3- La station météorologique

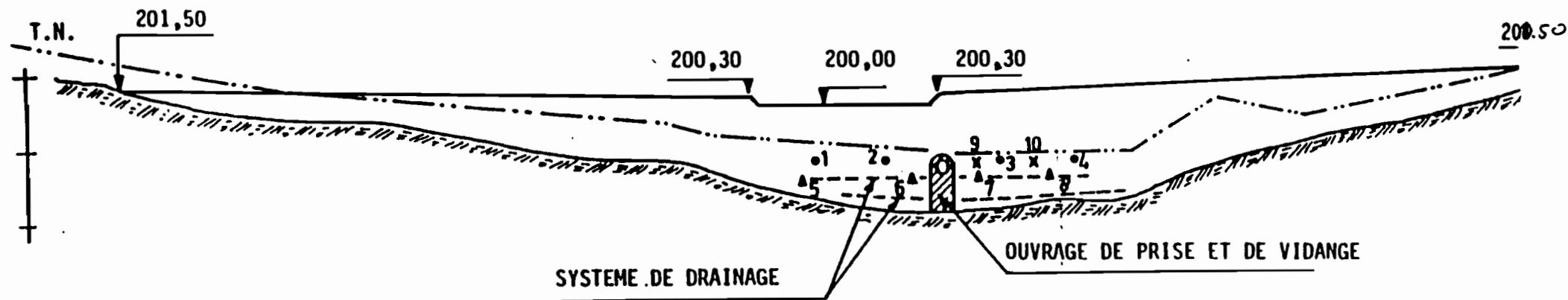
L'équipement de cette station a varié au fil des années, il comprend à fin 1997 :

- une station météo automatique CIMEI équipée de cinq capteurs : girouette, anémomètre, humidité relative, température, pluviographe.

- BARRAGE COLLINAIRE DE SAINT MARTIN DE LONDRES
DISPOSITION DES DRAINS ET PIEZOMETRES DE LA DIGUE



- BARRAGE COLLINAIRE DE SAINT MARTIN DE LONDRES
DISPOSITIF DRAINANT



DRAINS	Cote fil d'eau
1	196,05
2	196,28
3	196,21
4	196,52
5	196,12
6	195,97
7	195,89
8	196,35
9	196,15
10	196,23

- drains "aval"
- ▲ drains "centraux"
- ✗ drains "amont"

- un abri météo avec thermomètre sec, thermomètre humide, thermomètre à maxima et thermomètre à minima, ainsi qu'un évaporimètre Piche.
- un bac évaporation Colorado ORSTOM posé le 22/07/1987
- deux pluviomètres (bagues de 400 cm² et 200 cm²) ainsi qu'un pluviographe Précis Mécanique (bague de 400 cm²) relié à la station automatique.

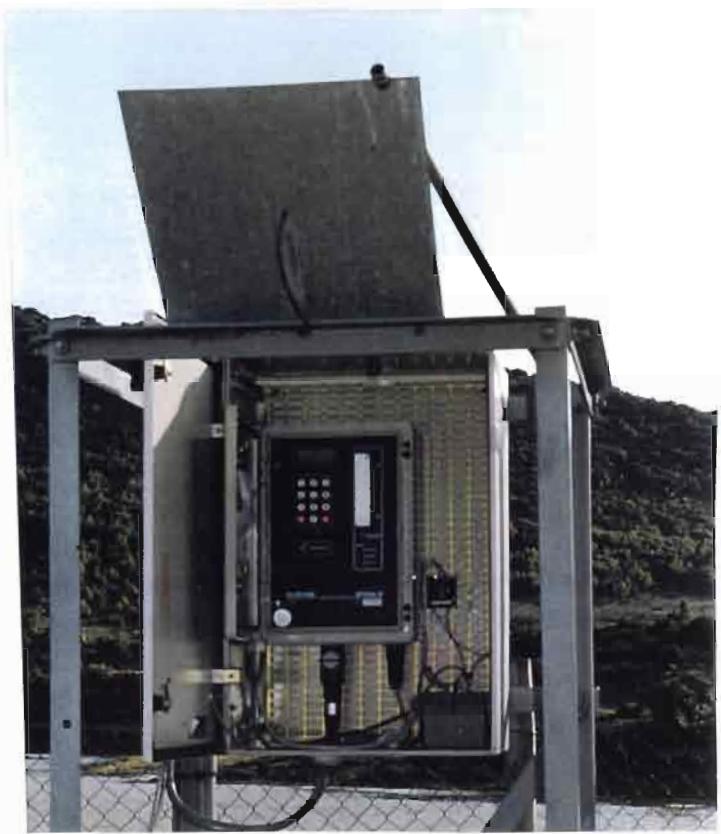
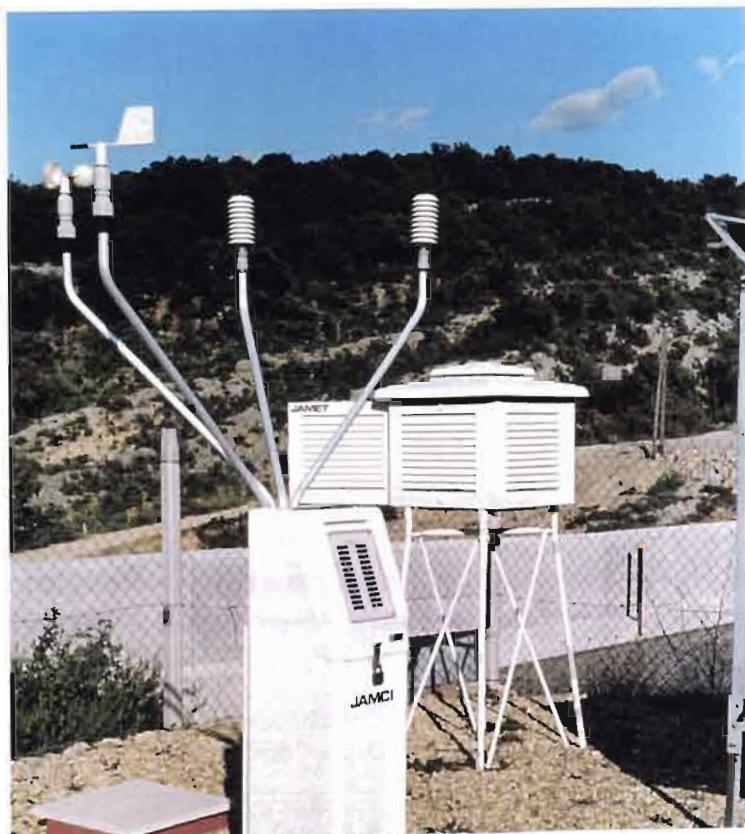
Station du Patus

1- Hydrométrie

La station hydrométrique a été installée en janvier 1986, en amont de la retenue, sur le ru du Patus. Ce ruisseau draine un bassin de 85 hectares qui se répartissent en calcaires massifs et en calcaires marneux sur le versant sud et en brèches et marnes ocres sur le reste de ce sous-bassin. Elle est équipée d'un limnigraphie à flotteur installé dans une portion rectiligne, environ 8 mètres en amont d'un seuil rocheux naturel qui sert de contrôle, et d'un élément d'échelle gradué de 3 à 4 mètres.

2- Pluviométrie

Un pluviographe Précis Mécanique (bague de 400 cm²) relié à une centrale d'acquisition de données Elsyde/OEDIPÉ est installé en rive gauche du ru du patus, en amont de la fosse à sédiments. Cet appareil fonctionne depuis le 5 mars 1986.



APPROCHE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT SUR PETITS BASSINS VERSANTS

**UTILISATION DE LA METHODE
DU MINI-SIMULATEUR DE PLUIE**

I - LA PROBLEMATIQUE

Pourquoi rechercher en Hydrologie à caractériser les paramètres du ruissellement et de l'infiltration sur parcelles ?

Connaissance des mécanismes.

Afin de répondre à la nécessité pour les aménageurs de connaître les crues les plus fortes et leur probabilité d'occurrence (crue de projet). || ! !

Deux niveaux d'études peuvent être considérés :

- 1) Sur les grands bassins : on a généralement la possibilité d'obtenir des chroniques de débits et de pluviométrie à partir des stations des réseaux nationaux.
- 2) Sur les petits bassins : nécessité d'étudier des Bassins Représentatifs et Expérimentaux dans la région à aménager. Ceci impose de faire des observations pendant une durée minimale de 3 à 5 ans pour obtenir une relation pluie-débit fiable, ce qui entraîne une immobilisation en moyens humains et matériels importante, d'où un coût élevé des études.

*CALAGE •
P-V 24*

La méthode classique d'étude, mise au point par RODIER et AUVRAY à partir de nombreuses études antérieures, consistait à transposer les résultats obtenus sur des bassins connus au bassin que l'on étudie par l'intermédiaire d'une série d'abaques qui classent ce dernier dans des groupes en fonction de ses différents caractères morphologiques et climatologiques.

Certains de ces caractères sont aisément quantifiables :

- climatiques : à partir d'études statistiques sur des séries pluviométriques,
- morphologiques : superficie du bassin versant, indice de compacité, indices de pente (indice global, indice de Roche), densité du réseau de drainage, topographie..., mais l'un de ces caractères reste jusqu'à présent assez subjectif dans son appréciation : LA PERMEABILITE.

Or, l'utilisation de la méthode nécessite de classer le bassin étudié dans l'une des cinq classes de perméabilité suivantes :

- P1 : Bassins rigoureusement imperméables : bassins entièrement rocheux ou argileux.
- P2 : Bassins imperméables avec quelques zones perméables de faible étendue ou bassins homogènes presque imperméables.
- P3 : Bassins assez imperméables comportant des zones perméables d'étendue notable ou bassins homogènes assez peu perméables.
- P4 : Bassins assez perméables tels qu'on en rencontre en zone de décomposition granitique avec abondance d'arènes.
- P5 : Bassins perméables : sables ou carapace latéritique très fissurée.

Les auteurs de la méthode précisent que la perméabilité est un facteur de première importance :

"La perméabilité du sol d'un bassin est la caractéristique la plus importante d'un sol vis-à-vis du ruissellement ; elle est difficile à chiffrer pour les raisons suivantes : les bassins naturels sont presque toujours plus ou moins hétérogènes. Si un petit bassin est homogène, il risque de ne pas être représentatif."

En outre, ce qui importe ce n'est pas la perméabilité des différents types de sols mesurée en laboratoire, sur des échantillons plus ou moins remaniés, mais la perméabilité "in situ" dans les conditions du début de l'averse.

Sur l'échantillon de bassin-versant, celle-ci a été appréciée de la manière suivante :

La méthode la plus simple pour classer les perméabilités a consisté à utiliser les courbes qui, pour un bassin, définissent l'apparition de l'écoulement en fonction de la hauteur de précipitation et de l'indice d'humidité. On a pris, pour celui-ci, une forme extrêmement simple : l'écart de temps en jours à la pluie précédente, supérieure à une limite donnée, 5 mm par exemple.

Pour un bassin sur lequel aucune mesure n'a été faite il est difficile de se prononcer sinon subjectivement à partir de :

- la carte pédologique,
- carte d'occupation des sols si elle existe,
- ce que l'on connaît de la région avec la topographie.

Devant ce point d'écueil et à la demande du CIEH, l'ORSTOM a décidé en 1976 de mettre en œuvre une méthode plus fiable pour étudier les caractéristiques hydrodynamiques des sols fondée sur l'utilisation du simulateur de pluie. ✓

II - LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'ensemble du dispositif peut être décomposé en trois parties :

1) Le système d'aspersion :

L'originalité principale de l'appareil utilisé ici, par rapport aux modèles antérieurs utilisés aux Etats-Unis (type SWANSON, 1965 ; BERTRAND et PARR, 1960 ; ou encore DIXON et PETERSON, 1964) est la possibilité de régler l'intensité de la pluie sans interruption de celle-ci, de manière progressive et continue, dans une gamme d'intensités définie par le rapport des engrenages utilisés. Dans notre cas, la plage d'intensités varie de 25 à 120 mm/h.

Le principe repose sur la variation de l'angle de balancement du gicleur, qui est animé d'un mouvement pendulaire par l'intermédiaire d'un moteur "Hybride" pas à pas piloté par un microprocesseur. Ainsi, on augmente ou diminue la quantité d'eau reçue par la parcelle, la surface mouillée au sol variant en sens inverse. La quantité d'eau consommée reste constante, car on travaille toujours avec la même pression.

?!

2) La parcelle de mesure :

Celle-ci est matérialisée par un cadre métallique de 1 m^2 , enfoncé dans le sol de cinq cm environ. Sur la face aval du cadre une série de trous permet l'écoulement des eaux de ruissellement dans un canal collecteur.

3) Le dispositif d'enregistrement :

Constitué d'un limnigraphé de laboratoire à mouvement de rotation rapide : 1 h 30 environ, il autorise une précision de l'ordre de 10 secondes en temps et de 1/10 millimètre en hauteur de lame ruisselée. Ce limnigraphé est monté sur la cuve réceptrice des eaux de ruissellement, reliée à la parcelle par un tuyau d'aménée.

III - LA METHODE A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

3.1. Intérêts et objectifs des études sous pluie simulée

La mesure des paramètres influant sur les phénomènes de ruissellement, infiltration et érosion, se heurtait jusqu'à présent à plusieurs problèmes :

- 1) En conditions naturelles, l'hydrologue ne possède pas la maîtrise de l'évènement pluvieux, ce qui l'astreint à des périodes d'observations relativement longues (trois années ou plus), s'il veut mesurer des averses exceptionnelles. La maîtrise des caractéristiques des averses (hauteur, intensités, durée) et la diminution de la longueur des études sont résolues en partie grâce au mini simulateur (une campagne de simulation de pluie dure de un à deux mois).
- 2) Par ailleurs, il est difficile, voire impossible, à l'échelle du bassin versant, de déterminer comment les différentes zones du bassin participent à la génèse des crues. L'apport du mini-simulateur, est là aussi très important, puisque de manière aisée, il permet dans des délais relativement courts, de tester le comportement vis à vis des précipitations des différents types de sols, états de surface, types d'occupation des sols (culture, jachère, végétation naturelle, etc.), et cela, selon les degrés d'humectation du sol que l'on a prédéterminés.

Les objectifs principaux du programme simulation de pluie sont :

- l'analyse fine des facteurs conditionnels du ruissellement et de l'infiltration, # OK
- Indications* - l'étude de la génèse des crues et la détermination des crues de fréquence rare (crue décennale), NON !
- une meilleure utilisation des modèles mathématiques qui nécessitent souvent un calage sur ~~#~~ des valeurs observées in situ, OK
- l'étude du rôle joué par les différents états de surface, pratiques culturales, etc, afin ~~#~~ OK d'améliorer l'efficacité des pluies pour les réserves en eau des plantes,
- l'étude de l'érodibilité des sols. Bien que l'on ne puisse pas parler d'érosion à l'échelle de la parcelle de 1 m^2 (effet de pente inexistant). VALENTIN (1981) propose le terme de susceptibles d'être transportées". NON !

On peut classer les sols selon ce dernier critère.

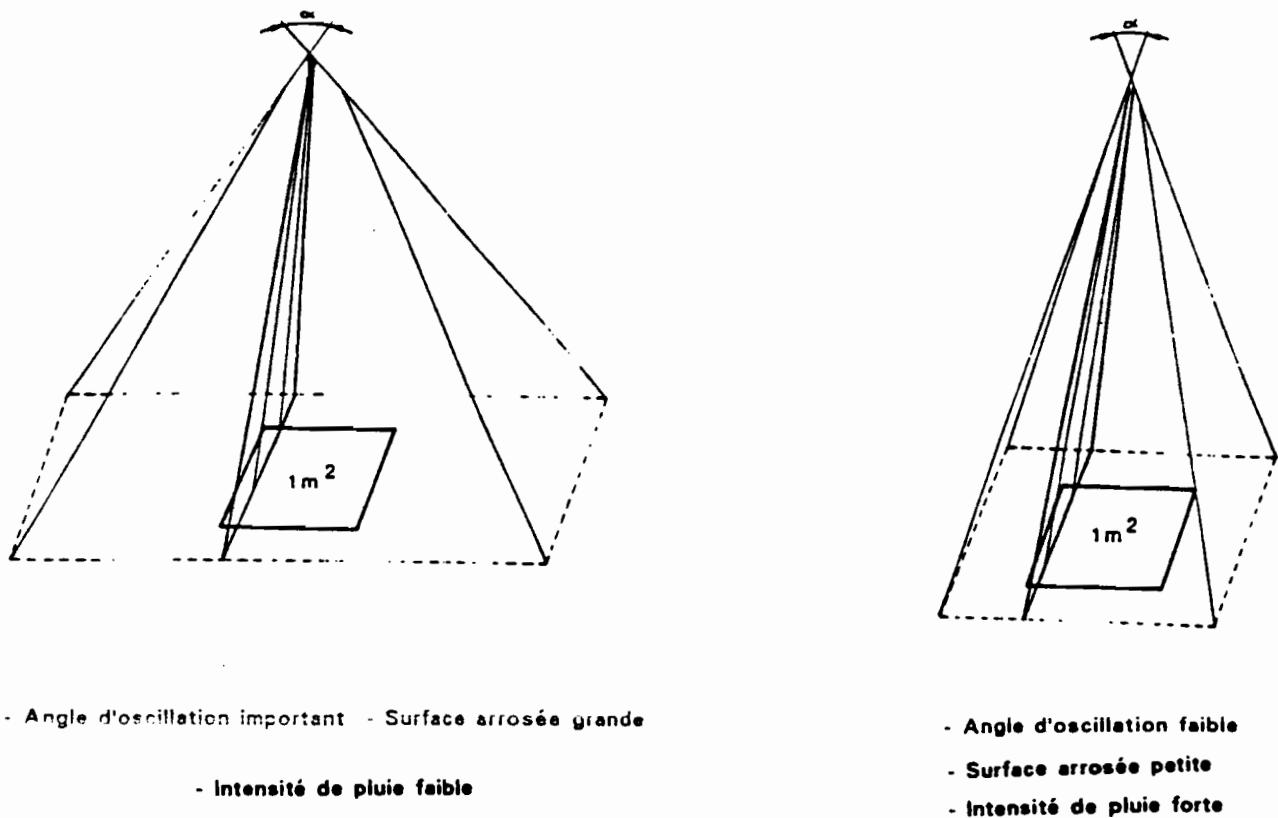


Fig.2 PRINCIPE DE REGLAGE DES INTENSITES DE PLUIE

De nombreux essais ont permis de choisir un gicleur calibré, une hauteur et une pression d'utilisation tels que les gouttes de pluie produites par l'appareil aient sensiblement la même taille et la même énergie cinétique que celles des gouttes de pluie naturelle (ASSELINE et VALENTIN, 1978) cf. graphiques. L'ensemble du dispositif est alimenté en eau et électricité par moto-pompes et batterie 12 V.

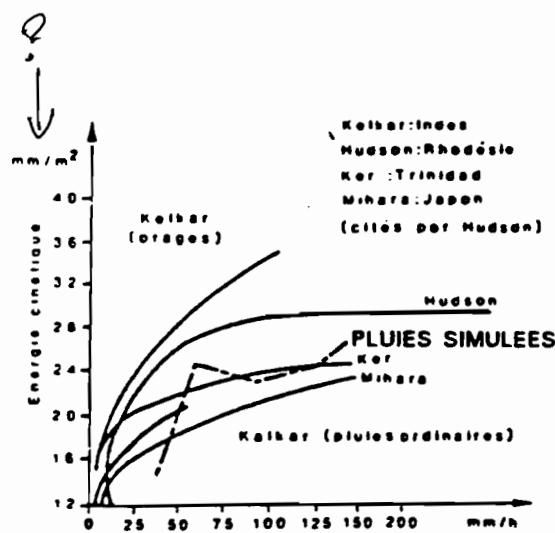


Fig.3a RELATION ENTRE L'ENERGIE CINETIQUE ET L'INTENSITE DES PLUIES NATURELLES ET SIMULEES

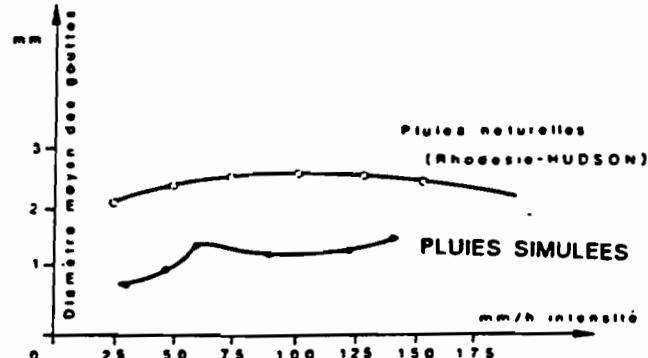


Fig.3b RELATION ENTRE LE DIAMETRE MOYEN DES GOUTTES ET L'INTENSITE (d'après VALENTIN 1978)



PARCELLE DE MESURE

DISPOSITIF D'ENREGISTREMENT

MALLETTE DE PROGRAMMATION



VUE GENERALE DU DISPOSITIF

3.2. La méthodologie

horizontales

La méthodologie consiste à mesurer sur des groupements de trois parcelles de 1 m² chacune, représentatives des milieux étudiés (type de sol, état de surface, de couvert végétal, etc.) la lame ruisselée (ou infiltrée, par différence avec la hauteur d'eau précipitée) au cours d'une averse, ou d'une série d'averses, dont on maîtrise les caractéristiques (hauteur, durée, intensité, intervalle de temps entre deux averses).

On définit les caractéristiques des averses à simuler et leur succession à partir de l'analyse des données pluviographiques et pluviométriques des postes longue durée de la zone étudiée et ceci constitue la base du protocole expérimental.

Sont également suivies la dynamique d'humectation des sols ainsi que celle de ressuyage et de déssèchement par des mesures de profils d'humidité à la sonde à neutrons avant et après chaque averse (l'évaporation étant considérée négligeable au cours de l'averse).

Des prélèvements d'eau effectués sur chaque volume ruisselé pour mesurer la turbidité, et la collecte du charriage à l'exutoire de la parcelle permettent de quantifier la détachabilité. ✓

3.3. Les protocoles de simulation de pluie

L'établissement du protocole de pluies consiste à définir la chronologie des différentes averses avec leurs caractéristiques, de façon à se rapprocher d'une situation naturelle pré-définie, en apportant le maximum d'enseignements dans un temps relativement court. Il n'est bien sûr pas possible de faire varier en continu les intensités comme c'est le cas pour les pluies naturelles ; nous définissons l'averse par une ou plusieurs séquences d'intensités, sans interruption de la pluie.

Le protocole d'averses pourra également comporter des averses à intensité constante, qui serviront à vérifier les "temps d'installation" du régime permanent de ruissellement. Les temps d'arrêt (ou de ressuyage) entre deux averses pourront varier de quelques dizaines de minutes à plusieurs heures, de manière à tester différents états d'humectation du sol.

3.4. Les mesures - Les paramètres définis

Les mesures de terrain se divisent en deux groupes :

- l'eau à la surface du sol : pluie-ruissellement-érosion,
- l'eau dans le sol : suivi des profils hydriques.

3.4.1. Mesure de la pluie

La procédure habituelle consiste à placer sur la parcelle de mesure un bac en tôle de 1 m² (ruissellement 100 %), sur lequel on procède au réglage des intensités de pluie. A condition de conserver pour chaque manipulation et chaque répétition la même hauteur du gicleur et le même centrage de l'appareil sur la parcelle, on peut considérer que les réglages initiaux sont valides, la fidélité de l'appareil étant vérifiée.

3.4.2. Mesure du ruissellement

L'exutoire "naturel" est la bordure aval de la parcelle. La mesure se fait environ un mètre plus loin dans la cuve réceptrice placée dans une fosse, ceci afin d'éviter le phénomène de drainage à l'aval de la parcelle. Nous négligerons le temps de transfert de la partie amont de la parcelle à la cuve. Cette approximation est acceptable étant donné les faibles distances en cause. L'enregistrement obtenu sur le limnigraphé de laboratoire permet de tracer "l'hydrogramme de la crue" sur la parcelle.

3.4.3. Les paramètres définis

La réaction d'une parcelle à une averse donnée est connue par l'analyse de l'hydrogramme de ruissellement pour l'averse considérée. A. LAFFORGUE (1977) a analysé l'hydrogramme-type (fig.4). Il ressort de cette étude que le processus de ruissellement peut se décomposer chronologiquement en quatre phases :

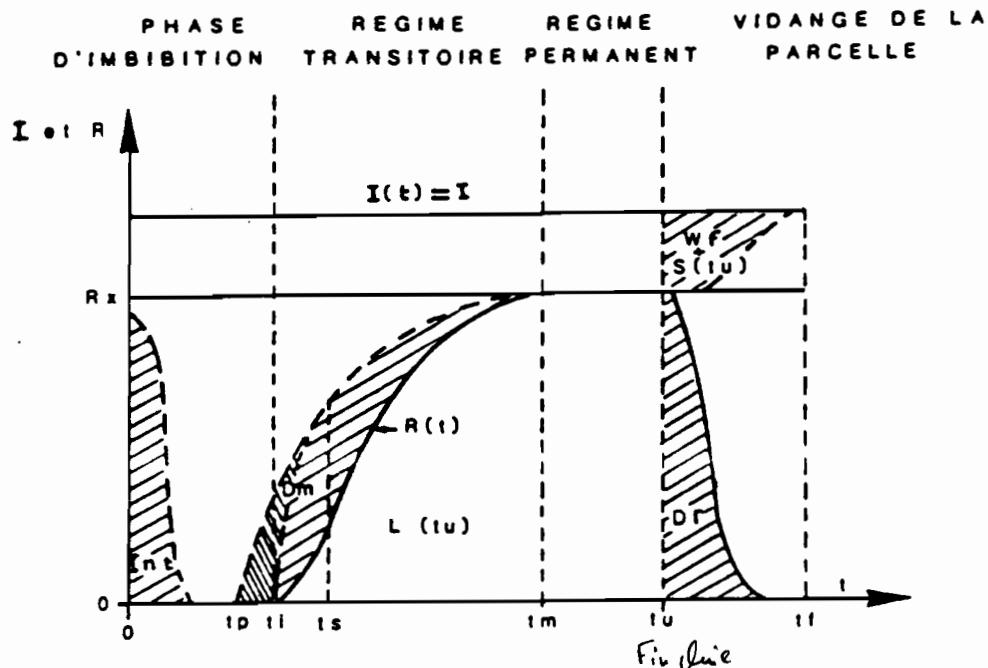


Fig.4 - RUISSELLEMENT SOUS INTENSITE
D'AVERE CONSTANTE
(D'APRES A.LAFFORGUE)

- Du début de l'averse au temps t_i on n'observe aucun ruissellement : c'est la phase d'imbibition. Durant cette période l'infiltration est d'abord totale, l'intensité potentielle d'infiltration est en tout point supérieure à l'intensité de la pluie ; puis la capacité d'infiltration diminue à mesure que le sol s'humecte, les dépressions de surface se remplissent.
- Au temps t_i les flaques débordent, le ruissellement apparaît à l'exutoire. L'hydrogramme prend la forme d'un S allongé, l'intensité de ruissellement augmente, donc l'intensité d'infiltration diminue. C'est la phase de régime transitoire.
- A partir du temps t_m , s'établit un palier de ruissellement dont l'intensité a atteint un maximum, l'infiltration est alors minimale.

Il s'est établi un régime permanent. A chaque changement d'intensité ce régime cesse, les intensités de ruissellement et d'infiltration varient jusqu'à trouver une nouvelle situation d'équilibre.

- Au temps t_u (fin de la pluie) le ruissellement décroît rapidement pour s'annuler au temps t_f . C'est la phase de vidange de la parcelle. La quantité d'eau écoulée pendant cette dernière phase est la détention superficielle récupérable Dr.

A chacune de ces phases correspond une équation du bilan entre les grandeurs mesurées à un instant (t) donné. Notations utilisées :

P	hauteur de la pluie	mm
L _r	lame ruisselée	mm
L _i	lame infiltrée	mm
S	lame stockée en surface	mm
D _m	détention superficielle mobilisable	mm
D _r	détention superficielle récupérable	mm
I	intensité de la pluie	mm/h
R	intensité de ruissellement	mm/h
F	intensité d'infiltration	mm/h
R _x	intensité maximale du ruissellement	mm/h
F _n	intensité minimale d'infiltration	mm/h
Int	hauteur de précipitation interceptée par la végétation	
t _i	temps d'apparition du ruissellement	mn
t _m	temps d'installation du régime permanent	mn
t _u	temps de fin de la pluie	mn
t _f	temps de fin du ruissellement	mn
t _p	(time of pounding) instant où la capacité d'infiltration est localement inférieure à l'intensité de la pluie.	
t _s	temps de submersion	
w _f	lame d'eau infiltrée entre les temps t _u et t _f	

- Pour la totalité de la pluie l'équation s'écrit :

$$P_u(t) - L_r(t) - L_i(t) - D_m(t) - S(t) = 0 \quad (1)$$

- Pendant la phase d'imbibition :

$$\begin{aligned} \text{On a :} \quad L_r(t) &= 0 & D_m(t) &= 0 \\ P_u(t) - L_i(t) - S(t) &= 0 & & \end{aligned} \quad (2)$$

- En régime transitoire :

En dérivant l'équation (1), on obtient :

$$I - R(t) - F(t) - \frac{dD_m}{dt} - \frac{ds}{dt} = 0 \quad (3)$$

- En régime permanent :

$$\begin{aligned} R(t) &= R_x & F(t) &= F_n & \frac{dD_m}{dt} &= 0 & \frac{ds}{dt} &= 0 \\ I - R_x - F_n &= 0 & & & & & & \end{aligned} \quad (4)$$

- En phase de vidange :

$$P_u(t) = 0$$

$$L_r(tf) - L_r(tu) = D_m(tu) + S(tu) - S(tf) + L_i(tu) - L_i(tf) \quad (5)$$

Si on appelle D_r (détention superficielle récupérable), la lame d'eau que l'on récupère après l'arrêt de la pluie et $L_i.f$ celle qui s'infiltra, on peut écrire :

$$D_r = D_m + S(tf) - w_f \quad (6)$$

Il nous reste à définir un autre paramètre : l'indice d'humectation des sols, que l'on fait varier tout au long de l'expérimentation. Celui-ci est représenté par un indice d'antécédence des pluies (IK) de type KOHLER (CASENAVE, 1982) qui peut être formulé ainsi :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1})e^{-\alpha t}$$

Où : IK_n = indice d'humectation immédiatement avant l'averse (n)

P_{n-1} = hauteur de l'averse précédant l'averse considérée

t = temps séparant la fin de l'averse de rang (n-1) du début de l'averse considérée
(t) est exprimé en jours et fractions de jours

α = coefficient de calage, pris égal à 0,5 (valeur prise par tous les utilisateurs sur l'ensemble des bassins testés au simulateur).

L'indice IK ainsi défini est différent de l'indice API de KOHLER et LINSLEY en ce sens que, au lieu de calculer l'indice pas à pas par itération sur les jours comme pour l'indice API (non différenciation des averses successives au cours d'une même journée), l'indice IK est calculé en continu au début de chaque averse par itération sur les averses et même pour la reconstitution de crues complexes à partir d'un hyéogramme lui aussi complexe, IK est recalculé au début de chaque averse individualisée.

3.5. Etude de l'infiltration

3.5.1. Les paramètres hydrodynamiques du sol

Les physiciens du sol considèrent le ruissellement comme le "résidu de l'infiltration" (VACHAUD, 1985). Sa genèse, son développement, ne peuvent être abordés sans la connaissance des mécanismes de l'infiltration liés aux caractéristiques du sol. L'infiltration peut être définie comme l'ensemble des processus suivants (MOREL-SEYTOUX, 1981).

- La pénétration de l'eau dans le sol à travers sa surface.
- Le stockage et les mouvements de l'eau dans le sol.

Elle caractérise donc la cinétique d'un fluide dans un espace à trois dimensions faisant intervenir trois phases : l'eau, l'air et le sol.

Par simplification, on ne considère que le mouvement sur sa principale direction : verticale et que les principales forces mises en jeu : la gravité et les forces capillaires. "Entre deux fluides en contact ou un fluide au contact d'un solide, il existe une énergie superficielle engendrée par la différence entre la force d'attraction des molécules vers l'intérieur de chaque phase et la force d'attraction des molécules à travers la surface de contact. Cette énergie superficielle se manifeste par une tension superficielle définie par la quantité de travail nécessaire pour séparer l'unité de surface des deux substances" (DE MARSILY, 1981).

L'infiltration est classiquement décrite par trois paramètres :

- L'intensité d'infiltration $f(t)$ qui est définie comme un flux d'eau traversant une unité de surface de sol, elle est fonction de la conductivité hydraulique du sol et de son gradient hydraulique et a pour unité celle d'une vitesse (LT^{-1}). Elle décroît assymptotiquement avec le temps (HILLEL, 1974).
- La capacité d'infiltration, qui a également comme unité celle d'une vitesse (LT^{-1}) est suivant HORTON (1933), la vitesse maximale d'infiltration avec laquelle un sol donné sous des conditions données absorbe la pluie au fur et à mesure qu'elle tombe. Le mot "capacité" se référant plutôt à un volume qu'à une vitesse les auteurs modernes (RICHARDS, 1965) lui préfèrent le terme de perméabilité. Lorsque cette capacité d'infiltration atteint un minimum, on la considère comme voisine de la conductivité hydraulique à saturation du sol dans les conditions naturelles (CHILDS, 1969).
- La hauteur d'eau infiltrée $L_i(t)$ exprimée en mm, c'est le cumul de la lame d'eau entrée dans le sol à l'instant t . Lorsque l'intensité de la pluie est plus petite que la capacité d'infiltration ou durant les arrêts de la pluie, l'eau gravifique descend le long du profil et la surface se dessèche. Cette dessication de surface engendre une circulation ascendante sous l'effet des forces capillaires, renforcées par la succion des racines des végétaux et de l'évaporation. Suivant que l'on assèche ou que l'on humidifie le sol, la pression capillaire présente des phénomènes d'hystérosis ; la forme que prennent les interfaces à une saturation donnée n'est pas la même suivant que l'on imbibe un sol sec ou que l'on draine un sol humide (VACHAUD et THONY, 1971 ; MUALEM, 1974 ; PARLANGE, 1976 ; VAUCLIN, 1982).

3.5.2. Interprétation des observations

La théorie classique de l'infiltration et du ruissellement suggère que le ruissellement n'apparaît que lorsque l'une des deux conditions suivantes est remplie :

- l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol "HORTON overland flow".
- l'état de saturation du sol est tel que la nappe affleure la surface "saturated overland flow". Il peut s'agir de la nappe elle-même ou d'accumulation d'eau dans un horizon imperméable peu profond du sol.

Dans le cas simple de la première hypothèse, RUBIN (1966) définit trois formes d'infiltration :

- infiltration sans submersion : l'intensité de la pluie n'est pas suffisante pour créer un ruissellement, la totalité de l'eau précipitée s'infiltra ;
- infiltration précédant la submersion : l'intensité de la pluie est suffisante pour créer des flaques pluviales à la surface du sol, mais celles-ci n'apparaissent que progressivement : c'est "la pluie d'imbibition" ;
- infiltration avec submersion : des flaques pluviales se forment à la surface du sol et le ruissellement a lieu mais une partie de l'eau précipitée continue à s'infiltrer.

Si l'averse est assez intense et assez longue, l'infiltration "avec submersion" suit l'infiltration "présubmergeante", une phase transitoire sépare les deux.

HILLEL (1974) donne le schéma suivant pour décrire cet ensemble de phénomènes.

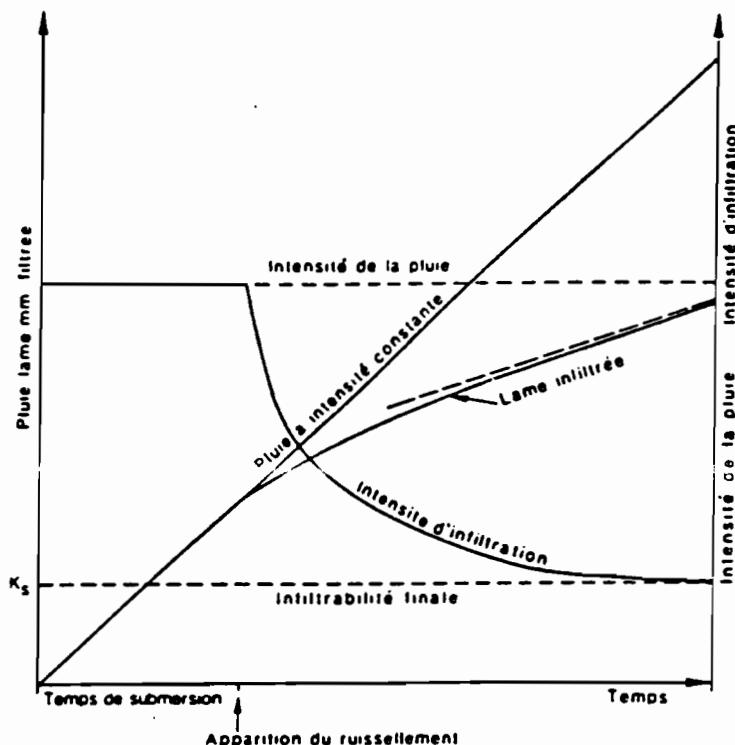


Fig.5 INFILTRATION : variation de la lame infiltrée et de l'intensité d'infiltration en fonction du temps HILLEL (1974)

3.6 Etude des paramètres du ruissellement

L'analyse de l'hydrogramme enregistré à l'exutoire de la parcelle permet l'étude des différentes phases du bilan d'eau à la surface du sol.

Ainsi peut-on étudier, pour divers états d'humectation du sol et de types d'occupation, les paramètres caractéristiques de l'écoulement tels que :

- la pluie d'imbibition (P_i) ;
- l'intensité maximale de ruissellement (R_x) déterminée graphiquement sur l'hydrogramme, à laquelle correspond une intensité minimale d'infiltration (F_n) en fonction de l'intensité de la pluie.

3.6.1 Etude de la pluie d'imbibition

Les facteurs principaux communément retenus, agissant sur la pluie d'imbibition sont : l'état d'humectation du sol, les différents états de surface et de la végétation et l'intensité de la pluie.

Nous allons étudier les deux premiers facteurs à partir d'une étude menée au Cameroun. fig.6

Divers états de surface et de la végétation ont été testés :

- sol nu après labour manuel
- couvert végétal peu dense (<30% de recouvrement au sol)
- couvert végétal dense (>30% de recouvrement au sol)

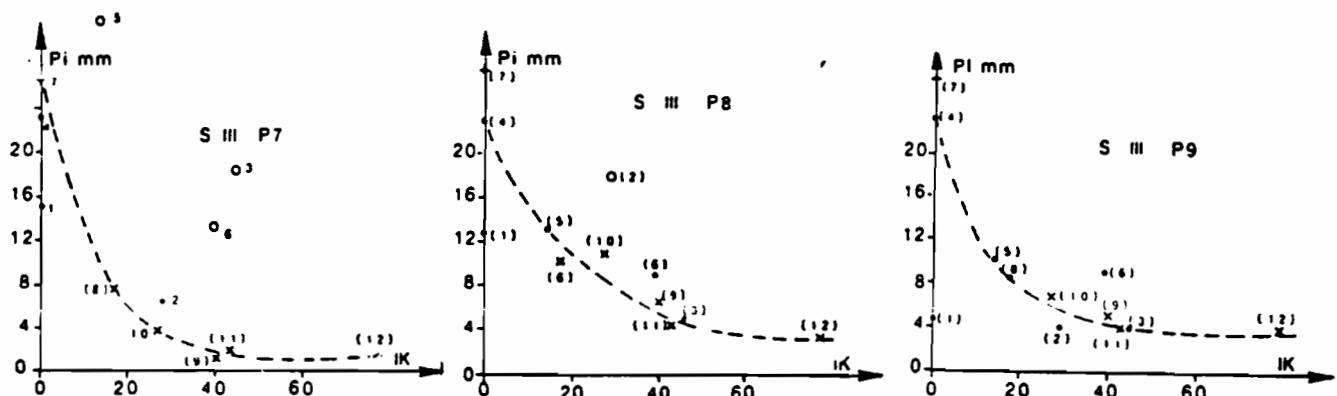


Fig.6 RELATION PLUIE D'IMBIBITION-INDICE IK

Trois enseignements peuvent être tirés de la lecture de ces graphes :

- 1) Le peu d'effet, au moins sur la pluie d'imbibition et le coefficient de ruissellement, d'un couvert végétal faible à moyen (<30%) par rapport au sol nu. Ceci est vérifié sur les parcelles P4 et P5 dont les résultats, sous ces conditions, sont assez proches de ceux de la parcelle P6 sur sol nu.
- 2) Un couvert dense, de l'ordre de 80%, a une influence certaine sur la pluie d'imbibition, mais moindre que le travail du sol.
- 3) la valeur de la pluie d'imbibition est dans tous les cas très liée à l'indice (IK) d'antécérence des pluies. Elle décroît en fonction de IK suivant une branche d'hyperbole dont la courbure dépend de l'état de surface et l'asymptote de l'état de la végétation.

Remarque :

Nous avons vu qu'à l'échelle de la parcelle le temps de transfert peut-être compté pour négligeable. La pluie d'imbibition peut-être alors assimilée à la notion de "précipitation limite de ruissellement".

3.6.2 Etude de l'intensité limite de ruissellement

Nous avons défini précédemment la variable (Rx) comme étant l'intensité maximale de ruissellement. Celle-ci est déterminée graphiquement, le régime permanent de ruissellement étant atteint.

La détermination des intensités limites de ruissellement se fait à partir des graphes (R_x , I), établis pour chaque site d'étude. fig. 7.

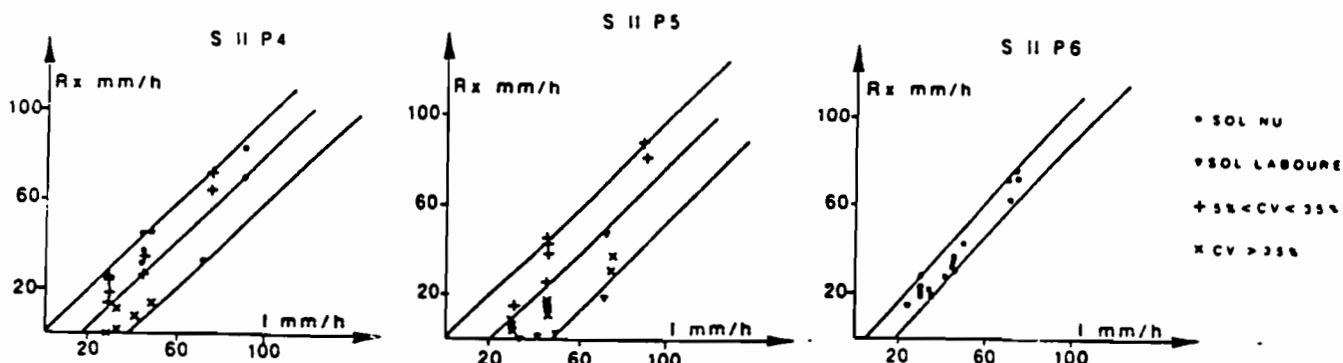


Fig. 7 RELATION INTENSITE MAXIMALE DE RUISELLEMENT-INTENSITE DE LA PLUIE

On remarque que pour chaque parcelle les points représentant les couples (R_x , I) peuvent être compris entre deux droites parallèles, dont les intersections avec l'axe des abscisses déterminent les valeurs IL_1 et IL_2 , telles que $0 \leq IL_1 < IL_2$, qui représentent :

IL_1 : intensité limite au-dessous de laquelle la parcelle ne ruisselle jamais

IL_2 : intensité limite au-dessus de laquelle la parcelle ruisselle toujours.

(Dans la mesure où R_x représente l'intensité maximum en régime permanent, ce que nous supposerons vérifié).

Ces deux données sont très intéressantes, IL_2 permet en particulier une approche de la "pluie utile", définie par ROCHE (1963) comme étant : "la partie de l'averse ayant pu raisonnablement donner lieu à du ruissellement".

IV - LE MODELE "PLUIE-LAME RUISELEE" SUR PARCELLE

4.1 Le modèle "pluie-lame ruisselée" sur parcelle.

Le modèle généralement retenu est de type simple, à régression linéaire multiple. Sa mise au point comporte généralement trois étapes :

- homogénéisation des données observées sur les x parcelles d'un site.
- test de signification des coefficients de régression.
- expression sous forme de fonction linéaire de la lame ruisselée en fonction des variables les plus significatives pour chacun des sites.

Les variables explicatives de la lame ruisselée peuvent varier en fonction du type de sol, des états de la surface etc.... Nous retiendrons principalement :

- La pluie totale : P
- L'indice des pluies antérieures : IK
- L'indice de couvert végétal : cv

Ainsi seront déterminées des fonctions de production du ruissellement sur chaque site. Ces fonctions sont de la forme :

$$L_r = aP + bIK + ccv + d$$

dans lesquelles a, b, c, d sont des paramètres sans dimension.

V - TRANSFERT DES RESULTATS DE LA PARCELLE AU BASSIN

5.1 La cartographie du bassin

Lors de l'aménagement d'un bassin versant représentatif, l'objectif principal est l'étude fine des mécanismes de l'infiltration et du ruissellement, plus généralement du cycle de l'eau.

L'hydrogramme global de crue, déduit du limnigramme enregistré à l'exutoire du bassin permet de connaître les apports en eaux de ruissellement à la station de mesure et d'étudier les caractéristiques de forme des crues.

Les résultats sur mini-parcelles sous pluie simulée ont permis l'analyse des caractéristiques hydrodynamiques des différents types de sols rencontrés sur les bassins et de connaître les apports en eaux de ruissellement de chaque aire contributive.

La base de la méthode de transfert des résultats obtenus sur parcelles repose sur une cartographie thématique du bassin sur lequel on veut étendre ces résultats. Cette méthodologie cartographique a été mise au point par les pédologues de l'ORSTOM, en particulier J.COLLINET et C. VALENTIN (1979 a.b - 1981) C. VALENTIN (1981 - 1982 - 1983 - 1985), pour répondre en particulier aux besoins des hydrologues.

Cette cartographie thématique est maintenant assez connue et répond à des critères bien définis pour sa mise en oeuvre. Selon la région climatique dans laquelle est situé le bassin à étudier, les composantes du milieu à prendre en compte seront différentes.

Ainsi, ressort-il des travaux antérieurs menés sous pluies simulées que dans la région climatique concernée (sahélienne), la cartographie des sols du bassin devra être basée principalement sur le type d'occupation des terres et les différents états de surface, ce terme regroupant deux composantes principales :

- les organisations pédologiques superficielles,
- le couvert végétal.

Les organisations pédologiques internes n'influencent que très peu le ruissellement sur ces sols. La dimension des surfaces prises en compte lors des descriptions de ce type varie avec le milieu étudié. D'une manière générale le "point d'observation" est défini par le champ de vision. Or même à cette échelle, il est fréquent que les états de surface soient hétérogènes, aussi définit-on des "surfaces élémentaires", constituées d'unités homogènes, dont le comportement serait uniforme sous pluie simulée.

VALENTIN a dressé un premier "check-list" des descripteurs de ces surfaces élémentaires :

Pour les organisations pédologiques superficielles on retiendra :

- la litière, (en savane on inclue dans cette rubrique les éventuels chevelus racinaires affleurants),
- l'activité faunique : termitières, turicules de vers, etc.,
- le micro-relief (buttes, billons...),
- les indices de migration des constituants (érosion hydrique, dépôts éoliens...),
- le micro-horizon, caractérisé par : couleur, humidité, continuité, taille des constituants des organisations pelliculaires.

Le couvert végétal sera décrit par :

- le couvert arboré : densité, pourcentage de recouvrement...
- le tapis herbacé (mêmes critères)
- la végétation de surface : mousses, lichens, jeunes pousses...
- les résidus végétaux: restes de végétation naturelle, ou de cultures.

5.2 Du m² au km²- De la parcelle au bassin -

La méthode de transposition des résultats de la parcelle au bassin se fait en deux étapes :

- Détermination d'une fonction de production du bassin. Elle résulte de la somme pondérée des fonctions de production de chaque unité cartographique (représentées par un site de simulation) et est du type :

$$Lr_b = aLr_1 + bLr_2 + \dots + xLr_n$$

a, b,...x représentent les fractions de superficies occupées par les unités 1, 2, ...n.

- Détermination d'une fonction de calage. A l'échelle de la parcelle, un certain nombre de paramètres ne sont pas pris en considération et ceci implique le passage par une fonction de calage des lames ruisselées calculées sur les lames ruisselées observées.

cf p. 10

Cette fonction de calage représente en particulier les paramètres non pris en compte suivants:

- l'effet de pente quasi-inexistant à l'échelle de la parcelle.
- l'état physionomique de la végétation : sèche pendant les expérimentations sous pluie simulée, active en saison des pluies pendant le suivi du bassin versant.
- la répartition spatiale des sols représentés par les parcelles, par rapport au réseau de drainage. Les caux qui ruissent en amont peuvent s'infiltrer à l'aval, ou inversement, de l'eau infiltrée dans une unité située en amont, peut après un cheminement hypodermique participer au ruissellement sur une unité de sol en aval.
- l'hétérogénéité spatiale de l'averse sur le bassin. En effet, on utilise comme variable d'entrée du modèle la pluie moyenne sur le bassin, le but à atteindre étant entre autres d'utiliser la pluviométrie à un poste de référence, pas forcément situé sur le bassin étudié, mais à proximité.

La fonction de calage du bassin est la droite moyenne entre les droites de régression

$$Lr_c = f(Lr_0) \quad \text{et} \quad Lr_0 = f(Lr_c)$$

5.3 Application de la méthode au cas d'un bassin versant du Nord-Cameroun.

La cartographie de ce bassin fait ressortir six unités homogènes du point de vue du ruissellement. (cf. carte fig.8).

Sur l'une de ces unités (S VII) il a été impossible d'établir une relation pluie-lame ruisselée sous simulation de pluie, le ruissellement étant toujours nul. Ce phénomène a été identique en conditions naturelles durant les deux saisons des pluies que nous avons suivies. En conséquence, dans la fonction de production globale du bassin, cette unité n'apparaîtra pas.

Les fonction de production des cinq "unités participatives" sont :

$$Lr_2 = 0,758 \text{ Pu} + 0,146 \text{ IK} - 0,207 \text{ cv} - 4,57$$

$$Lr_3 = 0,575 \text{ Pu} + 0,264 \text{ IK} - 17,0$$

$$Lr_4 = 0,403 \text{ Pu} + 0,139 \text{ IK} - 0,230 \text{ cv} - 6,13$$

$$Lr_5 = 0,583 \text{ Pu} + 0,205 \text{ IK} - 0,135 \text{ cv} - 8,17$$

$$Lr_6 = 0,661 \text{ Pu} + 0,197 \text{ IK} - 0,292 \text{ cv} - 5,47$$

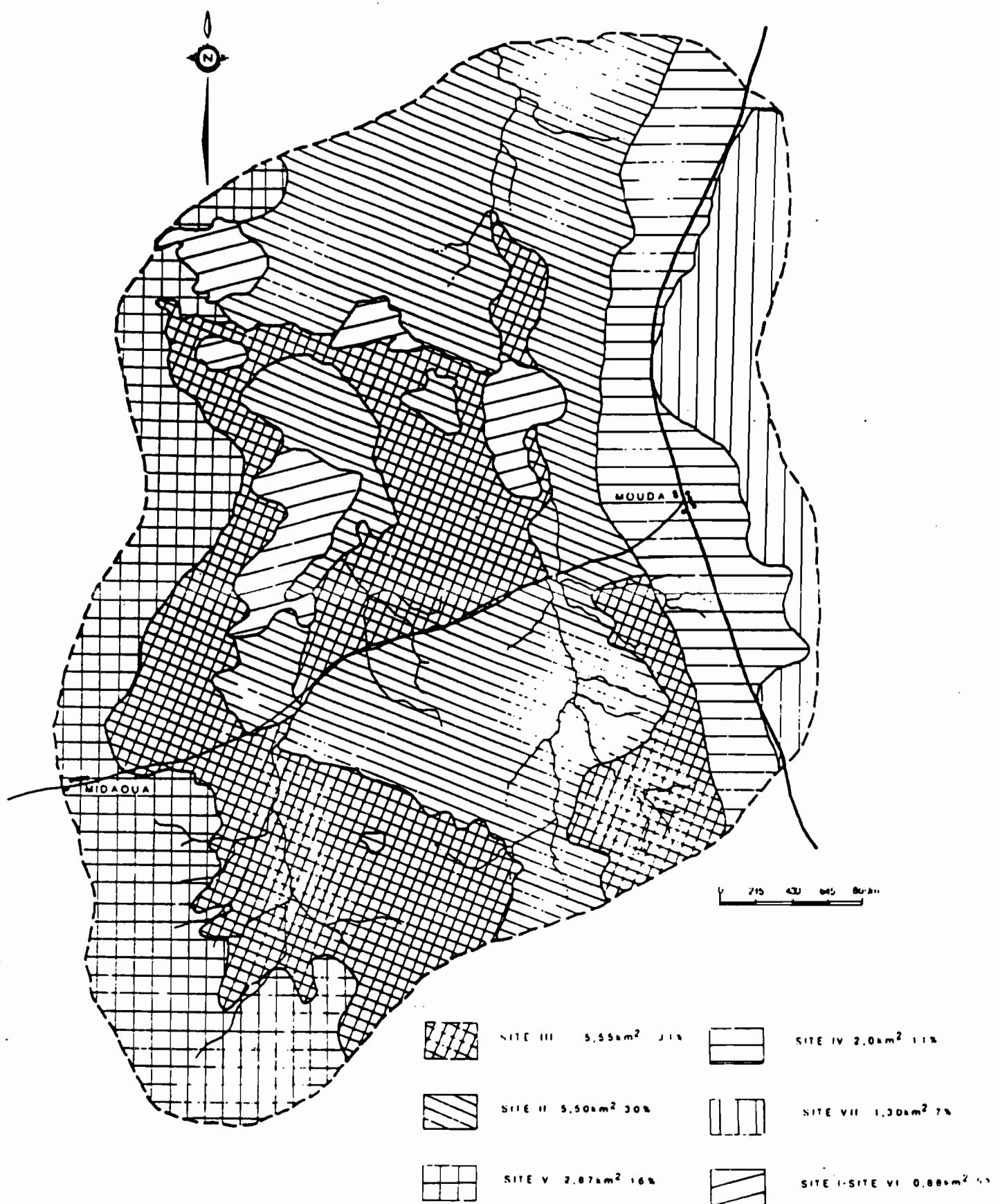


Fig.8 CARTE DES ETATS DE SURFACE B.V.1

REPRESENTATIVITE DES SITES DE SIMULATION DE PLUIE

Ces unités, homogènes vis à vis du ruissellement, représentent respectivement en pourcentage de la superficie globale du bassin :

Unité 2 : 30%
Unité 3 : 31%
Unité 4 : 11%

Unité 5 : 16%
Unité 6 : 5%
Unité 7 : 7

La fonction de production globale du bassin s'écrit donc :

$$Lrb = 0,30 Lr_2 + 0,31 Lr_3 + 0,11 Lr_4 + 0,16 Lr_5 + 0,05 Lr_6 + 0,07 Lr_7$$

Les résultats de la reconstitution des lames ruisselées observées pendant les campagnes 1984-1985 sont présentés dans le tableau ci-après :

La fonction de calage sur le bassin est :

$$Lr_0 = 1,16 Lr_c - 0,691 \quad r^2 = 0,96$$

Cette relation est représentée graphiquement sur la figure N°9.

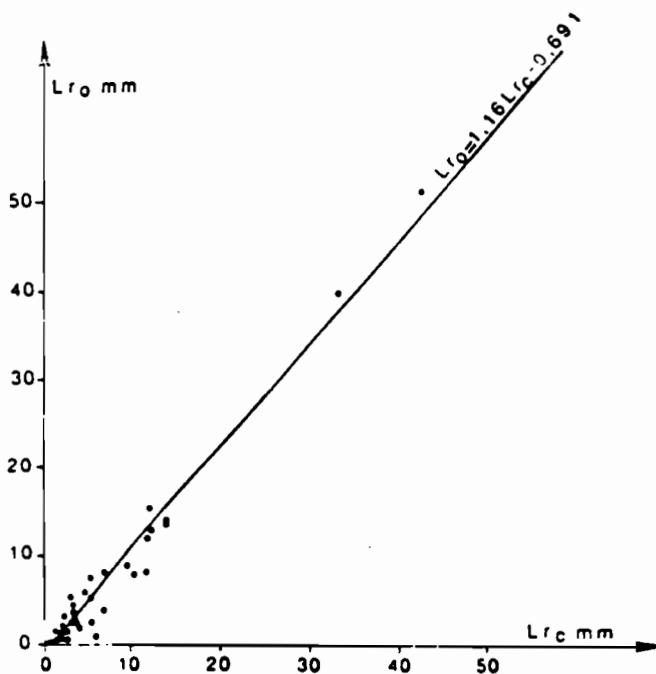


Fig.9 - BV 1 MOUDA FONCTION DE CALAGE

VI - VALIDITE DU MODELE SIMULATEUR

Pour vérifier la validité du modèle, on peut procéder de deux manières :

- 1) Si l'on a réservé une partie de l'échantillon de lames ruisselées observées lors du calage du modèle, on teste le modèle sur cette partie de l'échantillon.
- 2) Si l'ensemble de la population de l'échantillon a été utilisé pour caler le modèle, (c'est notre cas), on va générer une chronique de lames ruisselées sur le bassin à partir d'une série pluviométrique observée à un poste de référence voisin du bassin étudié.

Nous avons vu que le modèle simulateur comporte deux étapes :

1) Détermination des valeurs des variables d'entrée de la fonction de production : P_u , I_K , c_v

2) Application de la fonction de calage aux lames ruisselées calculées à l'étape précédente :

La première étape consiste à chercher le coefficient d'abattement à appliquer à la pluie journalière du poste de référence choisi pour passer à la pluie moyenne sur le bassin.

On calcule ensuite les valeurs de l'indice des précipitations antérieures I_K , en considérant par exemple que les pluies surviennent à 12 h, donc 24 heures séparent l'averse n de l'averse $n+1$ tombée le lendemain.

L'indice de recouvrement au sol de la végétation a été déterminé, dans notre cas, en considérant une valeur moyenne mensuelle, valable pour toute la chronique, à partir des observations des deux années de mesure.

Les variables ainsi définies, le modèle a pu être appliqué. Les résultats sont représentés sur la figure 10, où les couples pluies-lames ruisselées ont été reportés, ainsi que les lames ruisselées observées.

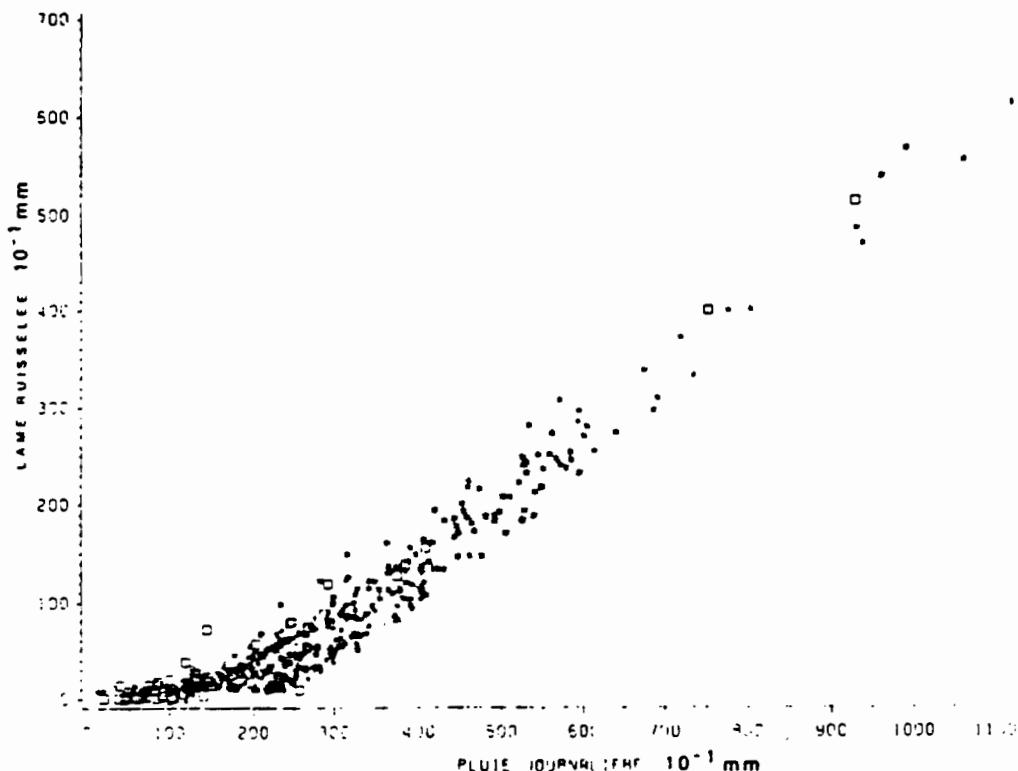


Fig.10 - B.V. MOUDA 1 LAMES RUISELEES RECONSTITUEES

On pourra, à partir de cette chronique de lames ruisselées reconstituées, ajuster l'échantillon des lames ruisselées maximales annuelles et celui des lames ruisselées annuelles à une série de lois statistiques, afin de déterminer les valeurs de récurrence annuelle et décennale nécessaires dans tous les projets d'aménagement.

- BIBLIOGRAPHIE -

ASSELINE J., VALENTIN C. (1978) - *Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion.*

Cah. ORSTOM - Sér. hydrol. Vol. XX n°4 - 1978, PP. 321-349.

BERNARD A. (1987) - *Le simulateur de pluie - 2ème génération.*
Note technique, ORSTOM - Laboratoire d'Hydrologie - Montpellier.

BERTRAND R.B., PAAR J.F. (1960) - *Development of a portable sprinkling infiltrometer Tr. of the VII th int. conf. of soils science.*

MADISON, VI, 4, pp. 433-440.

CASENAVE A. (1982) - *Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principe de l'interprétation des mesures.*

Cah. ORSTOM Sér. hydrol., Vol.XIX, 4, pp. 207-227.

CHILDS E.L. (1969) - *An introduction to the physical basis of soil water phenomena.*
Willey Interscience NEW YORK, NY. 493 p.

COLLINET J., VALENTIN C. (1979) - *Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques.*

Cah. ORSTOM Sér. Pédol. Vol. XVII, n°4, pp 283-328.

COLLINET J., VALENTIN C. (1979 b) - Un schéma des inter-relations hydrodynamiques dans les milieux naturels et cultivés, valorisation des données morphologiques in : *Informatique et Biosphère* : actes du colloque d'ABIDJAN, pp. 155-177.

DE MARSILY G. (1981) - *Hydrologie quantitative*, MASSON
edi. PARIS, NEW YORK, BARCELONE, MILAN, MEXICO, RIO DE JANEIRO. 214 p.

DIXON R.M., PETERSON A.E.E. (1964) - *Construction and Operation of a modified spray infiltrometer and a flood infiltrometer.*

University of WISCONSIN. Research repor. n°15, 31p.

HILLEL D. (1974) - *L'eau et le sol, principes et processus physiques.* Dept. of soil sc. The Hebrew University of JERUSALEM.

Trad. de l'anglais par Louis W. DE BACKER, WANDER ed. LOUVAINS : 288p.

HORTON R.E. (1933) - *The role of infiltration in the hydrological cycle.*
Trans. Amer. Geophys. Un. 14 : pp. 446-460.

LAFFORGUE A. (1977) - *Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées.* Cah. ORSTOM Sér. hydrol. Vol. XIV n°4, pp. 229-344.

MOREL-SEYTOUX H.J. (1981) - *Application of infiltration theory for the determination of excess rainfall hyetograph*. Water resources bulletin pp. 1012-1022.

MUALEM Y. (1974) - *A conceptual model of hysteresis*. Water resources res. pp. 514-520.

PARLANGE J.Y.(1976) - Capillary hysteresis and relations ship between drying and wetting curves. Water Res. Vol. 12 (2) : pp.224-228.

RICHARDS S.I. (1965) - *Physical condition of water in soil*, chap. 8. In C.A. BACK et al. (eds). Methods of soil analysis, Part. I, Academic press, NEW YORK, 770 p.

ROCHE M. (1963) - *Hydrologie de surface*. GAUTHIER-VILARS. Ed. PARIS, p. 383.

RUBIN M. (1963) - *Theory of rainfall uptake by soils initially dryer than their field capacity and its applications*, Water resources res. V.2 : pp. 739-749.

SWANSON N.P. (1965) - *Rotating boom rainfall simulator*. Amer. Soc. Agr. Engineers n°8, pp.71-72. MICHIGAN.

THEBE B. (1987) - *Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun. Bassins versants de MOUDA. Contribution à l'étude des transferts d'échelles*. Thèse d'Université - USTL, Montpellier, 238 p. + annexes.

VACHAUD G. (1985) - Intervention orale. Journées hydrologiques de MONTPELLIER. Colloques et séminaires. Editions de l'ORSTOM. p. 200.

VACHAUD G., THONY J.L. (1978) - *Hysteresis during infiltration and redistribution in a soil column at different initial water contents*. Water resources Res. pp. 111-127.

VALENTIN C. (1985) - *Differencier les milieux selon leur aptitude au ruissellement : une cartographie adaptée aux besoins hydrologiques*. Journées hydrologiques de l'ORSTOM à MONTPELLIER. (17-18 septembre 1985. Coll. colloques et séminaires. Ed. ORSTOM, pp. 50-74.

VAUCLIN M. (1982) - *Infiltration in unsaturated soils*. Lecture at NATO Advances Study Institute on "? University of DELAWARE, 50p.

ANNEXE 1

BORDEREAUX DE DEPOUILLEMENT

BORDEREAU DE DEPOUILLEMENT DE PLUIES SIMULEES

BASSIN.....

SITE.....

CAMPAGNE.....

Parcelle	Pluie	Date	Heure	T mn	Ti mn-s	Te mn-s	P mm	Pi mm	Pe mm	Lr mm	Li mm	Kr %	Kre %
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	1												
	2												
	3												
	4												
	5												

BORDEREAU DE DEPOUILLEMENT DE PLUIES SIMULEES

BASSIN.....

SITE.....

CAMPAGNE.....

PARCELLE N° 1					PARCELLE N° 2				PARCELLE N° 3			
T	P	Lr	Ry	Fy	P	Lr	Ry	Fy	P	Lr	Ry	Fy
5												
10												
15												
20												
25												
30												
35												
40												
45												
50												
55												
60												
Dr												

PARCELLE N° 1			PARCELLE N° 2			PARCELLE N° 3		
I	Rx	Fn	I	Rx	Fn	I	Rx	Fn

BORDEREAU DE DEPOUILLEMENT DE PLUIES SIMULEES

BASSIN.....

SITE.....

CAMPAGNE.....

PARCELLE N° 1					PARCELLE N° 2				PARCELLE N° 3			
T	P	Lr	Ry	Fy	P	Lr	Ry	Fy	P	Lr	Ry	Fy
5												
10												
15												
20												
25												
30												
35												
40												
45												
50												
55												
60				.								
Dr												

PARCELLE N° 1			PARCELLE N° 2			PARCELLE N° 3		
I	Rx	Fn	I	Rx	Fn	I	Rx	Fn

ANNEXE 2

L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS

1. GENERALITES

La sonde SOLO est destinée à mesurer l'humidité des sols. Le procédé mis en oeuvre utilise le ralentissement des neutrons rapides par les atomes d'hydrogène des molécules d'eau. L'application de ce procédé n'est pas très récent, divers modèles d'humidimètre l'utilisent déjà depuis plusieurs années, mais la sonde SOLO étudiée au Commissariat à l'Energie Atomique est originale par :

- l'emploi d'un détecteur ayant une grande efficacité, ce qui permet d'utiliser une source de neutrons de faible activité (10 milli-curie) qui ne nécessite aucune protection biologique particulière.
- Sa grande simplicité et sa grande commodité d'utilisation qui proviennent de l'application des plus récents progrès de la technologie électronique.

2. PRINCIPE

La détermination du taux d'humidité du sol par un humidimètre à neutrons* utilise le phénomène de la "diffusion élastique" des neutrons, qui peut être brièvement décrit ici de la façon suivante : lorsqu'un neutron de grande énergie est émis dans le sol par la source incluse dans la sonde (il s'agit d'une source radioactive constituée d'un mélange d'Americium et de Beryllium) il se propage en perdant peu à peu son énergie. Ce ralentissement est causé par les chocs subits avec les noyaux des atomes constituant le sol. Le neutron parvient de cette façon à l'énergie correspondant à l'agitation thermique : on dit qu'il est "thermalisé". Au cours du processus de ralentissement, la distance parcourue en moyenne par un neutron animé au départ d'une énergie donnée, dépend de la masse des noyaux atomiques qu'il rencontre. Ceux qui contribuent le plus efficacement à la thermalisation sont les noyaux de même masse que lui, c'est-à-dire, les noyaux d'hydrogène.

Or, dans le sol, l'hydrogène est essentiellement présent sous forme d' H_2O : on comprend donc que l'on puisse déterminer le taux d'humidité en mesurant le flux** de neutrons thermalisés à proximité d'une source de neutrons de forte énergie.

* Particule nucléaire élémentaire dépourvue de charge électrique.

** Nombre de neutrons traversant l'unité de surface par unité de temps.

Dans la pratique, cependant, les choses ne sont pas aussi simples :

- D'une part, en effet, le sol possède une certaine teneur en eau de constitution, liée à la présence d'argile ou de matières organiques. Cette eau a, bien sûr, le même pouvoir ralentisseur que l'eau libre.
- D'autre part, certains corps absorbent les neutrons, et leur présence dans le sol, même en très petite quantité, entraîne, pour une même teneur en eau, une baisse du flux de neutrons thermiques.

On se prévaut contre ces deux sources d'erreurs en effectuant un étalonnage préalable du milieu.

3. DESCRIPTION

L'ensemble SOLO 20 comprend les éléments suivants :

- Une sonde à neutrons contenant le détecteur et une source d'Am-Be, destinée à être introduite dans le sol, contenue dans un boîtier de protection qui comporte :
 - . Un mesureur de cote à friction avec affichage,
 - . Un dispositif de verrouillage automatique de la sonde dans le boîtier,
 - . Une protection mécanique et biologique constituée par un cylindre de polyéthylène qui permet d'effectuer des mesures de contrôle et autorise l'utilisation de source d'une activité de 40 mCi.
- Un câble coaxial solidaire de la sonde par une extrémité, l'autre étant équipée d'un connecteur haute tension à encliquetage.
- Un boîtier en acier inox abritant les circuits électroniques et la batterie d'accumulateurs.

Les accessoires suivants sont fournis avec l'ensemble SOLO 20 :

- Un réflecteur neutronique permettant d'effectuer des mesures à proximité de la surface,
- Une sangle de manutention,
- Une sacoche de portage,
- Un chargeur de batterie.

Ces éléments constituent la version de base.

3.1. Sonde à neutrons

3.1.1. Source de neutrons

La source de neutrons, du type SNA 2 (fournisseur : Service des Radioéléments Artificiels du CEA), est constituée d'un mélange Americium-Beryllium. Ayant la forme d'un tore de section rectangulaire, elle encercle le détecteur dans le plan médian de sa zone active.

L'activité de la source est de 10 mCi ou sur option 40 mCi.

3.1.2. Détecteur

La détection des neutrons thermiques est effectuée par un tube compteur à Hélium 3 du type 9319 Texlum ou équivalent. Ses principales caractéristiques sont :

- Diamètre : 25,4 mm (1 pouce),
- Longueur active : 150 mm (6 pouces),
- Longueur totale : 225 mm (9 pouces),
- Pression de remplissage : 4 atmosphères.

3.1.3. Corps de sonde et câble

La source et le détecteur sont inclus dans un tube cylindrique étanche de 300 mm de longueur et 39 mm de diamètre. De ce tube part le câble coaxial qui apporte au détecteur la haute tension nécessaire et véhicule vers le boîtier d'électronique les impulsions de tension représentatives de la détection des neutrons.

L'ensemble SOLO 20 est livré avec un câble de 5 m. On peut, à la demande, l'équiper d'un câble de longueur différente (30 m. au maximum).

On rappelle que le démontage de la sonde est interdit.

3.2. Boîtier électronique

3.2.1. Le boîtier

Il est constitué de deux demi-coques en acier inox, réunies par un système de six fixations en acier inoxydable. Chaque fixation est évidée pour permettre l'accrochage du boîtier de protection, ou le passage de la courroie de manutention dans le cas de l'utilisation en version de base.

Le boîtier renferme le circuit électronique et la batterie d'accumulateurs. Sur la face supérieure, on trouve :

- Trois embases de connecteurs à encliquetage :
 - . une coaxiale, haute tension, sur laquelle on branche le câble de liaison avec la sonde,
 - . une multicontacts, utilisée pour la sortie des résultats de comptage vers un système d'impression,
 - . une embase deux contacts, utilisée pour la recharge de la batterie ou l'alimentation par batterie extérieure 12 volts.
- Un fusible de sécurité pour la batterie interne
- Trois leviers de commande :
 - . un poussoir (à contact fugitif) marqué "Marche" servant à déclencher l'exécution d'une mesure,
 - . un inverseur marqué "Long" permettant la sélection du temps de comptage court ou long,
 - . un poussoir (à contact fugitif) marqué "Affichage" pour rappeler la visualisation de la dernière mesure.

- Une lucarne munie d'un écran transparent derrière lequel sont visibles les afficheurs électroluminescents.

Les dimensions externes du boîtier électronique sont 130 x 290 x 100 mm.

3.2.2. Le circuit électronique

Le circuit imprimé en verre époxy sur lequel sont rassemblés tous les éléments de l'électronique est fixé dans l'une des deux demi-coques qui constituent le boîtier, l'autre supportant la batterie.

3.2.3. La batterie d'accumulateurs

La batterie de marque S.A.F.T., référence 120.212, comprend 10 éléments au Nickel-Cadmium du type VR 4. Elle a une capacité de 4 Ah, sa tension nominale est 12 V. Les qualités générales de ces éléments sont :

- étanchéité,
- insensibilité aux surcharges,
- fiabilité et durée de vie exceptionnelles,
- gamme de température de stockage allant de -40 à +50°C.

3.3. Boîtier de protection

Le boîtier de protection à un triple rôle :

- Faciliter la mesure de la cote de la sonde dans le tubage, grâce à un indicateur à friction placé à la face supérieure,
- Simplifier l'introduction de la sonde dans le tubage. A sa partie inférieure, le boîtier de protection s'emboîte sur le tubage et cette action efface automatiquement un dispositif de maintien de la sonde,
- Assurer une protection mécanique et biologique supplémentaire de la sonde par un cylindre de polyéthylène qui, en outre, permet d'effectuer des mesures de contrôle.

Cette protection pourrait autoriser éventuellement l'utilisation d'une source d'activité plus élevée.

Ce boîtier est réalisé dans la même matière que le boîtier électronique. Il est fait également de deux demi-coques assemblées d'un côté par trois fixations, et de l'autre par deux pièces mâles qui peuvent s'emboîter dans les fixations évidées du boîtier électronique. Un blocage par vis pointeau rend alors solidaires les deux boîtiers. La poignée située à la partie supérieure du boîtier de protection peut alors être utilisée pour la manutention de l'ensemble.

Dans sa partie centrale, le fourreau de la sonde contient une pièce en matériau fortement hydrogéné qui fait office de milieu de référence et de protection biologique.

Les dimensions externes du boîtier de protection sont : 380 x 95 x 95 mm.

3.4. Réflecteur neutronique

Il est constitué d'une calotte de syprès percée en son centre d'un trou permettant le passage du tubage. Il est muni de deux crochets en acier inoxydable. Il doit être placé au pied de la partie aérienne du tubage si l'on doit effectuer des mesures entre la surface du sol et la cote -25 cm.

4. CARACTERISTIQUES

- Source Am-Be de 10 mCi, ne nécessitant aucune protection biologique.
- Détecteur à Hélium 3.
- Deux cycles de comptage possibles au choix de l'utilisateur :
Long (~ 80 s) et Court (~ 20 s).
- Visualisation du résultat de la mesure par trois digits plus une indication du dépassement, sur des afficheurs à LED ("Light Emitting Diodes").
- L'étalonnage réalisé par le constructeur donne 1000 pour un comptage dans l'eau quel que soit le cycle de comptage choisi (court ou long).
- Coefficient de température : variation relative de la mesure de $3 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$.

- Alimentation autonome par batteries au Cadmium-Nickel permettant 2000 mesures en cycles longs ou 6000 en cycles courts.
- Il est possible d'alimenter l'appareil par une batterie externe de 12 V.
- L'ensemble est étanche au ruissellement, à condition que le connecteur HT du câble de liaison avec la sonde soit en place (ou son bouchon), et que l'embase de la prise multibroche soit fermée par son bouchon.
- La sonde est étanche sous 1 m d'eau.
- Il est recommandé que la température à l'intérieur du boîtier électronique n'excède pas 50°C. Une température plus élevée est nuisible à la batterie d'accumulateurs.
- Dimensions :
 - . boîtier électronique : 130 x 290 x 100 mm
 - . boîtier de protection : 380 x 95 x 95 mm
 - . encombrement hors-tout de la version complète : 380 x 240 x 95 mm.
- Poids de l'ensemble : inférieur à 7 kg.

5. FONCTIONNEMENT ET UTILISATION DE L'ENSEMBLE SOLO 20

5.1. Exécution d'une mesure

La partie inférieure du boîtier de protection étant emboîtée à la partie supérieure du tubage, l'utilisateur descend la sonde dans le tubage. Pour ce faire, il met en position intermédiaire le levier de l'indicateur de profondeur placé sous la poignée, et il fait défiler le câble jusqu'à ce que la cote souhaitée, indiquée en centimètres sur le compte-tours, soit atteinte ; puis il repousse le levier en position de repos (blocage).

Agissant ensuite sur le levier de commande marqué "LONG" sur le boîtier électronique, l'utilisateur choisit un temps de comptage court ou long suivant la précision recherchée pour la mesure. Il manoeuvre ensuite le levier marqué "ON" ce qui déclenche l'exécution d'une séquence de mesure qui comporte :

- La mise en tension du détecteur qui prend environ six secondes,

- Le comptage des impulsions issues du détecteur pendant le temps choisi. Pendant le déroulement du comptage, les points décimaux de l'affichage sont allumés,
- L'apparition du résultat sur l'affichage pendant trois secondes, à la suite de quoi l'afficheur s'éteint.

Une séquence de mesure dure environ 20 ou 80 secondes suivant que l'on a choisi un temps de comptage court ou long.

En agissant sur le poussoir à levier marqué "AFFICHAGE", l'utilisateur a la possibilité de rappeler sur la visualisation le résultat de la dernière mesure effectuée, qui est automatiquement mémorisé. Cette possibilité subsiste pendant au moins 24 heures après la dernière mesure.

La persistance de la mémoire est obtenue parce que le circuit électronique est alimenté en permanence. La très faible consommation électrique du circuit (réalisé en technologie "C MOS") en dehors des séquences de comptage et de visualisation de la mesure a permis de concevoir un appareil qui est dépourvu d'un commutateur "Marche-Arrêt". Cette simplification apporte une aisance très appréciable dans l'utilisation de l'ensemble SOLO 20.

5.2. Précision des mesures

L'utilisateur doit savoir que deux mesures successives effectuées à la même position donneront toujours des résultats plus ou moins différents. Ceci est inhérent à la méthode nucléaire utilisée, qui fait appel au comptage d'événements (déttection des neutrons thermiques) dont la réalisation est aléatoire. Par suite, l'erreur de mesure est aussi aléatoire et doit être exprimée en termes de probabilité : nombre de chances sur 100, par exemple, pour qu'elle soit inférieure à telle valeur.

La théorie et l'expérience montrent que dans le domaine de la radioactivité, les résultats de comptages obéissent à une loi de probabilité connue sous le nom de loi de Poisson. Suivant cette loi, et compte tenu des conditions dans lesquelles sont réalisées les mesures dans l'ensemble SOLO 20, on devra considérer, pour un résultat affiché N, que l'erreur relative est inférieure à :

$$\pm \frac{1}{\sqrt{10N}} \quad \text{pour un temps de comptage court}$$

ou

$$\pm \frac{1}{\sqrt{40 N}} \quad \text{pour un temps de comptage long}$$

avec une probabilité de 68 %.

Ou bien, on pourra admettre, si l'on préfère, que l'erreur relative a une probabilité de 95 % d'être inférieure à deux fois les valeurs ci-dessus.

Par exemple, pour un résultat affiché de 250, la vraie valeur se trouve, avec une probabilité de 68 %, dans un intervalle de $\pm \frac{1}{\sqrt{2500}} = \pm 2\%$ autour de 250 si le comptage

est effectué en temps court, et de $\pm \frac{1}{\sqrt{10000}} = \pm 1\%$ s'il est effectué en temps long.

Enfin il faut noter, si l'on effectue un certain nombre n de mesures au même point et dans des conditions de durée identiques, que l'on doit prendre pour valeur de la mesure, la moyenne arithmétique des n résultats, et que l'erreur relative définie ci-dessus est à diviser par \sqrt{n} .

6. PRATIQUE D'EMPLOI

6.1. Site de mesure

6.1.1. Choix

L'emplacement du tubage doit être représentatif du site à étudier (infiltration de l'eau, évapotranspiration, ...). On tiendra compte du microrelief, de la densité et de la répartition du couvert végétal, des voies d'accès.

6.1.2. Protection

L'opérateur doit absolument éviter de marcher ou de piétiner autour du tubage pendant les mesures, sinon le lieu n'est plus représentatif.

Il est conseillé de placer quatre piquets autour du tube et de les relier par un fil métallique, délimitant ainsi une zone d'exclusion de 40 cm de côté environ.

La végétation doit être protégée de toute meurtrissure.

6.2. Tubage

6.2.1. Choix du tubage

Le tubage devra avoir un diamètre extérieur de 45 mm pour respecter les conditions d'étalonnage de la sonde.

Deux types de matériaux sont proposés :

- Aluminium AG3 (\varnothing 41-45 mm) qui représente le meilleur matériau, transparent aux neutrons mais dont le prix est élevé,
- Plastique PVC (\varnothing 42-43-45 mm) qui représente le matériau de moindre coût, surtout en version gaine téléphonique, mais qui absorbe 20 % du flux neutronique.

Le bout du tube doit être, soit muni d'un embout conique soudé, soit chanfreiné pour permettre une introduction sans accrochage de la paroi du sol. Il est recommandé que le fond du tube soit étanche quand il y a risque de remontée de nappe.

6.2.2. Forage du trou

A l'aide d'une tarière manuelle ou mécanique de diamètre 44-45 mm, on fore un trou jusqu'à la profondeur d'investigation désirée.

L'opération est délicate, Il faut éviter toute excavation dans la paroi qui entraînerait par la suite, soit un défaut de comptage en milieu non saturé, soit un excès en zone noyée.

La présence de cailloux est une cause de difficulté. La tarière, en forçant, a tendance à agrandir le diamètre du trou ; il est alors préférable de choisir un autre trou. Au cas où le sol serait trop caillouteux, il n'existe pas d'autre solution que de creuser une fosse et de reconstituer le sol autour du tube.

6.2.3. Pose du tubage

Le tubage est introduit en force dans le trou. On prend la précaution, lorsqu'il ne reste plus qu'un mètre à enfoncer, de placer autour et contre le tube un tas de sol sec réduit en poudre. Cette poudre pénètre entre la paroi du trou et le tube à la faveur des vibrations et colmate les vides éventuels.

On dispose ainsi d'un tubage en contact étroit avec le sol, sans risque d'infiltration préférentielle le long de la paroi du tube en cas de pluies ou d'irrigations.

6.2.4. Hauteur aérienne du tubage

La partie aérienne du tubage doit être supérieure à 20 cm pour permettre d'effectuer la mesure à la cote -10 cm, sans ôter l'indicateur de profondeur. En effet, la longueur de la sonde située au-dessus de la source est d'environ 30 cm.

6.2.5. Protection du tubage

Contre la pluie le tubage est coiffé d'un bouchon ou d'un capuchon.

6.3. Mesures

6.3.1. Climat

L'appareil ne doit pas être laissé en plein soleil.

Le boîtier est étanche à la pluie seulement. La sonde à neutrons, pour sa part, peut être noyée sous 1 m d'eau.

6.3.2. Premières mesures

En début de journée, il convient d'effectuer 3 à 5 mesures à vide pour stabiliser l'appareil.

6.3.3. Mesure de référence

Une ou plusieurs fois au cours des séries de mesures, la sonde sera introduite dans un fût de 200 l rempli d'eau. Cette mesure de référence doit donner un résultat se tenant dans les limites de tolérance des fluctuations statistiques du comptage (Cf. paragraphe 5.2.). Sinon, c'est signe que la batterie n'est plus assez chargée, ou qu'il y a une défectuosité dans l'appareillage.

6.3.4. Relevé d'un profil neutronique

La sonde est introduite dans le tubage de telle manière que la source se trouve au niveau de la mesure la moins profonde.

L'opérateur choisit son prétemps long ou court, et effectue la mesure.

Après avoir noté le résultat, il descend la sonde à la cote de la 2ème mesure et renouvelle le comptage.

Ainsi de suite jusqu'à la dernière cote.

Généralement les mesures sont espacées de 10 cm ou de multiples de 10 cm.

Certains utilisateurs préfèrent à chaque profondeur effectuer deux comptages en temps court et réalisent un 3ème comptage de contrôle au cas où l'écart entre les deux premières mesures serait supérieur à la fluctuation statistique attendue (Cf. paragraphe 5.2.).

6.3.5. Mesure de surface

La mesure la plus proche de la surface sera effectuée à -15 cm, avec la mise en place du réflecteur neutronique (calotte sphérique en polyéthylène corrigeant les mesures dans la zone 15-25 cm).

La cote -15 cm est choisie de telle sorte que la mesure soit encore valable si la surface du sol s'affaisse de 2-3 cm (tassemement) au cours du temps.

6.3.6. Programme de relevé sur un tubage

Les mesures neutroniques seront répétées à des fréquences variables sur un même tubage, plusieurs fois par jour dans le cas d'analyse hydrodynamique du sol, plusieurs fois par an en suivant l'alimentation en eau d'une culture.

Il est important d'effectuer les mesures toujours aux mêmes cotes par rapport au tubage et non pas par rapport à la surface du sol qui est une variable. On note lors du premier relevé, les cotes des mesures par rapport au haut du tube, le compteur indiquant zéro à la position hauteur maximale de la sonde à neutrons. On maintient ces cotes pendant toute la durée de la campagne de mesure.

6.3.7. Cas particulier des tubes horizontaux

Plusieurs organismes (ITCF, ORSTOM, BRL, ...) préfèrent mettre en place dans le sol des tubages horizontaux de 30 m de long. L'inconvénient d'avoir à reconstituer le sol dans la tranchée, est largement compensé par la plus grande précision de mesures (meilleur échantillonnage) et l'absence de perturbation au niveau de la surface du sol.

6.4. Etalonnage

6.4.1. Equation de la droite d'étalement

1°) - A densité sèche constante : $N = a Hv + b$

N = Comptage donné par la sonde

Hv = Humidité volumique en pour cent

a et b = Coefficients spécifiques du sol étudié.

2°) - A densité sèche variable : $N = (\alpha \rho_s + \beta) Hv + \gamma \rho_s + \delta$

ρ_s = Densité sèche du sol

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = Coefficients spécifiques du sol.

Les coefficients sont variables suivant les sols (a varie ainsi de 9 pour les sols argileux contenant des éléments à forte absorption neutronique, à 14 pour des sols sableux siliceux).

En effet le sol contient non seulement de l'eau libre mais aussi :

- de l'eau de constitution (14 % dans le cas du kaolin),
- des éléments absorbants (Cl, Mn, terres rares, ...) en teneur variable.

Il est à noter que la courbe d'étalement n'est plus linéaire en dessous de 5 % d'humidité volumique totale.

N.B. : La sonde SOLO 20 peut être munie sur demande d'un câble de 30 m.

6.4.2. Etalonnage sur le terrain

Il s'agit de comparer les mesures neutroniques aux mesures gravimétriques.

$$N = f(H_v) = f(\rho_s \cdot H)$$

H = Humidité pondérale mesurée par séchage à l'étuve.

On place un ou deux tubages dans un sol relativement sec recueillant les carottes qui fournissent l'humidité pondérale. Dans l'heure qui suit, on relève les mesures neutroniques. Ainsi à chaque cote on a un comptage neutronique N1 et une humidité pondérale H1.

Lorsque le sol est humide (48 h après un fort apport d'eau), on relève le profil neutronique, on prélève des échantillons de sols à la tarière pour déterminer les humidités pondérales, enfin en creusant une fosse on mesure les densités.

Ainsi à chaque cote on a un comptage neutronique N2, une humidité pondérale H2 et une densité sèche.

Ces valeurs sont portées sur graphique (N sur l'axe des ordonnées, H. sur l'axe des abscisses). On trace les droites de corrélations qui donnent les droites d'étaillonnages par tranches pédologiques de sol.

L'opérateur devra s'assurer qu'aux mesures neutroniques correspond une même mesure de référence dans l'eau ; il rapportera sinon toutes les mesures à une valeur eau de 1000.

6.4.3. Etalonnage sur bloc d'analyse neutronique

Un mode plus simple d'analyse consiste pour l'utilisateur à adresser au C.E.N. Cadarache* des échantillons de sol (pour chacun 500 g de terre broyée à 2 mm et séchée à 105°C). Ces échantillons sont soumis à divers flux de neutrons pour déterminer leurs propriétés de diffusion et d'absorption et fournir les coefficients α , β , γ , δ de la courbe d'étaillonnage.

Il convient, de préférence, de prendre des échantillons sur une tranche de 10 à 20 cm, dans des horizons caractérisés. Si les écarts sont élevés dans un même profil, on procèdera à des analyses intermédiaires complémentaires.

* DB/SRA - M. MARCESSE - B.P. 1 - 13115 St-Paul-Lez-Durance
Prix de l'analyse app. 1975 : 180 F/un, 150 F/un si série de 10 échantillons et plus.

MESURES A L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS

SITE : PARCELLE : PLUIE : DATE :

HEURE	DÉBUT :	MESURES DE REFERENCE	DÉBUT :
	FIN :		FIN :

PROF. N°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
1															
2															
3															
M															

SITE : PARCELLE : PLUIE : DATE :

HEURE	DÉBUT :	MESURES DE REFERENCE	DÉBUT :
	FIN :		FIN :

PROF. N°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
1															
2															
3															
M															

MESURES A L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS

SITE : PARCELLE : PLUIE : DATE :

HEURE DEBUT : MESURES DE
FIN : REFERENCE DEBUT :
FIN :

PROF N°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
1															
2															
3															
M															

SITE : PARCELLE : PLUIE : DATE :

HEURE DEBUT : MESURES DE
FIN : REFERENCE DEBUT :
FIN :

PROF N°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
1															
2															
3															
M															

L'HYDROLOGIE DE RESEAU

**LE BASSIN DE L'HERAULT
LA MESURE DES DEBITS
LA TOPOGRAPHIE EN HYDROLOGIE**

Présentation

L'Hérault, petit fleuve côtier méditerranéen, naît dans les Cévennes, sur le flanc méridional de l'Aigoual. Dès ses sources, malgré une altitude de 1 280 m., il participe au monde méditerranéen et plus particulièrement au monde cévenol. C'est vouloir suggérer au lecteur le caractère éminemment torrentiel de ce fleuve dont les crues sont souvent soudaines et foudroyantes.

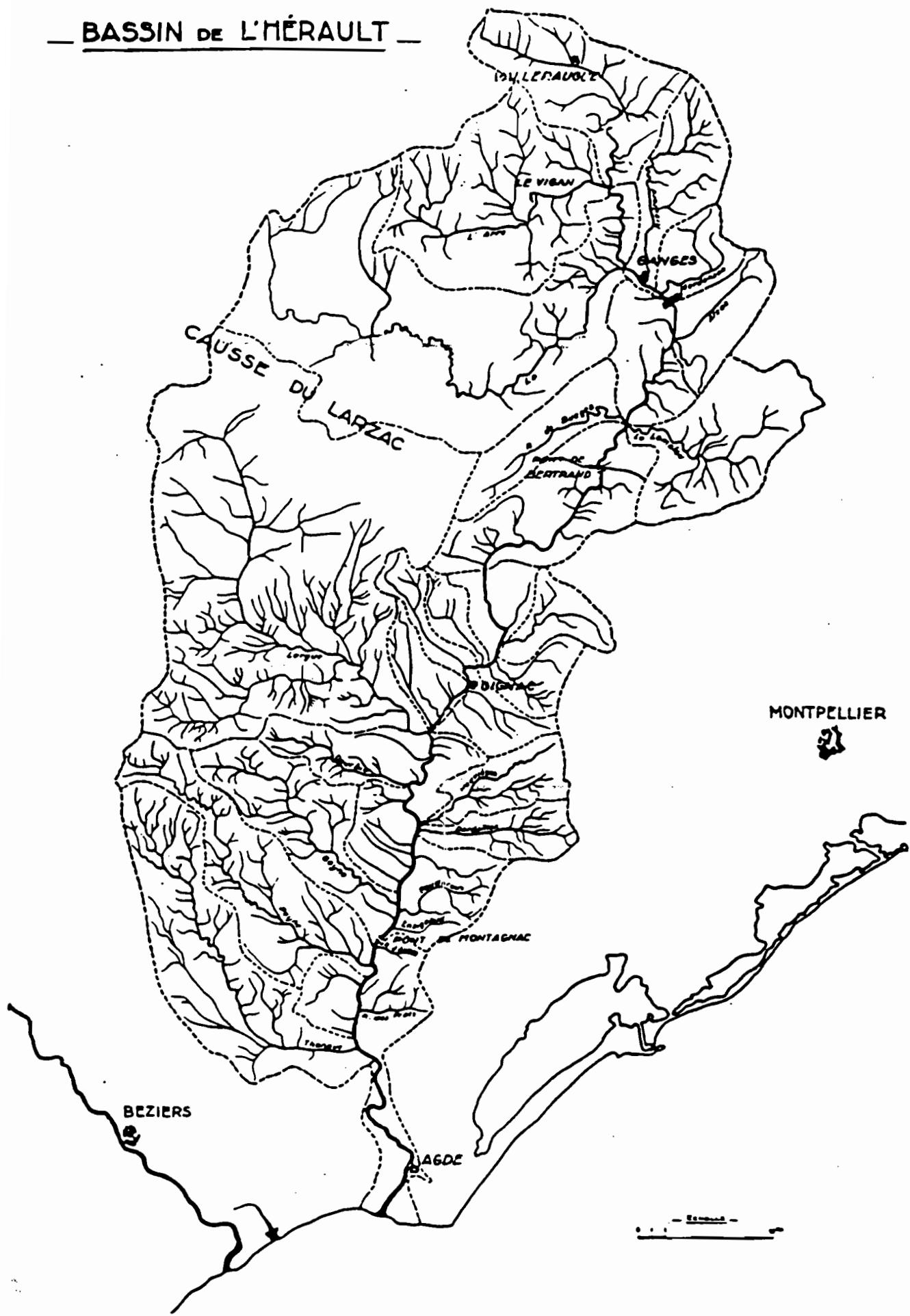
Cependant, l'Hérault se singularise au sein des rivières cévenoles. La cause principale de cet individualisme hydrologique est sa position, d'une part à l'extrême Ouest du rempart cévenol là où ce dernier a été rompu par l'importante avancée calcaire des plateaux jurassiques, et, d'autre part, en bordure d'une zone de subsidence dans laquelle les variations du niveau de base ont permis l'élaboration d'une plaine mio-pliocène. Ainsi, ce fleuve s'est installé dans un bassin de 2 500 km² d'où la torrentialité est loin d'être exclue. Elle serait peut-être même plus développée que dans les bassins versants voisins dans la mesure où la partie supérieure du réseau fluvial, très évoluée, avec pentes torrentielles (44 %) et point de convergence à Ganges est relayé dans ses effets par les bassins « gouttières » de la plaine mio-pliocène, plus jeunes mais tout aussi virulents. Ce caractère qui évoque en nous l'image d'un oued se gonflant subitement en crue d'une puissance inouie se trouve ici légèrement atténué.

Ceci parce que l'Hérault est une rivière méditerranéenne au régime pluvial, relativement bien alimentée (module de 44,5 m³/s et débit spécifique de 17,8 l/s/km²), car elle s'inscrit dans le volume montagneux du rebord du Massif Central et plus particulièrement dans celui du Massif de l'Aigoual. Ce n'est en rien un organisme à maigre débit spécifique, et même vers les sources pour quelques dizaines de km², son abondance rappelle presque les chiffres alpestres ou pyrénéens déjà honorables (à l'Aigoual, le débit spécifique est de 54,182 l/s/km²). Cependant il donne fréquemment l'impression d'une grande faiblesse hydrique ; impression fausse d'ailleurs pour certaines branches alimentées par des sources vauclusiennes comme la Foux.

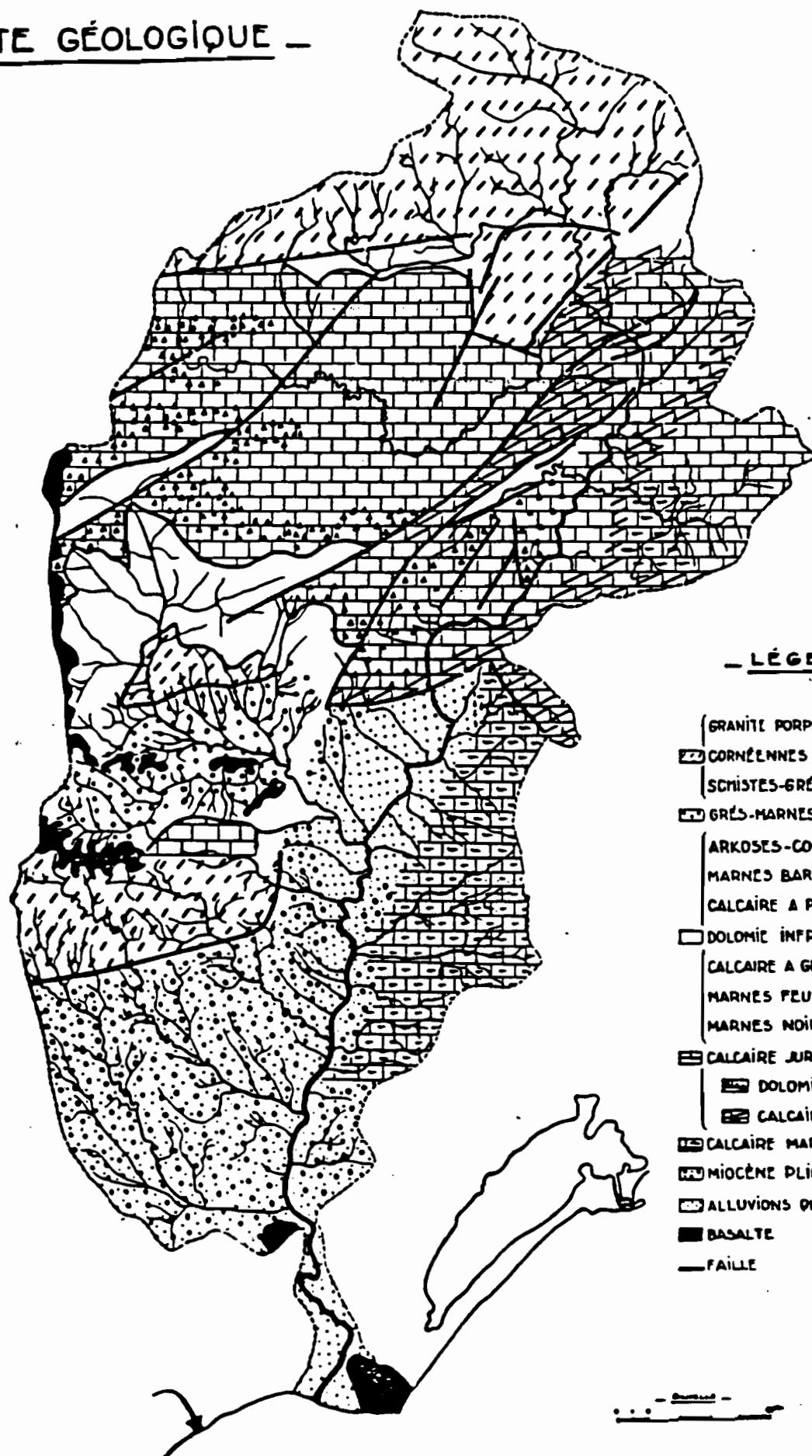
Mais, dans l'ensemble, l'immodération ~~est~~ grande. Elle prédomine à cause d'un climat à sécheresse très sensible ~~et à pluies exécutives~~ et ultra massives qui se caractérisent parfois par des intensités exceptionnelles : on enregistra peut-être à Valleraugue, lors de la crue de septembre 1900, un taux horaire de 95 mm, c'est-à-dire un débit pluvial de 26.388 l/s/km² pendant 10 heures. D'ailleurs, les débits pluviaux peuvent varier entre 20 et 60.000 l/s/km². Ainsi des crues énormes et soudaines ont lieu sur la plupart des éléments du bassin à la fin de l'été et au début de l'automne, même dans les régions moyennes, par l'effet des pluies frontales. Aussi, dès l'amont de Ganges, l'Hérault doit pouvoir débiter des maxima très importants, quasi-ardéchois (2.500 m³/s et peut-être plus à Ganges), mais il y a moins de certitude dans les bassins calcaires. Et cependant, les crues paraissent relativement modestes car l'Hérault dans son cours moyen et inférieur paraît nettement moins terrible par km² que d'autres rivières cévenoles et en tout cas que l'Ardèche et le Gardon vers Ners. Cela tient à de vastes aplatissements sur les 50 km du cours inférieur, puis surtout à une disproportion hydrologique entre l'Hérault, la Lergue et les petits affluents de laval, qui empêche les concordances monogéniques lors d'une seule averse ; en outre, ces averses ne paraissent pas pouvoir survenir fréquemment partout avec une très grande force. C'est là l'origine des différents types de crue qui affectent soit le haut du bassin (septembre 1890 ou 1958), soit le bassin inférieur (1875) et, plus rarement, l'ensemble du bassin (1907). Très fréquentes, 146 par siècle, elles peuvent se renouveler plusieurs fois l'an.

Puissance, soudaineté et parfois même brièveté, voilà ce qui caractérise le régime de l'Hérault et qui fait de lui au même titre que les autres rivières cévenoles, l'un des cours d'eau les plus torrentiels de France.

BASSIN DE L'HÉRAULT



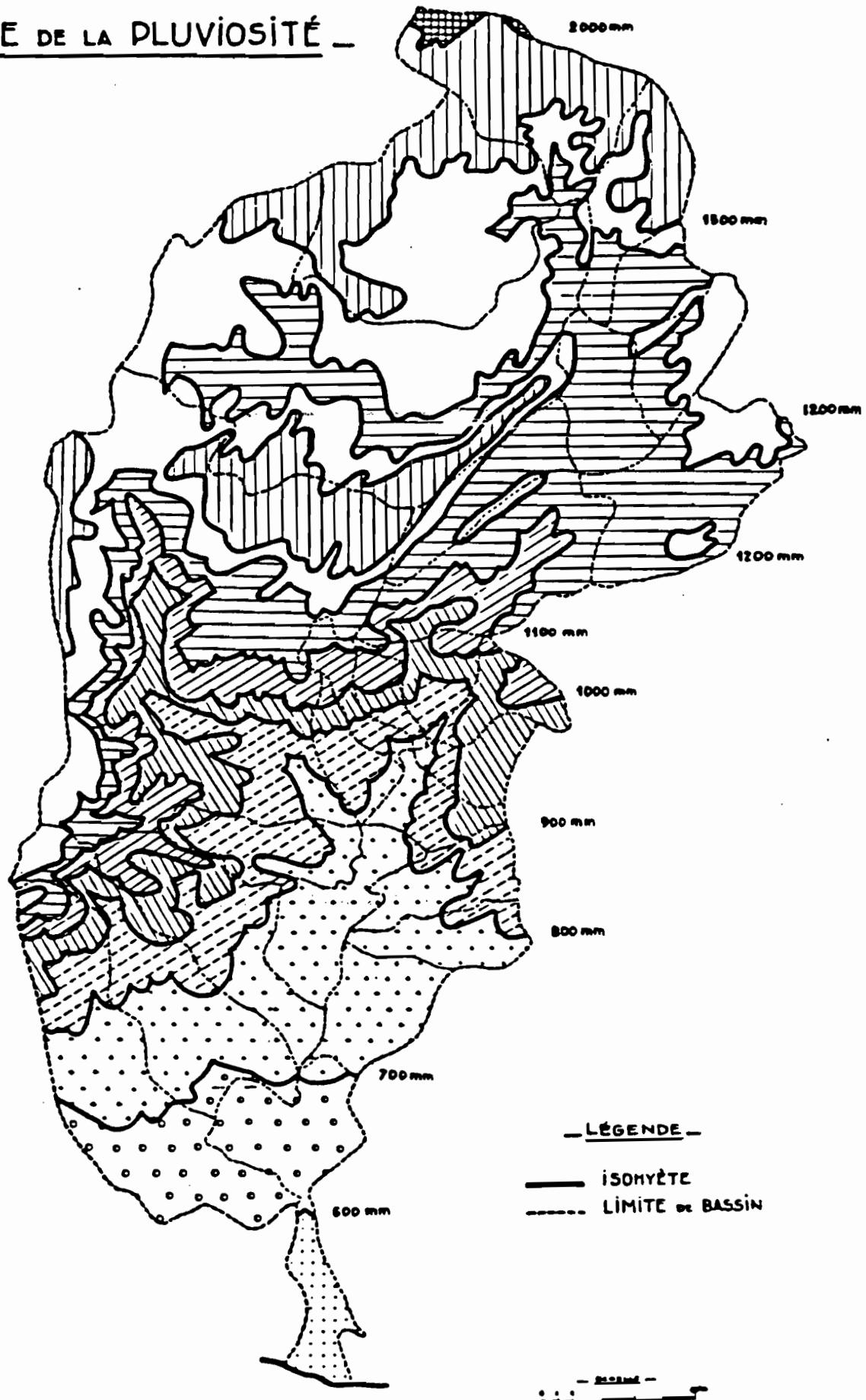
- CARTE GÉOLOGIQUE -



- LÉGENDE -

- GRANIT PORPHYROÏDE Y'
- CORNÉENNES S. & Y'
- SCHISTES-GRÈS DU POSTDAMIEN S. &
- GRÈS-MARNES DU PERMIEN P
- ARKOSSES-CONGLOMÉRATS L...
- MARNES BARRIOLÉES L"
- CALCAIRE À PLAQUETTES I'
- DOLOMIE INFRALIASIQUE I"
- CALCAIRE À GRAINS DE QUARTZ I"
- MARNES FEUILLETÉES I"
- MARNES NOIRES I"
- CALCAIRE JURASSIQUE CRÉTACÉ L...C
- DOLOMIE J...J"
- CALCAIRE RÉCIPAL J...J"
- CALCAIRE MARNES ÉOCÈNES E...
- MIOCÈNE PLIOCÈNE
- ALLUVIONS QUATERNAIRES
- BASALTE
- FAILLE

— CARTE DE LA PLUVIOSITÉ —



AIGOUAL (Massif de l')

Carte Michelin n° 20 plus 5, 6, 15, 16.

Tracées à travers les jeunes forêts dont se couvre la montagne ou sur des crêtes d'où les vues sont très étendues, les routes qui sillonnent le massif de l'Aigoual sont presque toutes pittoresques. De l'observatoire qui surmonte le sommet, on embrasse, par temps clair, un immense panorama. Les flancs du massif sont creusés de gorges impressionnantes comme celle de la Dourbie (p. 72), de la Jonte (p. 88) et du Trévezel (p. 72).

L'Aigoual fut, à partir de juillet 1944, le centre de l'important maquis « Aigoual-Cévennes » dont le P.C. était installé à l'Espérone.

JN PEU DE GÉOGRAPHIE

Le gigantesque château d'eau. — Massif granitique et schisteux, l'Aigoual (alt. 567 m) est le point culminant de la partie Sud des Cévennes proprement dites. C'est un des nœuds hydrographiques les plus importants du Massif central : son sommet condense à la fois les nuages venus de l'Atlantique et les vapeurs méditerranéennes qui s'y combattent constamment ; de là, son nom Aqualis (l'aqueux, le pluvieux). La hauteur d'eau, en année moyenne, atteint 2,25 m.

Les eaux, il les partage entre deux régions très dissemblables. Sur le versant méditerranéen, les gorges profondes alternent avec les crêtes schisteuses extrêmement découpées ; à l'Ouest, au contraire, vers l'océan, des pentes douces souduent le massif au vaste pays calcaire des Causses.

Le reboisement de l'Aigoual. — Il y a cent ans, le massif présentait l'aspect désolant d'une montagne dénudée et pelée.

En 1875, Georges Fabre, garde général des Eaux et Forêts, entreprend son reboisement. D'abord il prouve qu'une partie du sable comblant le port de Bordeaux provenait de l'Aigoual. Puis il réussit à faire voter une loi l'autorisant à acheter des terrains communaux ou particuliers, ce qui lui permet d'adopter le système du « périmètre extensif », c'est-à-dire de remplacer le mince rideau d'arbres destiné à retenir les terres à bordure des rivières par de larges surfaces plantées. Peu à peu, malgré l'hostilité de certaines communes qui refusent de céder leurs terrains de pacage, malgré la résistance des bergers qui n'hésitent pas à mettre le feu aux jeunes plants, Fabre arrivera à redonner à la montagne sa parure de forêts.

Le bienfaïsant forestier. — Fabre ne s'est pas contenté de reboiser. Il a développé autour de l'Aigoual le réseau des routes et des sentiers, restauré des maisons forestières, organisé des arboretums (tel celui de l'Hort-de-Dieu, voir p. 48) pour l'étude de l'acclimatation des essences, construit un observatoire destiné aux recherches météorologiques.

VISITE

Itinéraire décrit ci-après permet de traverser complètement le massif et d'atteindre en voiture le sommet même de l'Aigoual. On le suivra de préférence dans le sens Meyrueis — le Vigan, afin de parcourir à la descente la très belle route du col du Minier ou la vallée de l'Arre.

Les routes peuvent être obstruées par la neige de novembre à mai.

L'Aigoual est un lieu privilégié du tourisme pédestre : il est situé à la croisée des sentiers de la Grande Randonnée GR 6 (Alpes-Océan) et GR 7 (Vosges-Pyrénées), qui, dans le massif, s'enrichissent de nombreuses variantes, dont le GR 66 qui fait l'objet d'un opoguide intitulé « Sentier du Tour de l'Aigoual ». Voir les adresses des associations et fédérations de randonnées en fin de volume.

I DE MEYRUEIS AU MONT AIGOUAL

32 km — environ 3 h — schéma p. 48

Leysias. — Page 103.

Depuis Meyrueis, la montée au col de Montjardin s'effectue d'abord en forêt, sur la rive gauche du Bétuzon, puis à la lisière du causse Noir. Du col, vue très étendue sur le causse, sur celui du Larzac et, peu après, sur les montagnes de l'Aigoual et de l'Espérone. La route entre ensuite dans une forêt où dominent les mélèzes. Taillée en corniche dans les schistes, elle offre de belles échappées sur les anciennes mines de manganèse et de fer de Villermagne. Plus loin, on découvre sur la droite le très curieux arche rocheux de « l'Alcôve », où le Bramabiau tombe en cascade après un parcours souterrain dans le causse de Camprieu.

Le Bramabiau. — Page 59.

Quelques centaines de mètres plus loin on croise la route des gorges du Trévezel* (description p. 72).

Après la traversée du petit causse de Camprieu, la route atteint les bords du Trévezel et pénètre dans les reboisements de l'Aigoual (hêtres et conifères).

Col de la Sereyrède. — Il est situé à 1 300 m d'altitude sur la ligne de partage des eaux. Au pied du col se creuse la vallée de l'Hérault que dominent au loin les serres cévenoles. Derrière la maison forestière, on a une jolie vue sur la vallée du Bonheur. Le col de la Sereyrède était un des passages empruntés par la grande draille du Languedoc, l'une des larges pistes de transhumance foulées régulièrement chaque année, au mois de mai, par les moutons des Garrigues languedociennes montant aux pâturages de l'Aubrac, du mont Lozère, de la Margeride (au Nord, le D 18 emprunte le parcours de la draille, au Sud le GR 7 la suit jusqu'à l'Espérone où elle oblique vers Valleraugue). On reconnaît encore ces drailles, presque abandonnées maintenant, aux saignées qu'elles tracent dans le paysage des serres cévenoles.

AIGOUAL (Massif de l')***



Aujourd'hui c'est en camion que la plupart des 25 000 bêtes sont transportées jusqu'à leurs pâturages d'été.

Une belle route relie le col de la Sereyrède au sommet du mont Aigoual. Après magnifiques vues plongeantes sur la vallée de l'Hérault où serpente la route Valleraugue, on pénètre en forêt.

Sentier des Botanistes. — 1,5 km avant d'arriver au sommet, un panneau indique le sentier 20 mn à pied. Formant une boucle de 1 km contournant le sommet de Trépaloup, sentier passe au-dessus de l'Hort-de-Dieu (jardin de Dieu), un arboretum créé par botaniste Charles Flahault, aidé de Georges Fabre, pour étudier la croissance d'essences exotiques. Le sentier offre ensuite de très belles vues sur le versant Sud de l'Aigoual, ses crêtes schisteuses et, au-delà, la succession des serres cévenoles, passant sur les versants Est et Nord couverts de forêts.

En atteignant la crête de l'Aigoual, la vue se dégage sur les Cévennes et le causse Méjean.

* * * **Mont Aigoual.** — L'observatoire météorologique, construit en 1887 au sommet par l'administration des Eaux et Forêts, occupé actuellement par la Météorologie Nationale, est particulièrement bien placé. Dominant les bassins du Gard, de l'Hérault et du Tarn, il permet d'enregistrer notamment la direction et la vitesse des vents qui amènent soit les pluies méditerranéennes, torrentielles et dévastatrices, soit des pluies océaniques favorables à la végétation.

Les conditions de visibilité exceptionnelles — des observateurs ont pu reconnaître simultanément le mont Blanc et la Maladetta — sont le privilège de certains mois d'hiver (janvier). En été, le panorama de l'Aigoual étant souvent brumeux, les touristes auront intérêt à atteindre le sommet en dehors des heures chaudes de la journée. Les plus courageux pourront monter de nuit afin d'assister au lever du soleil. C'est en septembre que la première heure du jour est le plus propice à une bonne visibilité. Par temps clair, c'est un spectacle grandiose.

De la table d'orientation érigée au sommet de la tour de l'observatoire, on découvre un immense panorama*** sur les Causses et les Cévennes et, lorsque le temps est clair, sur les monts du Cantal, le mont Ventoux, les Alpes, la plaine du Languedoc, Méditerranée et les Pyrénées.

Le Parc national des Cévennes (voir p. 28) organise en été des promenades commentées (1 h), autour du sommet.

Données relatives à la climatologie de la
région de MONT AIGOUAL (altitude : 1567.0 m)
département : Gard

Cours d'eau Hérault

Station en service depuis le : Octobre 1960 (1)

Surface du bassin versant naturel: 756 Km²Surface du bassin versant effectif: Km²

Type de station: naturelle

Type de contrôle: retrécissement

Repère altimétrique de référence.

Nature: repère N.G.F. p"fn 3

Emplacement: sur rocher R.G.

Cote: 131,37 N.G.F

Altitude du zéro de l'échelle: 126,31 N.G.F

Nombre d'éléments de 1m 12

Limnigraphie : Marque NEYRPIC Type Télémètre Réduction 1/10 Rotation 5 mm/heure

Date d'installation: Juin 1969

Relevés: Hauteurs d'eau ou Limnigrammes.

Événements Envoyés tous les 15 jours

Par: Agent S.R.A.E.

Origineux conservés par: S.R.A.E.

Mode de jaugeage: (emplacement, point d'injection et de prélèvement, matériel utilisé, etc...)

(Repères sur le croquis)

Moulinet dilution

Mesures réalisées

1969-1976 : 81

1977 : 6

Calcul des débits moyens journaliers.

Débits calculés par: S.R.A.E. S.H.

Méthode de calcul: Programme A.R.H.M.A.

Marnage maximum observé: 7.23 m 790 m³/s

Écoulements moyennes de référence Mensuelles (période 69-77) et Annuelle

m ³ /s	64.2	53.9	29.5	25.5	15.8	13.3	5.51	4.73	12.5	32.0	19.0	26.4	24.6
litres/Km ²	84.9	71.3	39.0	33.7	20.9	17.6	7.29	6.26	16.5	42.3	25.1	37.6	32.5
mm	227.4	172.5	104.4	87.3	55.9	45.6	19.5	16.8	42.8	113.3	65.1	100.7	1052

Pluviomètres et pluviographes intéressant le B.V., % du B.V. intéressé:

Précipitations: moyennes de référence Mensuelles (période

) et Annuelle

mm													
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

DIVERS Influences amont

Modifications du B.V.:

Arrêt de fonctionnement: (1) 1965 à Juin 1969 - remplacée par St-Julien-la-Nef

Observateur: Agent S.R.A.E.

Service exploitant: S.R.A.E. LANGUEDOC-ROUSSILLON

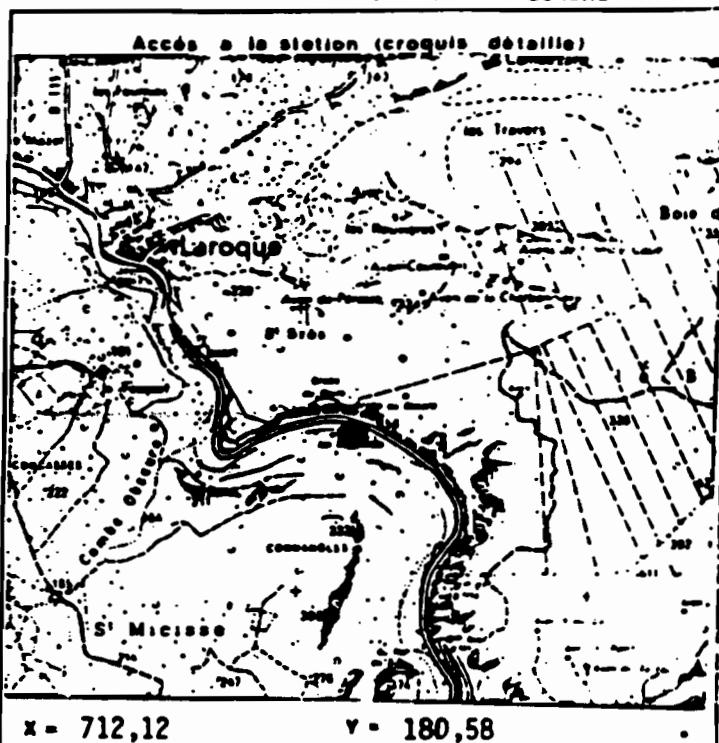
Adresse et téléphone: B.P. 1175
34009 MONTPELLIER CEDEX

Tél. : (67) 92.40.60

Station de jaugeage Laroque

CARTE IGN n° XXVII-42 (1-2)

Echelle 1/25000



Courbes de tarage sans extrapolation:

Première:	0,070	à	555	m ³ /s	(19 69/10))
Deuxième:	à			m ³ /s	(19 /10))
Troisième:	à			m ³ /s	(19 /10))
Quatrième:	à			m ³ /s	(19 /10))
Cinquième:	à			m ³ /s	(19 /10))
Sixième:	à			m ³ /s	(19 /10))

Précipitations: moyennes de référence Mensuelles (période													
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

mm													
----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

DIVERS Influences amont													
-------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

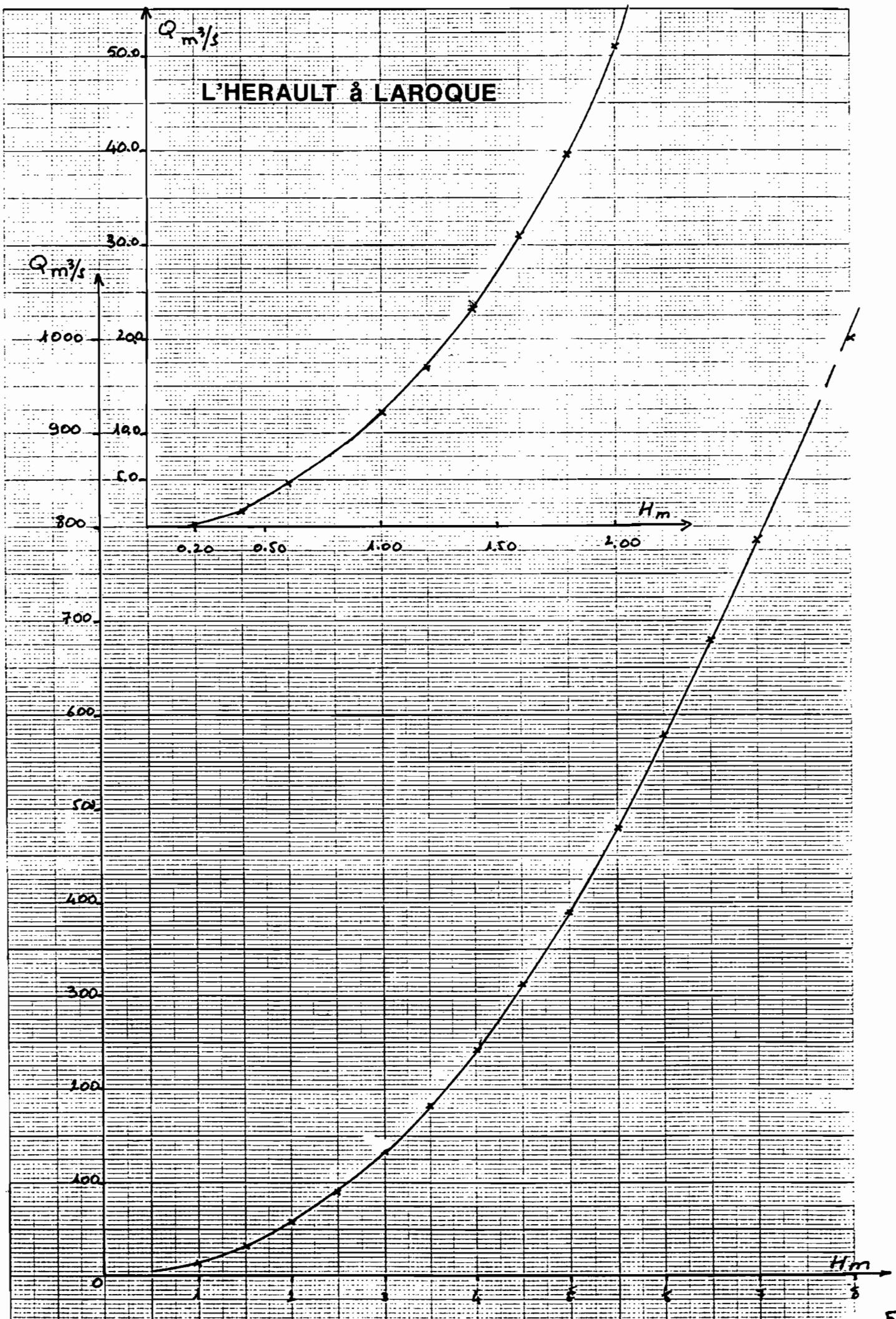
Modifications du B.V.:													
------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Arrêt de fonctionnement: (1) 1965 à Juin 1969 - remplacée par St-Julien-la-Nef													
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Date d'établissement de la fiche: 1978

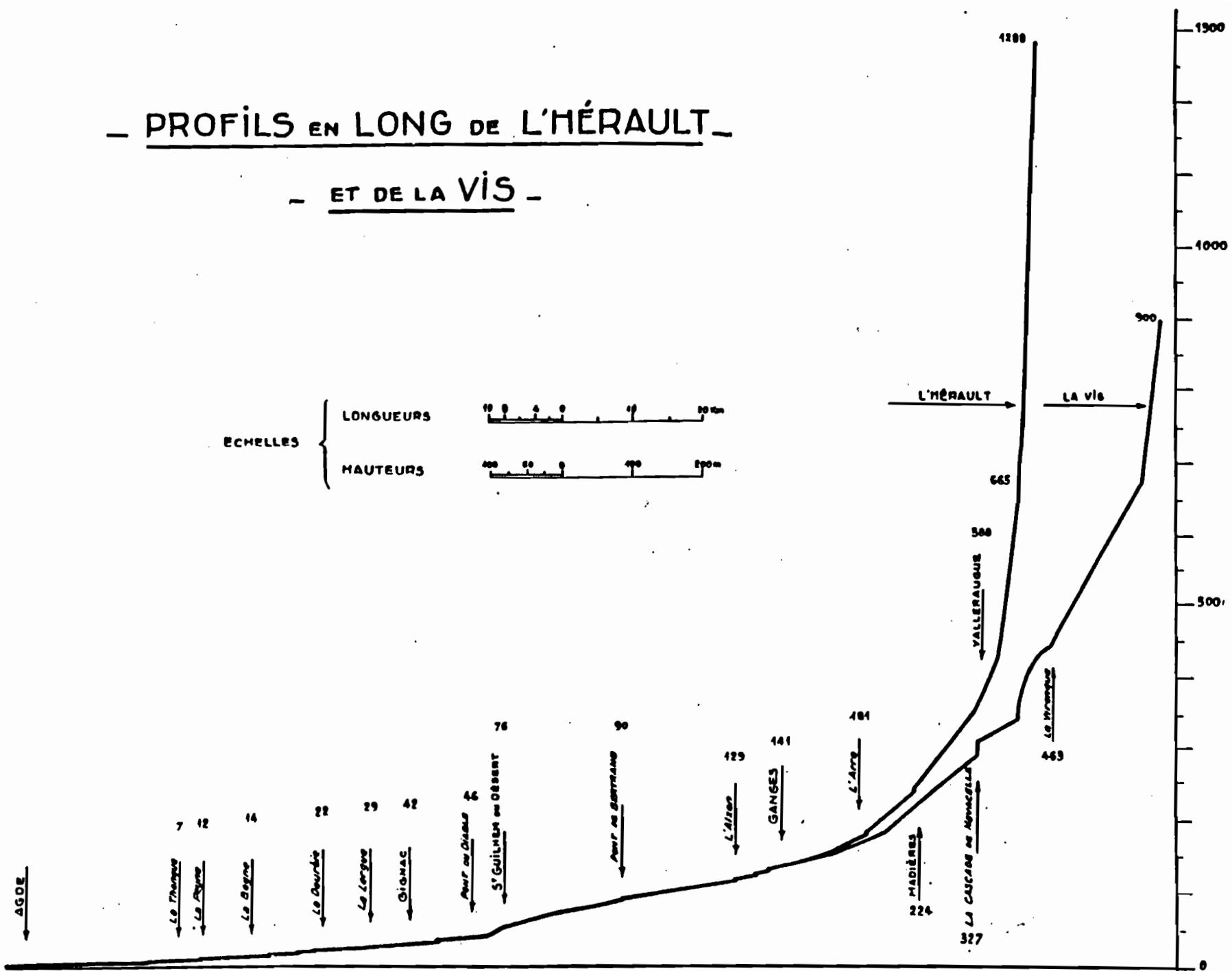
Date d'établissement de la fiche précédente: 1977

Nombre de fiches précédentes: 7

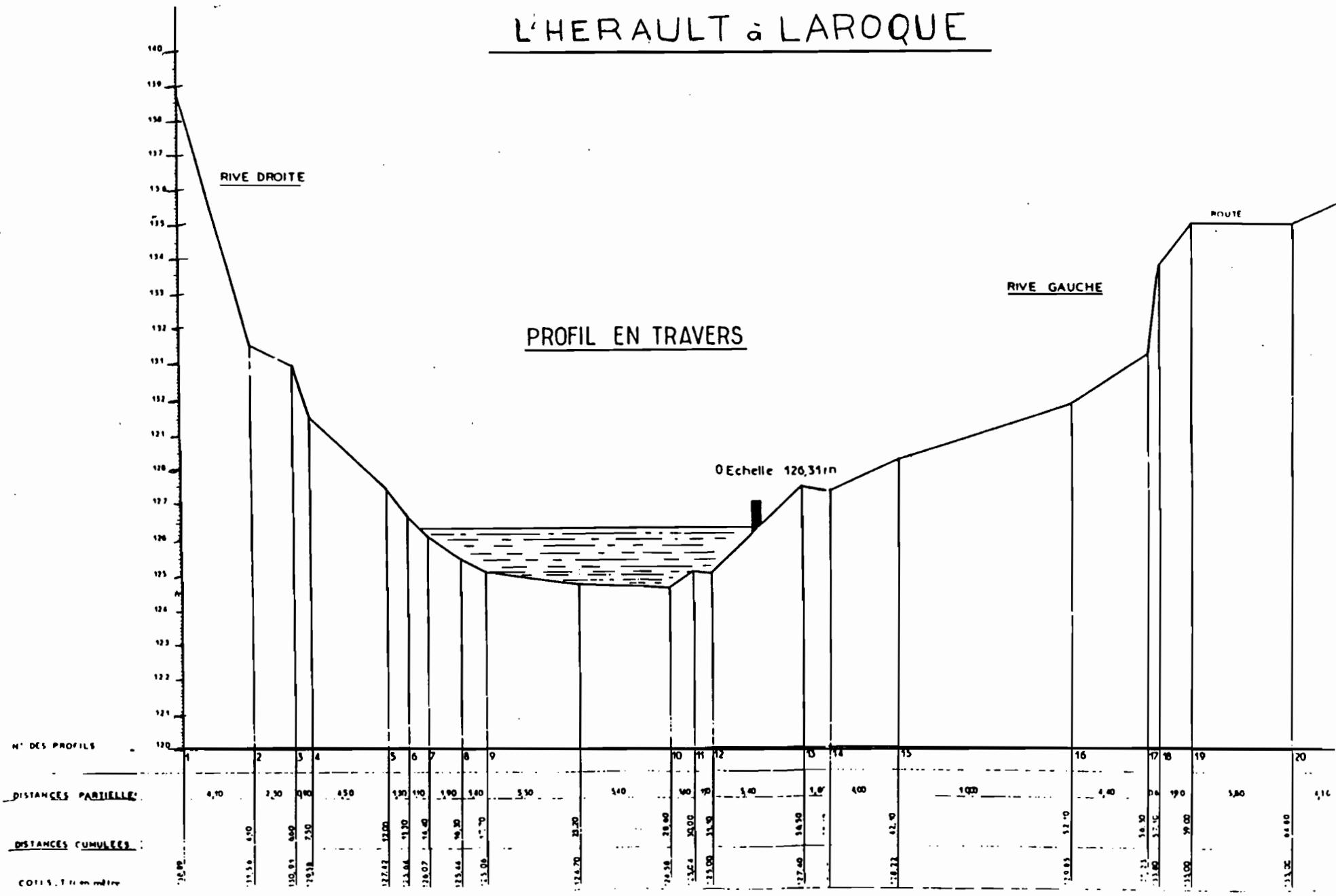


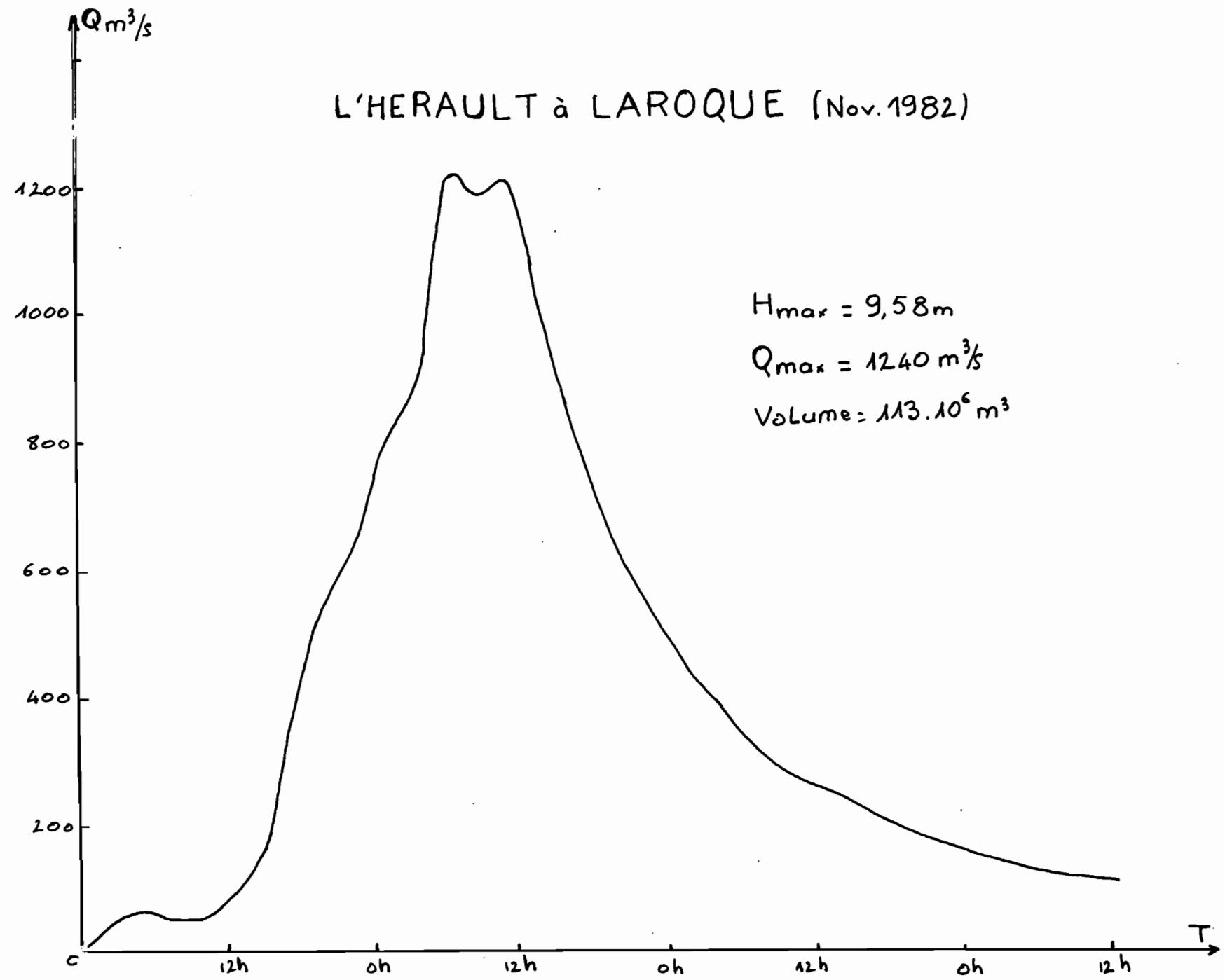
- PROFILS EN LONG DE L'HÉRAULT -

- ET DE LA VIS -

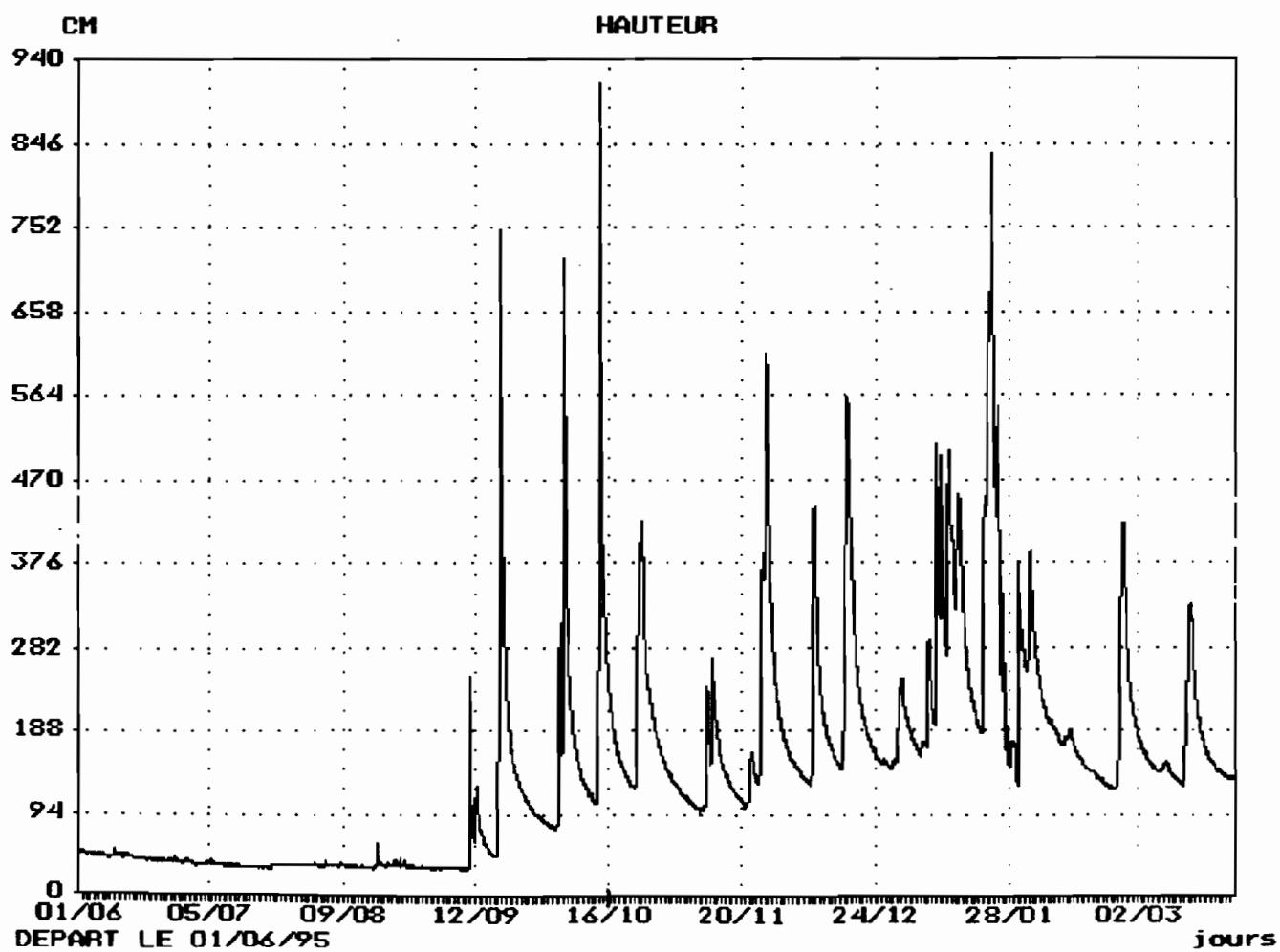
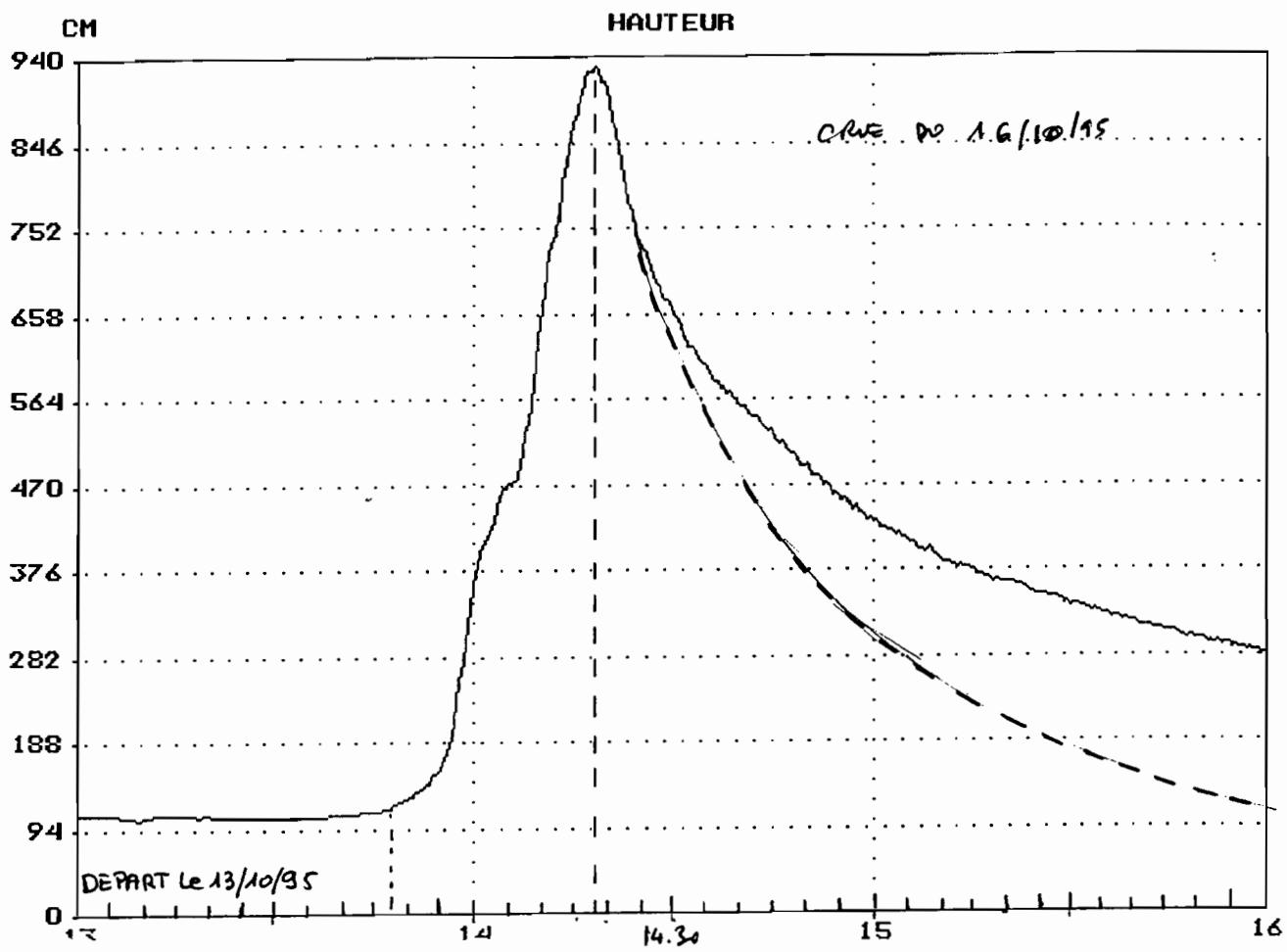


L'HERAULT à LAROQUE





DIREN SEMA L'HERAULT A LAROQUE D'H



Cours d'eau VIS

Station en service depuis le : Novembre 1960

Surface du bassin versant naturel: 332 Km²Surface du bassin versant effectif: Km².

Type de station: artificielle

Type de contrôle: seuil horizontal

Repère altimétrique de référence.

Nature: repère N.G.F.

Emplacement, p' f 13 N° 100 mur de soutènement du CD 110 au PK 7 Cote: 154.105 NGF

Altitude du zéro de l'échelle: 148.90 NGF

Nombre d'éléments de mesure: 1

Lynnigraphe : Marque NEYRPIC Type Télémnipp Réduction 1/10 Rotation 5 mm/heure

Date d'installation: Janvier 1968

Relevés: Mètres d'eau ou Lynnigrommes.

levés Envoyés tous les 15 jours

Par: agent S.R.A.E.

Origineux conservés par: S.R.A.E

Mode de jaugeage:(emplacement, point d'injection et de prélèvement, matériel utilisé, etc...)

(Repères sur le croquis)

Moulinet dilution

mesures réalisées

1960-1976 : 145

1977 : 3

Calcul des débits moyens journaliers.

Débits calculés par S.R.A.E. S.H.

Méthode de calcul: Programme A.R.H.M.A.

Mavage maximum observé: 6.32 m 450 m³

Ecoulements moyennes de référence Menouelles (période 61-77) et Annuelle

m ³ /s	21.1	21.1	16.6	12.2	9.35	6.89	3.40	5.28	6.74	14.0	11.9	12.5	Annuelle
m ³ /km ²	63.5	63.5	50.0	36.7	28.2	20.7	10.2	9.88	20.3	42.2	35.8	37.0	34.6
mm	170.0	153.7	133.9	95.1	75.5	53.7	27.3	26.5	52.6	113.0	92.8	99.1	1093

Pluviomètres et pluviographes intéressant le B.V., % du B.V. intéressé:

Précipitations: moyennes de référence Menouelles (période) et Annuelle													
mm													

DIVERS influences amont micro-centrale électrique, exploitation minière

Modifications du B.V.:

Arrêts de fonctionnement:

Observateur Agent S.R.A.E.

Service exploitant: S.R.A.E. LANGUEDOC-ROUSSILLON

Adresse et téléphone: B.P. 1175
34009 MONTPELLIER CEDEX

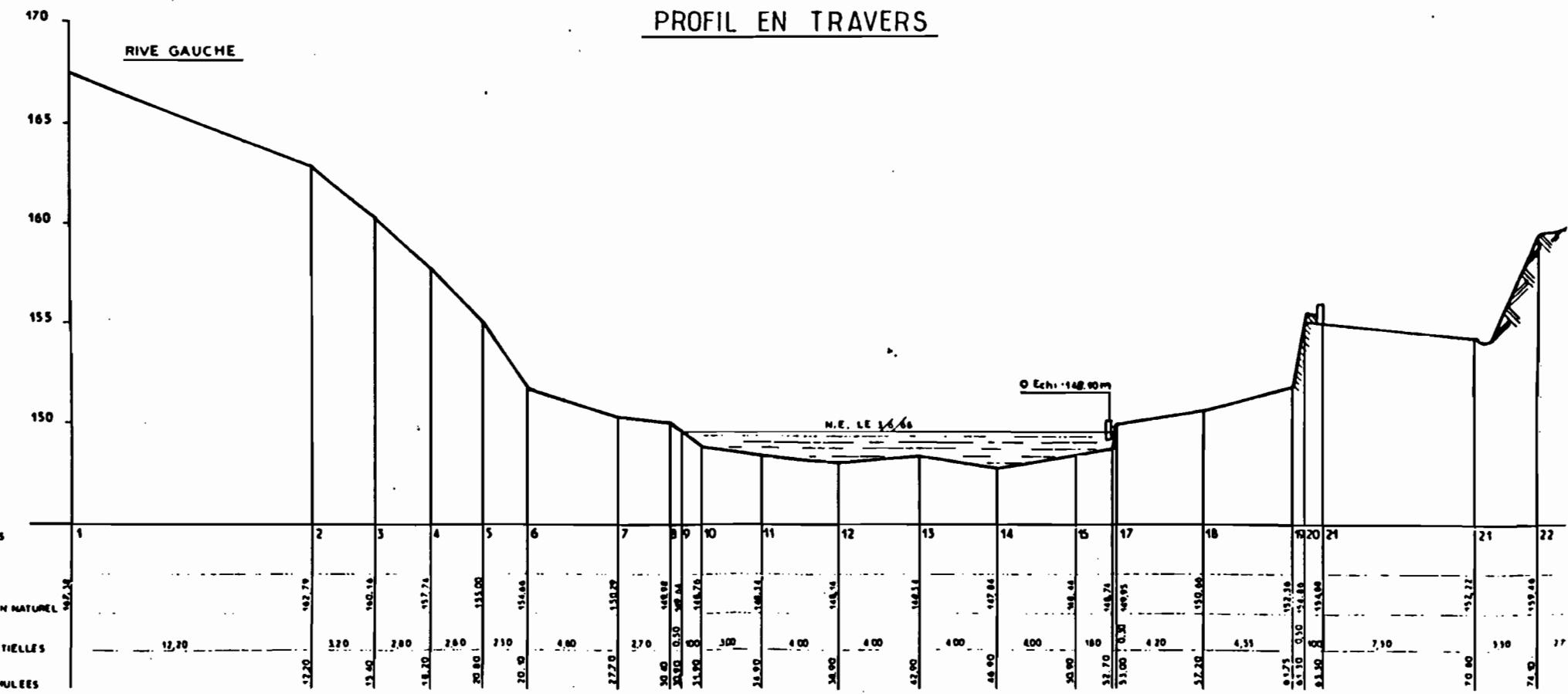
Tél. : (67) 92.40.60

Date d'établissement de la fiche: 1978

Date d'établissement de la fiche précédente 1977

Nombre de fiches précédentes: 8

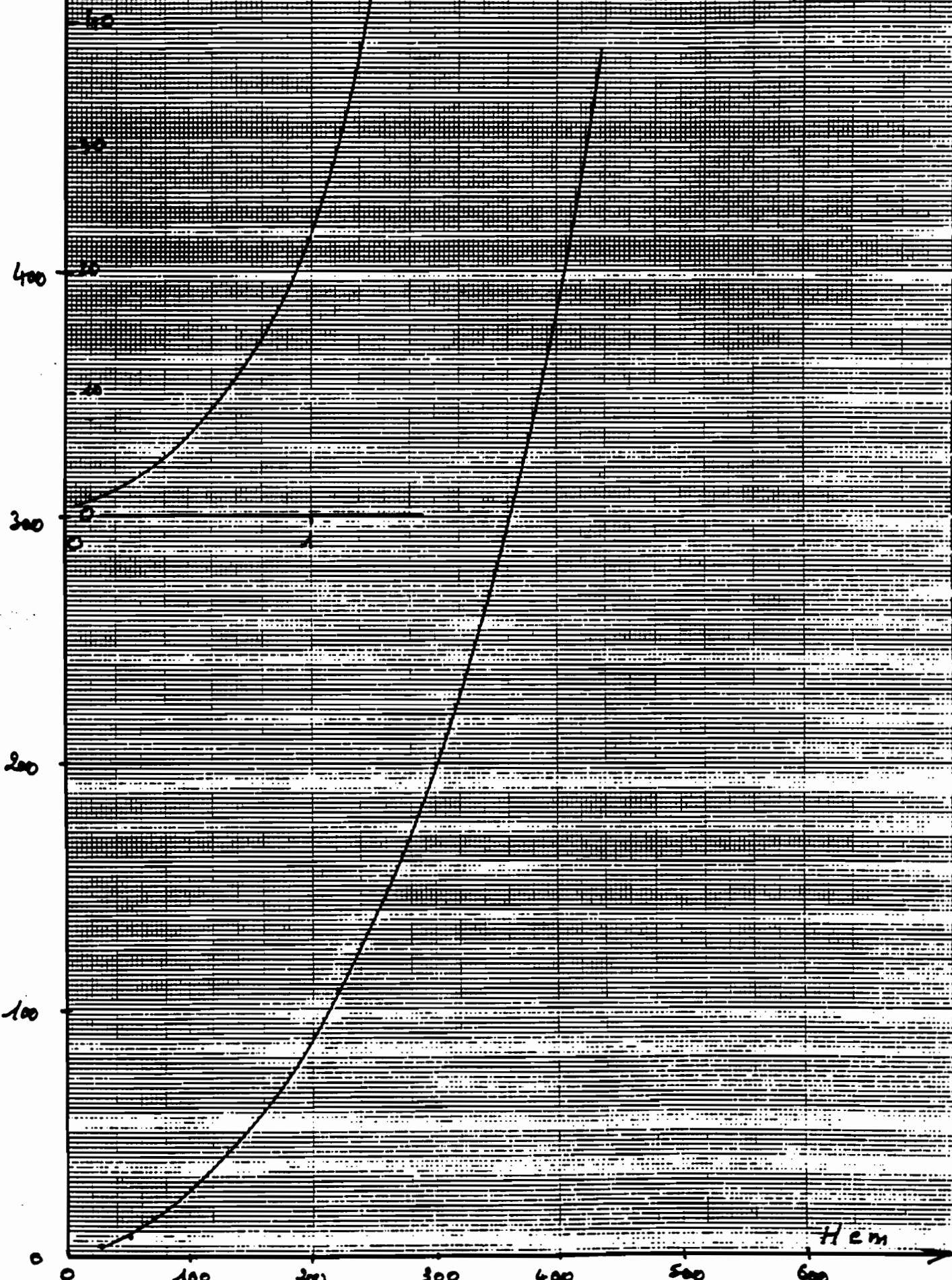
LA VIS à S^I LAURENT LEMINIER

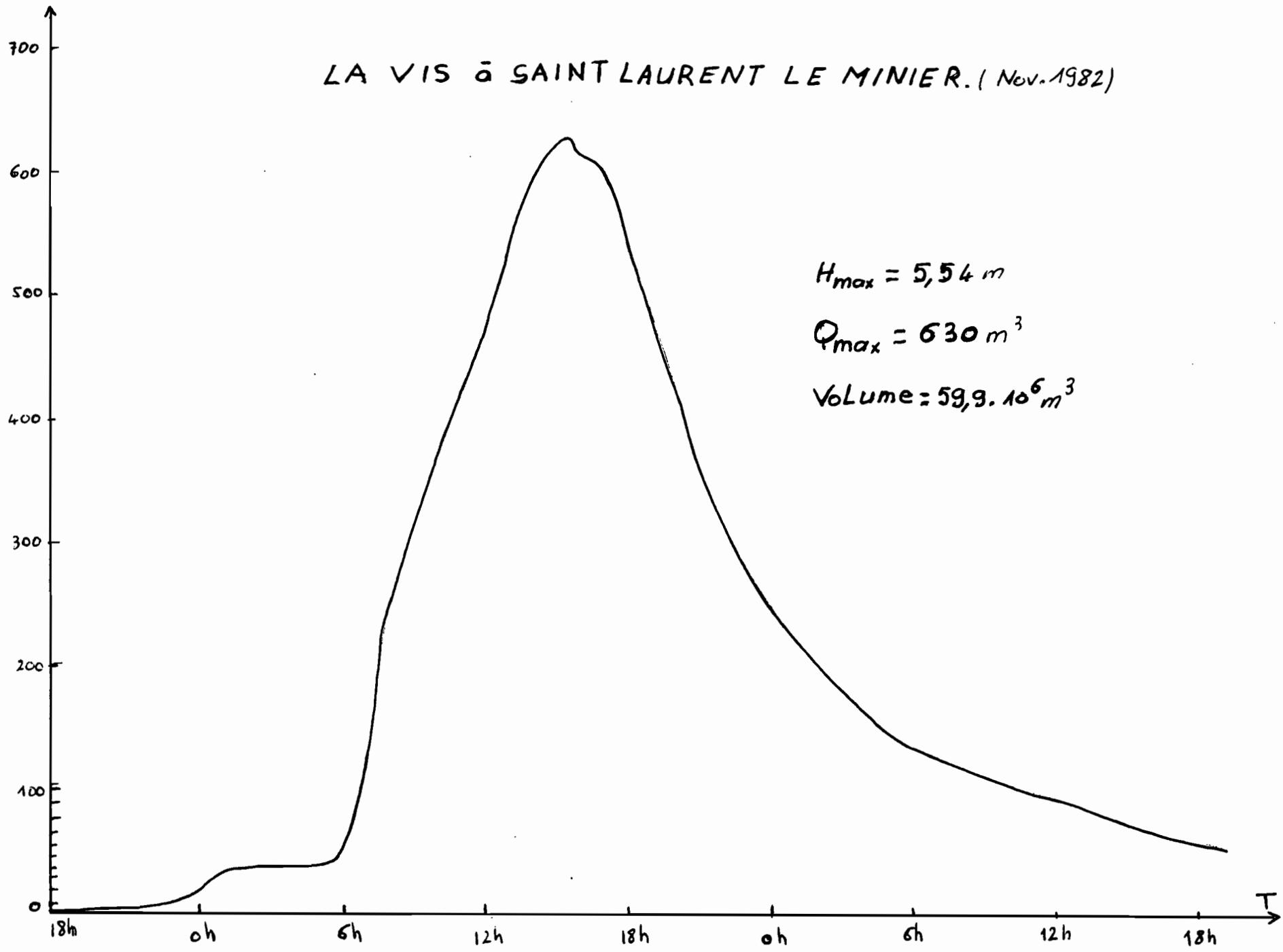


10.36

VIS A ST LAURENT

LE MINIER





FICHE DE STATION

RIVIERE STATION BASSIN

Date de mise en service (Ancienne station évent.)

Coordonnées : X = Y = Altitude Z : = m
N° de la carte IGN au 1/25000 Nom :Surface du bassin Km²

HAUTEURS D'EAU

Echelles : n° des éléments

Position par rapport au profil de base

Etat général des mires

Limnigraphes : Marque : Type N°

Réduction : Vitesse mm/h Amplitude

Emplacement par rapport aux échelles

Cote de la prise de pression : ou base du flotteur m

Repères : Emplacement des bornes

Cotes : B1 B2 Z du 0 de l'échelle

Nivellement général : N° de la borne Z = m

Hauteur Maximum enregistrée : m le (Débit = m³/s)

DEBITS

Basses eaux : Méthodologie :

Emplacement :

Moyennes eaux : Méthodologie :

Emplacement :

Hautes eaux : Méthodologie :

Emplacement :

Débit maximum jaugé : m³/s H = m le

PRECISION

Seuil de contrôle : Emplacement

Constitution :

Stabilité Nombre de courbes

Sensibilité : 1 cm représente en % du débit, pour H : 0,5 m %, H = 1,0 m %

H = 2,0 m %, H = m %, H = m %.

ACCES

Possibilité d'accès en crue :

Temps de trajet en heures : Distance de la route : m

FICHE DE RECONNAISSANCE DE SITE DE STATION HYDROMETRIQUE

RIVIERE :

DENOMINATION :

COORDONNEES :

Y = CARTE :

CRITERES DE CHOIX	CARACTERISTIQUES PRINCIPALES	DESCRIPTION ET COMMENTAIRES
STABILITE ET SENSIBILITE	SEUIL DE CONTROLE	
	NATURE ET FORME DES BERGES	
	NATURE ET FORME DU FOND	
	SENSIBILITE DE LA SECTION	
ABSENCE DE DEBORDEMENT	DEBORDEMENTS POSSIBLES	
	POSITION DES LAISSES DE CRUE	
	CONTOURNEMENT POSSIBLES ?	
STABILITE DES ECHELLES	POSITION DES ECHELLES D'ETIAGE	
	POSITION ET MODE DE FIXATION DES ECHELLES DE CRUE	
ENREGISTREMENT DES HAUTEURS	POSSIBILITE D'INSTALLATION D'UN LIMNIGRAPH A FLOTTEUR	
	LIMNIGRAPH A PRESSION	
	LIMNIGRAPH CHLOE	
MESURES DES DEBITS DE CRUE	APPRECIATION DE LA REGULARITE DE L'ECOULEMENT EN CRUE	
	POSSIBILITE JAUGEAGE BATEAU	
	BASE CERCLE SUR QUELLE RIVE ?	
	POSSIBILITE TELEPHERIQUE	
	POSSIBILITE FLOTTEURS	
	POSSIBILITE DILLUTION	
MESURES DES DEBITS D'ETIAGE	VISIBILITE EN CRUE	
	ECOULEMENT EN ETIAGE	
	POSITION DU PROFIL	
	PRISES D'EAU ?	
ACCES	INFILTRATION ?	
	DESCRIPTION DES ACCES	
ENVIRONNEMENT ET TRANSMISSION	RISQUES D'ISOLEMENT	
	PROXIMITE ELECTRICITE	
	PROXIMITE TELEPHONE	
	INSTALLATION ANTENNE RADIO	
	DEGAGEMENT HORIZONS E. W. ARGOS	
	DEGAGEMENT HORIZONS METEOSAT	

ETABLIE LE :

PAR

(Joindre les croquis et les plans de situation)

ASPECT THEORIQUE DES MESURES DE DEBIT A PARTIR DE LA MESURE DES VITESSES

I.1. DEFINITIONS

I.1.1. DEBIT

Le débit est le volume d'eau traversant une section du cours d'eau pendant une unité de temps. On l'exprime soit en mètres cubes par seconde (m^3/s) pour les débits importants, soit en litres par seconde (l/s) pour les faibles débits. ($Q < 100 l/s$)

On a convenu d'écrire le résultat des mesures sur le terrain avec trois chiffres significatifs quelle que soit la valeur du débit :

- ~~100 l/s~~
- | | |
|-------------------------------|---|
| • de 0 à 1 m^3/s : | trois chiffres après la virgule $0,457 m^3/s$ |
| • de 1 à 10 m^3/s : | deux chiffres après la virgule $4.57 m^3/s$ |
| • de 10 à 100 m^3/s : | un chiffre après la virgule $45,7 m^3/s$ |
| • de 100 à 1000 m^3/s : | valeur entière $457 m^3/s$ |
| • au-dessus de 1000 m^3/s : | arrondi à la dizaine de m^3/s $4570 m^3/s$ |

$1\% < \epsilon_R < 1\%$

✓

Cette règle, qui pourrait s'intituler « règle des trois chiffres significatifs », se justifie aisément compte tenu de la précision que l'on peut espérer atteindre dans les conditions normales de mesure sur le terrain.

I.1.2. COURBE D'ETALONNAGE

essentielle

Les mesures de débit apportent une information (*complémentaire*) permettant de définir le régime du cours d'eau étudié. En effet, à partir de ces mesures, il est possible d'établir la relation hauteur-débit dans la section considérée. Cette relation est présentée le plus souvent sous forme de courbe d'étalonnage ou courbe de tarage.

Pour obtenir la meilleure définition de cette courbe, il est nécessaire de réaliser des mesures à différents niveaux du plan d'eau depuis l'étiage jusqu'aux plus fortes crues. En général, lorsque la section de contrôle des hauteurs d'eau est bien choisie, la relation hauteur-débit est constante dans le temps : on dit que cette relation est univoque.

$$V = f(R, n, i)$$

Si à chaque hauteur correspond une valeur de débit.

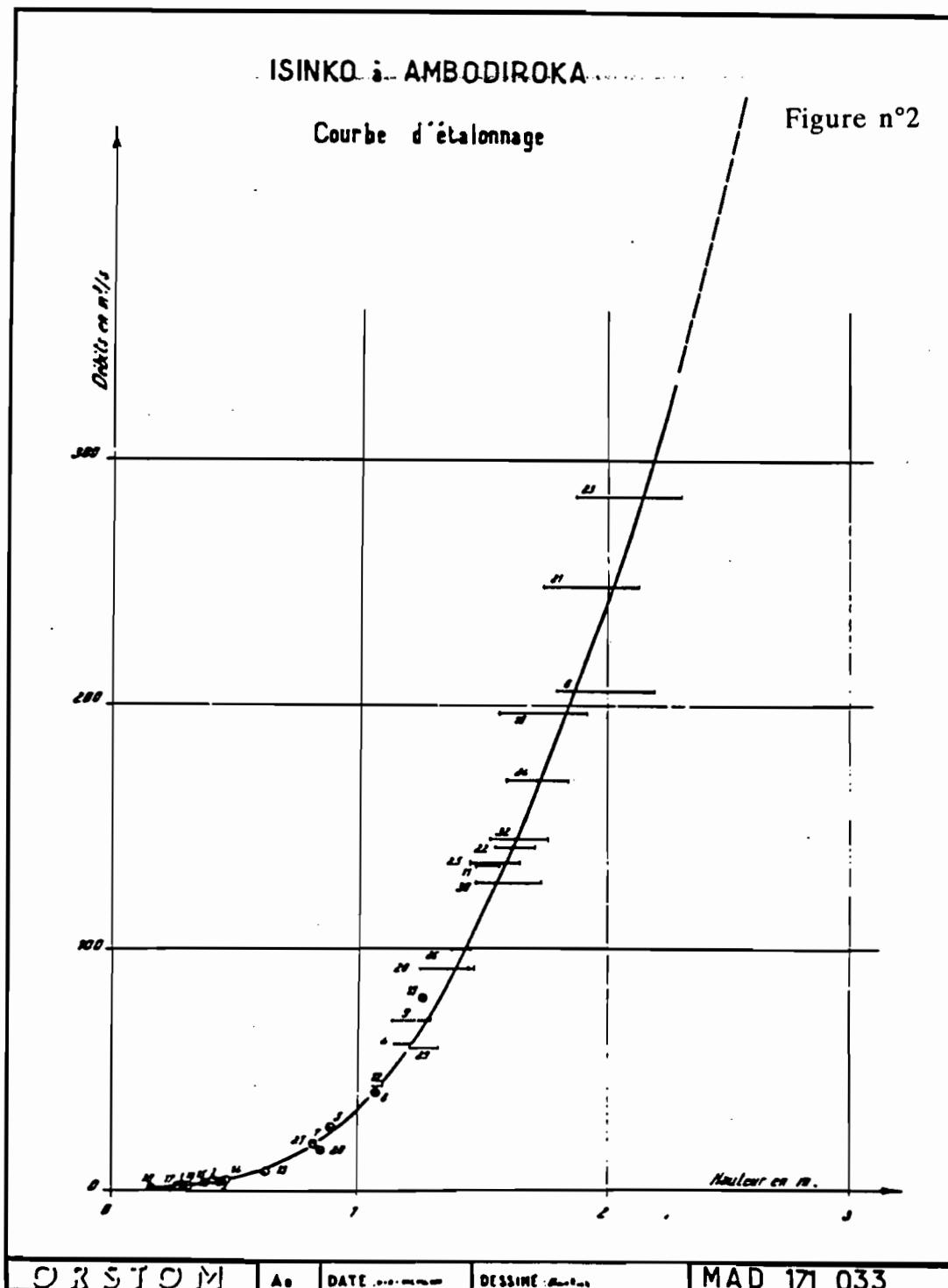
✓

Rappelons que :

✓

minimum

- dix ou mieux quinze jaugeages bien répartis sur toute l'amplitude de variation de cote à l'échelle, sont nécessaire pour tracer la courbe de tarage,
- des jaugeages de contrôle doivent être réalisés à intervalles réguliers pour déceler les détarages éventuels,
- le tracé de la courbe est d'autant plus précis que les variations de cote à l'échelle sont faibles pendant la durée des mesures,
- il existe toujours une certaine dispersion entre les points expérimentaux due aux erreurs inévitables de mesure. Le tracé est effectué en laissant, autant que possible, un nombre égal de points de part et d'autre de la courbe moyenne.



GENERALITES

D'après la définition donnée ci-dessus, le débit est donc égal au produit de la vitesse V du fluide par la surface S de la section traversée :

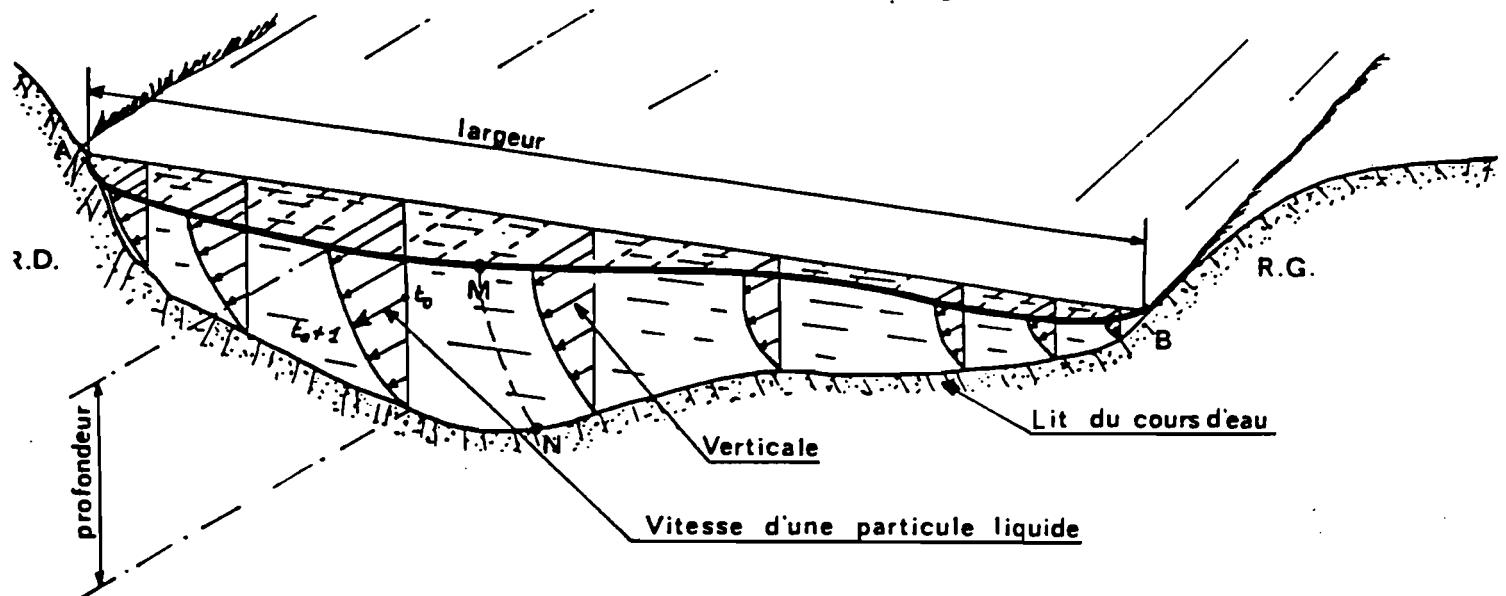
$$Q(m^3/s = V(m/s) \times S(m^2)) \quad (1)$$

Cette formule implique V constant en tous les points de la section. Or, ceci ne se réalise jamais sur les fleuves et les rivières. La vitesse n'est pas constante à l'intérieur d'une section, elle varie d'un point à un autre par suite de la forme du lit à l'amont ou à l'aval de la rugosité des berges, de la végétation, des irrégularités du fond etc... et en un même point, elle fluctue en grandeur et en direction dans le temps.

Une représentation en perspective cavalière du débit Q est donnée par la figure 3. Le débit est égal au volume d'eau contenu dans le trièdre curviligne limité par la droite AB et les courbes AMB et ANB (enveloppe des vecteurs vitesses des particules fluides en surface) et ANB (section du lit de la rivière par le plan vertical passant par la droite AB). La surface gauche limitée par les courbes AMB et ANB est le lieu géométrique à l'instant $t_0 + 1$ seconde, des gouttes d'eau ayant quitté le plan vertical ANB à l'instant t_0 ; c'est donc, en définitive, l'enveloppe des vecteurs vitesses de toutes les particules liquides de la section en travers.

Représentation du débit

Figure n°3

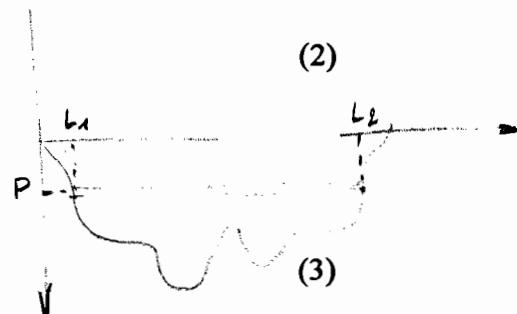


Supposée constante à travers un petit élément $dS = dp \times dl$ (dp élément de la profondeur et dl élément de la largeur) le débit dQ traversant cet élément de section sera donné, d'après (1), par :

$$dQ = v \, dS$$

et le débit total s'exprimera par :

$$Q = \iint_S v \, dS = \iint_S v \, dp \, dl \quad (2)$$



qui peut s'écrire aussi :

$$Q = \int_0^P v \, dp \int_0^L dl = \left(\int_{L_1}^{L_2} v \, dl \right) \int_0^{P_{MAX}} dp$$

Part la profondeur de la verticale pour laquelle on calcule le débit unitaire. P et L étant respectivement la profondeur et la largeur de la section à travers laquelle s'écoule le débit Q.

qui on intègre la fonction $v=f(p)$ sur la profondeur de la verticale considérée

La première formulation de (3) indique qu'il faut définir une vitesse moyenne sur toute la profondeur et obtenir ainsi un « débit élémentaire » appelé aussi débit unitaire (souvent désigné par le symbole p_u), suivant une verticale qui sera sommé ensuite sur toute la largeur.

La deuxième formule de (3) montre que la vitesse moyenne peut être définie suivant une horizontale sur toute la largeur, puis le débit élémentaire ainsi calculé sera sommé sur toute la profondeur de la section.

idem $v=f(l)$ sur la largeur de l'horizontale considérée

On voit ainsi que la connaissance du débit n'est obtenue que par la mesure des vitesses en plusieurs points au sein de l'écoulement de façon à définir une vitesse moyenne. C'est ce qu'on appelle habituellement : mesure du débit par exploration du champ des vitesses. La méthode la plus couramment utilisée est l'exploration suivant des verticales réparties dans la section. Dans le cas des sections parfaitement calibrées et équipées de dispositifs de translation horizontale, on peut envisager parfois une exploration suivant des horizontales, mais cette façon de procéder est rarement utilisée.

En résumé :

Geométrie simple.

Pour connaître le débit d'une rivière, on doit mesurer la vitesse en différents points de la section de façon à définir au mieux une vitesse moyenne U dans cette section.

La vitesse moyenne ainsi déterminée se rapprochera d'autant plus de la valeur vraie que :

- le nombre de points de mesure est plus important,
- l'écoulement dans la section est parfaitement uniforme, avec des filets liquides bien parallèles entre eux,
- la variation de la cote du plan d'eau pendant la mesure est faible.

I.3. LES DIFFERENTES METHODES DE MESURE

En général, l'hydrométriste ne dispose que d'un seul moulinet pour mesurer le débit d'une rivière. Les batteries de moulinets sont réservées aux mesures industrielles lors des essais de réception d'usines hydroélectriques, par exemple.

L'estimation de la vitesse moyenne sera donc obtenue en plaçant ce moulinet en différents points de la section repérés en abscisses et en ordonnées. En général, comme le montre la figure n°3, le moulinet est placé en des points répartis sur des verticales espacées régulièrement en travers de la section.

Les différentes méthodes de mesures peuvent être classées en deux grandes catégories suivant, d'une part la répartition des points et d'autre part la répartition des verticales en fonction de la rapidité des variations du plan d'eau.

Il est bien évident que cette division en deux catégories a été faite dans le but de rendre plus clair l'exposé. En réalité, la méthode utilisée pour réaliser un jaugeage est un assemblage des techniques décrites dans les deux classifications.

CLASSIFICATION SUIVANT LES MODALITES DE MESURE DE LA VITESSE SUR CHAQUE VERTICALE

Dans le paragraphe I.2.1. ~~nous avons vu que la première opération à réaliser pour connaître le débit est la définition de la vitesse moyenne~~. Ceci peut être fait de façon précise à partir de l'exploration de la section en plusieurs points, par différents procédés : ce sont les méthodes complètes. La vitesse moyenne est quelquefois estimée plus sommairement à partir d'un nombre réduit de mesures soit en surface, soit au sein de l'écoulement : ce sont les méthodes incomplètes.

Mesures complètes

On groupe dans ce paragraphe, les mesures qui exploitent la totalité de la verticale d'une façon continue ou discontinue. On distingue :

TAUGEAGE PAR INTEGRATION AVEC SAUMON

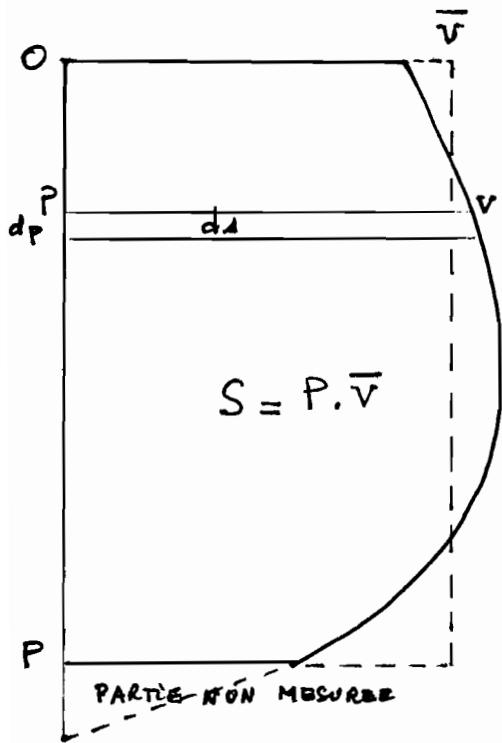
$$v = a \frac{n}{T} + b \quad \text{formule de l'hélice}$$

P : profondeur totale "pied de saumon" non inclus

T : temps mis par le moulinet pour aller de 0 à P

N : nombre total de tours d'hélice lors de la descente de 0 à P

v_g : vitesse de descente du moulinet



Pour une profondeur P on a une vitesse de courant v considérée constante le long de dp .

$$\text{Ou a } dA = v dp, \text{ avec } dp = v_g dt \text{ et } v_g = \frac{P}{T} \\ \text{il vient } dA = \frac{P}{T} v dt \quad (1)$$

durant l'intervalle dt on a un nombre dn de tours d'hélice, en utilisant la formule de l'hélice : $v = a \frac{dn}{dt} + b$ et en substituant cette valeur de

$$v \text{ dans (1)} \quad \text{il vient : } dA = \frac{P}{T} \left(a \frac{dn}{dt} + b \right) dt$$

$$\text{et } S = \frac{P}{T} \left(a \int_0^N dn + b \int_0^T dt \right) \quad \text{en intégrant on obtient}$$

$$S = P \left(a \frac{N}{T} + b \right), \text{ le facteur } \left(a \frac{N}{T} + b \right) \text{ répond}$$

à la définition de la vitesse moyenne le long de la verticale entre les points 0 et P., $\bar{v} = a \frac{N}{T} + b$.

N.B. La vitesse de fond v_g doit être petite comparée à la vitesse moyenne du courant v pour ne tenir compte que de cette dernière.

Pour la partie non mesurée on peut adopter une vitesse moyenne égale à la moitié de celle trouvée entre les points 0 et P.

→ Précision du report sur papier • Erreur planimétrique \Rightarrow surface minimum. etc...
chiffres significatifs

Méthode par points

L'appareil de mesure est positionné successivement en différents points sur la verticale. Chaque point est repéré en ordonnée (profondeur) et la vitesse y est mesurée pendant un temps suffisamment long (au moins 30 secondes). Le nombre de points doit être égal au moins à cinq par verticales.

La vitesse moyenne sera obtenue soit par intégration graphique (méthode des paraboles et méthode des isotaches ou courbes d'égale vitesse dans la section) soit par des méthodes arithmétiques.

Les principes des différentes méthodes de calcul sont les suivants :

■ Reprenons la formule (2) du paragraphe I.2.1.

$$\cancel{Q = \iint_S v \, dS}$$

✓

$$Q = \iint_S A \, dv$$

v étant la vitesse constante dans un élément de surface dS . Ceci revient à tracer sur le plan de la section de jaugeage, en s'appuyant sur les valeurs de la vitesse mesurées à chaque verticale, des lignes d'égale vitesse (appelées aussi isotaches ou isodromes) et à faire la sommation des surfaces élémentaires comprises entre les isotaches. C'est la méthode des isodromes ou des délimitees isotaches qui est résumée sur la figure 4.

■ Dans la formule (3) du même paragraphe :

$$Q = \int_P v \, dP \int_L dl$$

La première intégrale représente la surface du graphe obtenu en portant en abscisse les vitesses mesurées au droit des points de cette verticale portés en ordonnée suivant la profondeur. Ce graphe est appelé couramment profil des vitesses sur une verticale ou aussi parabole des vitesses. La première intégration donnera le débit élémentaire ou débit unitaire sur la verticale considérée exprimé en m^2/s

$$dq = \int_P v \, dP$$

C'est la méthode des paraboles représentée aussi sur la figure 4. L'intégration de tous les débits élémentaires suivant la largeur donne le débit total.

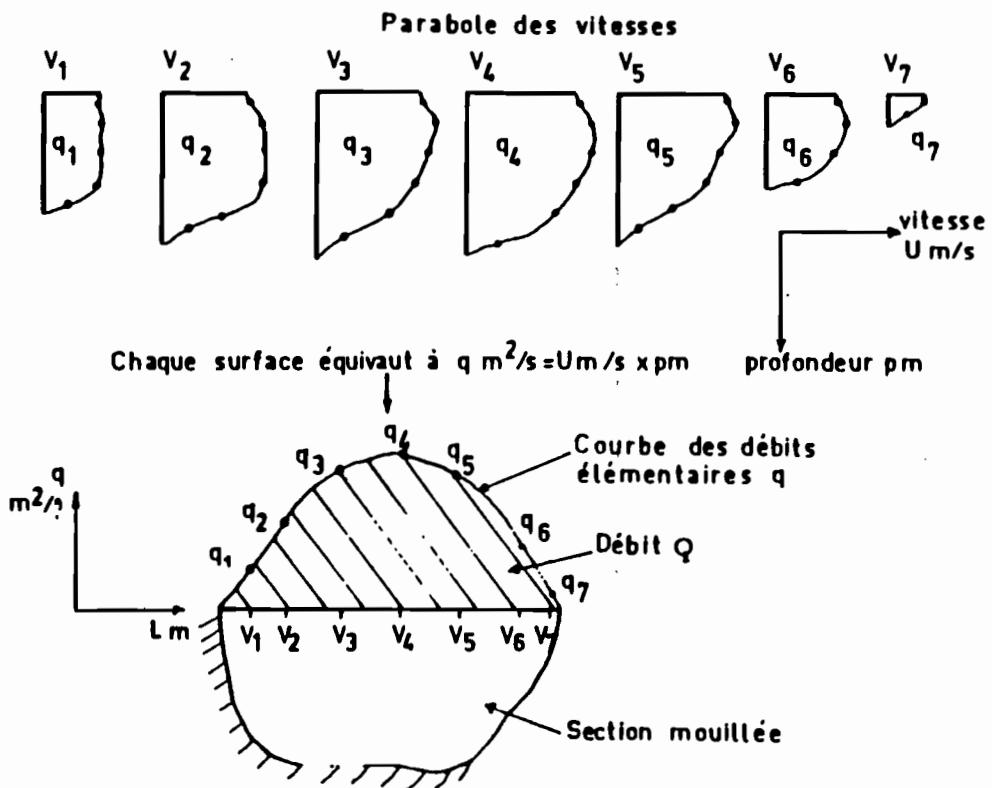
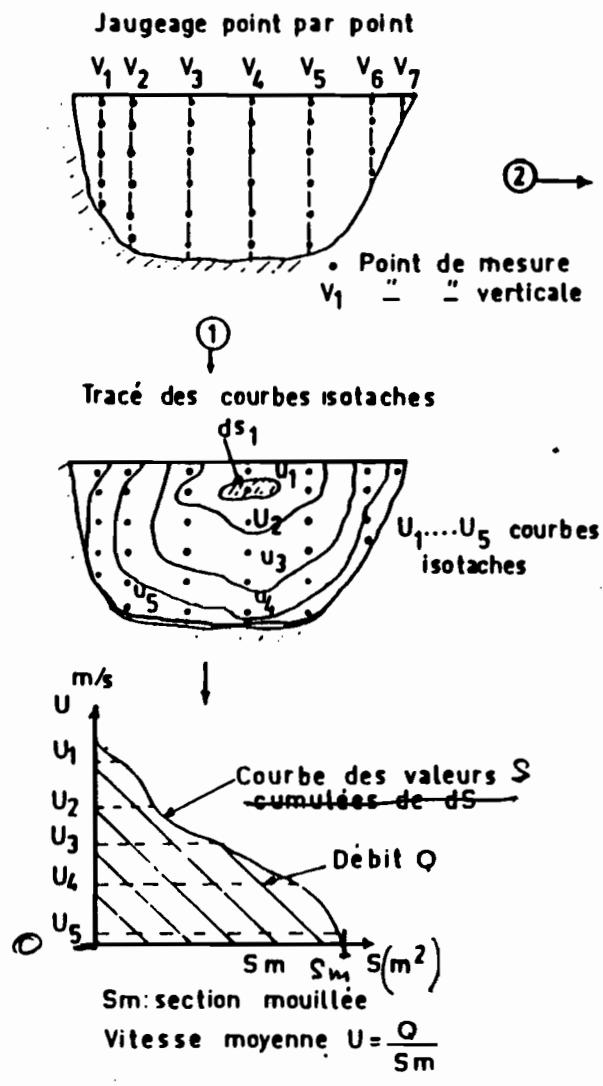


Fig. 4
SCHEMA DU DEPOUILLEMENT D'UN JAUGEAGE POINT PAR POINT

- 1 Méthode des isotaches
- 2 Méthode des paraboles

Trouve les profondeurs "d'équilibre" sur les paraboles puis reporter sur le graphique, technique à adopter suivant on utilise la 1^e ou la 2^e méthode.

$$dQ = A dv \quad \text{en faire l'intgral et qui est en abscisse}$$

$$Q = \int A dv$$

ELEMENTS DE TOPOGRAPHIE

Définitions

TOPOGRAPHIE

C'est l'art de représenter sur un plan, la configuration réelle d'un terrain.

PLANIMETRIE

Son objet est de représenter la projection sur un plan horizontal de tous les points situés sur le terrain.

Mesures des distances séparant les différents points les uns des autres.

Mesures des angles pour rattacher les différents points.

ALTIMETRIE ou NIVELLEMENT

Son objet est de déterminer par rapport à un plan horizontal de référence, la hauteur des points situés sur le terrain.

NIVELLEMENT DIRECT (ou GEOMETRIQUE ou DE PRECISION)

On utilise un niveau pour engendrer un plan horizontal de visée et une mire pour mesurer les dénivélees des points visés avec ce plan horizontal.

L'altitude du point A est connue. On appelle visée arrière ou AR la lecture faite sur la mire posée sur le point connu, et visée avant ou AV, la lecture sur la mire posée sur le point dont on veut connaître l'altitude.

La différence entre les visées arrière et avant donne la différence d'altitude entre les points A et B, si cette différence est positive, le point B est plus haut que le point A, si elle est négative, le point B est plus bas que le point A.

L'altitude du point B s'obtient en ajoutant algébriquement la différence à l'altitude du point A.

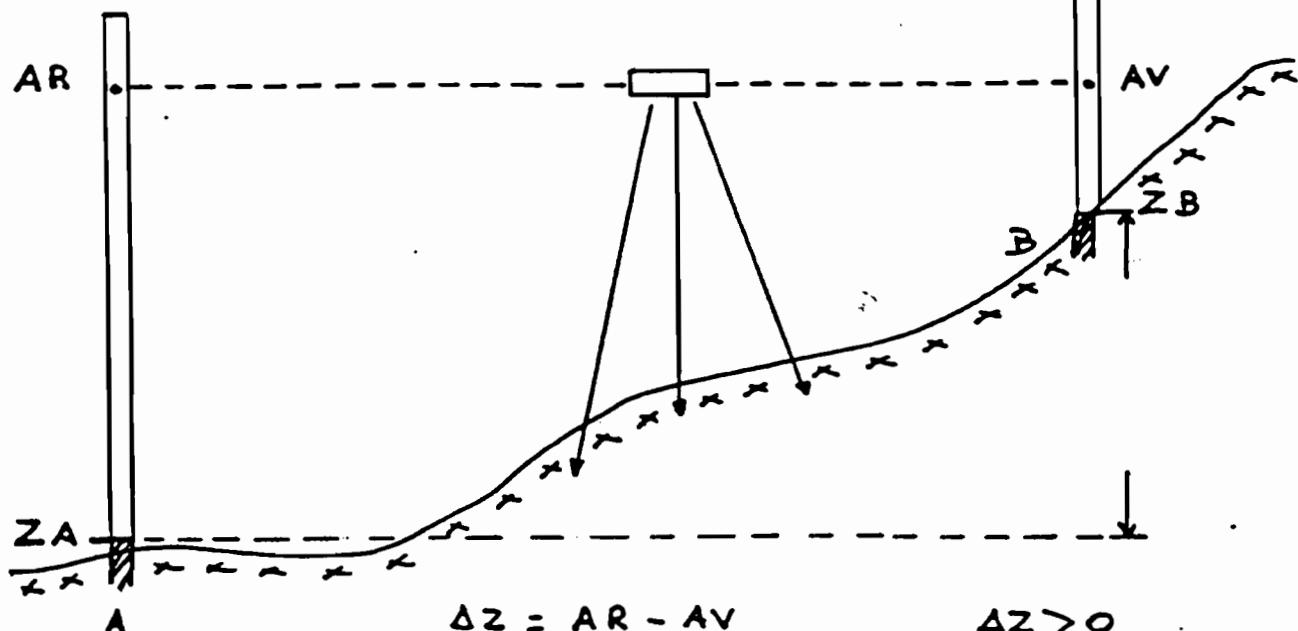
Pour éviter de manipuler des nombres négatifs, l'altitude du point inconnu peut se calculer en soustrayant AV de l'altitude du plan de visée, la démonstration est immédiate en écrivant :

$$ZB = ZA + (AR - AV)$$

$$ZB = (ZA + AR) - AV$$

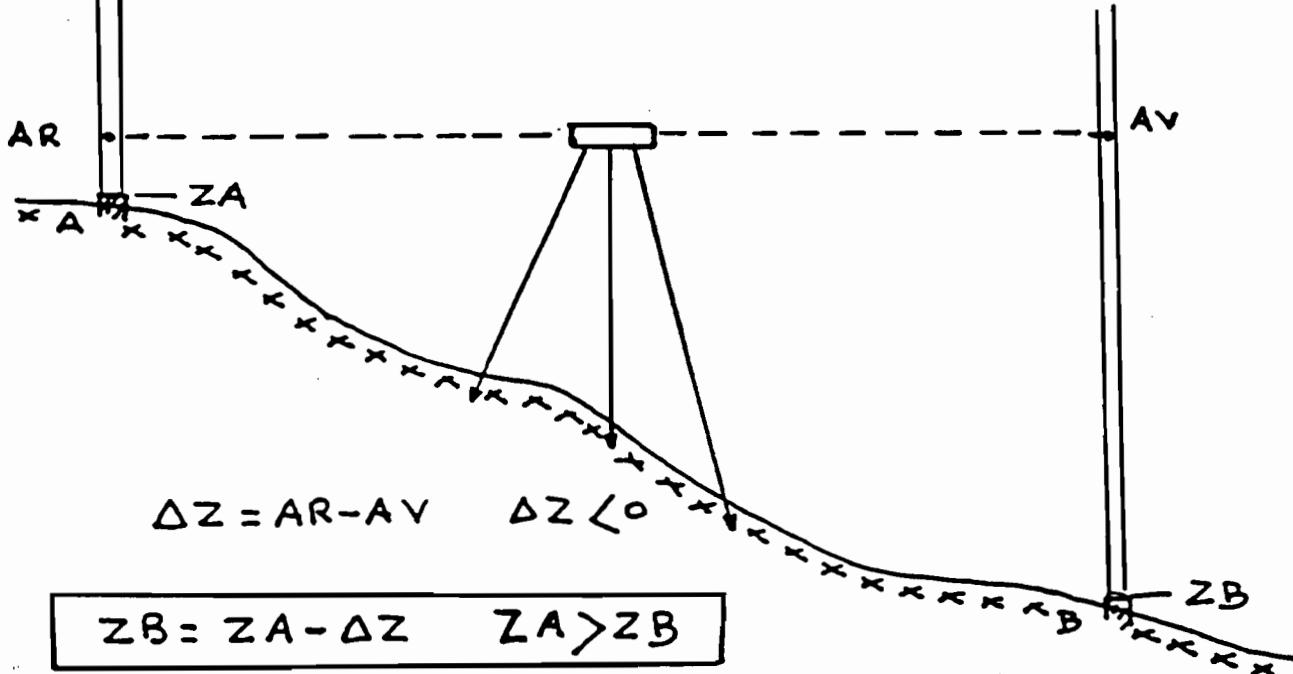
l'expression $ZA + AR$ représente bien l'altitude du plan de visée, c'est cette dernière formule qui est utilisée dans le nivelllement par rayonnement.

1° - "On MONTE"



$$ZB = (ZA + \Delta Z) - AV$$

2° "On DESCEND"



NIVELLEMENT PAR CHEMINEMENT

Le plus souvent le ou les points dont on veut déterminer l'altitude ne sont pas visibles depuis une même station. En ce cas, on procède de proche en proche, comme indiqué sur le croquis.

Les points intermédiaires 2, 3, 4, 5 peuvent être des points dont on veut connaître l'altitude, ou non, dans ce cas, il s'agit de points relais.

En utilisant la formule du paragraphe précédent on a :

$$Z_2 = Z_1 + AR_1 - AV_2$$

$$Z_3 = Z_2 + AR_2 - AV_3$$

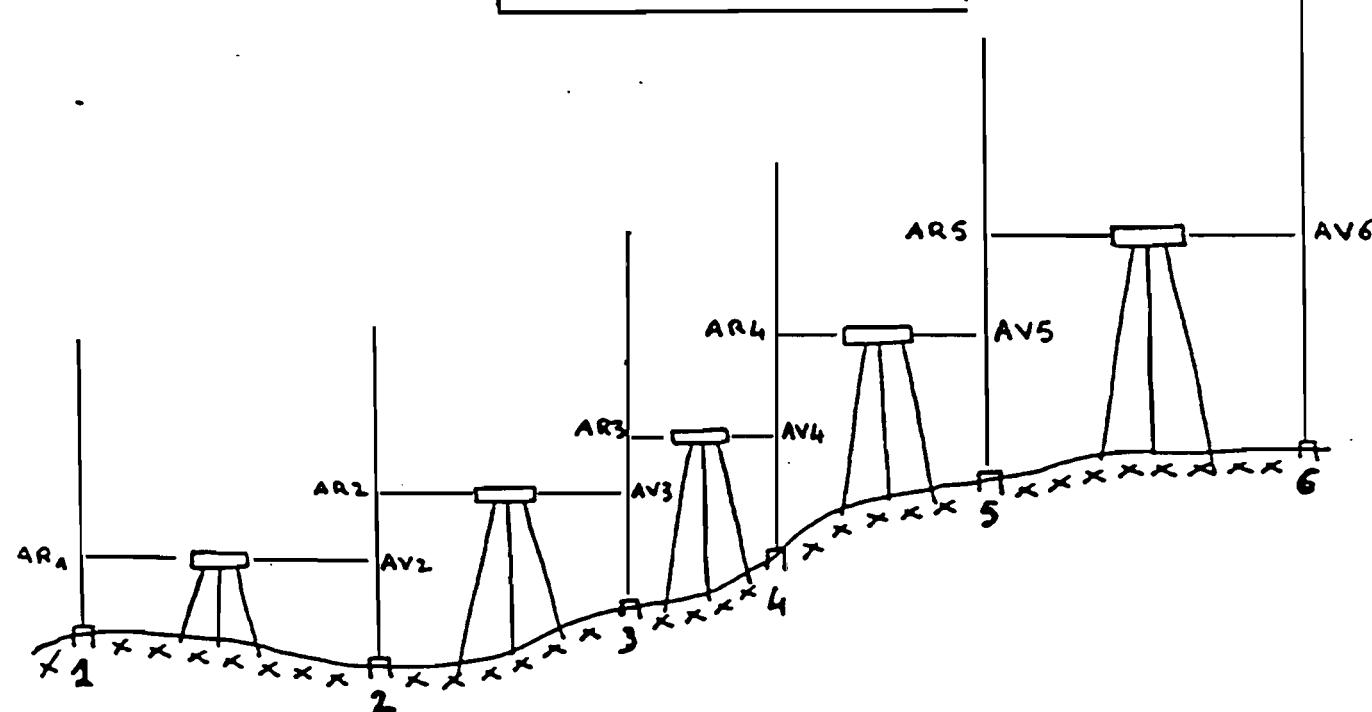
$$Z_4 = Z_3 + AR_3 - AV_4$$

$$Z_5 = Z_4 + AR_4 - AV_5$$

$$Z_6 = Z_5 + AR_5 - AV_6$$

en substituant, on obtient :

$$Z_6 = Z_1 + \sum_1^5 AR - \sum_2^6 AV$$

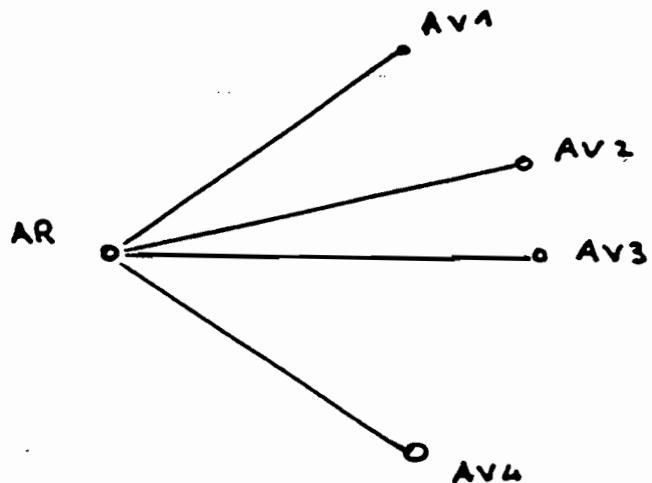


NIVELLEMENT PAR RAYONNEMENT

Si à partir d'une station, on peut viser plusieurs points, on a alors plusieurs "visées avant" pour une même "visée arrière". Pour calculer l'altitude des points, on utilise la formule

$$Z_2 = (Z_1 + AR) - AV,$$

c'est-à-dire qu'on retranche la visée avant de l'altitude du plan de visée, ceci évite des soustractions inutiles.



Ce procédé est utilisé conjointement avec le cheminement pour effectuer un profil en travers.

REGLE : Quant la mire bouge, le niveau ne bouge pas et inversement. On ne doit jamais voir les deux bouger en même temps, sauf à la fin du nivelllement.

LE NIVEAU

Il est supporté par un trépied équipé de pieds télescopiques et d'une embase sur laquelle se fixe le niveau.

Mise en place

Les pieds sont mis en extension partielle puis écartés de façon à placer l'embase à hauteur du menton de l'opérateur en position debout, ensuite on enfonce les pointes acier dans le sol et on agit sur les pieds coulissants pour rendre l'embase à peu près horizontale.

On place la lunette parallèle à 2 vis calantes avec la nivelle du côté visible par l'opérateur.

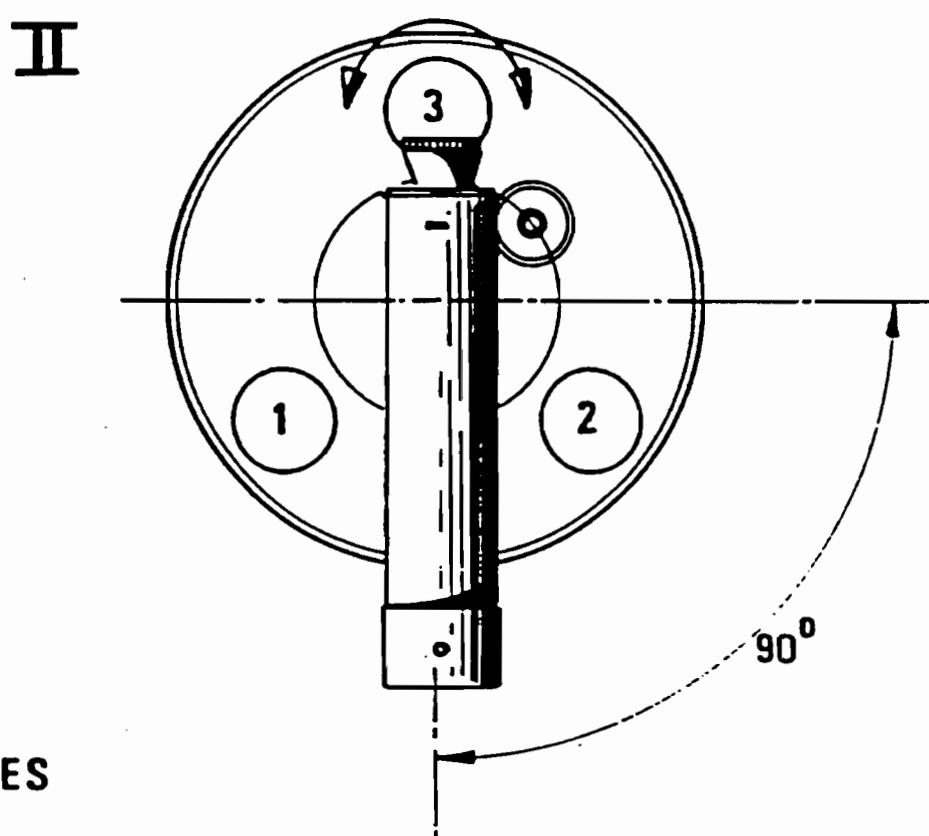
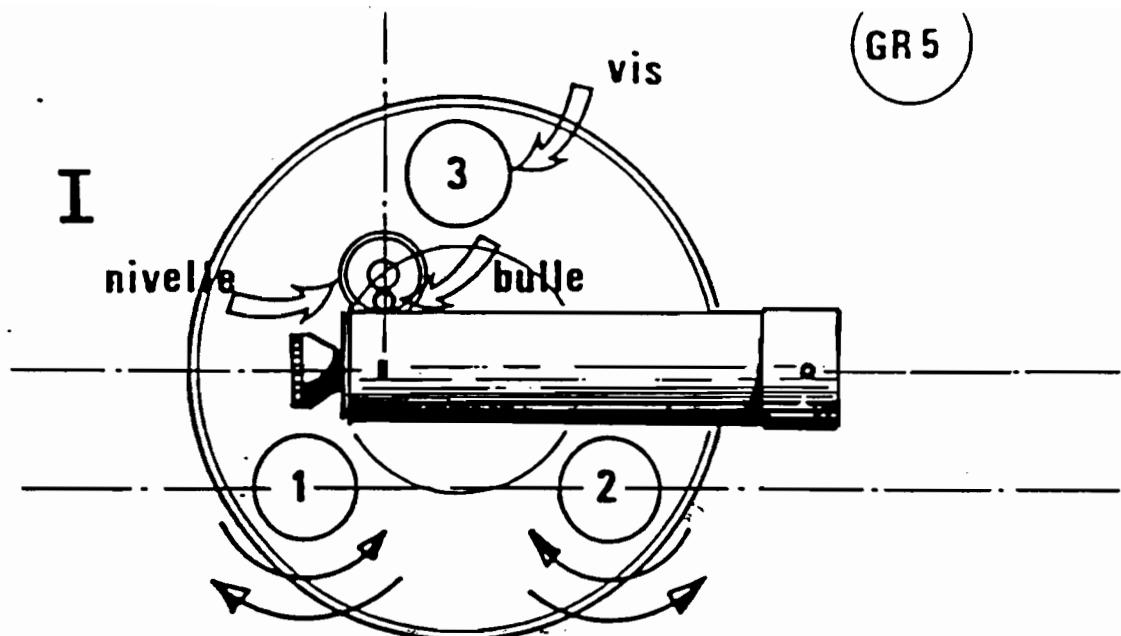
Nota : Réglage impossible 1 - Embase par trop oblique, le débattement des vis calantes n'est pas suffisant, recalier l'embase.

2 - Une ou plusieurs des vis calantes sont bloquées, remettre les vis "au milieu".

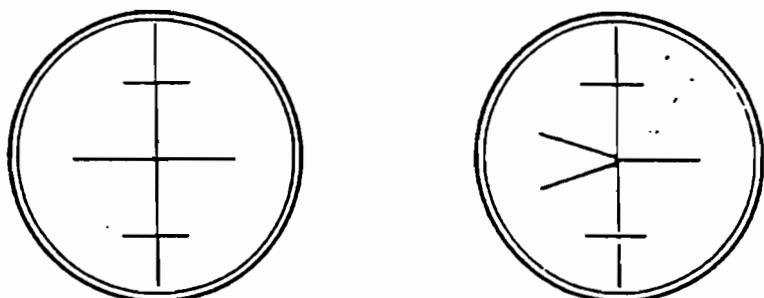
Attention 180°

Vérifier en tournant la lunette de 90°, si la bulle reste dans le repère, sinon recalier la bulle plus précisément (on suppose qu'on dispose d'un niveau en bon état).

- Recommandations :
- Il est interdit de toucher aux vis calantes, une fois une visée faite.
 - Il ne faut pas s'appuyer des mains ou du corps sur le trépied. Ceci aurait pour effet de modifier le plan de visée.



RETICULES



GR 6

Visée

On vise la mire avec le système de visée "type carabine" situé sur la lunette, puis on vise la mire à travers la lunette en utilisant une vis de mise au point pour la netteté de l'image et une vis de mouvement latéral pour parfaire la visée en plaçant le fil vertical du réticule sur la mire.

Une vis située au bout de la lunette côté oeil permet de régler pour voir avec netteté le réticule et les 2 fils stadiométriques qui existent sur la plupart des niveaux, ce réglage dépend de la vue de l'opérateur et se fait une fois pour toutes.

Niveau automatique :

Aucun autre réglage n'est nécessaire. Parfois ils sont équipés d'un bouton poussoir qui actionne, fait bouger, l'image vue si le système de compensation est en bon état.

Niveau non automatique :

Une fois une image nette de la mire obtenue, on doit à chaque visée régler une nivelle à coïncidence, qu'on voit sous la forme de deux demi-bulles de forme allongée qui doivent être mises en coïncidence pour n'en former plus qu'une, ceci afin d'obtenir une ligne de visée horizontale.

MIRE

Les mires sont en bois ou en aluminium, pliables ou coulissantes, généralement d'une longueur de 4 m et graduées en cm.

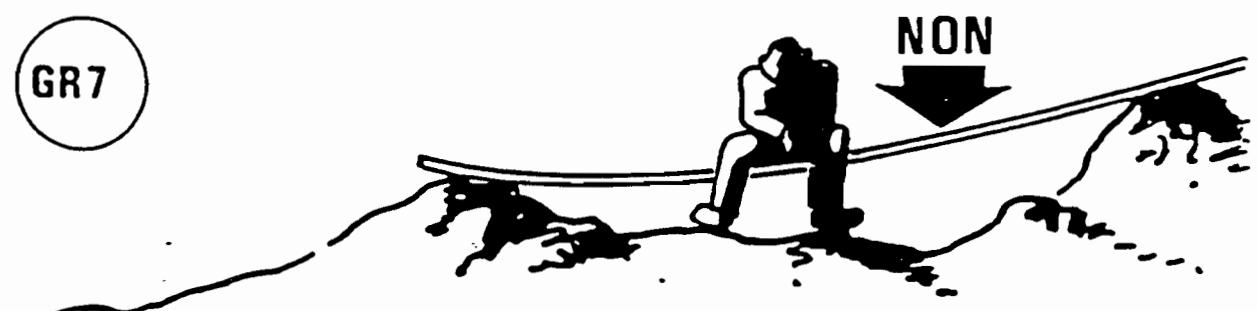
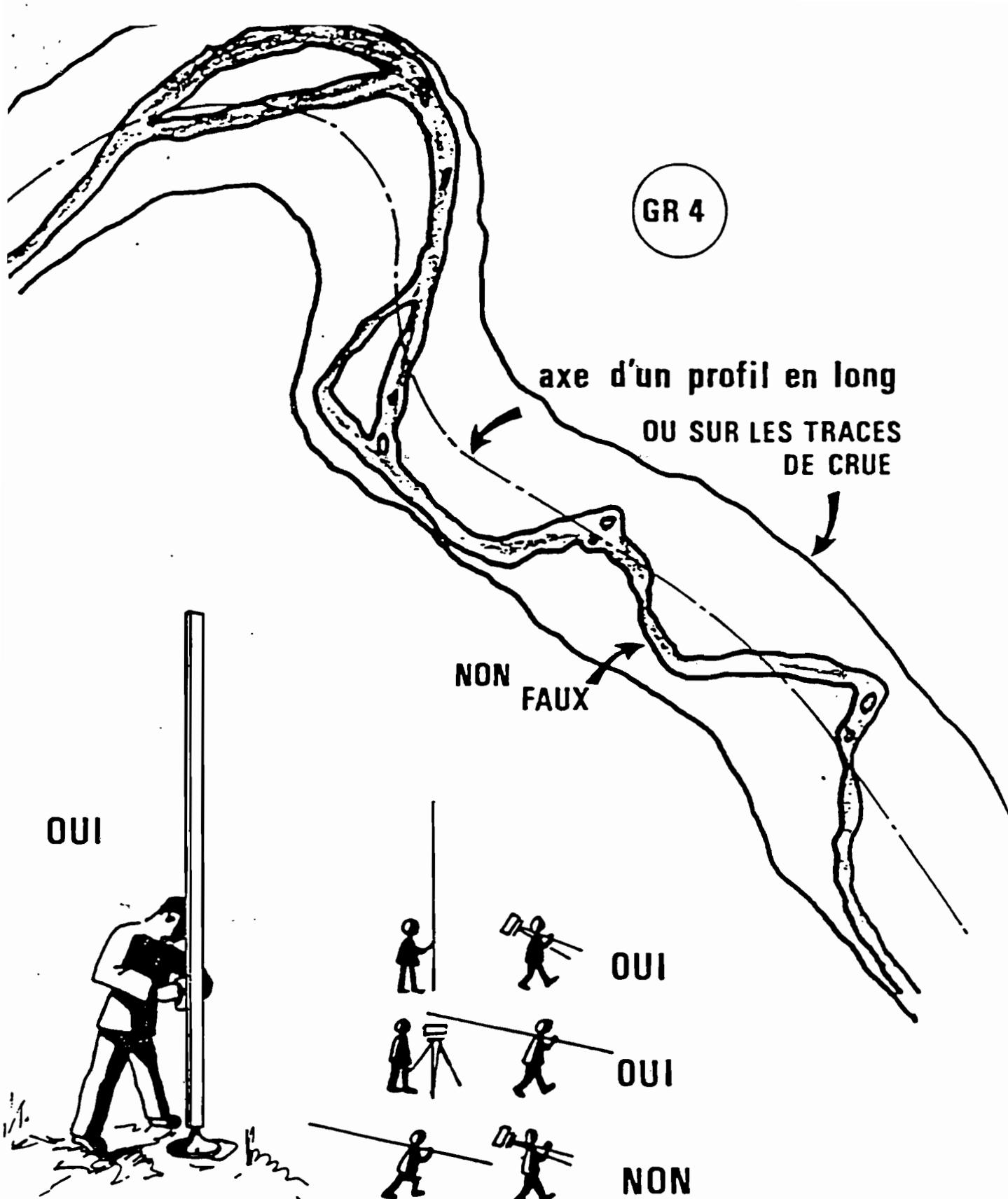
LECTURE SUR LA MIRE

La mire doit être tenue verticale, pour ce faire on utilise une nivelle fixée sur la mire qu'il faut maintenir dans son repère, ce qui n'est pas toujours facile quand il y a du vent.

Se tenir jambes écartées derrière la mire en appuyant le front sur celle-ci, est une bonne méthode.

La plupart des niveaux actuels donnent une image "droite" de la mire, c'est-à-dire telle qu'on la voit ; certains niveaux moins récents donnent une image renversée, c'est-à-dire sol en haut, ciel en bas !, ces niveaux nécessitent des mires dont les chiffres sont gravés à l'envers et les lectures sont faites de haut en bas.

La hauteur de la mire est en général de 4 m, c'est donc la dénivellation maximum qu'on peut mesurer avec une seule station. On doit lire 4 chiffres représentant les mètres, décimètres, centimètres et mm, les mètres et décimètres sont généralement inscrits en clair, les centimètres représentent la graduation élémentaire, il faut les compter depuis l'origine du 1/2 décimètre le plus proche et apprécier les mm, le plan de visée est matérialisé par le fil horizontal du réticule et la lecture s'effectue à l'intersection entre celui-ci et la mire.



FERMETURE

On dit qu'un nivelllement est fermé si la dernière visée avant, s'effectue sur un point dont on connaît l'altitude.

Le calcul de la fermeture s'effectue en faisant la somme des "visées arrière" puis la somme des "visées avant" et la différence des deux sommes, le résultat doit être proche de la dénivellation réelle entre le 1er et le dernier point, c'est cet écart entre dénivellation réelle et dénivellation mesurée qui est appelé "fermeture".

Nota : Les points rayonnés ne sont bien sûr pas pris en compte dans le calcul de la fermeture, il n'y a aucun moyen de vérifier la validité des mesures effectuées sur ceux-ci. Le calcul de fermeture doit s'effectuer sur le terrain.

Précision : Les constructeurs donnent pour leur niveau, la précision généralement appelée "erreur moyenne au kilomètre" qui est de l'ordre de quelques millimètres (1 à 3 mm/km).

Un nivelllement non fermé est dit "en l'air". C'est fortement déconseillé. ✓

Compensation : Quand la fermeture est raisonnable, on répartit l'écart uniformément entre les différents points de nivelllement (sauf le premier et le dernier point de référence).

CARNET DE NIVELLEMENT

Ils peuvent différer légèrement d'un service à l'autre. Dans celui fourni par l'ORSTOM, on a 7 colonnes.

Stations : On note le n° de la station. Dans l'exemple donné, il y a 4 stations. Le nombre de stations doit être égal au nombre de visée arrière.

Points : On note le nom ou n° du point visé. On doit retrouver ces indications sur le croquis au verso.

Distance :

Visées Arrière : On commence toujours le niveling par une visée arrière, ensuite on aura une visée pour tous les points de retournement, c'est-à-dire qu'à un déplacement du niveau correspondra une visée arrière. Si le point visé est rayonné, il n'y aura pas de visée arrière.

Visées Avant : On termine toujours le niveling par une visée avant. On peut avoir plusieurs visées avant pour le même coup arrière, en cas de rayonnement.

Nota : Les visées arrière et avant concernant un même point sont situées sur la même ligne.

CARNET DE NIVELLEMENT (suite)

Dénivelées : Si le coup arrière est plus grand que le coup avant, la différence s'écrit dans la colonne + (ou monte), en cas contraire dans la colonne - (ou descend).

Altitude : Pour obtenir l'altitude du point en cours, on ajoute la dénivée si elle est "en plus", on la soustrait dans le cas contraire à l'altitude du point sur lequel on a fait la visée arrière.

Cas particulier du rayonnement

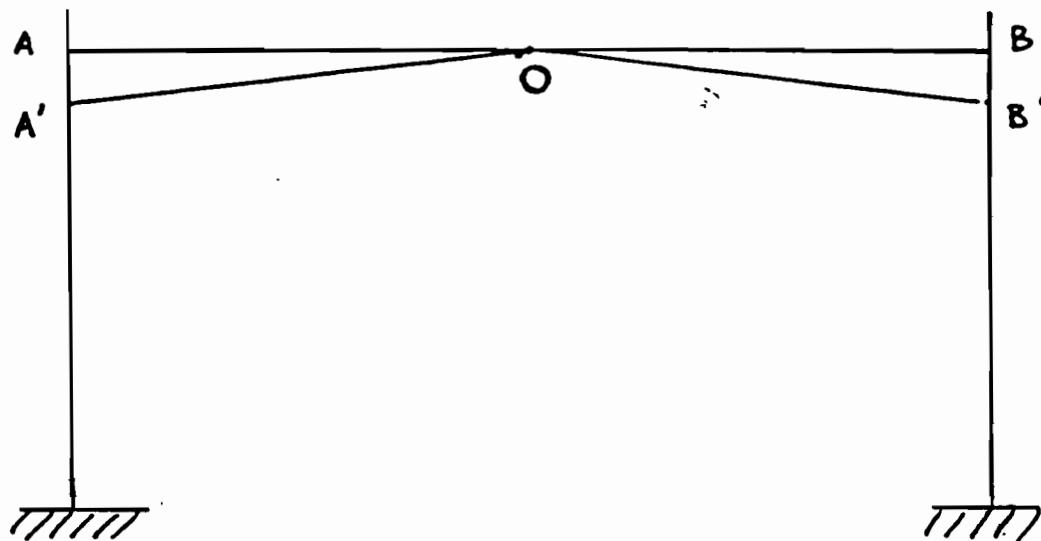
Il est plus simple d'utiliser l'altitude du plan de visée et pour chaque point rayonné, on soustrait la visée (avant) de l'altitude de ce plan.

RECOMMANDATION

Ecrire les altitudes avec le mm pour éviter les erreurs d'addition ou de soustraction. 4 chiffres

Vérification du NIVEAU

On se place à équidistance entre deux points (25 m de portée) et on mesure la dénivellation, ensuite on place le niveau le plus près possible de l'un des deux points et on mesure de nouveau cette dénivellation, les 2 nombres trouvés doivent être égaux au mm près.



Un niveau déréglé génère un cône et non un plan horizontal mais les résultats sont corrects si les points visés sont à la même distance du niveau.

Règle du fil nivéole permis. $A > 3 \text{ m}$ ✓

Règle : Dans la mesure du possible les portées avant et arrière ne doivent pas être trop inégales.

Vérification de la mire :

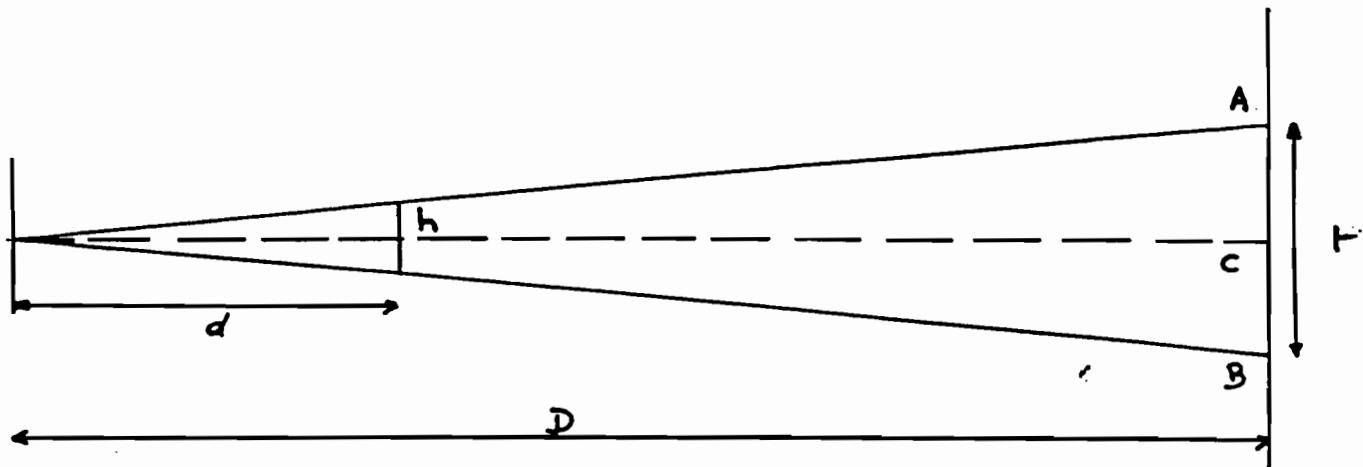
Certaines nivelles de mire sont réglables. Pour régler la nivelle, placer la mire verticale à l'aide d'un niveau de maçon ou d'un fil à plomb, si la bulle n'est pas dans son repère, l'y amener à l'aide des 3 vis de réglage.

Mesure des distances

Il s'agit toujours des distances horizontales, on en tiendra compte en cas de fortes pentes

Pour l'alignement, on utilise des jalons, on peut aligner à l'oeil ou avec le fil vertical du réticule du niveau.

Mesure indirecte des distances Fils stadiométriques



$$\frac{H}{h} = \frac{D}{d} \Rightarrow D = \frac{H}{h} \times d \Rightarrow D = \frac{d}{h} \times H$$

, Le rapport d/h généralement égal à 100 est déterminé une fois pour toutes.

On a donc

$$D = 100 \times H, \text{ } H \text{ étant en mm,}$$

on a pour D en mm

$$D = H/10$$

c'est-à-dire que 1 mm représente 1 dm réel.

La stadia est pratique quand une grande précision n'est pas nécessaire et qu'on peut placer le niveau sur le chemin parcouru. C'est le cas généralement, quand on fait un profil en long du lit d'une rivière.

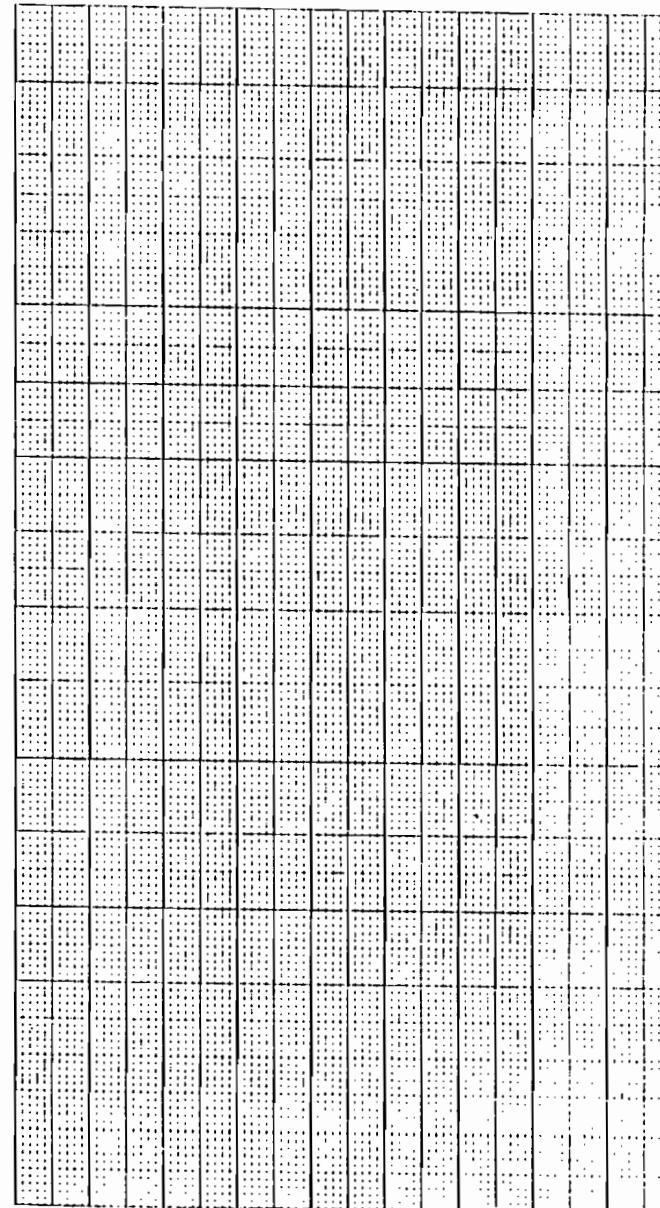
NIVELLEMENT :

116

CROQUIS

NIVELLEMENT :

CROQUIS



NIVELLEMENT :

CROQUIS

