

UNIVERSITE PARIS XII VAL DE MARNE

U.F.R. DE SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE

D.E.S.S.

Gestion des Systèmes, Agro-Sylvo-Pastoraux en Zones tropicales

1990-1991

Promotion n° 1

Relation entre le Potentiel hydrique et l'Humidité volumique d'un sol brun-rouge sénégalais : outil d'interprétation écophysologique.

BENALI M'barka

**Directeur du stage : M. NIZINSKI J.
Superviseur du stage : M. HUMBEL F.**

Directeur du D.E.S.S. : Mme GARNIER-ZARLI E.

Je remercie le Directeur du laboratoire d'Ecologie Végétale de l'ORSTOM de Dakar, D^r GROUZIS Michel, pour son accueil au sein de son équipe.

Je remercie M^r NIZINSKI Georges, pour ce qu'il m'a appris, pour sa patience et sa disponibilité à mon égard.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Pascal BOIVIN, pour le temps qu'il m'a consacré. Sans vous la partie géostatistique du mémoire n'aurait pu être traitée.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du laboratoire, et à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu dans mon travail.

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	3
INTRODUCTION	4
CHAPITRE 1. CADRE DE L'ETUDE	5
1.LA STATION D'ETUDE	5
1.1.LE CLIMAT	5
1.2.LES SOLS	6
1.3.LA VEGETATION	6
2.LE MILIEU HUMAIN	6
CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODES	8
2.1.POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL, HUMIDITE VOLUMIQUE DEFINITIONS ET INTERET DES MESURES	8
2.1.1.LE POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL	8
2.1.2.LA TENEUR EN EAU DU SOL	8
2.1.3.RELATION ENTRE LE POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL ET LE TENEUR EN EAU	8
2.2.MATERIEL UTILISE ET PRINCIPE DES MESURES	9
2.2.1.LA SONDE A NEUTRONS	9
2.2.1.1.MESURE DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE DU SOL <u>IN SITU</u>	9
2.2.1.2.LA COURBE D'ETALONNAGE	9
2.2.2.LE PSYCHROMETRE	10
2.2.2.1.MESURE DU POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL	10
2.2.2.2.ETALONNAGE	10
2.3.DISPOSITIF EXPERIMENTAL	10
2.3.1.MISE EN PLACE DES TUBES	10
CHAPITRE 3. TRAITEMENT DES DONNEES	12
3.1.L'OUTIL INFORMATIQUE	12
3.2.LA GEOSTATISTIQUE	12
3.3.LES STATISTIQUES (LA REGRESSION)	13

CHAPITRE 4. RESULTATS ET DISCUSSION	14
4.1.ETUDE DE LA RELATION POTENTIEL HYDRIQUE -HUMIDITE VOLUMIQUE DU SOL	14
4.2.LES CARTES INTERPOLLEES DE LA VARIABLE POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL : OUTIL D'INTERPRETATION	16
CONCLUSION	18
ANNEXES	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

AVANT PROPOS

Le Sénégal fait partie des neufs états du Sahel. Le Sahel, de es-Sahel (Giri, 1975) ou de Sahil (Robert, 1988), "rivage" en arabe désigne les régions proches des côtes en Algérie et en Tunisie et surtout aujourd'hui une étroite bande comprise entre 15° et 20° de latitude Nord au sud du Sahara .

Il couvre une surface de 5,378 Millions de Km² (J.A.,1973). Large de 600 km environ du Nord au Sud et long de 4500 km d'Est en Ouest, le Sahel se trouve confronté aux grands problèmes de développement liés à la croissance démographique au déficit structurel de la production vivrière et à la dégradation des conditions écologiques (Grouzis, 1988).

Le Sahel peut donc se résumer en trois mots sec, sommaire, et aléatoire. En effet c'est un milieu sec presque toute l'année, sommaire en raison de la durée très courte des manifestations de la vie, aléatoire à cause de "la non reproductibilité des phénomènes d'une année sur l'autre" (Bille, 1977).

Dégradation, régression écologique, rupture d'équilibre qualifient l'état actuel du système écologique sahélien (Akpo, 1990).

Toute tentative de développement dans ce milieu, doit tenir compte de l'évolution et du suivi temporel des ressources naturelles.

INTRODUCTION

Dans le cadre du Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées de Gestion des Systèmes Agro-Sylvo-Pastoraux en Zones tropicales (Université Paris XII Val de Marne), j'ai été accueillie en stage du 1er Mai au 31 Août 1991 au laboratoire d'Ecologie Végétale de l'ORSTOM de Dakar.

Le présent document entre dans le cadre du programme "Arbre et Herbe au Sahel : dynamique des interactions, application à la régénération des systèmes écologiques". Ce programme a pour objectif la comparaison du milieu physique, chimique, et biologique de l'ensemble "Arbres-herbes" et de l'ensemble "Herbes seules" d'une steppe au Nord - Sénégal. Il comprend trois études stationnelles (station expérimentale, Ferlo, Nord Sénégal) :

- Analyse de la composition floristique et de la structure dans l'espace de la strate herbacée, et analyse des sols des niches hors et sous couvert;
- Bilan hydrique d'une steppe;
- Etude de la transpiration, des potentiels hydriques, de la résistance stomatique de six espèces arborescentes et de quatre espèces herbacées, et étude des potentiels hydriques des sols correspondants .

Notre travail a porté sur le point 3 de cette étude, il a pour objectif d'étudier l'état hydrique du sol le long d'un transect de 45 mètres de long sur 4 m 25 de profondeur, situé dans la station expérimentale.

L'état hydrique du sol peut s'exprimer à l'aide de deux paramètres :

- l'humidité volumique
- le potentiel hydrique

L'humidité volumique est du point de vue pratique le paramètre le plus facile à mesurer, mais le potentiel hydrique qui reflète directement l'état énergétique de l'eau du sol, est le plus intéressant.

Nous avons donc mis au point un protocole expérimental nous permettant d'exprimer le potentiel hydrique du sol en fonction de son humidité volumique.

Et, ainsi grâce aux mesures d'humidité volumique faites sur le transect, nous avons pu déduire les valeurs de potentiel hydrique correspondantes , et obtenir de manière indirecte les valeurs du paramètre le plus intéressant.

CHAPITRE 1. CADRE DE L'ETUDE

1. LA STATION D'ETUDE

Le site expérimental se situe dans le Ferlo sénégalais à 16°20'99'' Nord et 15°25'40'' Ouest, à 400 km de Dagana et à proximité du lieu dit Souilène (Keur Mor Ibra).

1.1. Le climat

Située dans la partie occidentale du Ferlo (Nord Sénégal) Souilène présente les principaux traits climatiques de la bande sahélienne.

Ce climat se caractérise, par une pluviométrie annuelle allant de 200 à 400 mm . C'est le climat sahélien type (Aubréville, 1949), où l'année se décompose classiquement en deux saisons :

Une saison humide, saison des pluies, qui s'étend de début juillet à fin septembre, pendant laquelle se concentre 80% des précipitations.

Une saison sèche de neuf mois, froide en novembre et décembre, qui se réchauffe de janvier à mai.

Cette région subit depuis 1970 un déficit pluviométrique persistant (pluviométrie annuelle réduite à 300 mm) .

l'évapotranspiration potentielle (E.T.P. PENMAN) atteint 1685 mm/an.

Le diagramme Pluie/E.T.P. de la station de référence (Dagana) montre que la saison de croissance est réduite à 80 jours entre juillet et septembre . Figure 1.

Au niveau de la station, figure 2 différents dispositifs expérimentaux sont en place permettant de mesurer :

- le rayonnement global et net;
- la vitesse du vent;
- l'humidité de l'air;
- la température de l'air;
- les précipitations au sol;
- la température du sol;

Les données sont stockées en continu sur une centrale d'acquisition de données (Micrologger 21X), et ramenées au centre à Dakar où elle sont traitées.

1.2. Les sols

On rencontre essentiellement 2 types de sols (Maignien, 1965).

- Des sols bruns-rouges intergrades;
- Des sols ferrugineux sur sable siliceux, ce sont des sols de transition entre les sols subarides et les sols ferrugineux tropicaux. L'horizon A (ou de surface) pauvre en matière organique peut atteindre 40 cm d'épaisseur son déplacement par le vent entraîne la formation d'ergs.

1.3. La végétation

La région d'étude se situe dans le domaine des steppes à épineux où prédominent des thérophytes et des phanérophytes. La nette dominance de ces types biologiques traduit une adaptation écologique aux sévères conditions d'aridité du milieu (Grouzis, 1986).

Dans la station quelques espèces ligneuses épineuses dominant telles que les Acacia tortilis et Balanites aegyptiaca.

La végétation herbacée essentiellement à base de graminées, dépasse rarement 40 cm de hauteur.

2. Le milieu humain

La population est composée essentiellement de trois groupes ethniques, Les Peuls, les Maures et les Toucouleurs.

Les Peuls dont l'image du pasteur nomade est présente dans les esprits a tendance à changer ses habitudes. Les aléas climatiques et la dégradation du milieu naturel poussent ces pasteurs exclusifs à adopter de plus en plus le système agropastoral.

Les Toucouleurs forment une société très mélangée, elle se présente comme une communauté culturelle, profondément marquée par la spiritualité de l'Islam. L'activité principale de cette ethnie est l'agriculture.

Les Maures, sont en général des commerçants, artisans, marabouts, et des pasteurs (Grand Atlas du Sénégal, 1977).

Le partage des terres entre les exploitants des différentes ethnies traduit les divisions et les affrontements historiques. Avant le régime colonial la domination des Maures s'exerçait sur toutes les terres situées au nord du fleuve. L'arrivée du pouvoir colonial au début du siècle favorisera le retour des Toucouleurs et des Peuls dans la région (Lericollais, Diallo et Santoir 1980).

On observe aujourd'hui, au sein de cette population une forte tendance vers l'émigration :

- une émigration vers le sud, l'aridité du nord du pays pousse les populations à se déplacer vers le sud à la recherche de conditions plus favorables à l'agriculture. Ce

type de migration a surtout été observé chez les Toucouleurs qui migraient vers le sud pour cultiver l'arachide dans les pays wolofs pendant l'hivernage.

-une émigration vers les villes, la stagnation de l'activité agro-pastorale incite les populations à chercher une autre source de revenu. Ceci est notamment le cas des Maures qui vont faire du commerce dans les villes.

A tous ces problèmes internes vient s'ajouter le conflit sénégal-mauritanien qui a rendu impossibles les déplacements et la circulation de part et d'autre de la frontière, entraînant ainsi la disparition des pratiques agro-pastorales traditionnelles.

CHAPITRE 2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Potentiel hydrique du sol, humidité volumique, définitions et intérêt des mesures

2.1.1. Potentiel hydrique du sol

Les particules d'eau dans le sol sont soumises à différents types de forces. Ces forces attirent et lient l'eau dans le sol.

L'énergie qui s'exerce sur l'eau a deux composantes :

-une composante cinétique due à la vitesse du fluide dans les pores (dans le sol compte tenu de la taille restreinte des pores l'énergie cinétique est négligeable);

-une composante potentielle;

Cette dernière dépend de 3 éléments

*de la position du fluide dans un champ de gravité qui définit un potentiel gravitaire Z par rapport à un plan horizontal de référence;

*de la pression de l'eau due aux effets de capillarité dans les pores, elle définit la pression capillaire qui représente la différence de pression entre l'air et l'eau. Cette pression s'exprime sous forme d'un potentiel matriciel Ψ (ou potentiel capillaire) qui correspond à une hauteur d'eau capillaire h ($= -\Psi$);

*de la pression osmotique liée à la concentration saline.

En dehors des sols halomorphes ou très fortement fertilisés, pour lesquels le terme osmotique n'est pas négligeable, le potentiel total du sol est égale à la somme du potentiel gravitaire et du potentiel matriciel.

On note : $\Phi = P = \Psi + Z$

2.1.2. La teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol θ exprime la quantité d'eau présente dans le sol. Elle peut être volumique exprimée en cm^3 d'eau / cm^3 de sol ou massique en g d'eau / gramme de sol. L'humidité elle, s'exprime en % (H.V.% ou H.P.%).

Humidité = teneur en eau * 100

2.1.3. Relation entre le potentiel hydrique du sol et la teneur en eau

La relation entre Ψ et θ a fait l'objet de nombreux travaux, Schoffield 1935, Hennin 1936, Hallaire en 1963 et plus récemment Vauclin en 1971.

Plusieurs facteurs intervenant dans cette relation ont ainsi été mis en évidence :

- La texture (Bonneau, 1961);
- Le tassement du sol (Périgaud, 1963), la structure;
- Les conditions de préparation du matériau en vue de la mesure (Monnier et Konan, 1968).

De plus il a été constaté que les courbes $\Psi = f(\theta)$ sont différentes selon qu'elles sont établies en phase de réhumectation ou de dessèchement du sol. Dans le premier cas, elles présentent un décalage la teneur en eau étant plus faible pour un potentiel donné : c'est le phénomène d'hystérésis, que l'on explique par un piégeage d'air s'opposant à la réhumectation totale (Bonneau et Souchier, 1979).

Il est important de tenir compte de tous ces éléments dans notre étude.

2.2. MATERIEL UTILISE ET PRINCIPE DES MESURES

2.2.1. LA SONDE A NEUTRONS

2.2.1.1. MESURE DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE DU SOL IN SITU

Cette méthode utilise la propriété qu'ont les neutrons rapides d'être ralentis par les atomes d'hydrogène.

Des neutrons rapides sont émis dans le sol par une source radioactive (Américium-Bérillium) , à l'intérieur d'un tube en aluminium ou en dural préalablement installé dans le sol . Ces matériaux étant connus pour être "transparents" aux neutrons. Par suite de collisions avec les noyaux d'hydrogène présents dans le sol, les neutrons émis par la source sont ralentis.

Certains d'entre eux retournent vers la sonde où ils sont comptés par un détecteur de neutrons lents.

Le ralentissement et la diffusion des neutrons dépendent de la nature du sol et du nombre de noyaux d'hydrogène présents dans le sol.

La quantité de neutrons lents est donc proportionnelle à la teneur en eau du sol.

2.2.1.2. LA COURBE D'ETALONNAGE

L'étalonnage pour une sonde à neutrons revient à établir la relation entre la mesure brute N donnée par l'appareil et l'humidité volumique du sol H_{vol} , cela revient donc à déterminer les coefficients a et b intervenant dans la relation

$$H = a \cdot N + b$$

H : humidité volumique en cm^3/cm^3 ;

N : nombre de coups donné par la sonde à neutron;

a, b : coefficients donnés par la courbe d'étalonnage

Pour chaque horizon de sol étudié, d'une part on prélève des échantillons pour mesurer l'humidité en cm^3 (différence entre le poids frais et le poids sec après passage à l'étuve à 105°C pendant 7 jours). Cette quantité d'eau ramenée à 1 cm^3 de sol nous donnera l'humidité volumique en cm^3/cm^3 (ou en %), et d'autre part on détermine le nombre de coups (N) .

On obtient donc pour chaque horizon la courbe humidité volumique = $f(\text{nombre de coups})$, et par régression linéaire de ces courbes on détermine les différents coefficients a et b propres à chaque horizon.

2.2.2.LE PSYCHROMETRE

2.2.2.1.MESURE DU POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL

Le psychromètre est une unité de contrôle et un dispositif de lecture à utiliser avec les thermocouples PELTIER à refroidissement pour la détermination du potentiel hydrique.

Les sondes psychrométriques sont raccordées à un microvoltmètre qui permet de lire la tension (en microvolts) qui est proportionnelle au potentiel hydrique du sol.

2.2.2.2.ETALONNAGE

L'étalonnage du psychromètre s'effectue par mise en équilibre de la chambre psychrométrique avec une phase gazeuse à potentiel connu, fixé par une solution de NaCl . La température est contrôlée à 1/100ème de degré, au moins dans le cas où le bain thermostaté est à 20°C , température d'ambiance de la pièce de travail (Lang 1967, Bruckler 1984).

2.3.DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Afin d'établir les courbes potentiel hydrique = $f(\text{humidité volumique})$, nous avons mis en place un dispositif expérimental constitué de trois tubes d'accès à la sonde à neutrons , d'une série de sondes psychrométriques le tout entouré par un collier métallique Figure 3.

2.3.1.MISE EN PLACE DES TUBES

Une tarière a été utilisée pour forer un trou de 130 cm de profondeur. Les sols des différents horizons sont conservés pour la mesure de l'humidité pondérale qui servira à l'étalonnage de la sonde.

Trois tubes sont ainsi mis en place, dans une zone délimitée par un collier métallique de 100 cm de diamètre, et ceci à égale distance les uns des autres.

Pour les mesures psychrométriques un trou de 100 cm est foré au milieu de ces trois tubes dans lequel on placera les

sondes psychrométriques. Ces dernières sont placées horizontalement (afin de minimiser les effets du gradient thermique) tous les dix centimètres jusqu'à un mètre de profondeur.

Une fois le dispositif mis en place le sol est humecté jusqu'à la capacité au champ.

On suivra ainsi l'évolution du potentiel hydrique en fonction de l'humidité volumique du sol, au fur et à mesure de son évaporation pendant la saison sèche et de son humectation durant la saison des pluies.

Au niveau des tubes les mesures sont faites tous les dix centimètres, et la profondeur maximale explorée est de 100 cm.

L'expérience a débuté pendant la saison sèche et est poursuivie pendant la saison des pluies.

CHAPITRE 3. TRAITEMENT DES DONNEES

3.1.L'outil informatique

Les données ont été traitées à l'aide de différents logiciels informatiques : MULTIPLAN, logiciel permettant la gestion des données sous forme de tableaux; CHART, logiciel graphique; WORD, logiciel de traitement de texte, et GEOSTAT, logiciel interactif pour le calcul géostatistique (mis au point par Boivin P., 1990).

3.2.La Géostatistique

La géostatistique intervient pour l'établissement des cartes interpolées de la variable potentiel hydrique.

* Intérêt de la géostatistique

Cette méthode est préconisée dans le cas où la statistique classique devient inadaptée.

Dans notre cas cela est du essentiellement à la dépendance spatiale entre deux points de mesure. Du fait qu'il existe une relation entre les coordonnées spatiales d'un point de mesure et la valeur d'une grandeur mesurée en ce point.

* Quelques notions théoriques concernant la géostatistique :

Cette science est née de la théorie des variables régionalisées proposée par Matheron en 1965.

Les principes de base

Une variable régionalisée est une variable caractérisant un phénomène se déployant dans un espace et y manifestant une certaine structure, c'est à dire une dépendance de la valeur prise en deux points différents.

Soit $Z(x)$ la valeur d'une réalisation d'une variable régionalisée aux coordonnées x , Les hypothèses générales utilisées sont celles d'ergodicité (l'étude de la réalisation unique de la variable suffit à rendre compte de l'ensemble des réalisations), et l'hypothèse intrinsèque qui suppose que les accroissements $Z(x+h)-Z(x)$ ne dépendent que de l'écart h entre les points de mesures et non des coordonnées x .

La variable régionalisée est étudiée par le calcul du semi variogramme. En faisant l'hypothèse complémentaire : $E(Z(x+h)-Z(x)) = 0$ on écrit

$$G(h) = 1/2 E(Z(x+h)-Z(x))^2$$

Cette relation représente la variance entre deux points de mesure en fonction de la distance qui les sépare.

Le comportement du semi variogramme permet de connaître la structure spatiale de la variable étudiée (Delhomme 1978).

Dans l'étude du variogramme on s'intéressera :

- au comportement à l'origine ;
- au comportement au voisinage de l'origine. En principe la variance entre deux points doit croître lorsque la distance qui les sépare augmente. Ceci traduit la pente du variogramme (si la pente est nulle, cela signifie que la variable étudiée est purement aléatoire, on se trouve alors dans le domaine d'application de la statistique classique);
- au comportement à l'infini, le semi variogramme atteint généralement une valeur constante appelée "palier" à partir d'une distance appelée "portée" ou distance d'autocorrelation. Le variogramme peut aussi ne pas être borné, lorsqu'il se rapproche d'une branche d'hyperbole ceci indique l'existence d'une dérive. Dans ce cas l'hypothèse intrinsèque n'est pas vérifiée. Des transformations de la variable s'imposent pour se ramener au cas sans dérive.

Le variogramme est enfin modélisé, le modèle choisi sera alors utilisé comme interpolateur linéaire pour l'estimation ponctuelle, zonale ou globale de la variable.

Cette opération s'appelle le krigeage. Elle permet de réaliser les cartes interpolées.

Le krigeage est en général réalisé par voisinage glissant. Ceci signifie qu'une valeur est estimée en un point de la carte à partir d'un nombre limité de valeurs mesurées situées dans un proche voisinage de la valeur recherchée.

Le choix du modèle et des options de krigeage a toujours été confirmé dans l'ensemble du travail au moyen du test de validation croisée.

3.3. Les Statistiques

Pour l'étude de l'évolution du potentiel hydrique en fonction de l'humidité volumique on se réfère aux statistiques classiques .

La régression

C'est une méthode statistique qui permet de déterminer l'intensité de la liaison entre deux ou plusieurs variables quantitatives. Elle est basée sur un test dit "test d'indépendance ou de dépendance" (Akpo, 1990).

Le coefficient qui mesure l'intensité de cette liaison est appelé coefficient de corrélation (r). L'association est d'autant plus étroite que la valeur absolue de r est proche de l'unité (Schwartz, Lazard, 1978, Schwartz, 1980.) c'est à dire de ses valeurs extrêmes (-1,+1).

Le coefficient de détermination (r^2) exprime la variabilité du système lié au paramètre considéré.

CHAPITRE 4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Etude de la relation potentiel hydrique du sol - humidité volumique

Pour chaque niveau du sol (20, 40, 60, 80, 90, 100, 250 et 425 cm), on établit la courbe qui exprime la relation entre le potentiel hydrique du sol et son humidité volumique :

$$|\Psi| = a \theta^{-b} \quad \text{en bars, figures 4 à 13.}$$

Il nous faut d'abord préciser que, d'une part les données des niveaux 10 et 30 cm n'ont pu être obtenues, à cause d'une défaillance des sondes psychrométriques à ces niveaux. Et que d'autre part les mesures à 50 et 100 cm ont été aussi recueillies sur un autre dispositif déjà en place, ce qui explique la forte densité des points par rapport aux autres niveaux.

Pour les courbes Potentiel = f(Humidité volumique) de chaque niveau on a calculé une régression et on a établi l'équation de la courbe (figures 4 à 13). Les valeurs de r^2 nous permettent de conclure que la corrélation entre Ψ et θ est plus ou moins étroite selon le niveau où l'on se situe.

L'allure générale des courbes est la même quelque soit la profondeur à laquelle on se trouve, elle illustre le fait que pour chaque niveau le potentiel hydrique varie à l'inverse de l'humidité volumique.

Les courbes $\Psi = f(\theta)$ se divisent en trois parties. Sachant qu'au début de l'expérience le sol a été réhumecté jusqu'à la capacité au champ, on part donc de l'humidité volumique la plus élevée.

-La première partie de la courbe forme un plateau. Elle indique que pour des humidités volumiques élevées on a un potentiel hydrique stable assez faible. Il s'agit de la première phase.

Pour les différentes profondeurs étudiées on constate que pour les même valeurs de θ élevées Ψ est différent. Divers auteurs : Gras, 1962 ; Dancette, 1970 ; Feodorff, 1972 ; Marcesse et Couchat, 1973 ; Dancette et Maertens, 1974 ont démontré que la capacité au champ n'est pas liée à un potentiel déterminé mais que Ψ à la capacité au champ varie avec la texture du sol. Ce qui expliquerait le décalage des courbes les unes par rapport aux autres. D'autre part Cornet en 1981 a démontré que le potentiel correspondant à la capacité au champ est lié à la teneur en éléments fins, et qu'il est d'autant plus élevé que la teneur en éléments fins est plus forte (dans notre étude le sol du niveau 60 cm serait le plus riche en éléments fins).

La deuxième partie ou virage de la courbe correspond à une augmentation progressive de $|\Psi|$ lorsque θ diminue. Nous sommes dans le cas où le sol est en dessous de la capacité au champ, le potentiel matriciel qui est du aux effets capillaires et aux phénomènes de liaison entre l'eau et la phase solide devient prépondérant.

La troisième phase est caractérisée par une augmentation rapide de $|\Psi|$, pendant de cette phase la teneur en eau du sol est minimale. D'après les valeurs du potentiel hydrique du sol cette eau est soumise à une tension très forte. Il existe deux facteurs qui favorisent cette liaison de l'eau au sol :

- la structure du sol ou porosité du substrat, en effet à un certain stade de dessèchement seule subsiste dans le sol l'eau contenue dans les micropores, et c'est cette eau qui est le plus difficile à extraire.

- la texture du sol : l'eau a la particularité de se lier fortement aux constituants du sol. Parmi ces constituants l'argile joue un rôle important, Cornet en 1981 a établi qu'il existait une corrélation significative entre le taux d'humidité d'un sol et sa teneur en argile (fraction 0-2 μ) du sol. Le taux de matière organique peut également favoriser la rétention de l'eau par le sol. Donc étant donnée la faible θ mesurée, et la forte rétention de cette eau le potentiel hydrique atteint des valeurs élevées.

On constate que suivant la profondeur où l'on se situe la valeur maximale de $|\Psi|$ varie. En effet elle atteint les valeurs de 12 à 14 bars pour les niveaux 50, 250 et 425 cm, 3 bars pour 60, 70 et 80 cm et 5 bars pour les niveaux 40 et 100 cm. Cette différence entre les $|\Psi|_{\text{max}}$ peut être due également à une variation de la structure ou de la texture du sol entre les différents niveaux. Sachant que $|\Psi|$ est d'autant plus élevé que la teneur en éléments fins est forte, nous pouvons donc classer les différents niveaux selon leur teneur en éléments fins. Par teneur croissante on a les niveaux (50, 250, et 425 cm), les niveaux (40 et 100cm) et les niveaux (60, 70 et 80 cm).

Cette étude nous permet de conclure que, comme l'ont établi Bonneau en 1961 et Périgaud en 1963, que les propriétés du sol jouent un rôle important dans la relation entre le potentiel hydrique du sol et son humidité volumique. Les analyses de sol qui seront faites ultérieurement nous permettront de confirmer toutes les hypothèses émises précédemment.

4.2. Les cartes interpolées de la variable potentiel hydrique; outil d'interprétation

Choix du site dans la station de recherche

Dans le but de pouvoir comparer la situation hors couvert et sous couvert des ligneux, nous avons choisi de suivre la ligne formée par les sondes 7, 8, 9, 10, 11, et 2. Figure 14. Avec les sondes n° 7 à 11 en situation hors couvert, et la sonde n° 2 sous couvert d'Acacia radiana. Figure 15.

Rôle des cartes interpolées

Les cartes que nous avons établies représentent les valeurs du potentiel hydrique au niveau des différentes sondes (axe des x), et à différentes profondeurs (axe des y).

Ces cartes nous ont permis de visualiser les variations de la réserve hydrique du sol :

- variation en profondeur (de la surface à 4 m 25);
- variation spatiale (hors et sous couvert);
- variation temporelle (saison sèche-saison des pluies).

Choix des cartes et analyse des résultats

Afin de suivre l'évolution de cette réserve hydrique dans le temps, nous avons choisi de comparer les données de 3 dates différentes. La première carte sélectionnée se situe en pleine saison des pluies, la seconde en fin de saison des pluies, et la dernière en pleine saison sèche.

La figure 16 qui représente la carte du 24-09-89 illustre la première situation. La répartition de la réserve hydrique du sol en profondeur nous permet de distinguer trois strates, une première strate allant de la surface du sol à 150 cm de profondeur, une seconde allant de 150 cm à 350 cm, et la troisième allant de 350 cm à 425 cm de profondeur.

Au niveau de la première strate on constate que le potentiel hydrique atteint des valeurs plus élevées sous couvert que hors couvert. Sachant qu'à des valeurs de potentiel hydrique élevées correspondent des humidités volumiques faibles, nous pouvons dire que le sol est plus humide hors couvert que sous couvert.

Pour la deuxième strate les valeurs du potentiel indiquent une certaine homogénéité de la répartition de l'eau à ce niveau.

En profondeur (de 350 cm à 425 cm) le potentiel hydrique est de nouveau plus élevé sous couvert que hors couvert. Cela signifie qu'il existe une réserve en eau plus élevée sous couvert que hors couvert.

Toutes ces observations nous permettent de conclure qu'en saison des pluies :

- l'arbre n'accroît pas la réserve hydrique du sol;

-que l'arbre grâce à sa racine en pivot puise l'eau jusqu'à des profondeurs de 4 m 25 et crée ainsi une augmentation du potentiel hydrique du sol.

-que les herbacées en saison des pluies, en situation sous couvert se trouveraient en état de stress hydrique.

Ces résultats nous permettent d'émettre l'hypothèse qu'en saison des pluies, étant donnée les valeurs élevées du potentiel hydrique, les herbacés soient dans un état hydrique plus favorable lorsqu'elles sont en situation hors couvert.

Mais ces valeurs peuvent être dues aussi à une utilisation plus intense de la réserve hydrique par les deux espèces en présence. Les études de Grouzis, Nizinski, Akpo, en 1991 ont montré que la biomasse des herbacés sous couvert est 2 fois plus élevée que celle des herbacés hors couvert. Donc les valeurs élevées du potentiel hydrique seraient plutôt dues à une utilisation optimale de la réserve hydrique du sol par les herbacés en situation sous couvert.

La seconde carte datée du 24 -10-90, figure 17, illustre l'état de la réserve hydrique à la fin de la saison des pluies. On observe les mêmes résultats que précédemment.

Enfin, la 3^{ème} carte interpollée du 16-05-90, figure 18, représente le cas de la pleine saison sèche. A cette date comme aux dates précédentes, on observe une stratification de la réserve hydrique du sol en trois niveaux :

-le premier allant de 0 à 60 cm de profondeur, au niveau duquel le sol présente un potentiel hydrique élevé, aussi bien hors que sous couvert. Le dessèchement dans les 60 premiers cm du sol est important.

-le second allant de 60 cm à 330 cm, où l'on observe une "homogénéité" du dessèchement (hors et sous couvert), mais à un degré moindre qu'au niveau de la première strate.

-le troisième allant de 330 cm à 425 cm au niveau duquel on a apparition d'une nette différence entre la situation hors couvert et sous couvert, le potentiel hydrique du sol hors couvert pouvant atteindre une valeur 2 fois plus élevée que celle de la situation sous couvert.

Ces résultats nous permettent de conclure que pendant la saison sèche

-l'arbre permet le maintien d'une certaine quantité d'eau dans le sol en profondeur (au delà de 3 m 30). Mais que cette eau n'est utilisable que par les ligneux.

-l'arbre ne semble pas favoriser la réserve hydrique du sol jusqu'à 3 m 30 .

-les herbacés ne tirent pas avantage de leur situation sous couvert, du moins en termes de réserve hydrique du sol.

CONCLUSION

Le sol joue un rôle essentiel dans la régulation des transferts hydriques dans le système "Sol-plante-atmosphère" : les aspects principaux de ces transferts sont le stockage, la circulation, et la redistribution de l'eau. Le bilan hydrique du sol est un élément important du fonctionnement des phytocénoses, notamment en zone aride où l'eau est un facteur limitant de la production végétale.

La texture et la structure du sol déterminent un certain nombre de caractéristiques, qui conditionnent la circulation et le stockage de l'eau dans le sol.

La variabilité de la réserve hydrique du sol dans l'espace et dans le temps se manifeste directement au niveau de la végétation. Les deux partenaires sol-plante forme un système complexe où les interactions sont nombreuses.

A la stratification racinaire des végétaux vient s'ajouter une stratification de la réserve hydrique du sol. Cette répartition particulière de la réserve hydrique du sol laisse supposer qu'il existe un partage des ressources entre les ligneux et les herbacés.

ANNEXES

Figure 1. Diagramme Pluie/ E.T.P. DAGANA

Figure 2. La station d'étude

Figure 3. Dispositif expérimental

Figures 4 à 13. Courbes Potentiel hydrique = $f(\text{humidité volumique})$

Figure 14. Situation du transect dans la station

Figure 15. Division de la station en 4 carrés de 50 m sur 50 m

Figures 16 à 18. Cartes interpolées

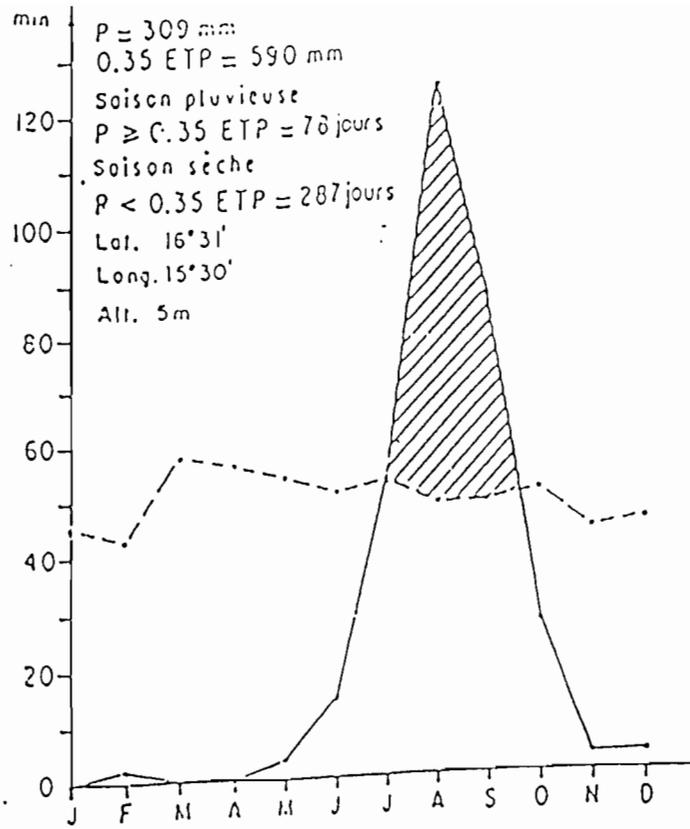


Figure 1. Diagramme Pluie/ E.T.P. DAGANA.

STATION D'ETUDE

Echelle 1cm = 5 m
 Surface 10000 m²
 Pente 0,78 %

Y

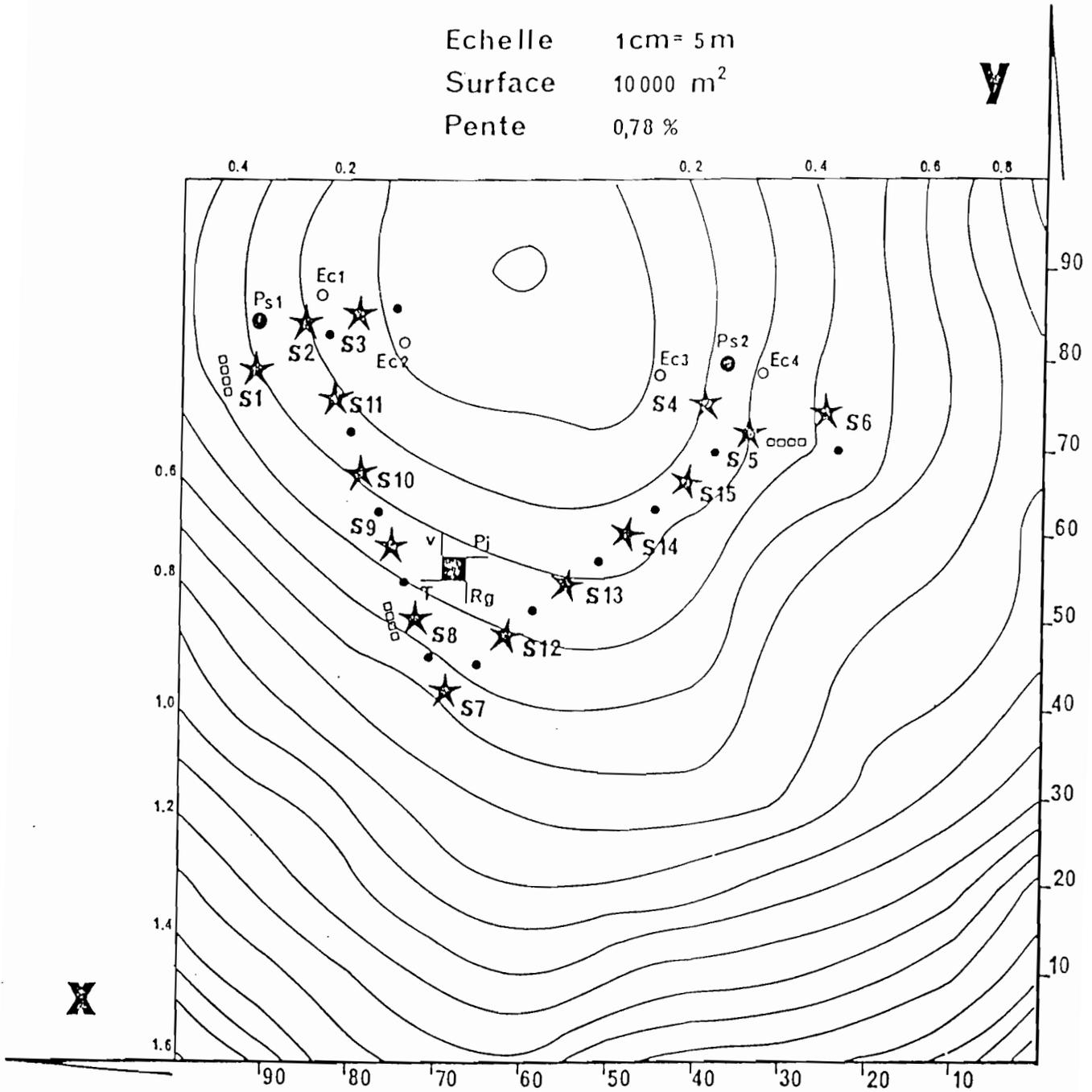


Figure 2. Station d'Etude.

- Légende:
- | | | |
|-----------|---------------------------------------|------------------------------------|
| | Station météorologique | Pi - précipitations incidentes |
| | Tube d'accès pour la sonde à neutrons | Rg - rayonnement global |
| S1 | Numéro du tube | T - températures |
| | Pluviomètre | v - vitesse du vent |
| | Gouttière | Ps - précipitations au sol |
| | Sonde psychrométrique | Ec - écoulement le long des troncs |

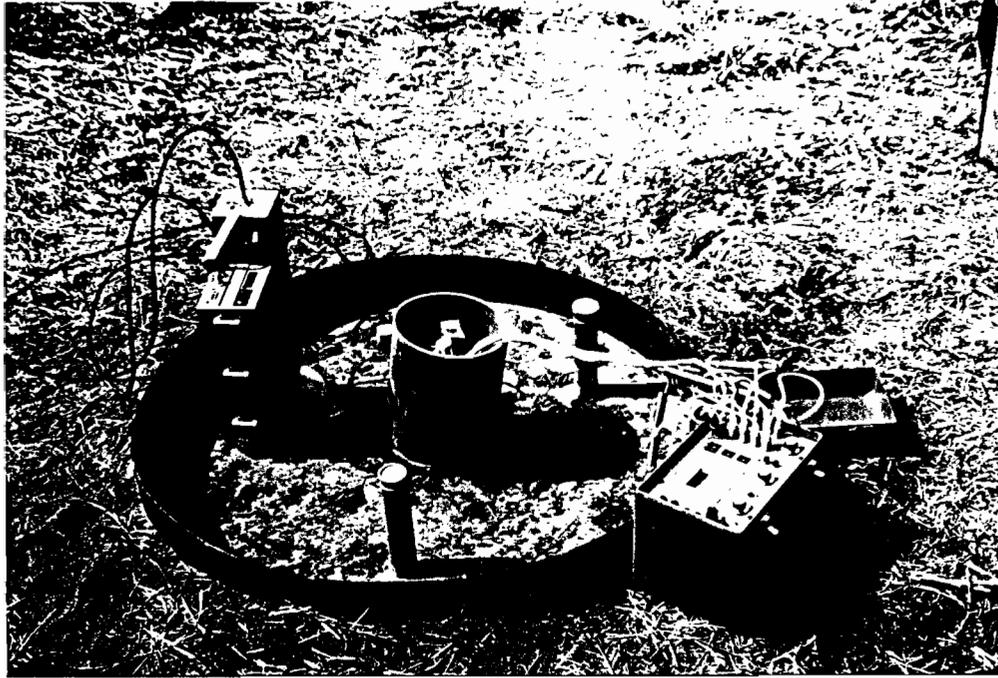


Figure 3. Dispositif expérimental

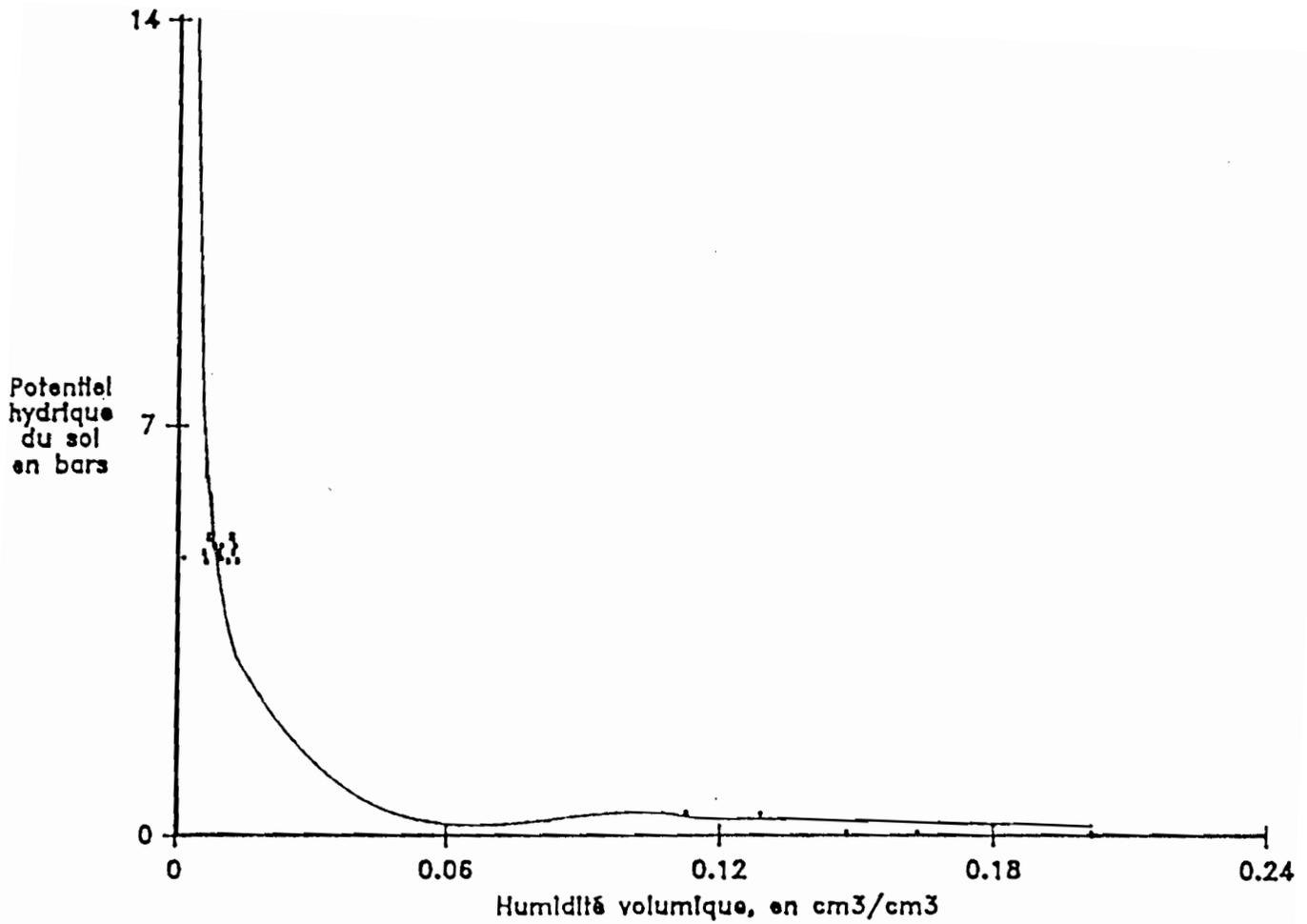


Figure 4 Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol
Niveau 20

Niveau 20
 Nombre de points = 45
 $\Psi = 0.03 \theta^{1.04}$
 $r = 0.96$
 $r^2 = 0.87$

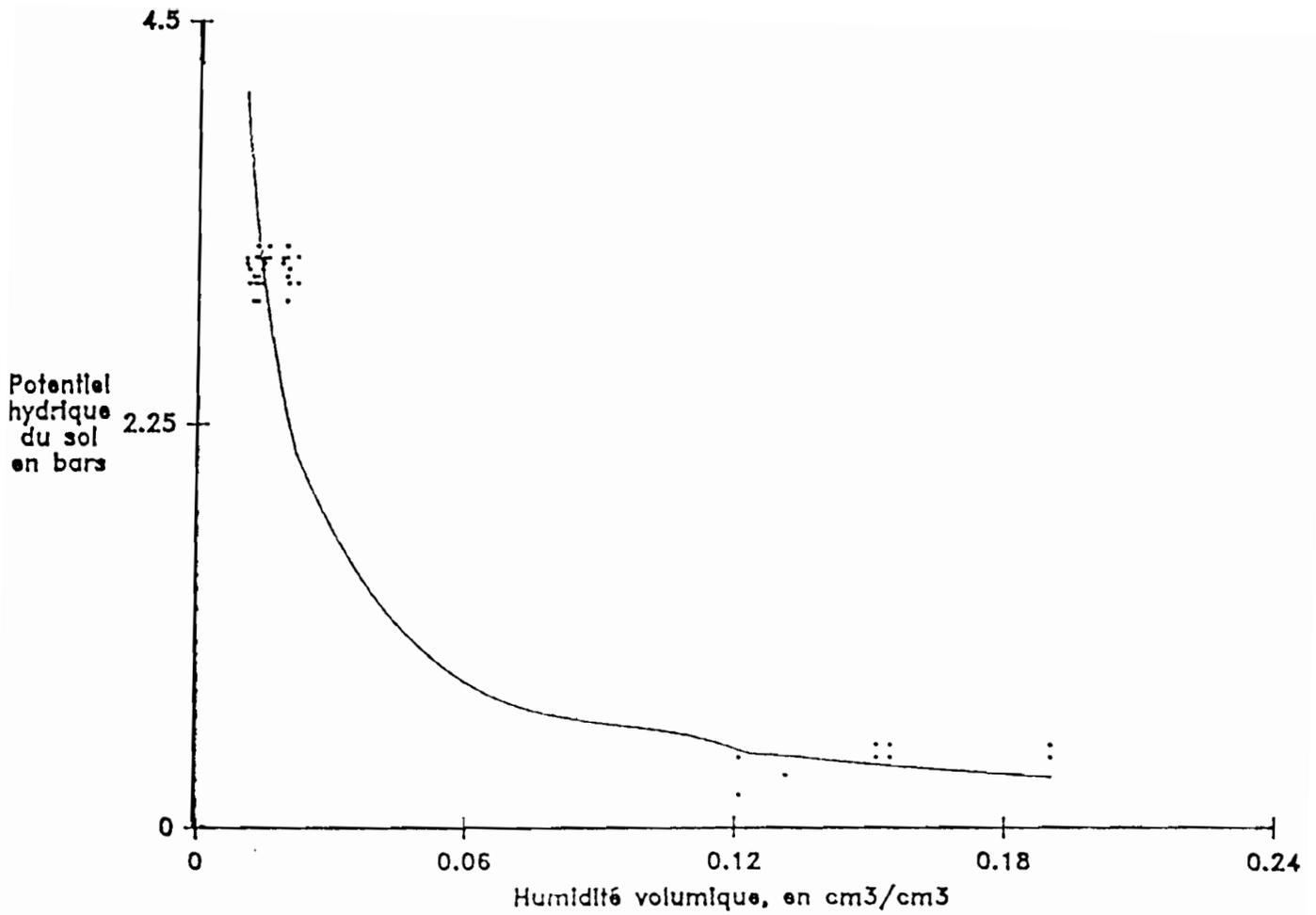


Figure 5. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 40

Niveau 40
 Nombre de points = 48
 $\Psi = 0.05 \theta^{0.93}$
 $r = 0.96$
 $r^2 = 0.91$

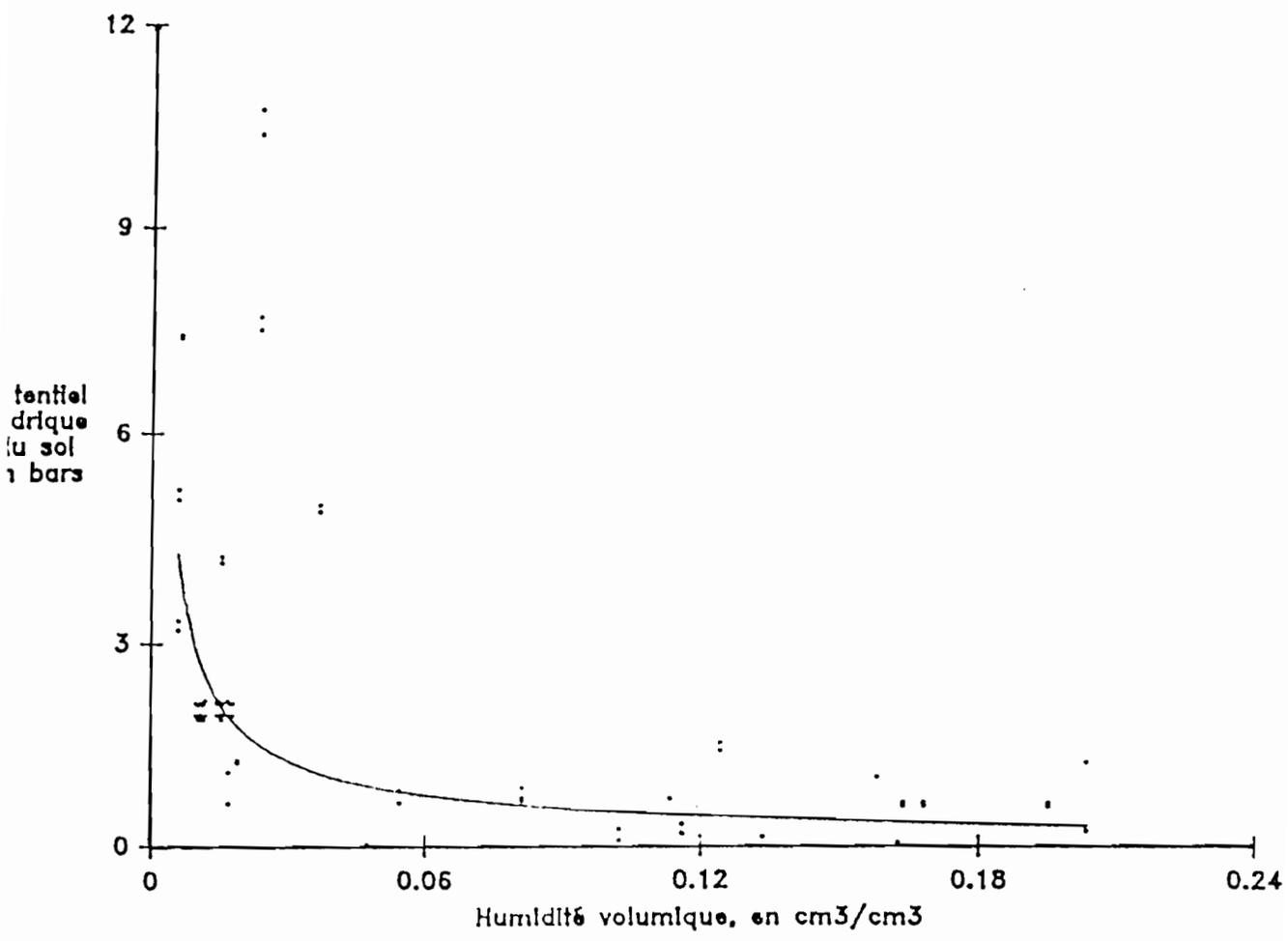


Figure 6. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 50

Niveau 50
 Nombre de points = 82
 $Y = 0.09 \theta^{0.74}$
 $r = 0.49$
 $r^2 = 0.45$

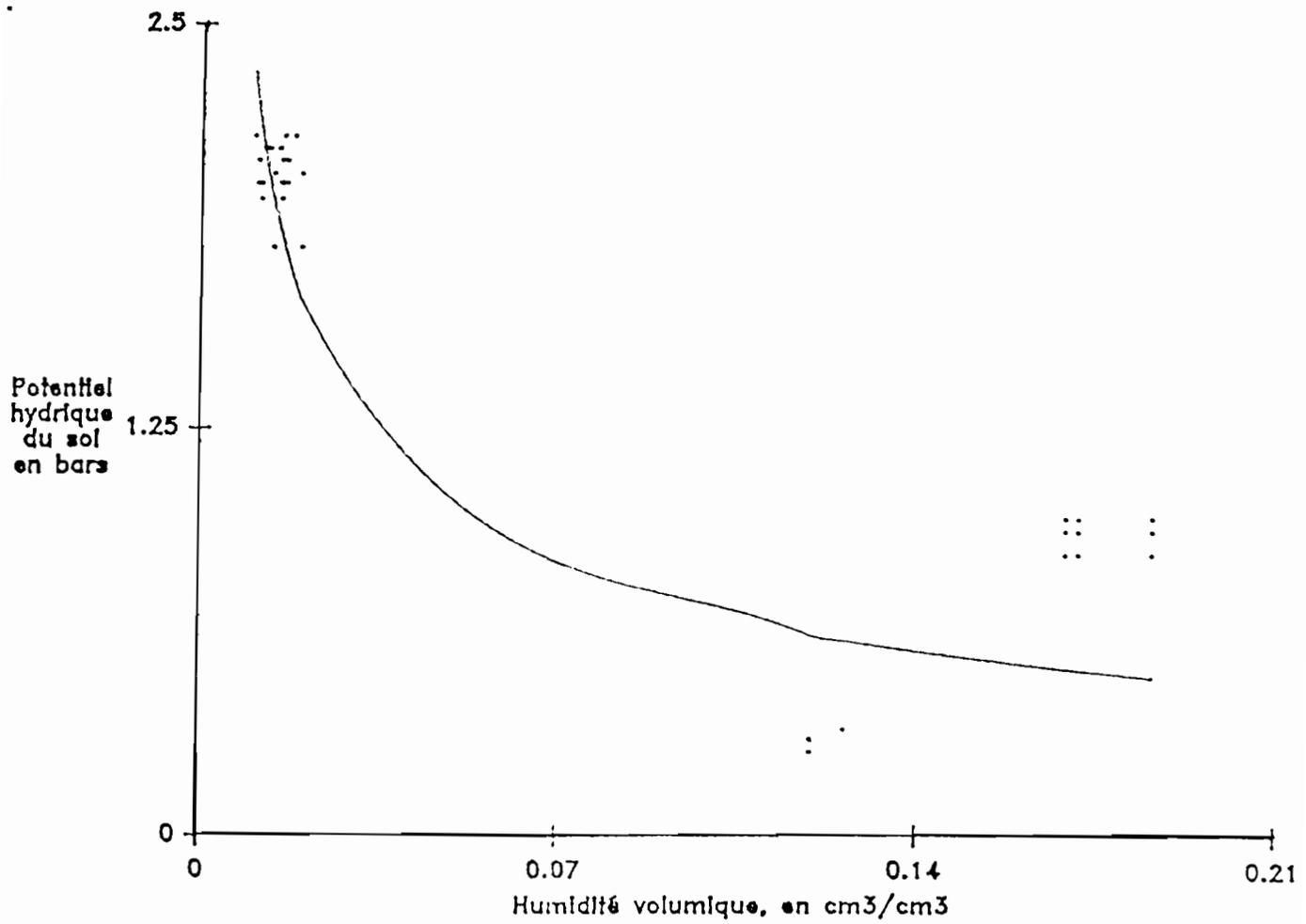


Figure 7. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol
Niveau 60

Niveau 60
 Nombre de points = 45
 $\Psi = 0.19 \theta^{0.53}$
 $r = 0.85$
 $r^2 = 0.66$

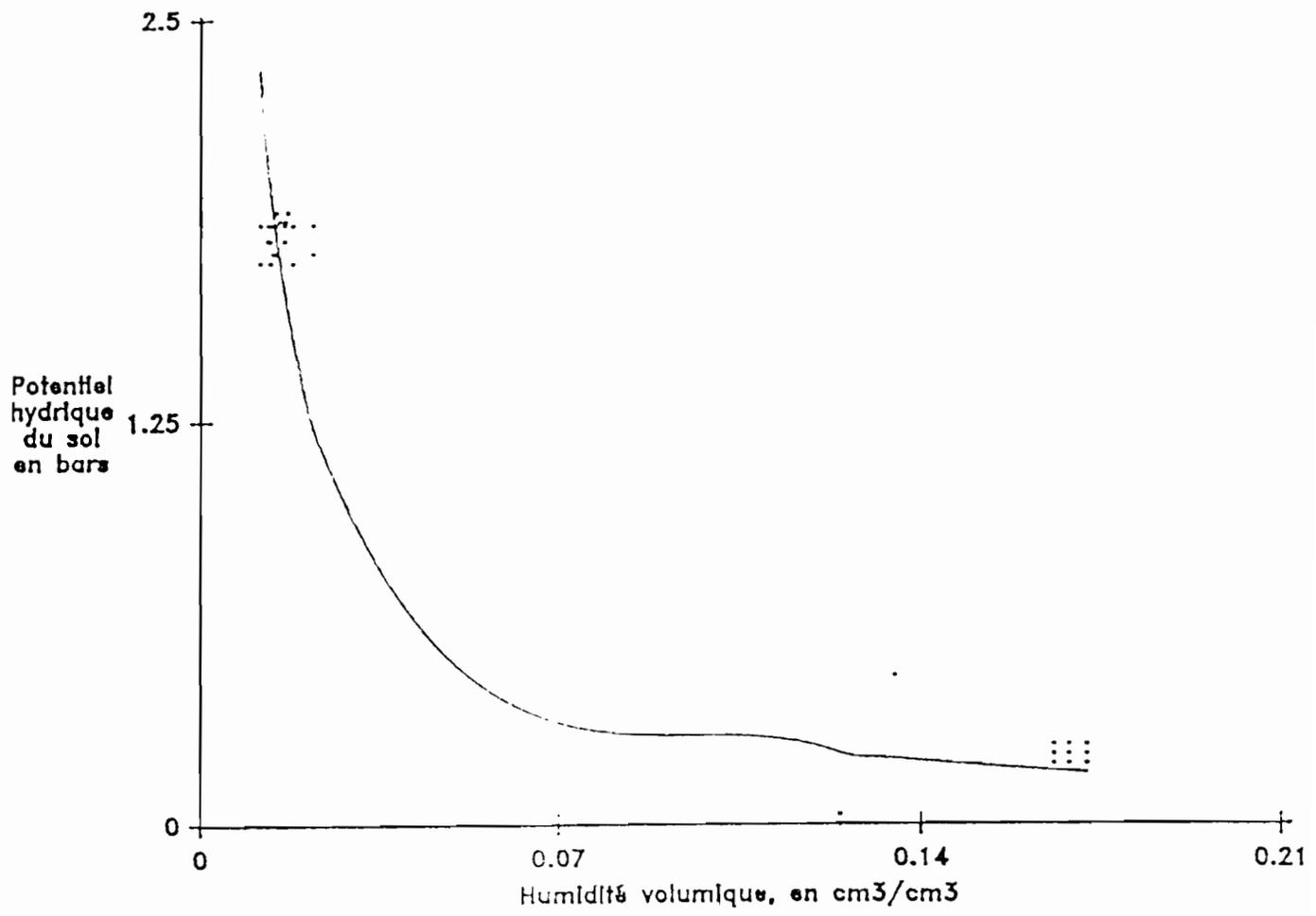


Figure 8. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 70

Niveau 70
 Nombre de points = 45
 $\Psi = 0.02 \theta^{0.99}$
 $r = 0.96$
 $r^2 = 0.76$

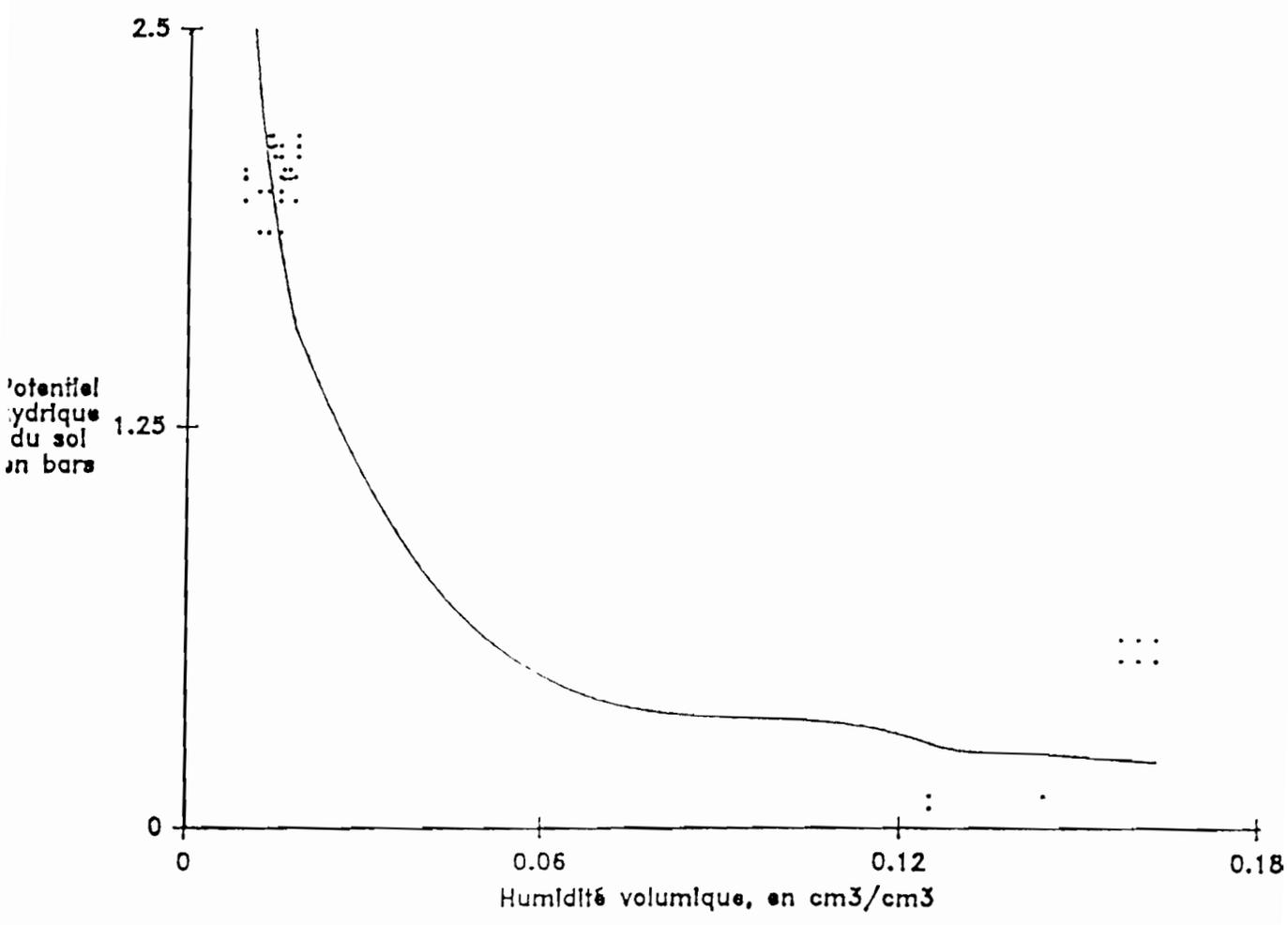


Figure 9. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 80

Niveau 80
 Nombre de points = 48
 $\Psi = 0.03 \theta^{0.91}$
 $r = 0.94$
 $r^2 = 0.71$

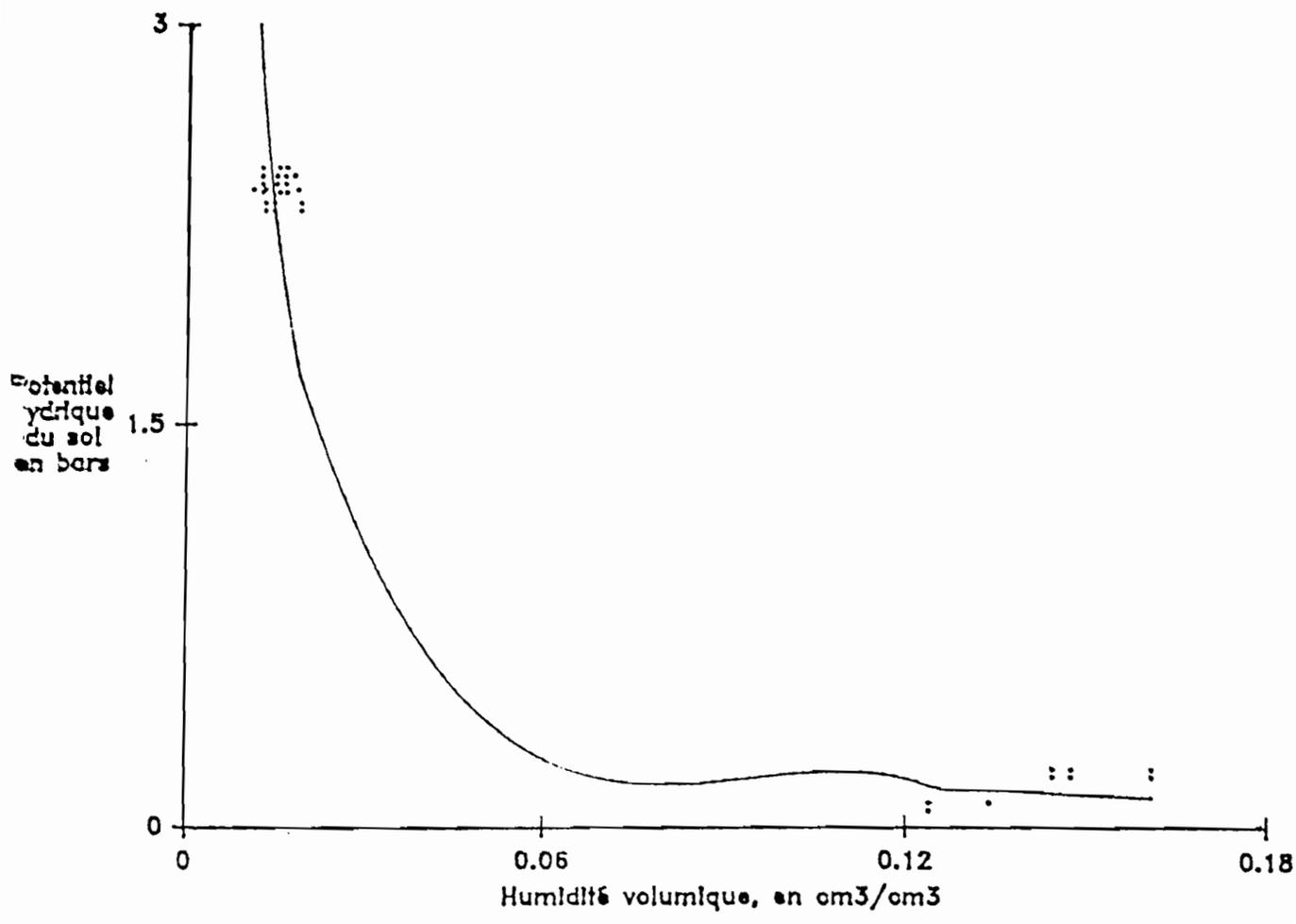


Figure 10. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 90

Niveau 90
 Nombre de points = 48
 $\Psi = 0.01 \theta^{1.27}$
 $r = 0.98$
 $r^2 = 0.91$

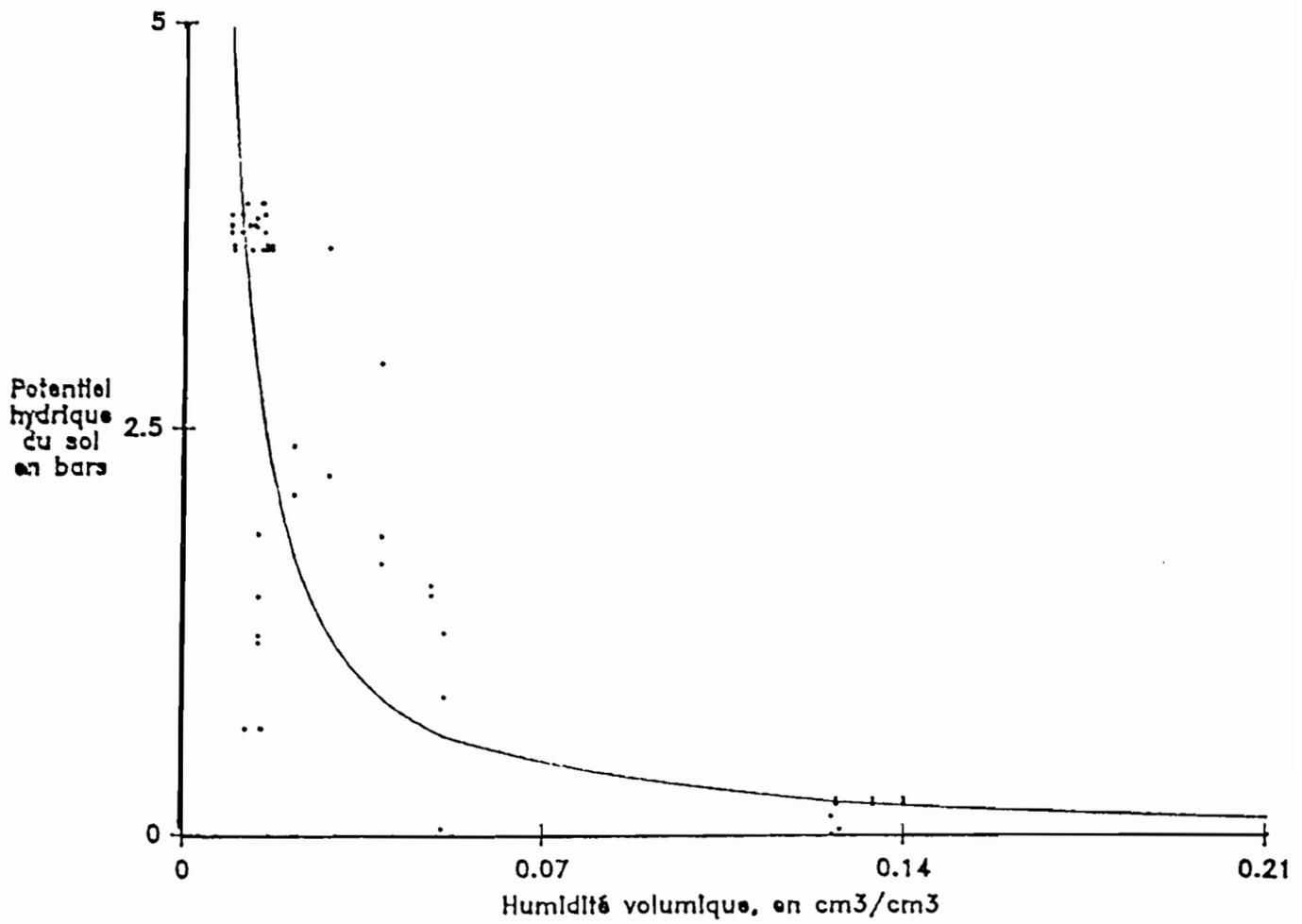


Figure 11. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 100

Niveau 100
 Nombre de points = 71
 $\Psi = 0.01 \theta^{1.23}$
 $r = 0.62$
 $r^2 = 0.71$

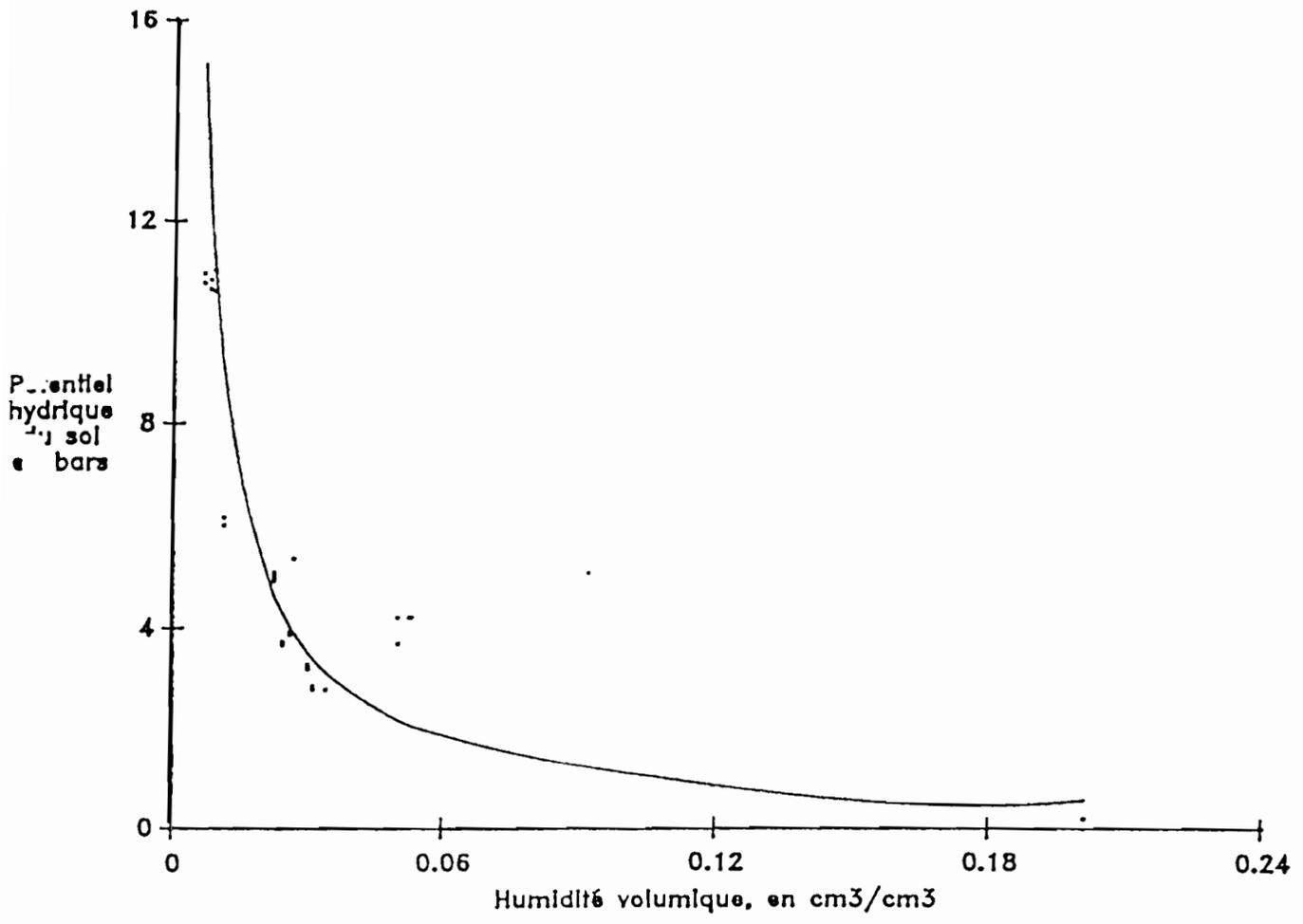


Figure 12. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 250

Niveau 250
 Nombre de points = 34
 $Y = 0.12 \theta^{0.94}$
 $r = 0,67$
 $r^2 = 0.73$

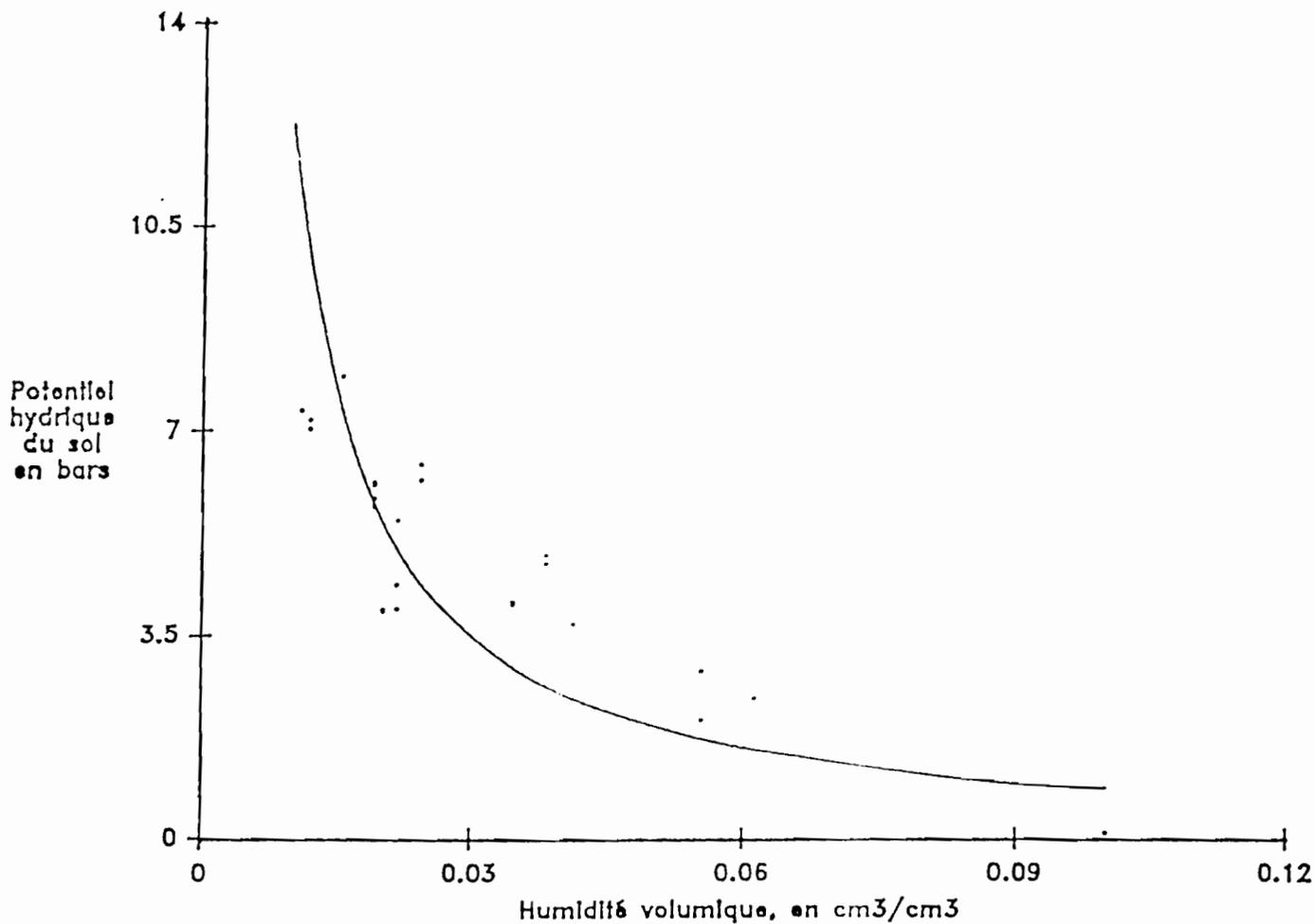


Figure 13. Relation entre l'humidité volumique et le potentiel hydrique du sol Niveau 425

Niveau 425
 Nombre de points = 26
 $\Psi = 0.7 \theta^{1.75}$
 $r = 0.72$
 $r^2 = 0.60$

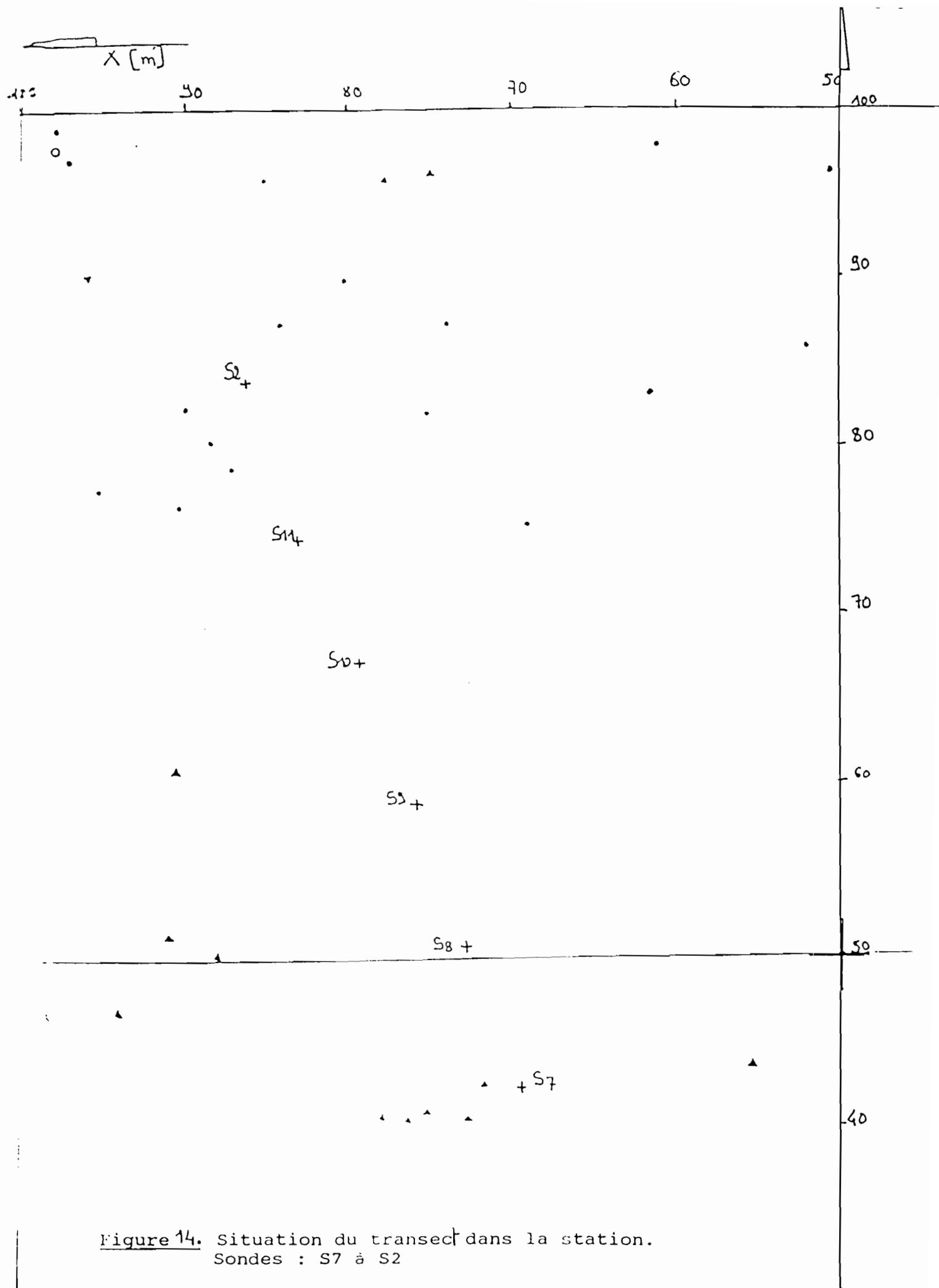


Figure 14. Situation du transect dans la station.
Sondes : S7 à S2

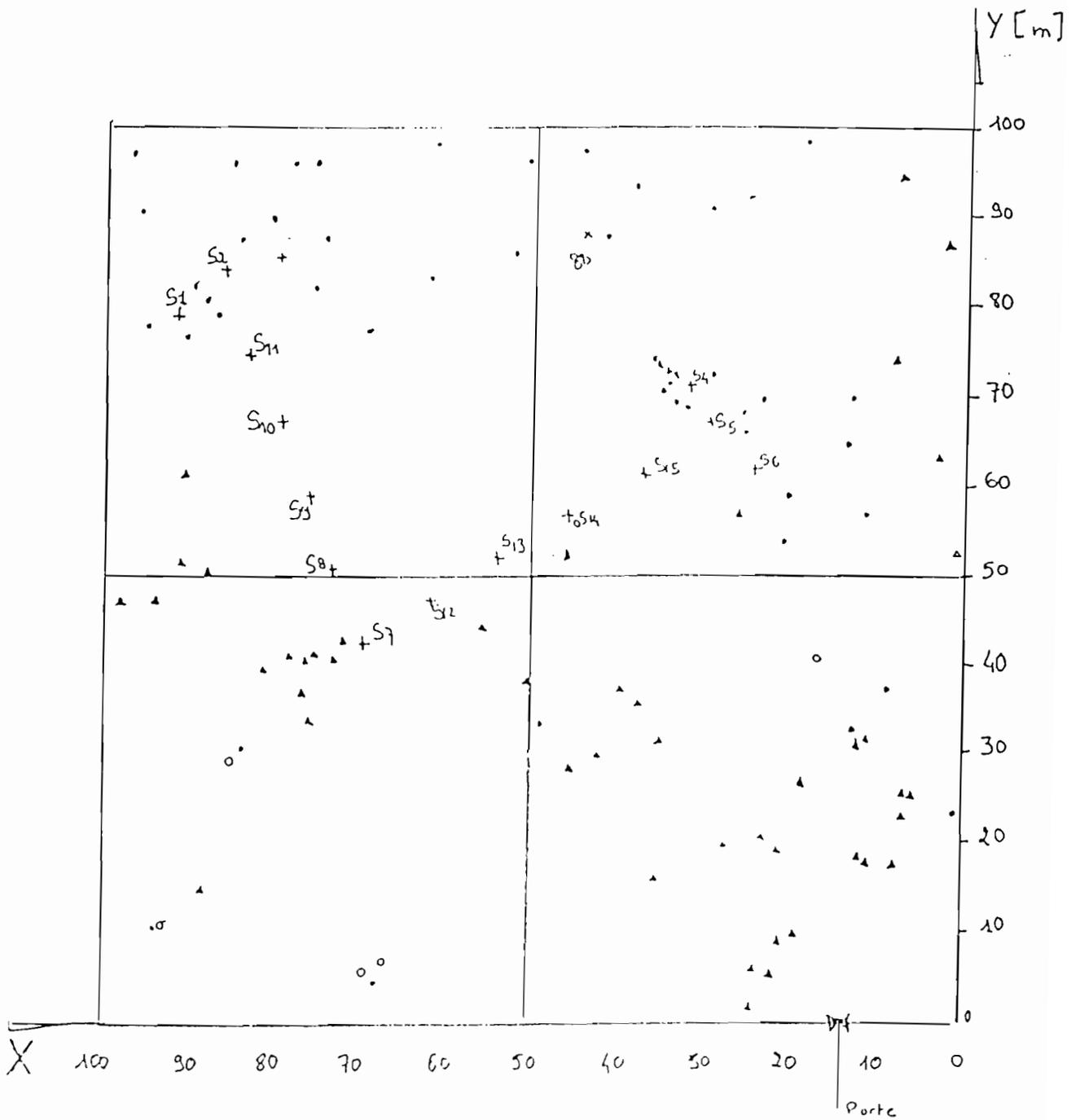


Figure 15. Division de la station en 4 carrés de 50X50 m.

Sondes : S1 à S13

Espèces arborées rencontrées :

- ▲ Balanites
- Acacias
- Boscia
- × Ziziphus

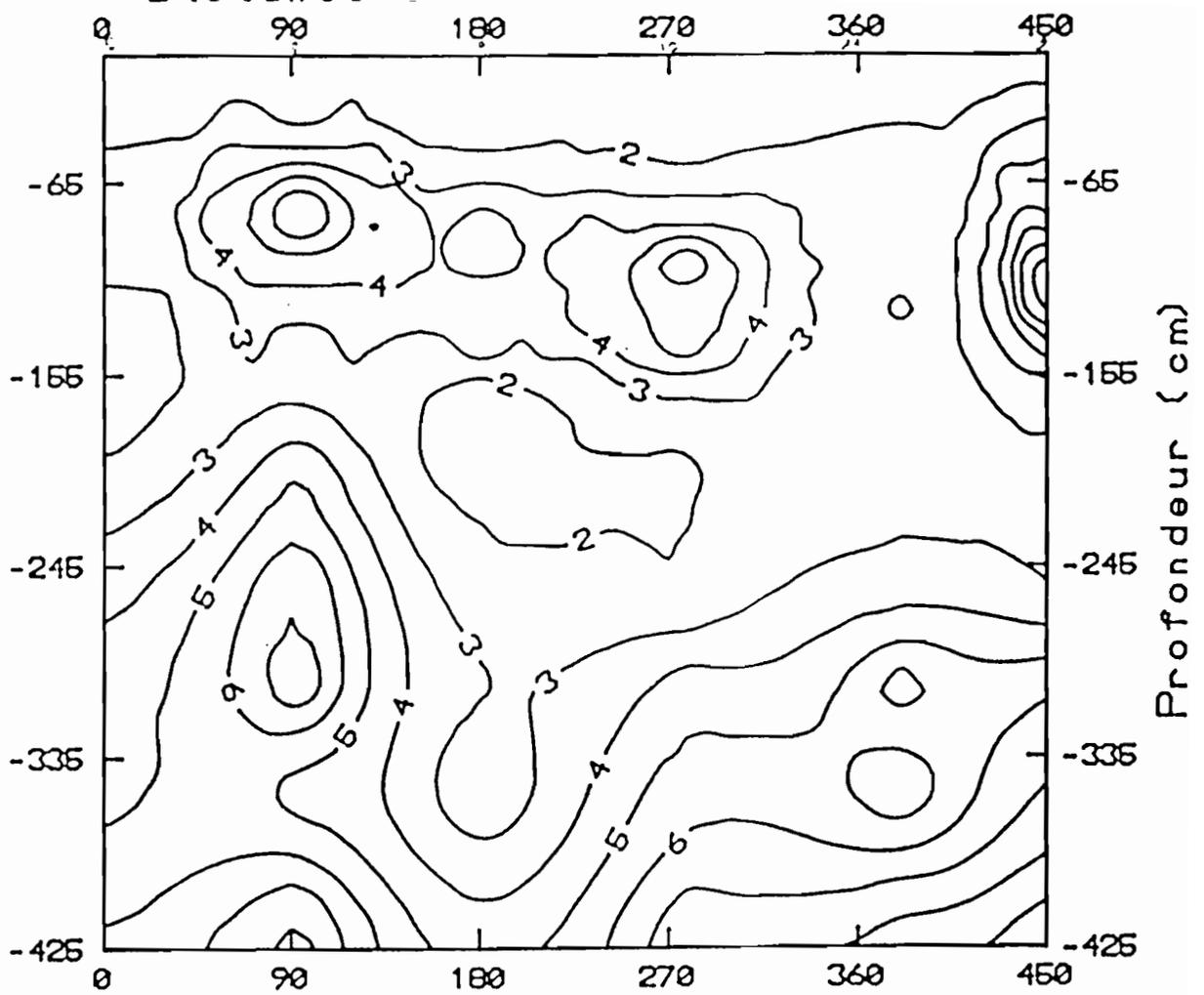


Figure 16. Carte interpolée du 24-09-89

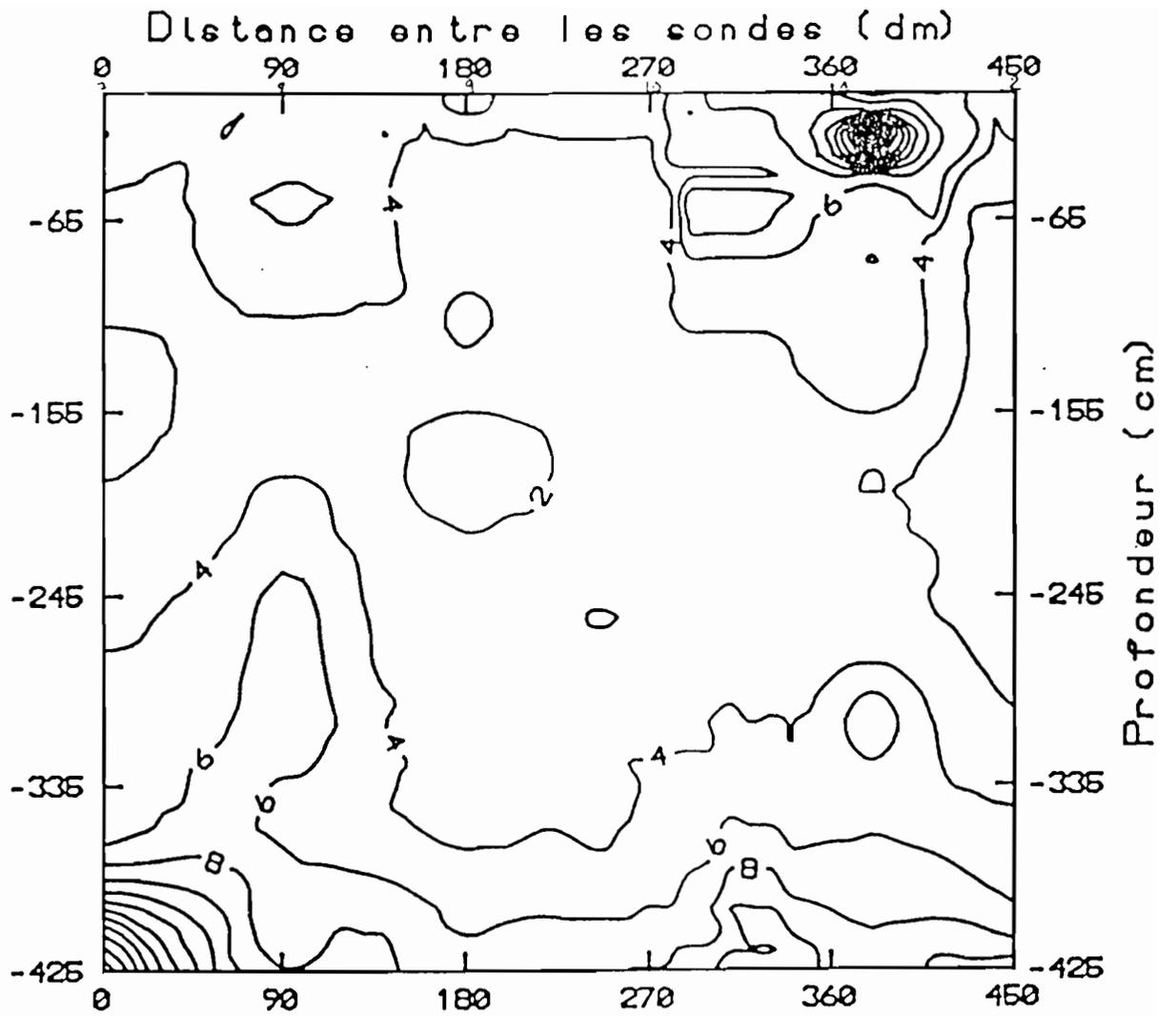


Figure 17. Carte interpolée du 24-10-90

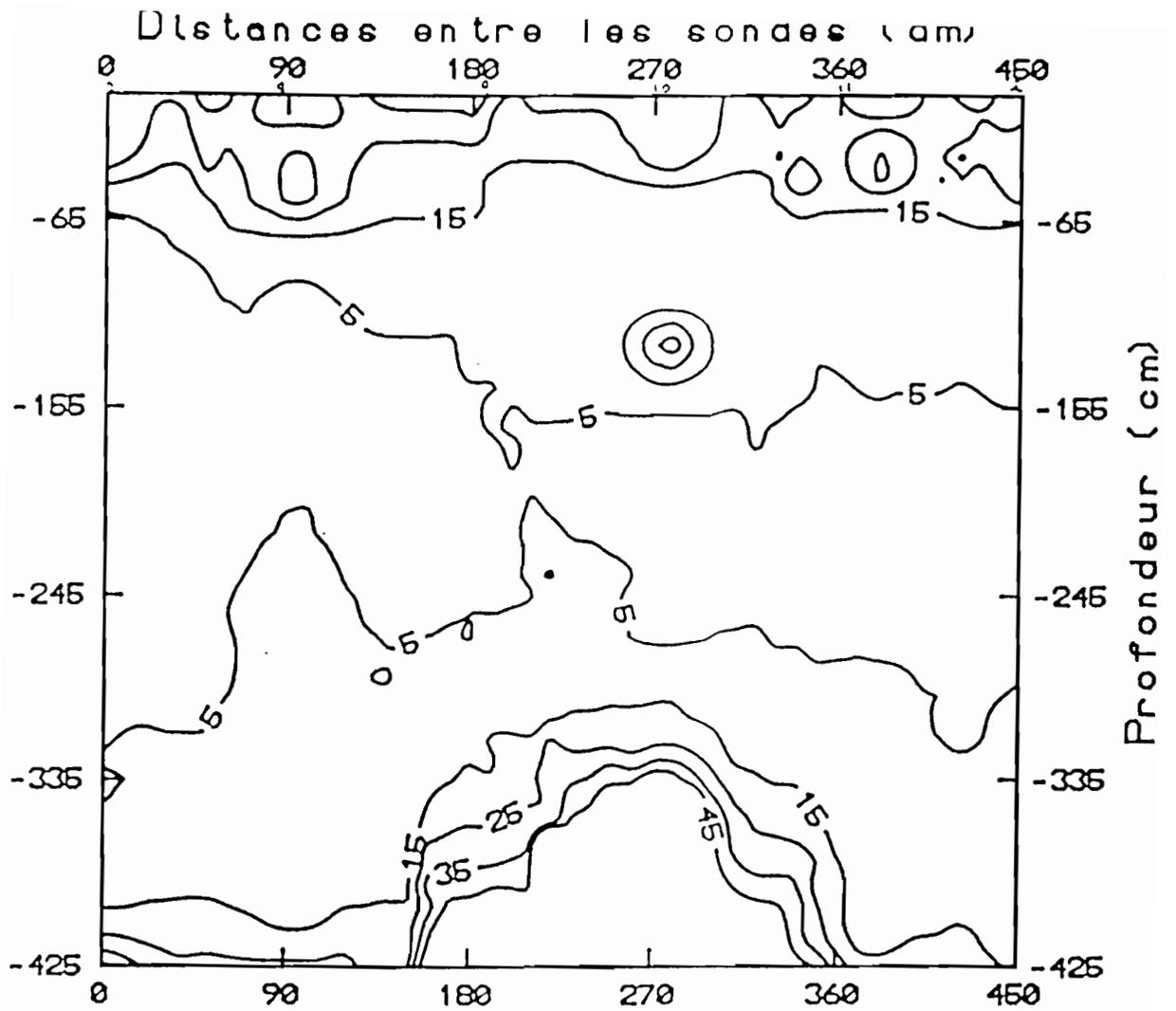


Figure 18. Carte interpolée du 16-05-90

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKPO, L. E., 1990.** Dynamique des systèmes écologiques sahéliens : structure spécifique, productivité et qualité des herbages (le forage de Widdu Thiengoly). Mémoire de D.E.A. 55 p.
- AUBREVILLE, A., 1949.** Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Paris : Soc. Ed. Géog. marit. colon., 351 p.
- BILLE, J.C., 1977.** Etude de la production I aire nette d'un système écologique sahélien. Paris : ORSTOM 82 p. (Trav. et Doc. ; 65).
- BOIVIN, P., 1990.** Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance Sénégal). Etude de la variabilité spatiale et relations avec les caractéristiques pédologiques. Thèse de Doctorat. 185p.
- BONNEAU, M., 1961.** Bulletin A.F.E.S., 8, 16-26. Potentiel hydrique du sol : relation entre potentiel hydrique et humidité volumique.
- BONNEAU, M., SOUCHIER, B., 1979.** Pédologie II. Constituants et propriétés du sol. Masson Ed. 273-275.
- BRUCKLER, L., 1984.** Utilisation des micropsychromètres pour la mesure du potentiel hydrique du sol en laboratoire et in situ. I.N.R.A. Agronomie, 4 (2), 171-182.
- CORNET, A., 1981.** Le bilan hydrique et son rôle dans la production de la strate herbacée de quelques phytocénoses sahéliennes au Sénégal. Thèse de Docteur Ingénieur.
- DANCETTE, C., 1970.** Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal. Interêt agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide. Agron. trop. 25, 3 : 225-240.
- DANCETTE, C., MAERTENS, C., 1974.** Méthode d'estimation de la capacité au champ pour l'eau à partir de pF 3. Sciences du Sol 3 : 165-171.
- DELHOMME, J.P., 1978.** Application de la théorie des variables aléatoires régionalisées dans les sciences de l'eau, Bulletin B.R.G.M., III, 4, 341-375.
- FEODOROFF, A., 1972.** Hydrologie du sol, Doc. Multigr. 159 p.
- GIRI, J. 1983.** Le Sahel de demain : renaissance ou catastrophe. Paris, Ed. KARTHALA. 325 p.
- GRAND ATLAS DU SENEGAL, 1977.**
- GRAS, R., 1962.** Propriétés physiques du sol et croissance des Pêchers. Annales agronomiques, 13, 2 : 141-174.

- GROUZIS, M., 1986. Dynamique et tendances évolutives des phytocénoses sahéliennes au Burkina Faso. Séminaire régional sur la dynamique des pâturages sahéliens (3-8 novembre). Dakar : FAPIS-UNESCO.-15p.
- GROUZIS, M., 1988. Structure, productivité et dynamique des écosystèmes écologiques sahéliens : la Mare d'Oursi au Burkina Faso. Paris ORSTOM 336 p. (Collection études et thèses).
- GROUZIS, M., NIZINSKI, G., AKPO, L.E. 1991. L'arbre et l'herbe au sahel. Influence de l'arbre sur la structure spécifique et la production de la strate herbacée, et sur la régénération des espèces ligneuses. IV^{ème} congrès international des terres de parcours. Montpellier, France 22-26 avril 1991.
- HALLAIRE, M., 1963. L'eau et la production végétale (Vol. 1), INRA, Paris.
- HENIN, 1936. Annales Agronomiques, 723-741.
- JEUNE AFRIQUE, 1973. Le Grand Atlas du Continent Africain, Paris.
- LANG, 1967. Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solution from 0 to 40°C. *Australian J. Chem.*, 20, 2017-2023.
- LERICOLLAIS, A., DIALLO, Y., SANTOIR, Ch., 1980. Peuplement et culture de saison sèche dans la vallée du Sénégal, Carte B à 1/100000 Mbane, Tyilé-Boubakar, Rosso-Est, Rkiz. O.R.S.T.O.M., organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal.
- MAIGNIEN, R.(1965). Carte des sols du Sénégal 1/1000000. Dakar : O.R.S.T.O.M. .
- MARCESSE, J., et COUCHAT, Ph., 1973. Etude hydrodynamique des sols à l'aide d'un humidimètre à neutron automatique. C.R. I.A.E.A.-SM. 176/23 : 277-293.
- MATHERON, G., 1965. Les variables régionalisées et leur estimation, Ed. Mason, Paris.
- MONNIER & KONAN, 1968. Annales agronomiques, 19(1), 541-552.
- PERIGAUD, G., 1963. Thèse d'Ingénieur-Docteur, Clermont-Ferrand, 203 p.
- ROBERT, P. 1988. Le Petit Robert : Dictionnaire de la langue française. Paris : Le Robert.
- SCHOFFIELD, R.K., 1935. *Trans. 3^{em} Int Congr. A.I.S.S.*, 2, 135
- SCHWARTZ, D.(1980). Méthodes statistiques à l'usage des Médecins et Biologistes. 3^o édition Collection statistique en Biologie et Médecine. Paris : Flammarion. 318p. (Médecine-Sciences)

SCHWARTZ, D. LAZARD, P.(1978). Statistique médicale et biologique. 4° édit., Collection Eléments de statistique. Paris : Flammarion(Médecine-Sciences).

VAUCLIN, M. 1971. Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Grenoble.