

DELEGATION GÉNÉRALE
A LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
- D.G.R.S.T. -

MINISTÈRE DU PLAN
DE LA RÉPUBLIQUE
DE HAUTE-VOLTA

Office de la Recherche
Scientifique et Technique
Outre-Mer
- O.R.S.T.O.M. -

Groupement d'Études et de Recherches
pour le Développement de
l'Agronomie Tropicale
- G.E.R.D.A.T. -

Institut d'Élevage et de
Médecine Vétérinaire
des Pays Tropicaux
- I.E.M.V.T. -

Centre Technique Forestier Tropical
- C.T.F.T. -

Université Paris VII
Laboratoire de Géographie physique
U.E.R. de Géographie et
Sciences de la Société

Centre National
de la Recherche Scientifique
- C.N.R.S. -

Centre d'Études Phytosociologiques
et Écologiques
Louis EMBERGER de Montpellier
- C.E.P.E. -

A.C.C. LUTTE CONTRE L'ARIDITE

DANS L'OULDALAN

(Haute-Volta)

ETALONNAGE DE L'HUMIDIMETRE SOLO
DANS LES SOLS SAHELIENS DU BASSIN
VERSANT DE LA MARE D'OURSIS
(HAUTE-VOLTA)

MARCEL SICOT
Agronome de l'ORSTOM

Octobre 1979

OFFICE DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
OUTRE - MER
ORSTOM

ETALONNAGE DE L'HUMIDIMETRE SOLO
DANS LES SOLS SAHELIENS DU BASSIN
VERSANT DE LA MARE D'OURSI
(HAUTE VOLTA).

Marcel SICOT
ORSTOM - Agronomie

Octobre 1979

SOMMAIRE

Avertissement

Introduction

I. Le milieu

II. Matériel et méthodes

- 21 Le dispositif expérimental
- 22 Le matériel de mesure.
- 23 Méthodes de mesure

III. Résultats

- 31 L'étalonnage "in situ"
- 32 Les éléments d'étalonnage fournis par l'analyse neutronique des sols au laboratoire des radio-isotopes d'Adiopodoumé
- 33 L'étalonnage neutronique des sols d'après l'analyse sous flux de neutrons thermiques à Cadarache
 - 331 Les caractéristiques d'absorption et de diffusion des sols du bassin
 - 332 Les équations d'étalonnage selon les données de Cadarache
- 34 Comparaison des résultats fournis par les différentes techniques d'étalonnage de la sonde solo dans les sols du bassin.

IV. Discussion

- 41 Origine des divergences d'étalonnage en milieux sableux
- 42 Origine des divergences d'étalonnage en milieux argileux
- 43 Incidences des caractéristiques édaphiques du bassin sur la mesure de l'humidité volumique du sol.

V. Exemple d'utilisation de la sonde solo après étalonnage

Conclusion

Références bibliographiques

AVERTISSEMENT

Le milieu sahélien peut être considéré dans un sens général comme un écosystème défini par des conditions spécifiques d'aridité : caractère saisonnier et sporadique des pluies, longueur de la saison sèche, intensité de l'évaporation, forte variabilité des précipitations, précarité de la réserve en eau du sol, couverture végétale d'allure steppique... C'est une zone présentant des caractères fluctuants pour ce qui concerne les variables écologiques, où les équilibres biologiques sont fragiles et peuvent être rompus à tout moment. De telles conditions climatiques imposent des limitations sévères à l'exploitation de cette zone.

Pour parvenir à une utilisation plus rationnelle du milieu sahélien, il est non seulement nécessaire de comprendre le réseau d'interactions complexes et dynamiques qui se manifestent au niveau de cette entité, mais encore de saisir les relations entre l'homme et son milieu. Cela suppose une bonne connaissance de la structure et du fonctionnement de l'écosystème et de la variation de ses ressources en fonction des aléas climatiques.

Cependant et afin de pouvoir dégager les lignes directrices de la planification de ces zones à conditions marginales, il est nécessaire d'aboutir à une approche multidisciplinaire des interactions de l'écosystème.

C'est dans cet esprit qu'a été élaboré, à l'initiative de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique française*, un programme de recherche intégré dans la région de la Mare d'Oursi (Haute-Volta), considérée comme représentative des contraintes générales du sahel voltaïque. Des chercheurs de différentes disciplines se proposent d'y dresser un inventaire des ressources des milieux physiques et biologiques, de leur exploitation par l'homme, et de définir l'évolution de ces différentes ressources en fonction des facteurs écologiques.

* Comité L.A.T. de la DGRST : Action conjointe et concertée : Lutte contre l'aridité en milieu tropical (Mali, Haute-Volta, Niger).

Dans le cadre de ces travaux prennent place les recherches entreprises par les sections AGRONOMIE et BOTANIQUE de l'ORSTOM.

Le thème de recherche de ce groupe de travail est l'étude de la production de formations végétales sahéliennes en fonction des variables écologiques et plus particulièrement du bilan hydrique. Deux programmes parallèles mais complémentaires ont été développés sur différentes unités édaphiques :

- le premier porte sur les caractéristiques de la végétation
- le second est relatif au cycle de l'eau.

Les études relatives à la végétation accordent une attention particulière à la structure, la composition floristique, la production et à la dynamique des formations végétales retenues. Les observations sont menées à deux échelles :

- La première, l'échelle stationnelle, permet d'analyser plus finement l'évolution qualitative et quantitative de la végétation, et la dynamique de la production,
- La seconde, l'échelle du bassin versant, permet d'établir un bilan annuel de la production, d'en suivre les variations interannuelles et de tester la validité de l'extrapolation de certains résultats obtenus à grande échelle.

Le programme concernant le cycle de l'eau s'attache à déterminer :

- les caractères hydrodynamiques des sols (densité, capacité de rétention, perméabilité...)
- Les flux de transfert de l'eau dans les différents milieux (précipitations, évapotranspiration, dynamique de l'eau dans le sol...).

Les observations sont réalisées dans le détail au niveau stationnel, mais des coefficients de passage permettant l'extrapolation des résultats à plus petite échelle seront déterminés.

Ces deux programmes se proposent d'élaborer ultérieurement une fonction de production de la matière végétale en fonction des variables écologiques notamment climatiques et édaphiques.

Le caractère prévisionnel qui en résultera devrait permettre aux planificateurs d'organiser l'aménagement et l'exploitation des potentialités agropastorales ainsi définies.

INTRODUCTION

Même en limitant leur champ d'application, les techniques et méthodes de détermination de l'eau dans les matériaux se comptent par dizaines. Leur nombre et leur diversité indiquent clairement qu'aucune d'elles ne s'impose de façon indiscutable pour atteindre complètement l'objectif assigné.

Dans le domaine de l'eau du sol, la méthode gravimétrique sert de référence. Elle a l'inconvénient d'être destructive et d'intégrer l'hétérogénéité ponctuelle du substrat, d'où la nécessité de procéder à un échantillonnage volumineux (Reynolds) qui se révèle vite impraticable, lorsqu'il doit être fréquemment répété.

Aussi, dans les études axées sur le suivi de l'eau, on lui substitue d'autres méthodes, parmi lesquelles celles faisant appel à la conductivité thermique, à l'absorption des rayons γ et à la dispersion des neutrons sont les plus courantes.

Les techniques basées sur la conductivité thermique sont bien adaptées à la mesure de l'eau dans les horizons superficiels et présentent une bonne sensibilité entre le point de flétrissement et la capacité au champ. Mais l'installation à demeure des sondes est source de perturbations non négligeables et l'étalonnage et le fonctionnement de l'appareillage sont très délicats. En dépit de nombreux travaux que ces méthodes ont suscités, signale Normand(1970), il n'existe pas à sa connaissance, de dispositif commercial utilisant ce principe de mesure.

Quant aux appareils à absorption de rayons γ , ils sont encombrants et le dispositif nécessaire à l'exécution des mesures, d'installation délicate. En dehors de la détermination de la densité des matériaux, ils ne s'utilisent qu'en laboratoire où ils constituent des instruments de recherche de haute précision. La méthode neutronique, la plus courante, entraîne relativement peu de perturbations dans le milieu. Elle est aussi bien adaptée à l'étude de l'humidité du sol dans les couches profondes, au suivi et à l'analyse du bilan hydrique. Mais les instruments dérivés sont encore fragiles et coûteux. Leur maniement requiert beaucoup de soins et leur maintenance une haute technicité.

C'est néanmoins cette dernière qui a été retenue pour l'étude du bilan hydrique dans les écosystèmes sahéliens de la Mare d'Oursi.

A posteriori, elle s'est révélée capable de fournir des résultats cohérents, compte tenu de l'extraordinaire hétérogénéité du milieu naturel sahélien.

Le présent document expose les résultats de l'étalonnage de l'humidimètre solo utilisé à cette occasion.

Notre but très pratique dans ce document est d'explicitier l'équation d'équivalence reliant les comptages neutroniques de la sonde à l'humidimètre volumique du sol.

Cette opération n'est cependant pas dépourvue d'intérêt théorique, car ce faisant, nous sommes amenés à faire une analyse critique de la précision de l'étalonnage et à poser le problème de l'adaptation de la méthode, à l'étude du bilan hydrique en milieu sahélien.

I. Le milieu

Le bassin versant de la Mare d'Oursi, cadre expérimental de ce travail, a été décrit antérieurement (Grouzis 1979, Leprun 1977, Sicot 1976, 1977, 1978, Toutain 1976). Nous en rappelons les principales caractéristiques d'un grand intérêt pour l'interprétation des résultats exposés ci-après.

Le bassin appartient à la zone soudano-sahélienne (Aubreville 1949), caractérisée par :

- une saison sèche longue de 8 à 9 mois, d'octobre à juin, durant laquelle, la température initialement fraîche augmente progressivement, l'alizé continental ou harmattan souffle en permanence et l'humidité atmosphérique est très faible,
- une saison humide de 3 à 4 mois pendant laquelle les pluies d'une hauteur totale inférieure à 650 mm tombent en averses orageuses irrégulières permettant difficilement l'installation et la croissance d'une végétation discontinue, d'épineux en strate ligneuse et de graminées annuelles en strate herbacée.

Les sols sont très diversifiés, formant des chaînes de lithosols, sols peu évolués, sols ferrugineux, sols bruns et vertisols...

Leurs caractéristiques physiques et hydrodynamiques permettent de distinguer les sols de texture :

- sableuse (sols dunaires, horizons superficiels des sols de certains piémonts)
- limono-argileuse à argileuse (glacis et bas-fonds)
- ou complexe, composée d'un cortex grossier de concrétions gravillonnaires et d'un ciment limono-argileux faisant place à un sable lessivé au contact de la roche-mère.

La montmorillonite constitue généralement 80-90% des éléments fins (dans le bas-fond Winde-Tiuluki l'argile se partage également entre la kaolinite et la montmorillonite, soit 25% de la composition totale pour chaque type d'argile)

En dehors des sables, ces sols constituent de très mauvais supports physiques pour la végétation, en raison de leur compacité, leur faible porosité et leur imperméabilité qui s'opposent à la circulation de l'eau.

II. Matériel et méthodes

21 - Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental qui se réfère à l'échantillonnage du bassin en 1976 (SICOT 1976) a été décrit en 1978 par SICOT sur les plans édapho-climatiques et par GROUZIS sur le plan de la végétation.

L'humidimètre a été étalonné dans :

- 1 sol de sable pratiquement pur, sur le cordon dunaire, (Oursi AMS),
- 1 sol de piémont, sableux en surface, qui s'enrichit progressivement en éléments fins pour donner une argile sableuse en profondeur, (Kolel piémont Cep),
- 3 sols limono argileux constituant respectivement deux glacis (Kouni-Kouni Sgl, Kolel glacis Sgr) et un bas fond (Winde Tiuluki Spt),
- 2 sols complexes de texture argilo gravillonnaire issus de la dégradation sur place de granites et migmatites et du transit d'éléments divers.

Ces sols sont souvent profonds et homogènes sur l'ensemble du profil. Cependant le sol dunaire présente une surface de discontinuité due à la juxtaposition des deux ergs formant l'ensablement, les pédiments sont hétérogènes de par leur formation et leur évolution et le bas-fond, en raison des remaniements saisonniers qui occasionnent la formation de poches et d'un réseau d'éléments de texture grossière fluctuant au gré des fissures et des fentes de retrait.

22 - Le matériel de mesure

Les échantillons de sols ont été prélevés à l'aide de tarières agronomiques, séchés en étuve à 105° C et pesés au 1/100 de gramme. Les caractéristiques neutroniques des sols (voir ci-après) et les équations des courbes d'étalonnage neutronique ont été déterminées au moyen d'humidimètres de type solo et Lepaute 310.

23 - Méthodes de mesure

Pour l'étalonnage dans les différents sols de la sonde Solo, on a fait appel à :

- la méthode d'analyse d'échantillons sous flux neutronique de Cadarache et de sa variante du laboratoire des radio-isotopes à Adiopodoumé en Côte d'Ivoire,

- la méthode de régression entre comptages neutroniques et humidités volumiques déterminées par gravimétrie

Pour la première méthode, suivant la théorie développée par Couchat (1974), la réponse N de l'appareil est fonction de la teneur en eau volumique H_v et des caractéristiques neutroniques du sol : ΣA (section efficace d'absorption de neutrons thermiques) et ΣD (section efficace de diffusion des neutrons thermiques) et de sa densité apparente ρ_s sèche :

$$N = (\alpha \rho_s + \beta) + \gamma \rho_s + \delta$$

Les coefficients α, β, γ et δ dépendent de ΣA et ΣD , de l'humidimètre (géométrie de la sonde, puissance de la source neutronique, rendement du détecteur...) et du tubage permettant l'accès de la sonde au point de mesure.

Cette équation est utilisée en ramenant le comptage à celui d'un appareil donnant 1 000 impulsions par seconde (i/s) dans l'eau pure. Par ailleurs des coefficients de passage permettent de transformer le comptage d'un humidimètre donné en celui d'un autre humidimètre. Dans ces conditions, n'importe quel appareil peut être étalonné au laboratoire à partir de l'analyse neutronique du substrat.

La seconde méthode qui s'applique sur le terrain consiste :

- à repérer l'humidité initiale et à suivre l'évolution du ressuyage après irrigation à la fois par des mesures neutroniques et des mesures gravimétriques
- et à expliciter la liaison existant entre ces deux séries de mesures.

III RESULTATS

31. L'étalonnage "in situ"

Les résultats de l'étalonnage direct de la sonde solo dans les différents milieux sont représentés sur les figures 1 à 6.

D'une façon générale, le nuage des points s'étire suivant une bande indiquant des variations proportionnelles entre le comptage neutronique N et l'humidité volumique Hv

$$\frac{\Delta N}{\Delta Hv} = a \quad a = \text{constante de proportionnalité}$$

La largeur de cette bande montre l'importance des fluctuations autour des points moyens et révèle une certaine imprécision quant à la détermination de l'origine des ordonnées b (terme constant) de l'équation de la régression.

Les coefficients de déterminations calculés sont hautement significatifs : $r^2 \gg 0,9$ indiquant une liaison quasi rigide assimilable à l'équation linéaire :

$$N = a Hv + b$$

L'analyse détaillée du nuage permet d'individualiser les horizons de surface de l'ensemble du profil. Dans les glacis cette distinction peut paraître superflue, une régression unique pouvant être adoptée. Mais ce faisant, on se prive de la possibilité d'étudier les couches superficielles du sol. L'équation unique, tout en restant valable pour l'ensemble du profil, appliquée aux horizons proches de la surface, peut aboutir dans certains cas, à des absurdités, à des humidités négatives par exemple. Il s'en suit que dans ces milieux, il est nécessaire de maintenir l'étalonnage des horizons superficiels séparé du reste du profil.

C'est a fortiori impératif en milieu sableux où l'on note des différences sensibles portant à la fois sur les deux constantes de l'équation d'étalonnage. Le cas le plus typique est celui du sol dunaire où dans un profil très homogène on doit étalonner séparément par couche de sol de 15 cm, jusqu'à une profondeur de 60 cm.

32. Les éléments d'étalonnage fournis par l'analyse neutronique des sols au laboratoire des radio-isotopes d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire)

Ce sont initialement les premières données recueillies au cours de cette opération. Le laboratoire des radio-isotopes de l'ORSTOM au Centre d'Adiopodoumé, après l'analyse de nos sols n'a fourni que le coefficient a, déterminé au moyen d'un humidimètre Lepaute 310, à charge pour nous de définir par des manipulations de terrain le terme B et de préciser ces deux constantes pour la sonde solo. Deux coefficients de passage,

$\frac{1}{0,9}$ pour a et -30 pour b (utilisés pour les sols

d'Adiopodoumé), nous étaient suggérés, avec cependant, une mise en garde contre d'éventuelles variations, suivant le type de sol. Les valeurs fournies sont reportées dans la colonne α du tableau 1. Les valeurs transformées de la colonne a résultent de la multiplication de

α par $\frac{1}{0,95}$, terme de passage de la sonde

Lepaute à la sonde solo, déduit des résultats fournis par Cadarache.

Exception faite pour les stations Gountouré et Winde-Tiuluki déjà définies comme hétérogènes, le coefficient varie peu avec la profondeur.

Le profil dunaire apparaît particulièrement homogène à cet égard.

33. L'étalonnage neutronique des sols d'après l'analyse sous flux de neutrons thermiques à Cadarache

331. Les caractéristiques d'absorption et de diffusion des sols du bassin

L'analyse neutronique des échantillons de sol n'a été entreprise que dans le but de confirmer l'étalonnage sur le terrain.

Tableau 1. Pente de la droite d'étalonnage de la sonde solo dans les sols du bassin (données d'Adiopodoumé).

Stations	Horizons	α	a
Oursi (AMs)	0 - 40	14,05	14,79
	40 - 75	14,2	14,95
	75 - 120	14,3	15,05
	120 - 170	14,3	15,05
Kolel piémont (Cep)	22 - 53	12,9	13,58
	53 - 75	13,1	13,79
Kouni-Kouni (Sgl)	0 - 20	12,5	13,16
	20 - 55	12,2	12,84
	55 - 130	12,3	12,95
Winde-Tiuluki (Spt)	0 - 25	11,9	12,53
	60 - 104	11,3	11,89
	104 - 145	10,1	10,63
Gountouré (Ase)	0 - 32	13,4	14,11
	32 - 75	12,2	12,84

α = données d'Adiopodoumé

a = données transformées à partir des résultats de Cadarache.

Seules les tranches de sol de 45 à 75 cm ont été analysées, étant donné l'homogénéité de la plupart des profils et le prix des analyses.

Les résultats fournis par Cadarache sont consignés au tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques neutroniques des sols du bassin
(D'après Cadarache)

Station	$\Sigma a(\text{mm}^2/\text{g})$	$\Sigma d(\text{mm}^2/\text{g})$	eau de constitution(%)
Oursi	0,29	12,400	0,8
Kolel piémont	0,38	12,300	0,8
Gountouré	0,58	17,500	2,3
Kolel glacis	0,67	22,400	4,1
Folaka	1,01	33,100	8,2

Σa = section efficace d'absorption neutronique

Σd = section efficace de diffusion neutronique

Si l'on se reporte au référentiel des résultats d'analyses établi par Cadarache et représenté à la figure 7 (in Couchat 1977), on note que :

- les points représentatifs de l'horizon 45-75cm des différents sols du bassin sont alignés, révélant une certaine proportionnalité des caractéristiques d'absorption et de diffusion dans ces sols,
- dans sa grande majorité ils absorbent et diffusent peu les neutrons thermiques,
- les valeurs relatives au site dunaire d'Oursi semblent constituer des minima à cet égard, cependant que celles de Polaka les plus élevées du bassin dépassent à peine le milieu des deux gammes de variation.

Il est aussi à remarquer que les stations Gountouré et Polaka pédologiquement, (Leprun 1977) et hydrodynamiquement similaires, sont ici nettement discriminées par les critères d'absorption et de diffusion neutroniques. Au contraire, les différences texturales si tranchées des terrains sableux et argileux ne se traduisent pas par des écarts élevés des caractéristiques neutroniques.

En outre, c'est paradoxalement le sol de Polaka présentant un important cortex de posolithes ferrugineux qui possède la plus forte teneur en eau de constitution, d'après les données de Cadarache.

332. Les équations d'étalonnage selon les données de Cadarache

Les constantes de l'équation d'équivalence permettant de connaître, dans chaque station, l'humidité volumique du sol en fonction du taux de comptage et de la densité apparente sèche sont regroupées au tableau 3.

Appliquée à l'ensemble du profil, l'étalonnage varie peu avec la densité apparente du matériau. On note le problème déjà signalé à propos de l'étalonnage sur le terrain à savoir la nécessité d'un étalonnage particulier pour la couche superficielle du sol afin d'éviter d'aboutir à des humidités négatives dans certains cas.

34. Comparaison des résultats fournis par les différentes techniques d'étalonnage de la sonde solo dans les sols du bassin.

Au tableau 3 sont reportés, les éléments d'étalonnage fournis par les trois techniques utilisées. Les résultats du laboratoire d'Adiopodoumé sont en bon accord avec ceux de Cadarache. Les cas de divergence à plus de 5%, soulignés dans le tableau, concernent la couche superficielle du sol où a été étendue l'étalonnage neutronique effectuée par Cadarache. De plus, dans le cas de la station de Gountouré, nous savons que le profil pédologique est hétérogène et que, par conséquent, toute généralisation à l'ensemble du profil peut être litigieuse.

Les divergences plus importantes entre méthodes neutroniques et de terrain méritent attention. Auparavant on doit noter que pour la couche de sol analysée à Gountouré, la concordance est presque parfaite entre les trois méthodes : voir tableau 3 et figure 8).

Dans la station d'Oursi, l'étalonnage in situ très différent en surface de l'étalonnage neutronique s'en rapproche en profondeur. Il y a similitude des deux équations à partir de 60cm (figure 9).

Dans les terrains argileux les coefficients de proportionnalité entre comptages neutroniques et humidités volumiques sont très proches même pour les horizons non analysés par Cadarache. Par contre, les constantes b diffèrent largement, les valeurs de terrain étant généralement nettement supérieures à celles de Cadarache. Il en résulte qu'on obtiendra à peu près les mêmes valeurs pour les fluctuations de la réserve hydrique du sol par les deux méthodes, mais que les déterminations d'humidité absolue seront différentes.

Tableau 3 A - Tableau comparatif de l'étalonnage de la sonde solo dans les sols du bassin suivant les trois techniques utilisées.

Oursi	0-30 cm	30-45 cm
terrain	N = 7,71 HV + 25	N = 12,02 HV + 20
Adiopodoumé	a = 14,80	a = 14,80
Cadarache	(N = 14,78 HV + 38)	(N = 14,75 HV + 38)
Kolel piémont	0-15 cm	30-45 cm
terrain	N = 13,76 HV + 8,7	N = 13,34 HV + 47
Adiopodoumé	a = 13,58	a = 13,58
Cadarache	N = 13,61 HV + 23,62	N = 13,62 HV + 24
Kolel glacis	0-30 cm	30-150 cm
terrain	N = 10,57 HV + 56	N = 11,53 HV + 56
Adiopodoumé		
Cadarache	(N = 12,20 HV + 68)	N = 12,38 HV + 77
Kouni-Kouni	0-30 cm	30-45 cm
terrain	N = 11,20 HV + 137	N = 10,84 HV + 184
Adiopodoumé	a = <u>12,94</u>	a = 12,63
Cadarache	(N = <u>11,82</u> HV + 45,6)	(N = 12,08 HV + 60)
Winde-Tiuluki	0-30 cm	30-150 cm
terrain	N = 12,05 HV + 142	N = 13,70 HV + 133
Adiopodoumé	a = 12,53	a = <u>11,26</u>
Cadarache	(N = 12 HV + 56)	(N = 12,08 HV + 60)
Gountouré	0-30 cm	30-45 cm
terrain	N = 10,32 HV + 27	N = 13,32 HV + 18,5
Adiopodoumé	a = <u>13,87</u>	a = <u>12,63</u>
Cadarache	(N = 12,51 HV + 44)	(N = 12,51 HV + 44)
Polaka		
Cadarache		

() extention litigieuse de l'étalonnage effectuée à Cadarache sur 45-75 cm

— divergence entre les pentes des droites d'étalonnage données par Adiopodoumé et Cadarache.

Tableau 3 B - Tableau comparatif de l'étalonnage de la sonde solo dans les sols du bassin suivant les trois techniques utilisées.

Oursi	0-30 cm	30-45 cm
terrain	N = 12,90 HV + 46,76	N = 13,91 HV + 42
Adiopodoumé	a = 14,95	a = 15,05
Cadarache	N = 14,96 HV + 42	N = 14,79 HV + 27
Kolel piémont	60-75 cm	90-150 cm
terrain	N = 13,52 HV + 58	N = 13,39 HV + 57
Adiopodoumé	a = 13,79	
Cadarache	N = 13,74 HV + 26	
Kolel glacis		
terrain		
Adiopodoumé		
Cadarache		
Kouni-Kouni	45-150	
terrain	N = 12,51 HV + 124	
Adiopodoumé	a = 12,73	
Cadarache	N = 12,24 HV + 69,4	
Winde-Tiuluki		
terrain		
Adiopodoumé		
Cadarache		
Gountouré	45-75 cm	75-150 cm
terrain	N = 12,75 HV + 58	N = 12,75 HV + 67
Adiopodoumé	a = 12,63	a = 12,63
Cadarache	N = 12,80 HV + 54	N = 12,71 HV + 51
Folaka	45-75 cm	
Cadarache	N = 10,87 HV + 121	

IV DISCUSSION

La discussion des résultats se ramène à l'interprétation des divergences d'étalonnage constatées en milieu sableux d'une part et en milieu argileux d'autre part.

41 Origine des divergences d'étalonnage en milieux sableux

Les divergences d'étalonnage observées en milieux sableux procèdent d'un phénomène plus général : la modification de la détection des neutrons lents dans les couches superficielles du sol.

La sphère d'influence de la sonde contient 95% des neutrons lents détectés lors de la mesure. Suivant la formule de Van Bavel, elle a pour rayon :

$$R = 15 \sqrt[3]{\frac{100}{Hv}} \quad \text{avec } R \text{ en cm} \\ \text{Hv en \%}$$

Plus l'humidité volumique est faible, plus le volume de détection est important. Le rayon peut atteindre 45 - 60 cm pour les humidités comprises entre 0,5 - 1 %, couramment rencontrées dans les sols sableux durant la saison sèche. Aux environs de la surface du sol, une partie de ce volume, (d'autant plus importante qu'on s'en rapproche, ou que le matériau est plus sec) est dans l'air. Les neutrons lents qui s'y trouvent diffusent librement, échappant ainsi à la détection. La réponse de l'appareil est de ce fait, plus faible en horizons superficiels qu'en horizons profonds, plus faible en milieu sableux qu'en milieu argileux.

L'utilisation d'un réflecteur pour les mesures de surface est un palliatif qui ne supprime pas totalement le phénomène.

Contrairement à l'étalonnage direct, l'étalonnage neutronique n'en tient pas compte. Il est donc normal, pour les couches superficielles du profil de trouver des constantes plus petites (en étalonnage) sur le terrain qu'en étalonnage neutronique.

42. Origine des divergences d'étalonnage en milieux argileux

L'étalonnage direct est moins précis que l'étalonnage indirect. Sans préjuger de la précision de celui-ci, nous faisons remarquer que l'étalonnage direct combine sur le terrain, des mesures gravimétriques aux mesures neutroniques. A l'erreur propre à la méthode neutronique s'ajoutent celles relevant de la mesure de l'humidité pondérale et de la densité apparente. A ce propos, il faut noter

que l'incertitude sur la densité se répercute deux fois dans l'étalonnage "in situ" : une première fois dans l'étalonnage neutronique, la seconde lors du calcul de l'humidité volumique.

Du fait de l'imprécision relative de l'étalonnage direct par rapport à l'étalonnage neutronique, le coefficient de corrélation r , ainsi que la constante de proportionnalité a de la régression linéaire sont plus faibles en étalonnage direct. La constante b est au contraire plus élevée. Les observations en milieux argileux exposées ci-dessus, sont donc en accord avec les conséquences prévisibles de la différence de précision des deux méthodes.

43. Incidences des caractéristiques édaphiques du bassin sur la mesure de l'humidité volumique du sol

Les avantages de la méthode neutronique sur les autres méthodes de mesure de l'humidité du sol, sur la méthode pondérale en particulier, ne sont plus à démontrer. (Couchat, Guennelon et Cabibel, Maertens et al.). Par ailleurs, depuis 1956 (Van Bavel et al), l'étalonnage des humidimètres ne pose plus de problème d'ordre théorique. Tout récemment Valancogne, Fouère et Hao ont constaté une similitude parfaite entre les méthodes directe et neutronique, en étalonnant leur sonde solo dans les sols de la Minière, près de Versailles.

Ces considérations nous amènent à rechercher au niveau des caractéristiques particulières des sols du bassin, les causes des divergences d'étalonnage constatées.

L'étalonnage indirect au ban neutronique, comme l'étalonnage direct sur le terrain, requiert la détermination de la densité apparente du sol. Il ressort à la fois de l'examen des résultats et de leur interprétation, que l'erreur commise sur ce paramètre a beaucoup moins d'incidence sur l'étalonnage neutronique que sur l'étalonnage "in situ". En outre, lorsque les seules fluctuations de la densité proviennent de la précision sur sa mesure et se situent aux environs de 5% (6% est l'imprécision maximale des mesures de densité effectuées dans les sols du bassin : Sicot, données non publiées), "le problème de la mesure de la densité reste posé, mais ne constitue pas un obstacle à l'étalonnage des humidimètres" : (Couchat 1977). C'est le cas généralement rencontré avec les

sols ne renfermant pas un taux appréciable d'argile gonflant (smectitique). Quelle que soit la teneur en eau du sol, son volume et sa porosité ne changent pas et la densité apparente reste invariante. L'humidité volumique ainsi mesurée représente, à l'incertitude de l'étalonnage près, l'humidité réelle du sol.

Il en va tout autrement dans les sols d'Oursi où la montmorillonite constitue 80 - 90% des argiles, lesquelles entrent pour 30 à 50% du substrat en milieux argileux. Dans ces sols, pratiquement dépourvus de porosité pour l'air, mais possédant par contre "une porosité extensible pour l'eau", la diminution de la densité en fonction de l'humidité ne peut être négligée. Nous citons pour preuve, les mesures de densité effectuées dans le glacis de Kouni-Kouni et le bas-fond Winde-Tiuluki. Les résultats relatifs aux états de dessiccation extrême de saison sèche et de saturation de saison des pluies indiquent une diminution de la densité apparente sèche de 1,82-1,84 à 1,34-1,64. Pour expliquer de telles variations sur la valeur mesurée de la densité apparente, on peut faire état des erreurs systématiques propres aux méthodes utilisées : mesures sur mottes, sur prélèvements cylindriques, au densitomètre à membrane. Mais ces erreurs sont surtout liées à la taille des échantillons. Elles jouent peu dans le cadre de nos manipulations. Force est de reconnaître que le gonflement dû à l'hydratation du matériau y est pour beaucoup.

Dans ces sols à argile gonflant, on ne peut pas référer à un paramètre considéré comme invariant et déterminé une fois pour toutes. On doit utiliser la valeur discrète d'une fonction de l'humidité exprimant le volume occupé par un poids de sol, selon son état hydrique.

On en déduit que les deux méthodes d'étalonnage de la sonde solo divergent, parce que la densité apparente considérée comme constante, varie en réalité sur toute la gamme des humidités utilisées. Les divergences d'étalonnage expriment les différences d'impact de la variation de la densité sur deux méthodes.

A la limite, les fluctuations de la densité des argiles smectitiques posent le problème de l'estimation de la réserve hydrique édaphique dans ces milieux. Le calcul ou la mesure de l'humidité volumique

doit faire intervenir la relation densité-humidité sus-mentionnée.

De nombreux travaux traitent de l'hydratation des argiles et de la circulation de l'eau en milieux argileux : (Mering, Calvet, Bardon et Jacquin, Didier et Marrat, Wolsack, de Crecy...). Les différents modèles développés pour interpréter les phénomènes au laboratoire, ne font que mettre l'accent sur les difficultés d'appréhender les systèmes argile-eau-sels minéraux. Les nombreux paramètres physico-chimiques qui interviennent interdisent une quantification rigoureuse sur le terrain et par conséquent toute possibilité d'établissement indirecte de la relation densité-humidité.

Empiriquement, l'estimation de l'humidité volumique et de la réserve hydrique des sols argileux smectitiques est améliorable par la mesure simultanée de la densité apparente et de l'humidité au moyen d'un densimètre-humidimètre Gamma-neutronique : (Normand 1973). En opérant sur le sol en place on tient compte des limites imposées au gonflement par la compactation et l'organisation du profil. Cette parenthèse concerne essentiellement les sols vertiques et vertisols, sols des mares et des bas-fonds. Ils occupent 12 % de la surface du bassin mais leur production représente 36,6% des ressources fourragères (Sicot 1979). Du fait des difficultés sus-mentionnées, il n'existe pratiquement pas de données sur leur régime et bilan hydriques.

V. EXEMPLE D'UTILISATION DE LA SONDE SOLO APRES ETALONNAGE

Les données qui suivent (tableau 4), ont été recueillies dans la station du piémont de Kolel.

Des pluies de 60 mm/h simulées par MM. Collinet et Asseline, pédologues de l'ORSTOM, ont permis de mesurer le ruissellement superficiel et d'en déduire l'infiltration. Parallèlement celle-ci a été mesurée directement à partir de relevés de profils hydriques (mesures gravimétriques dans l'horizon 0-15 cm, mesures neutroniques, au delà).

Les profils hydriques successifs établis d'après les comptages neutroniques sont représentés à la figure 15. Ils permettent de suivre l'humectation du sol et la progression du front d'humectation en profondeur. La longueur utile de 150 cm du tube d'accès de la sonde est dépassée pendant le ressuyage de la 6e pluie. Dès lors, les variations du stock d'eau ne sont plus appréciables. Il n'a pas été

Tableau 4. Evolution du profil (humidité en %) et de la réserve hydrique (mm) d'un sol couvert après des pluies simulées de 60 mm/h

Profondeur (cm)	Numéro d'ordre de la pluie								Ressuyage (100 h)
	0	1	2	4	6	7	9		
0	0	17,8	21,8	18,9	19,8	20,6	19,9	10,0	
15	1,2	17,4	21,8	18,9	19,8	20,6	19,9	10,0	
30	3,7	8,7	11,0	12,9	14,4	14,3	14,2	8,1	
45	5,2	7,4	6,4	15,0	15,2	15,3	16,0	10,0	
60	4,8	5,2	4,6	14,9	15,5	12,6	16,0	10,2	
75	5,0	5,1	4,6	9,9	14,3	10,4	15,5	9,9	
90	4,9	5,1	4,4	5,4	13,0	10,3	14,3	10,1	
105	5,1	5,4	5,0	5,3	12,3	11,6	14,2	11,3	
120	5,8	6,3	5,9	6,2	12,2	13,7	14,2	12,9	
135	6,7	7,1	7,2	7,2	9,0	15,0	15,2	13,0	
150	8,1	8,0	7,7	7,9	8,2	15,5	15,5	14,2	
Réserve totale (mm)	69,4	120,0	130,7	164,3	209,9	214,0	236,8	163,2	

possible d'utiliser le réflecteur de surface en raison du diamètre inhabituel du tubage utilisé. Les humidités mesurées par voie neutronique sont nettement inférieures aux déterminations gravimétriques. L'ajustement des valeurs se fait en multipliant les premières par 1,99.

Dans ces conditions, la quantité d'eau infiltrée durant la première pluie est évaluée à 50,5 mm en intégrant les humidités sur 150 cm. Si on arrête le calcul à 75 cm, niveau du front d'humectation l'accroissement de la réserve hydrique est de 48,6 mm, exactement la valeur calculée par la méthode indirecte. De plus si on se réfère à la mesure de la capacité au champ effectuée en 1977 par Sicot et Zéganadin, on note qu'après 102 heures de ressuyage : (figure 16), la réserve hydrique du sol cumulée sur 150 cm est de 163,2 mm soit pratiquement la capacité au champ évaluée à 169 mm. En outre l'augmentation du stock d'eau par rapport à l'état initial est de 93,8 mm et correspond aux 94 mm trouvés pour la réserve utile pour cette tranche du profil.

Ces diverses données concordent de façon remarquable et prouvent que le fonctionnement de l'humidimètre est excellent dans son domaine d'utilisation.

CONCLUSION

En raison de sa grande diversité pédologique, le bassin versant de la Mare d'Oursi offre des conditions très disparates à la mesure de l'humidité du sol et à l'estimation de la réserve hydrique du profil. Les particularités édaphiques, le fort pourcentage d'argile gonflant tout spécialement sont responsables de divergences d'étalonnage des humidimètres. De l'étalonnage direct sur le terrain ou indirect au ban neutronique, aucune des deux méthodes utilisées ne peut être retenue ou rejetée à priori. Dans les couches superficielles du profil et en milieux sableux, la méthode directe doit être préférée. C'est le contraire en milieux argileux. Lorsque la texture est grossière les deux méthodes sont valables. On ne doit cependant pas exagérer l'importance de ces divergences d'étalonnage. Elles sont faibles et ont été signalées, en raison de concordances plus parfaites entre les méthodes d'étalonnage obtenues en des milieux moins difficiles et de la présence de sols vertiques dans le bassin qui constituent des cas limites pour l'utilisation de l'appareil et pour l'étude de l'eau dans le sol.

L'exemple d'utilisation de l'humidimètre après étalonnage analysé dans ce document permet d'augurer favorablement sur la qualité et la précision des données de bilan hydrique déjà recueillies.

Références bibliographiques

Bardon C. Jacquin C. 1968

Interprétation des phénomènes d'écoulement en milieux argileux.

Rev Inst Fr Petrole 1968, 23, 3, 347-364.

Bourrier J. 1963

Considérations sur la mesure de l'humidité du sol pour la conduite des irrigations Bull. Techn. Génie rural n° 63 24 p.

Calvet R.

Propriété de la montmorillonite : rôle des interactions entre les cations compensateurs et les molécules d'eau. Bull Groupe fr, Argile t 23, 181-190.

Crecy (J. de) 1969

Les vertisols sur calcaire aux Antilles. Problèmes d'utilisation agricole. CR VIIè cong. an. Ass. inter-caraïbes pl. alim. 1969 251-265.

Crecy (J. de) 1975

Déssèchement et réhumectation des pâtes argileuses. Umification des résultats. Ann. agron. 1975, 26, 6, 651-669.

Couchat P 1967

Détermination de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons à partir de l'analyse chimique des sols. Isotopes and Radiation techniques in Soils physico and irrigation studies IAEA, FAO Istanbul - IAEA Vienne.

Couchat P 1974

Mesure neutronique de l'humidité des sols.

Thèse Univ Paul Sabatier. Toulouse.

Couchat P. 1977

Aspects méthodologiques et technologiques de la mesure neutronique de l'humidité des sols. Ann. agron. 1977 28, 5, 477-488.

Didier G., Murat M. 1969

Variation de la pression de gonflement lors de l'hydratation d'une montmorillonite C.R. Acad. Sc. Paris sér. D. t268 3009-3012.

Guennelon R., Cabibel B 1977

Applications diverses de la méthode d'humidimétrie neutronique au contrôle et à l'utilisation des réserves hydriques des sols. Ann. agron. 1977, 28, 5, 489-502.

Leprun J.C. 1977

ACC. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute Volta). Rapport de la mission pédologique ORSTOM - DGRST rap. mult. 19 p.

Maertens C., Morizet J., Studer R. 1965

Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons. Ann. agron., 1965, 16, 1, 5-23.

Merling J.

Gonflement, dispersion et hydratation des argiles...

Normand M. 1970

La mesure de l'humidité du sol. Application aux problèmes d'hydraulique agricole. Bull tech. Génie rural n° 103 232 p.

Normand M. 1973

Une méthode d'étalonnage d'un humidimètre à neutrons utilisant les mesures de densité du gamma-densimètre associé Coll. Emploi Isotopes et rayonnements dans les études sur la physique du sol, l'irrigation et le drainage pour la production agricole. AIEA. FAO Vienne.

Reynolds S.G. 1974

A note on the relationship between size of area and soil moisture variability. J of Hydrol. 1974 22 71-76.

Sicot A.M. 1976

ACC. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan. Evaluation de la production fourragère. Rap. mult. 43 p. bibl. annexes.

Sicot A.M., Zeganadin J.P., 1977

La rétention hydrique des sols du bassin versant de la Mare d'Oursi (Haute-Volta). 1 considération sur la capacité au champ des sols sableux ORSTOM Rap. mult. 24 p.

Sicot A.M. 1978

A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute Volta). Cycle de l'eau et bilan hydrique dans les écosystèmes types du bassin versant de la Mare d'Oursi (Haute-Volta). Analyse préliminaire des données recueillies en 1977. Critique des principes de base du bilan hydrique en milieu sahélien. Rap. mult. 76 p. 16 tabl, 60fig...

Sicot A.M. 1979

Déterminisme de la production et des immobilisations minérales de la strate herbacée des parcours naturels sahéliens.

ORSTOM-DGRST, rap., mult. 13p 7 tabl., 7 fig.

Toutain B. 1976

A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Haute-Volta). Carte des ressources fourragères à 1/50.000ème. Cartographie et notice.

Valancogne C., Feuère A, Aho. N., 1976

Contrôle de l'étalonnage basé sur l'étude neutronique d'échantillon de sol.

Séminaire sur les applications de la méthode neutronique en agronomie et hydrologie. Cadarache 16-18 nov. 1976, rap. mult. 3p + annexes.

Van Bavel C., Underwood M., Swanson R. 1956

Soil moisture measurement by neutron moderation. Soil sc. 1956 B2, 29-42.

Van Bavel C., Nielsen D., Davidson J. 1961

Calibration and characteristics of two neutron moisture probes. Soil Sci. amer. Proc. 1961, 25, 329-334.

Wolsack J. 1976

La circulation de l'eau et des sels en milieux non saturés
BTI 1976. n° 310 363-375.

Fig. 1 ETALONNAGE DE LA SONDE SOLO N° 14
DANS LE SABLE DUNAIRE (AMs)

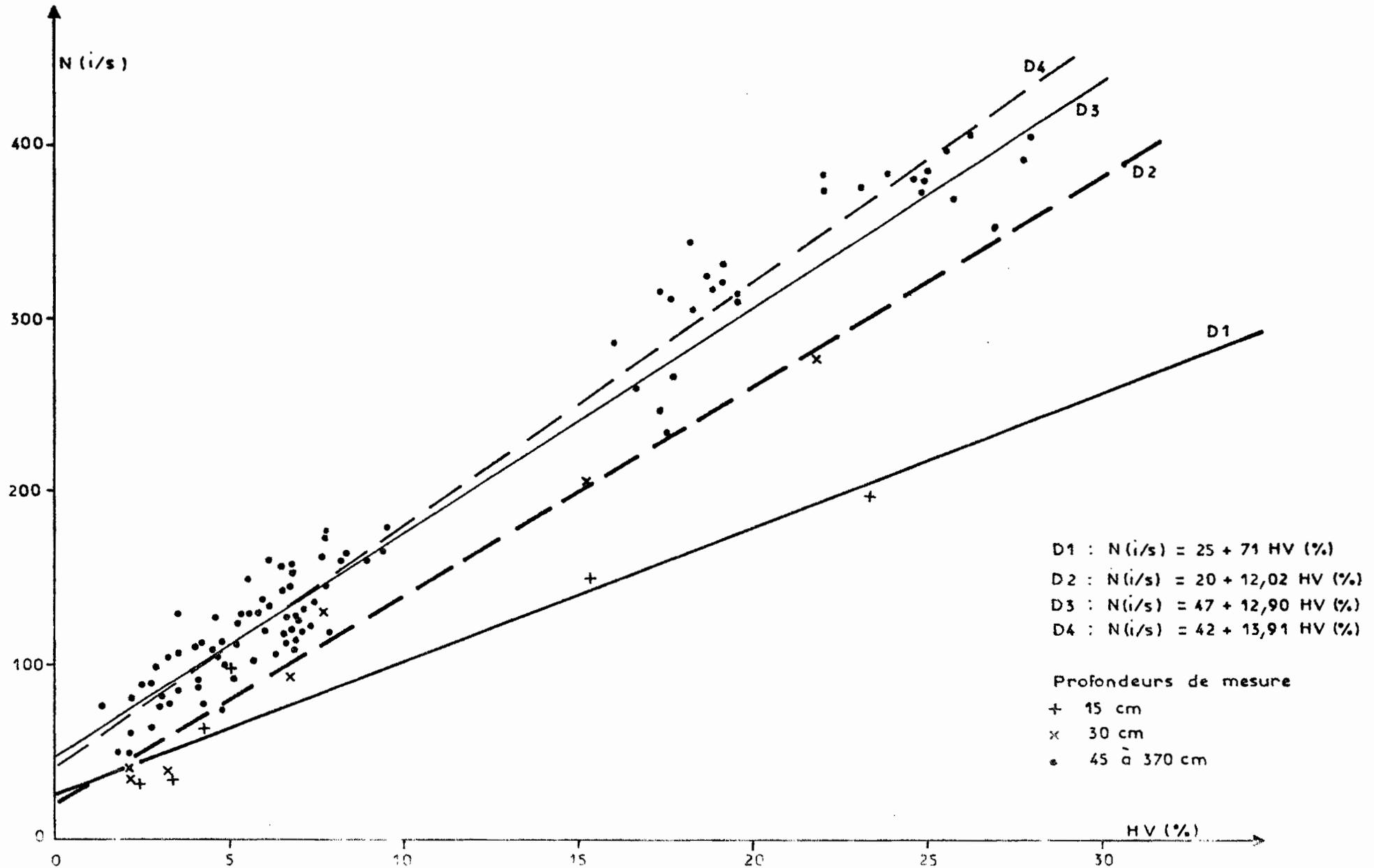


Fig. 2 STATION DE KOLEL PIE MONT
 ETALONNAGE IN SITU DE
 L' HUMIDIMETRE SOLO

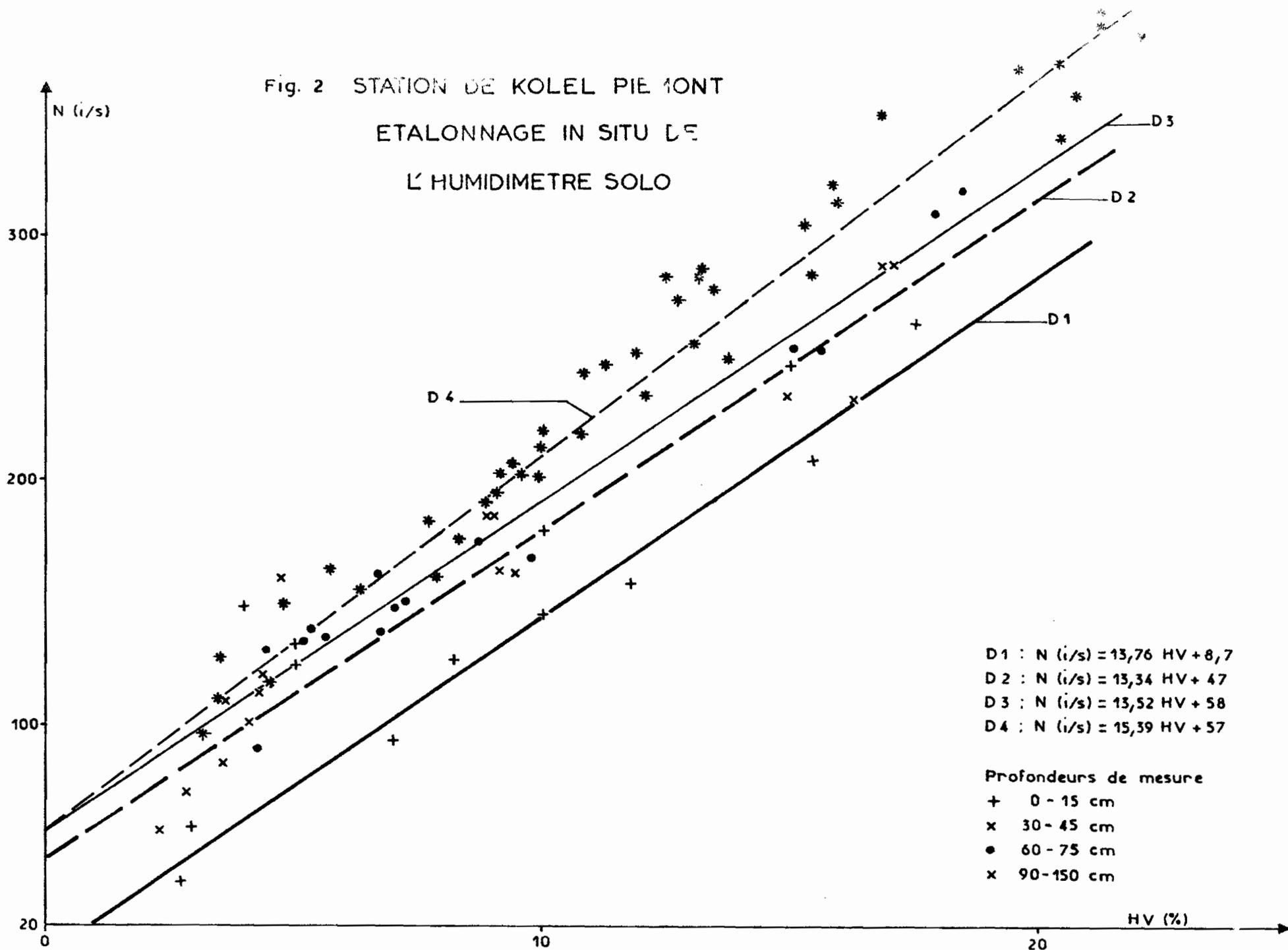
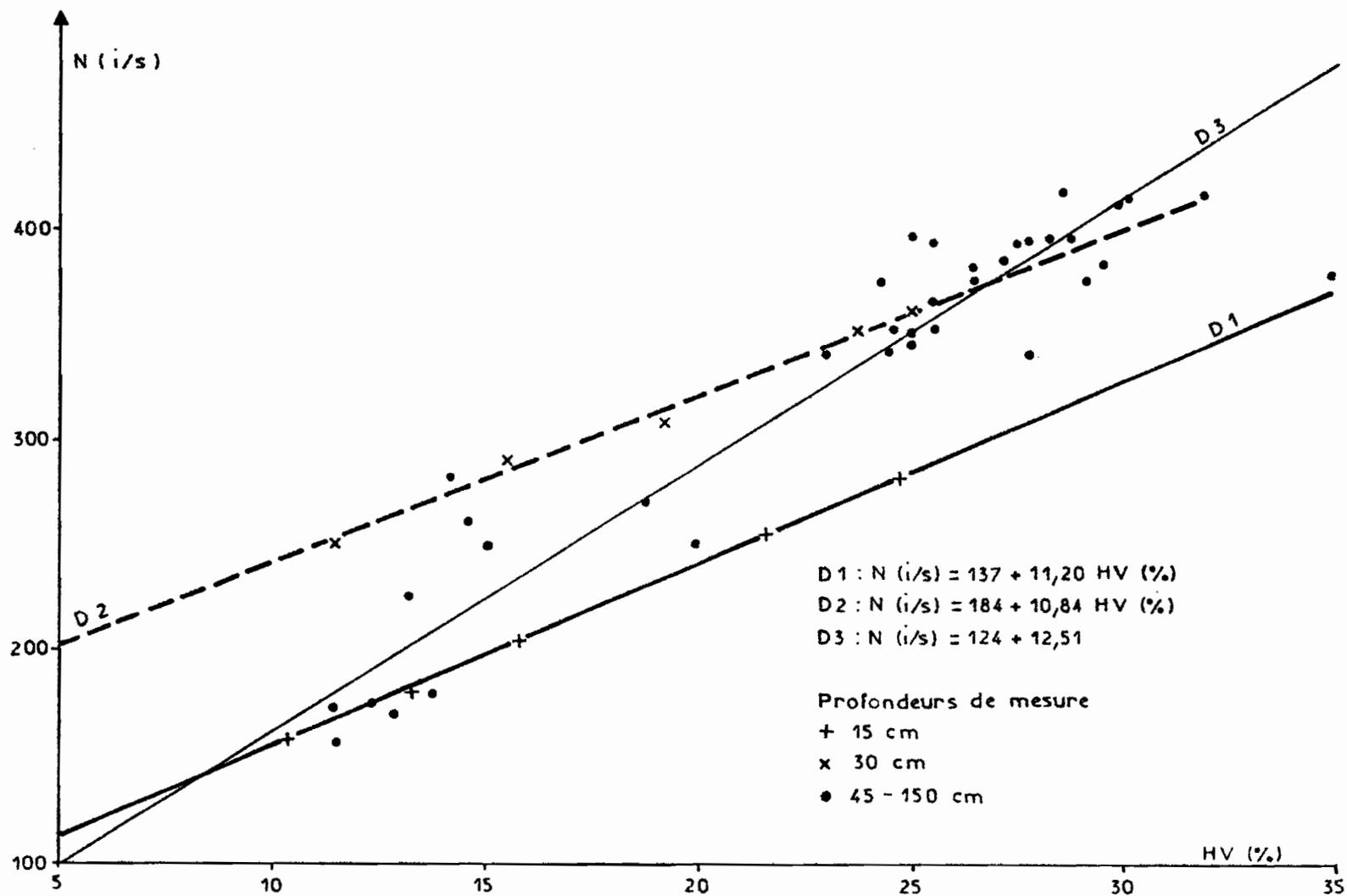


Fig. 3 ETALONNAGE DE LA SONDE SOLO N° 14
DANS LE GLACIS DE KOUNI-KOUNI (Sgl)



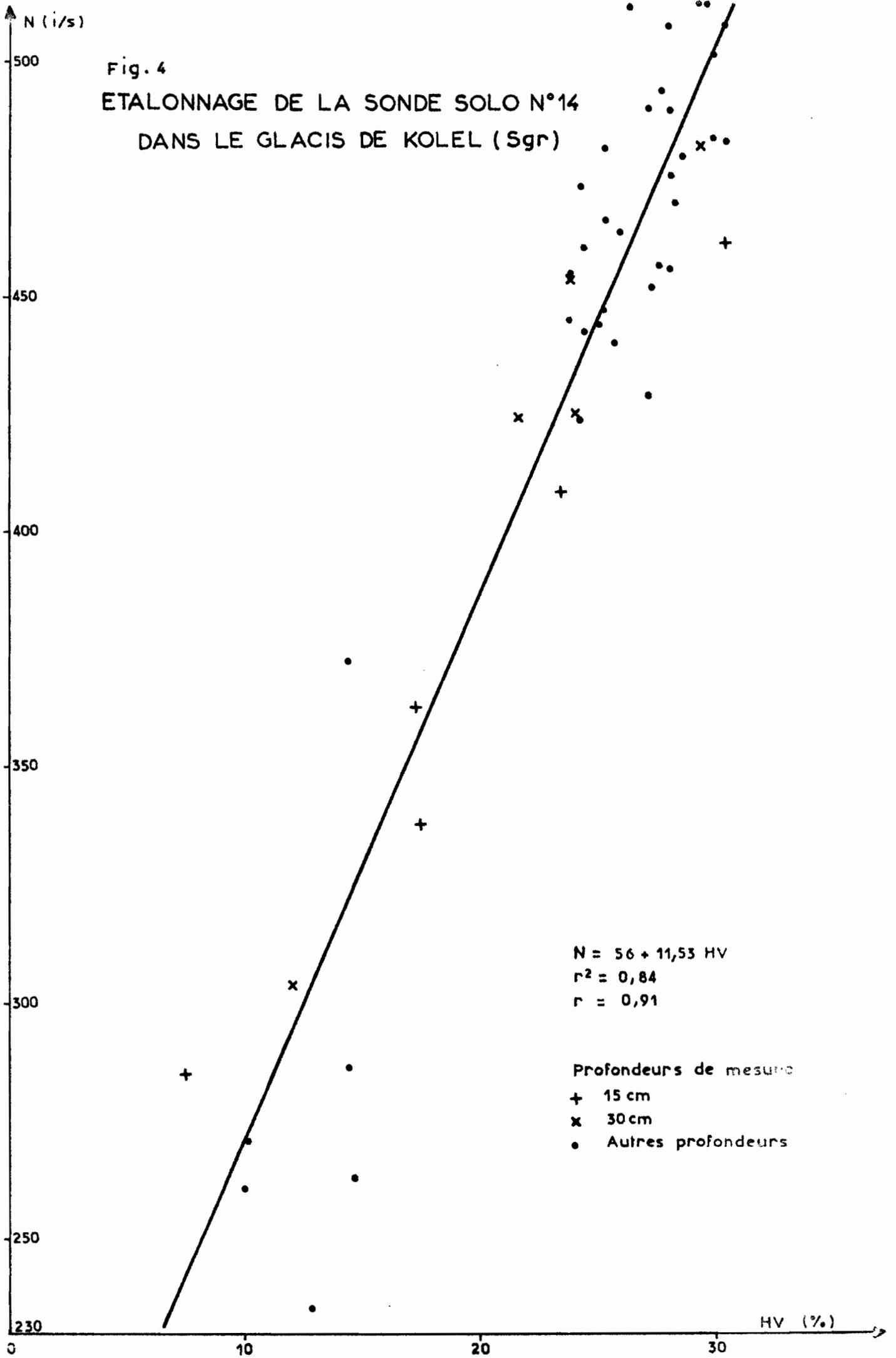


Fig. 5 ETALONNAGE DE LA SONDE SOLO N°14
DANS LE BAS-FOND DE WINDE-TIULUKI (Spt)

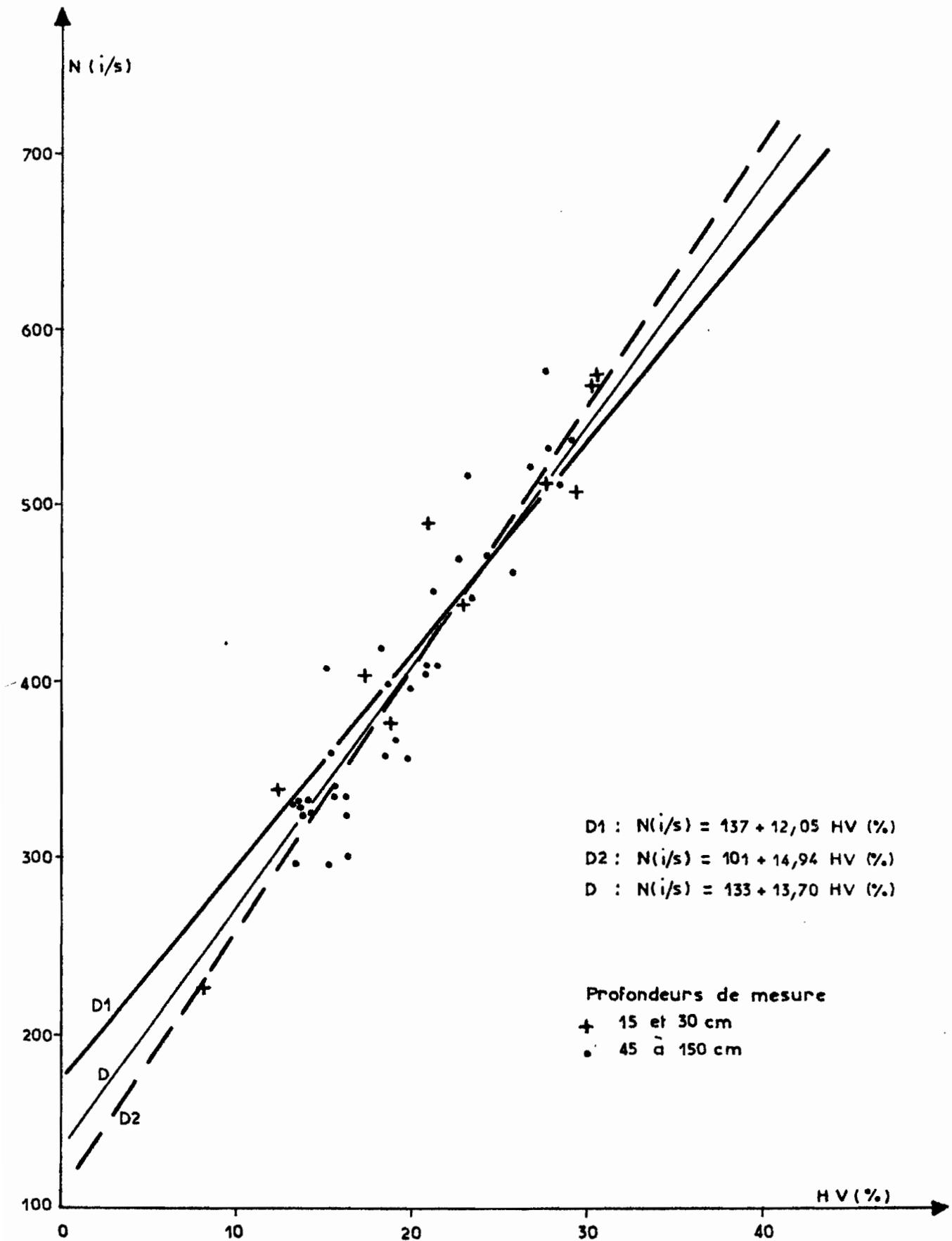


Fig. 6 ETALONNAGE DE LA SONDE SOLO N° 14
DANS LE PEDIMENT DE GOUNTOURE (Ase)

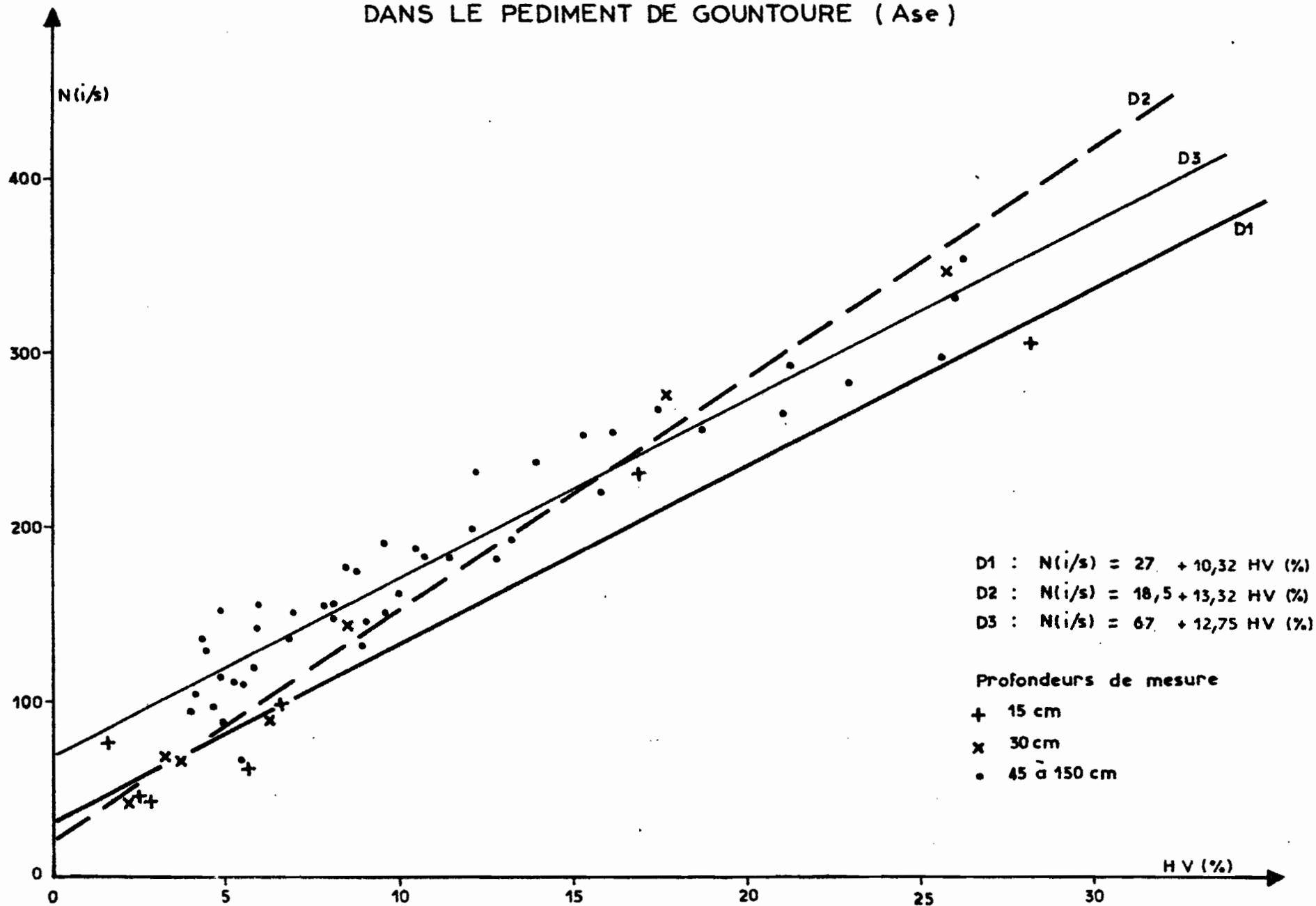
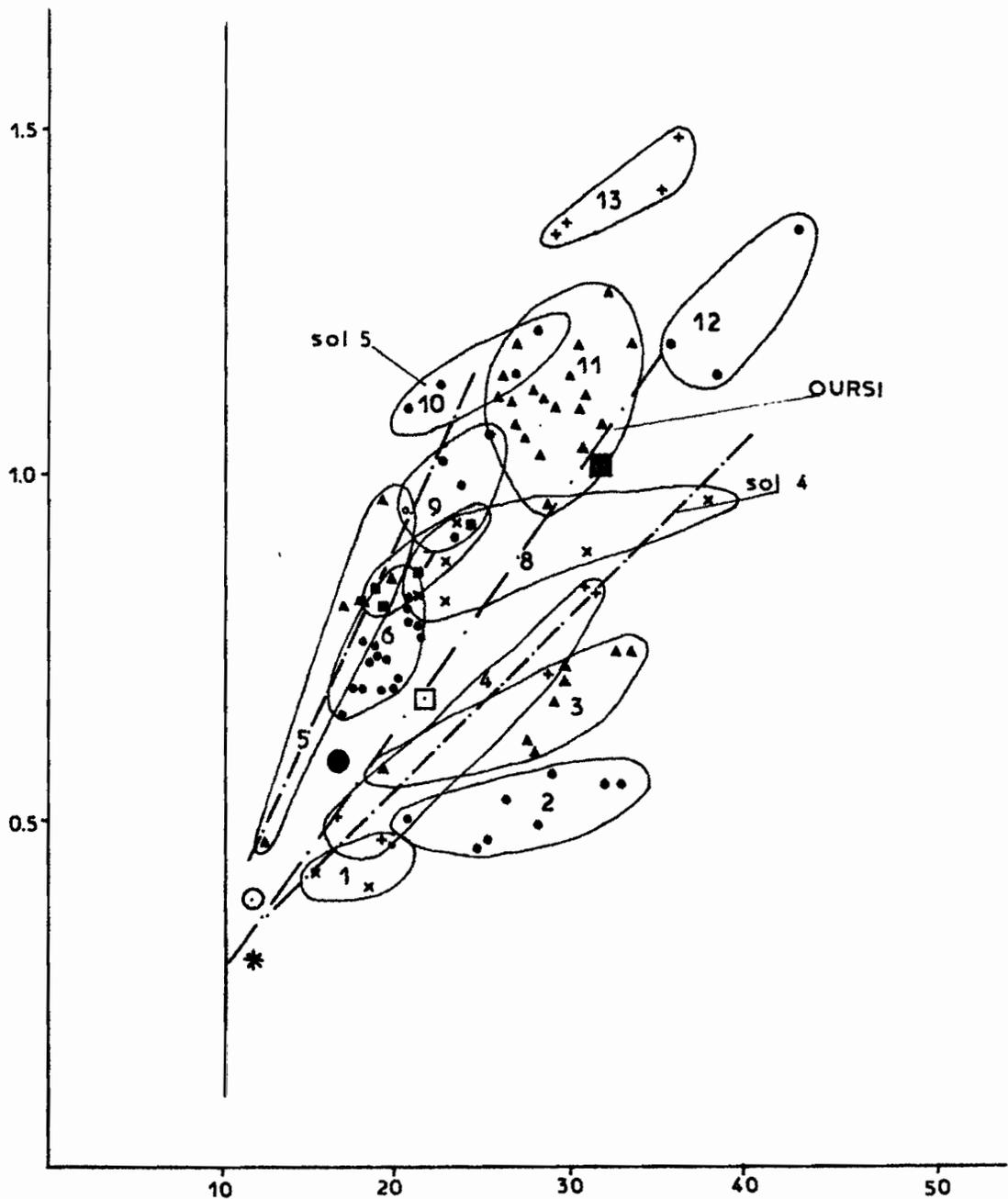


Fig.7 COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES NEUTRONIQUES DES SOLS D'OURSIS
 AU REFERENTIEL DES SOLS ANALYSES PAR CADARACHE (Marcesse)



- 1 : ADIPOUDOUME
- 2 : GAGNOA
- 3 : BOUAKE
- 4 : TILLABERY
- 5 : TARASCON
- 6 : CADARACHE
- 7 : GEMBLoux

- 8 : LUNEL
- 9 : GRENOBLE
- 10 : LA LEZE
- 11 : EL KHEMIS
- 12 : BEN NACEUR
- 13 : TOMBLAINE

- * OURSI dune
- KOLEL piemont
- GOUNTOURE
- KOLEL glacis
- POLAKA

Fig. 8 COMPARAISON DETALONNAGE
DE LA SONDE SOLO
à GOUNTOURE et à POLAKA

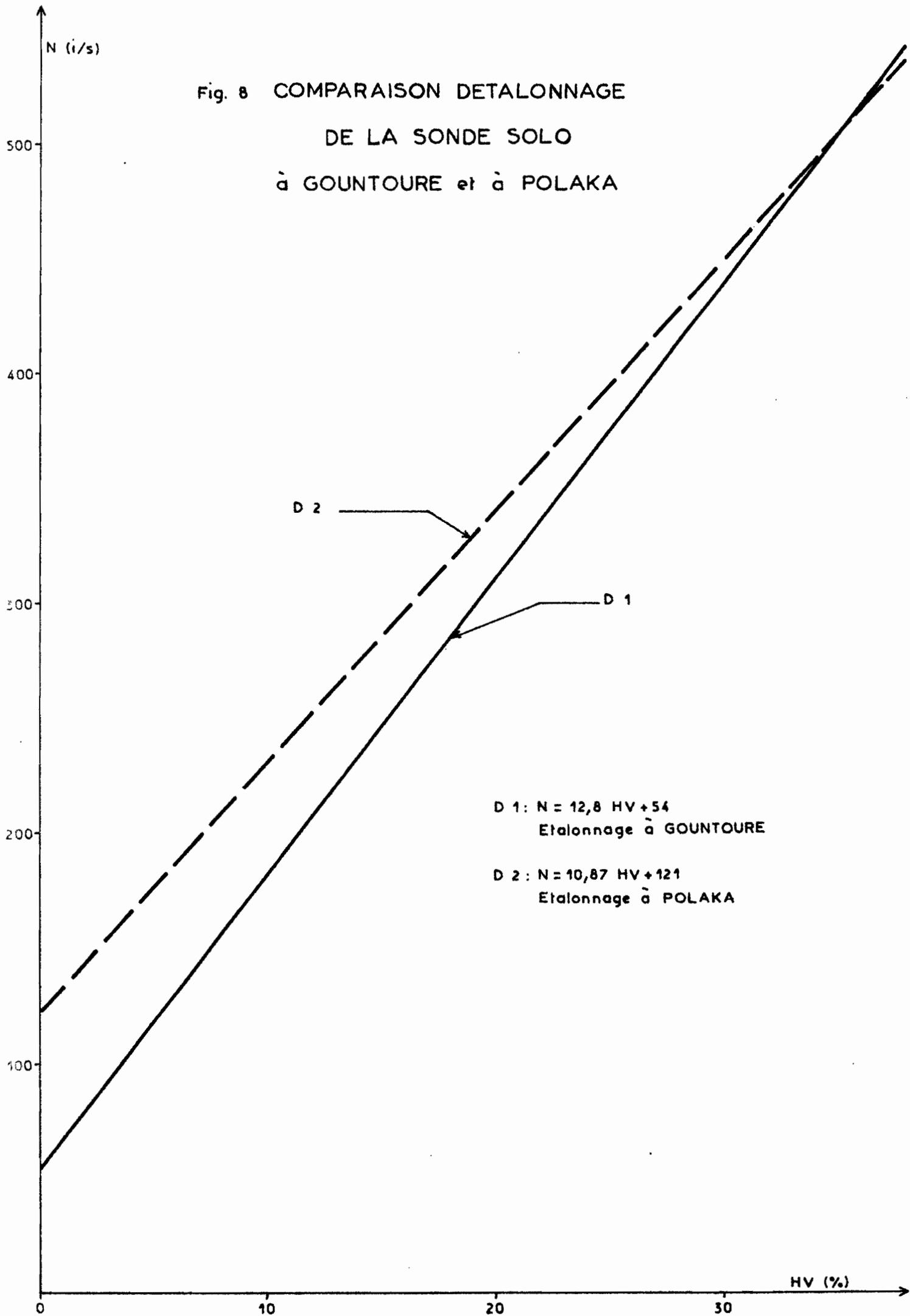


Fig. 9 STATION D'OURS
 COMPARAISON DETALONNAGE
 IN-SITU à l'ETALONNAGE
 NEUTRONIQUE MOYEN

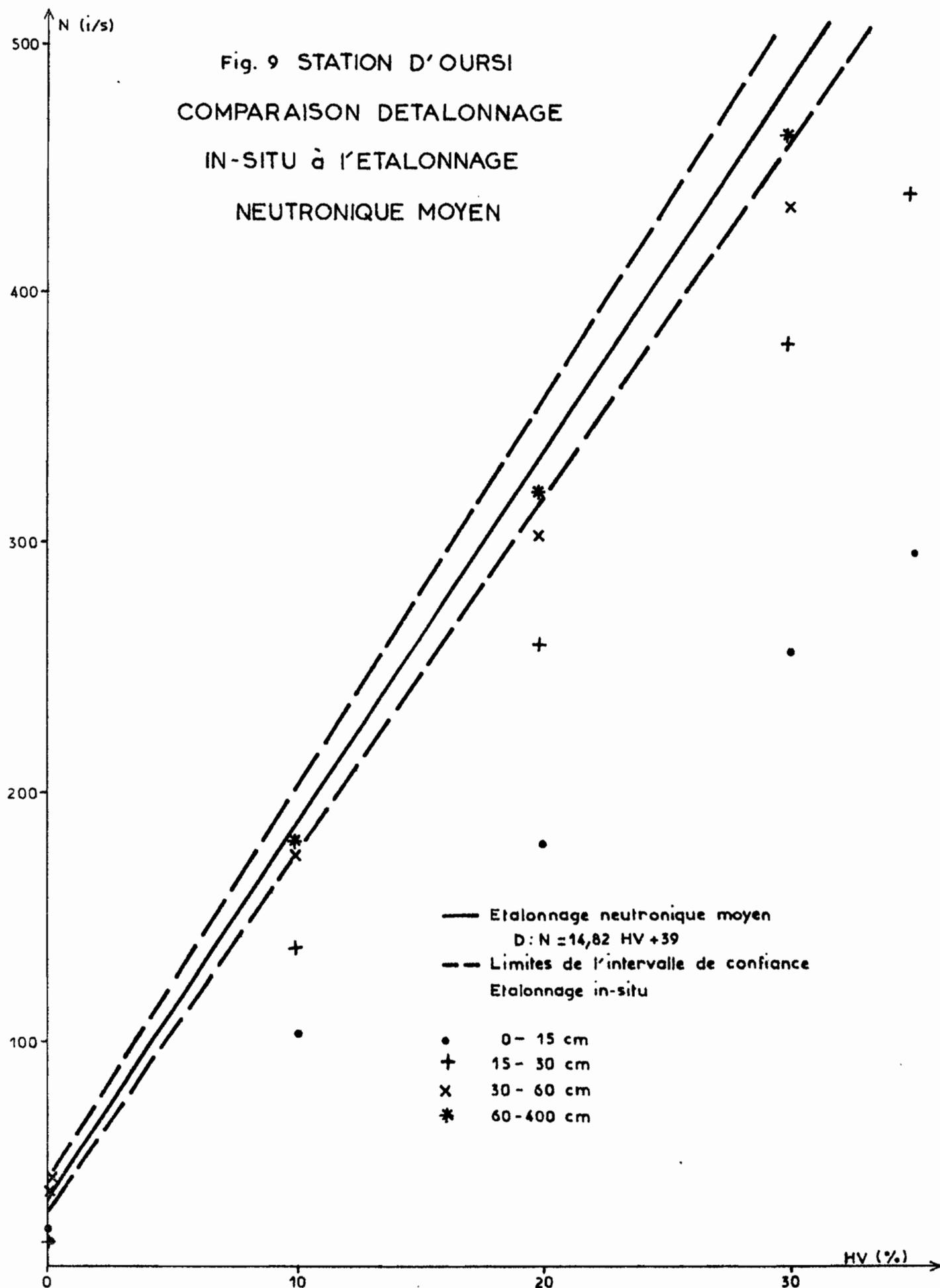


Fig. 10 STATION DE KOLEL PIEMONT
 COMPARAISON DE L'ETALONNAGE IN-SITU
 à L'ETALONNAGE NEUTRONIQUE
 DANS 45-75 cm

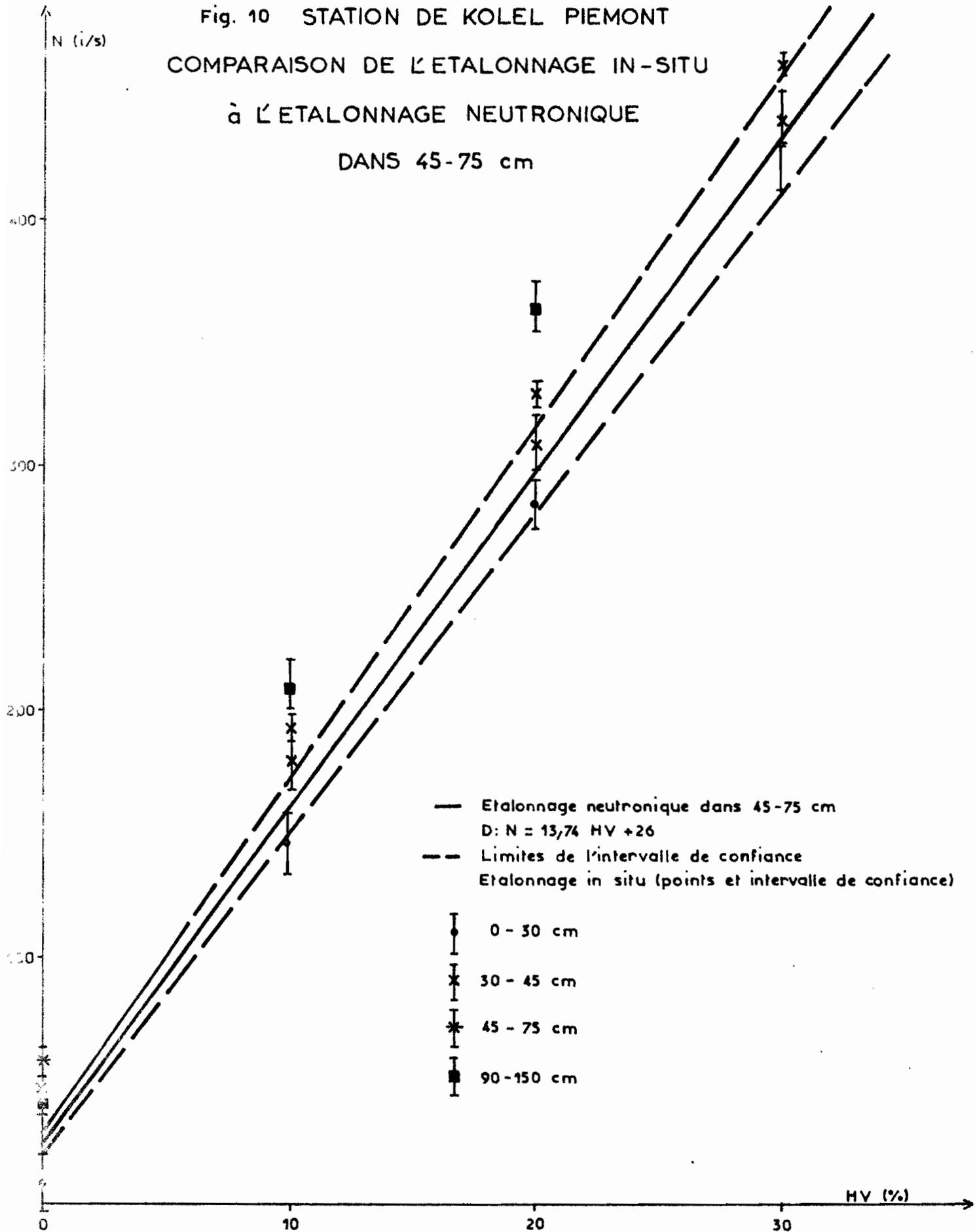


Fig. 11 STATION DE KOUNI-KOUNI
 COMPARAISON DE L'ETALONNAGE IN-SITU
 à L'ETALONNAGE NEUTRONIQUE
 DANS 45-75 cm

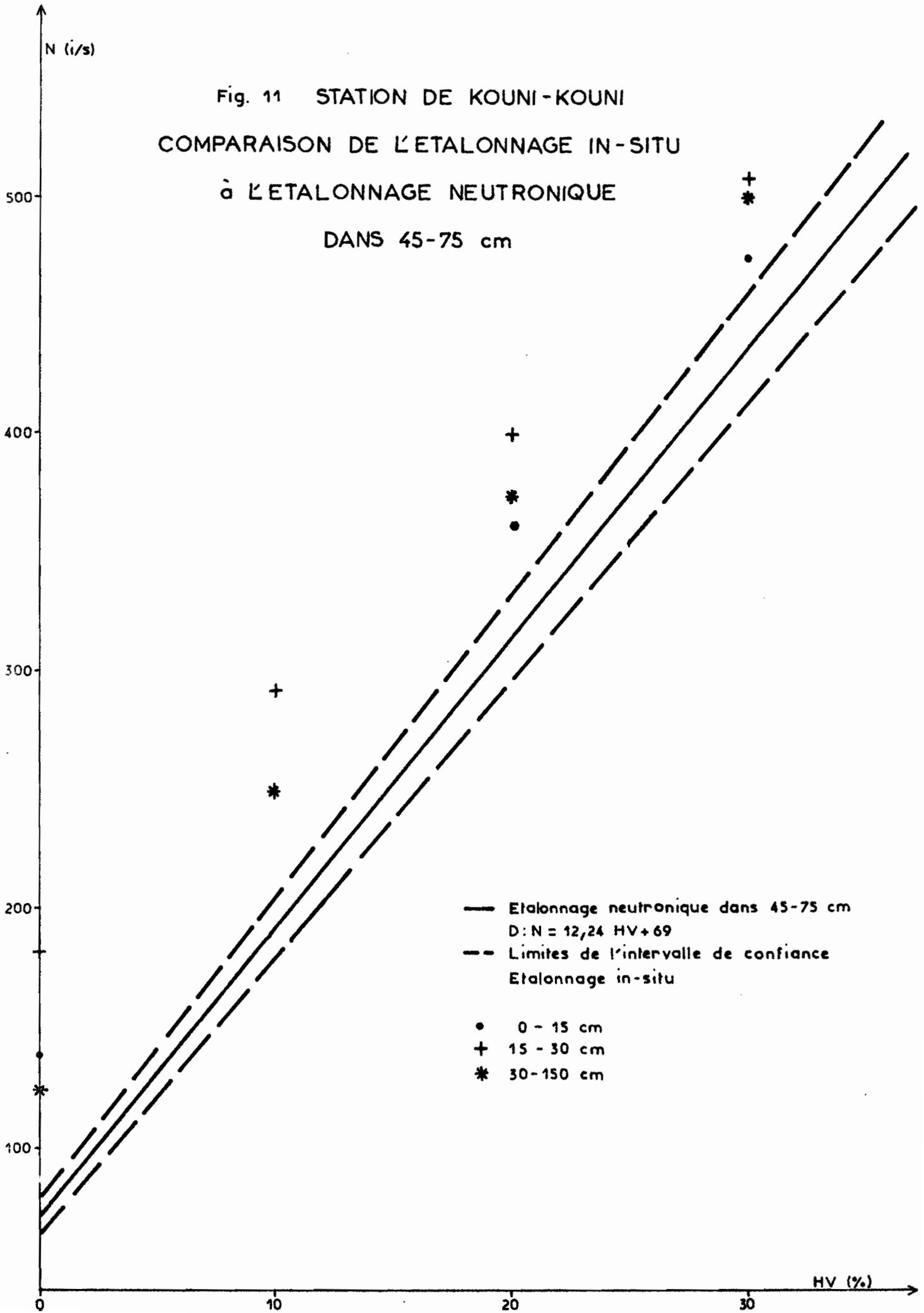


Fig. 12 STATION DE KOLEL GLACIS
 COMPARAISON DE L'ETALONNAGE IN-SITU
 à L'ETALONNAGE NEUTRONIQUE
 DANS 45-75 cm

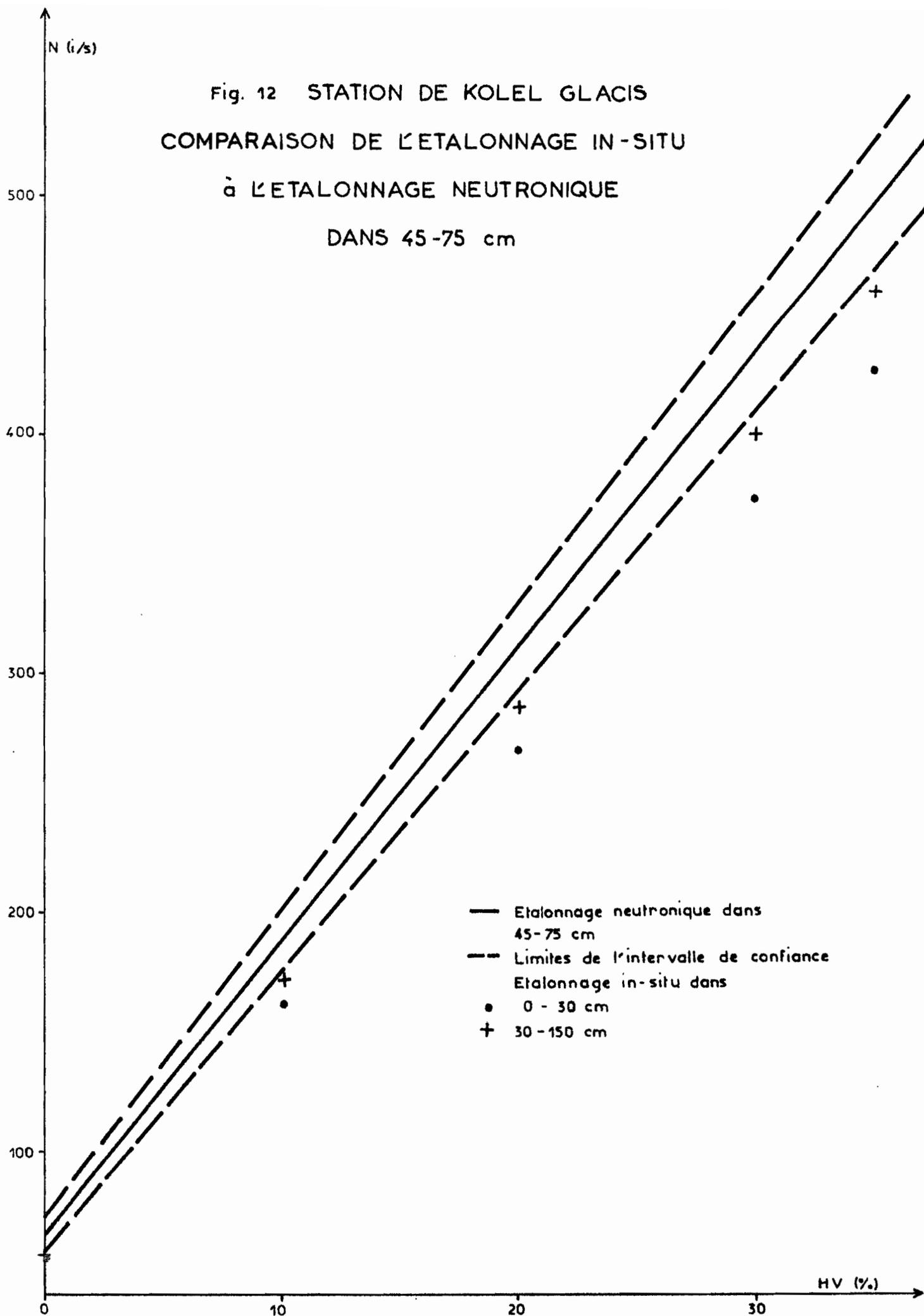


Fig. 13 STATION DE WINDE-TIULUKI
COMPARAISON DE L'ETALONNAGE IN-SITU
à L'ETALONNAGE NEUTRONIQUE

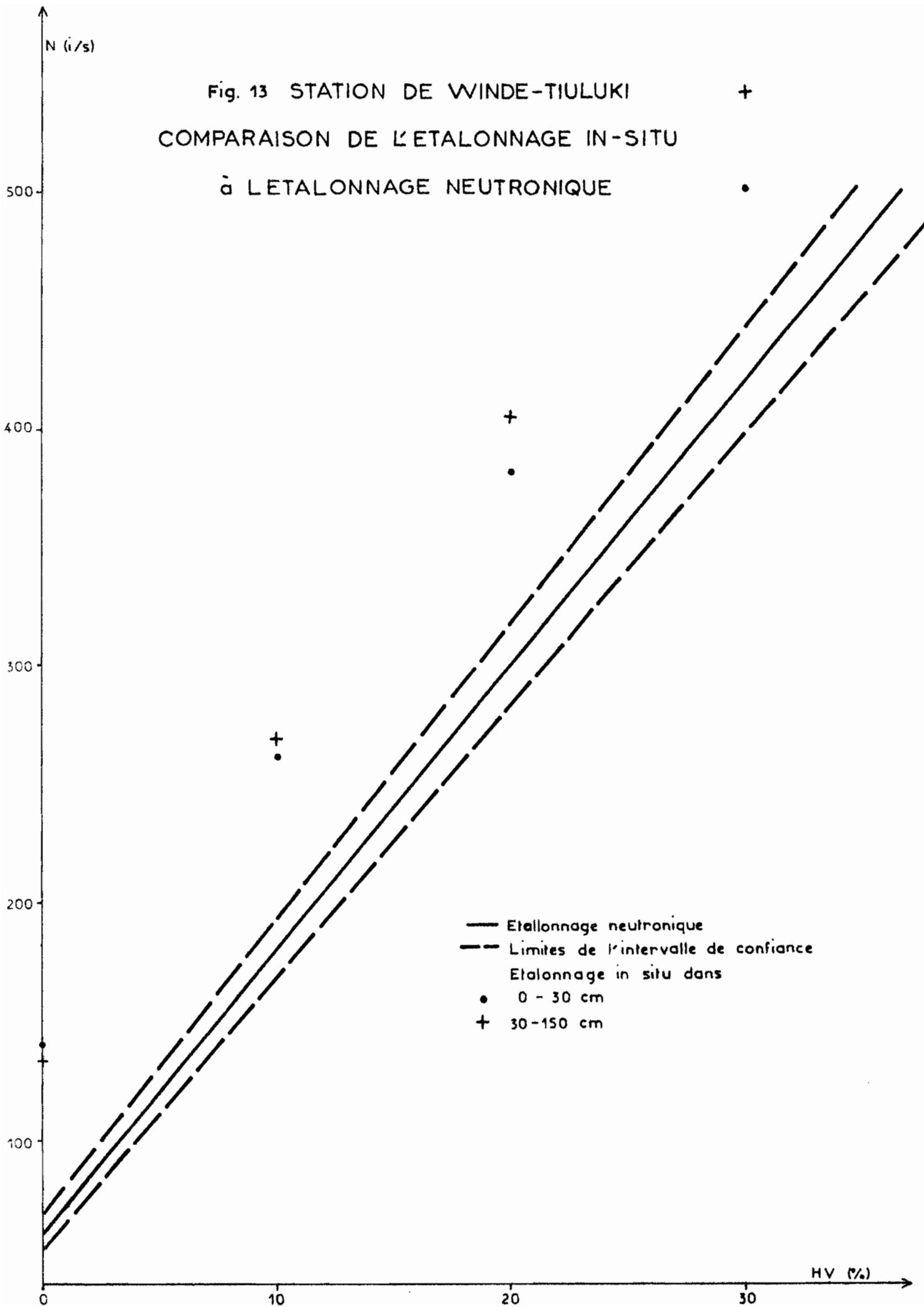


Fig. 14 STATION DE GOUNTOURE
COMPARAISON DE L'ETALONNAGE IN-SITU
à L'ETALONNAGE NEUTRONIQUE
DANS 45-75 cm

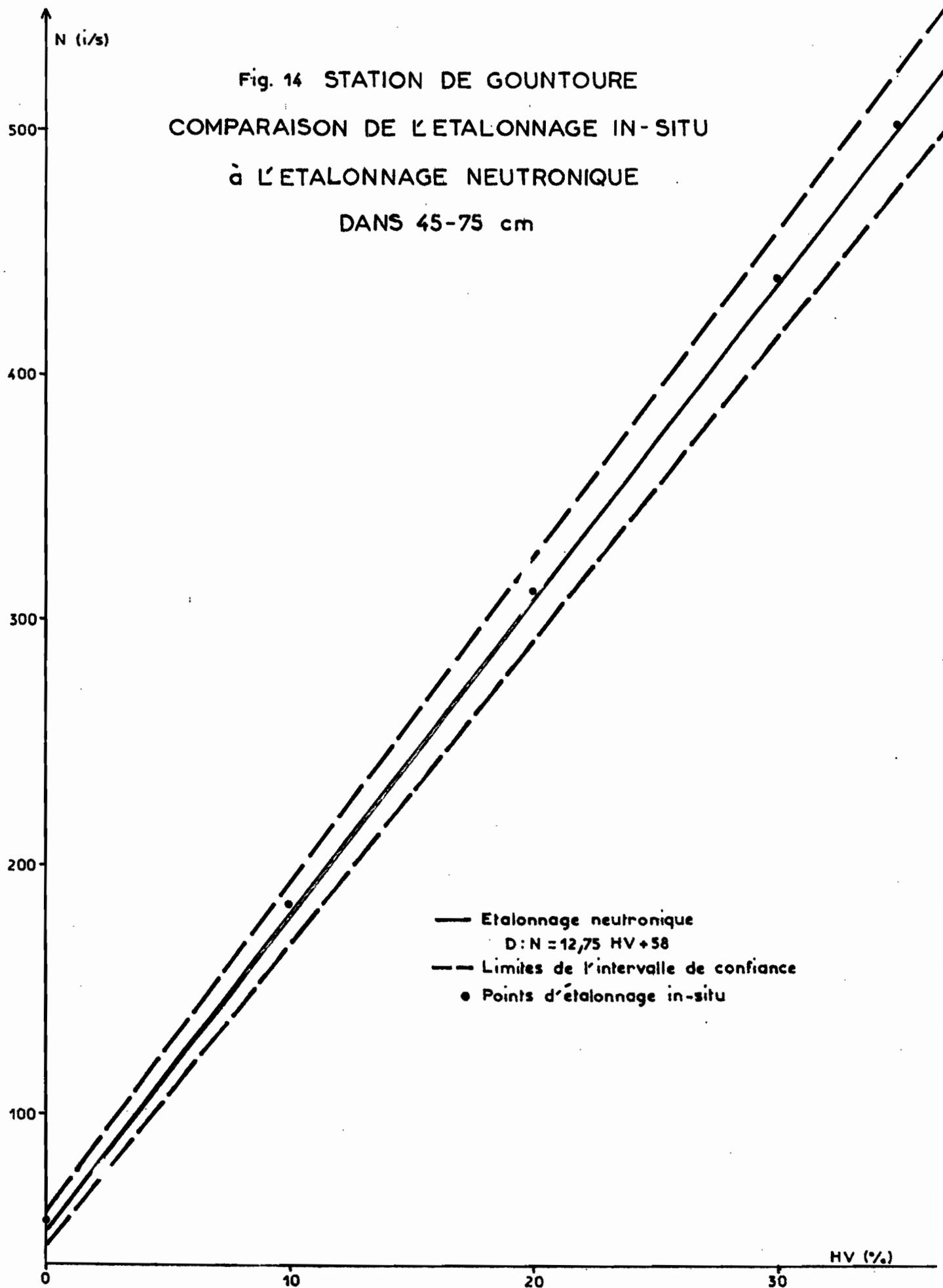


Fig. 15 KOLEL PIEMONT

PROFILS HYDRIQUES APRES PLUIES SIMULEES

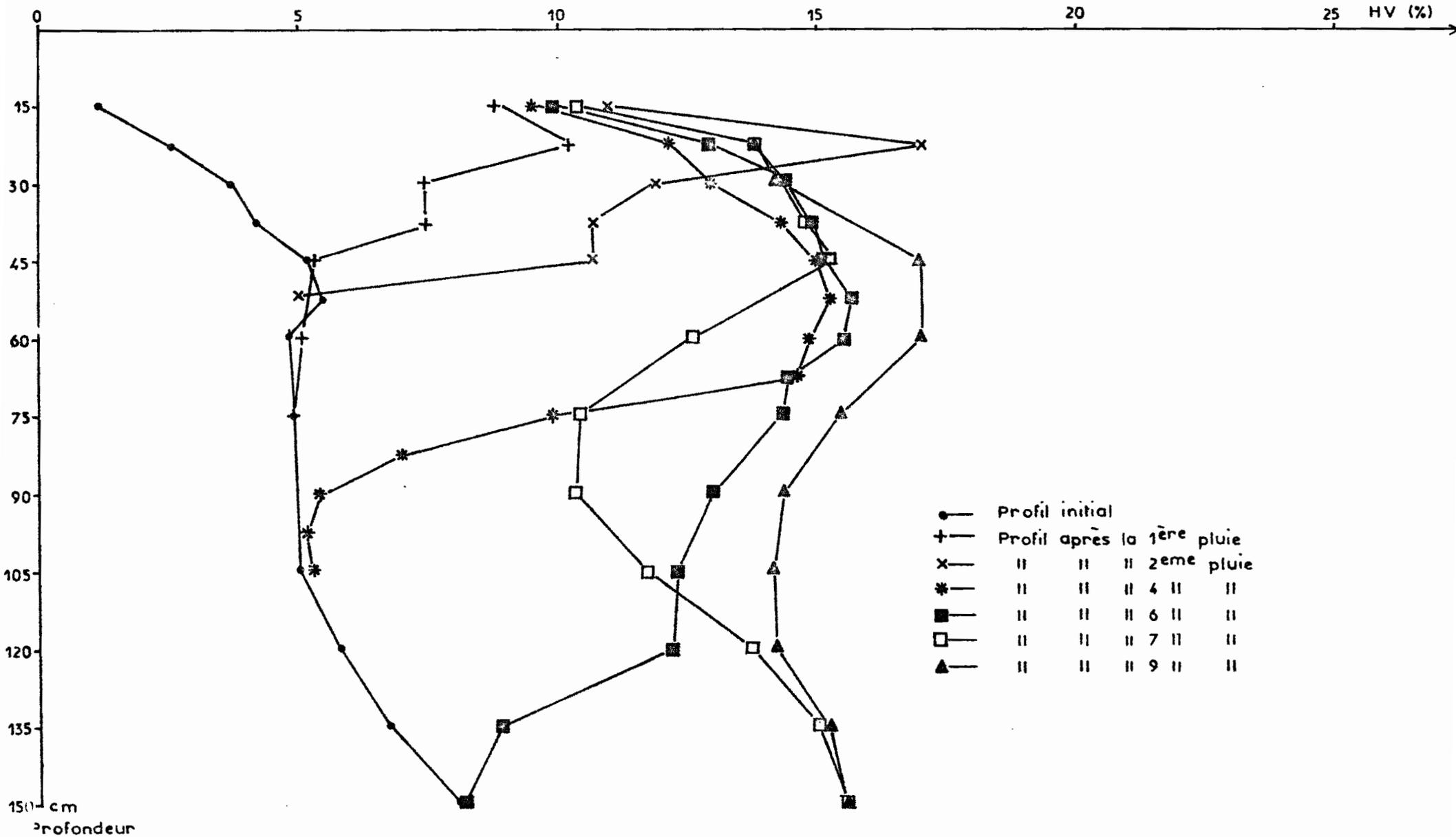


Fig. 16 KOLEL PIEMONT

PROFILS DE RESSUYAGE APRES LA 9^e PLUIE

