

REPUBLIQUE TUNISIENNE

1984

MINISTRE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DES SOLS

**ELECTRODE SENSIBLE AUX IONS SODIUM
RECUEIL DE DONNEES POUR UNE UTILISATION
DANS UN SOL EN PLACE : IMPORTANCE DU FACTEUR HUMIDITE**

Par : M^{me} N. KOLSI - BENZINA (Division des Sols)
M^r J. SUSINI (D.R.E.S. - O.R.S.T.O.M.) collaboration Technique : M^{me} M. CHARRAD
Division des Sols (Mai 1983)

E-S 209

ELECTRODE SENSIBLE AUX IONS SODIUM
RECUEIL DE DONNEES POUR UNE UTILISATION DANS UN SOL EN PLACE :
IMPORTANCE DU FACTEUR HUMIDITE

P a r

Mme N. KOLSI - BENZINA (Division des Sols)
Mr. J. SUSINI (D.R.E.S. - O.R.S.T.O.M.)

Collaboration technique : Mme. M. CHARRAD

Service de Recherche et d'Expérimentation Pédologique
Division des Sols

Mai 1983

Ce rapport présente des résultats des recherches menées au service de recherche pédologique de la D.R.E.S. Il s'inscrit dans le cadre du programme étude et prévision de la salure utilisation des électrodes spécifiques.

LECTRODE SENSIBLE AUX IONS Na

RECUEIL DE DONNEES POUR UNE UTILISATION DANS UN SOL EN PLACE : IMPORTANCE DU FACTEUR HUMIDITE

Comme pour l'électrode pH une électrode ionique spécifique suit la relation de Nerst.

$$E = E_0 + \frac{RT}{ZF} \log \frac{a_{in}}{a_{ext}}$$

a_{in} et a_{ext} sont respectivement les activités de l'ion considéré dans la solution interne de l'électrode et dans la solution extérieure.

L'électrode est donc sensible uniquement à la forme ionisée de l'élément considéré ou plutôt à sa forme active, ceci aux interférences avec d'autres ions près *1.

Dans le sol, cette forme ionisée existe spécialement en solution *2 donc nécessite une certaine humidité du sol. C'est cette humidité qui, solubilisant des éléments du sol et ionisant certains, assure théoriquement la continuité électrique du milieu. Seulement la notion de continuité électrique est à préciser.

On entend par continuité électrique la propriété de la terre d'être bonne conductrice du courant. La définition du seuil de continuité dépend de l'appareil de mesure.

*1 Pour un ion A principal et un ion B_i interférent l'équation de Nerst devient.

$$E = E_0 + \frac{2,3 RT}{Z_A} \log A + k_i B_i \frac{Z_{B_i}}{Z_A}$$

A et B_i = activités des ions A et B_i

Z_A et Z_{B_i} = nombre de charge des ions A et B_i .

*2 - Les sels s'ionisent spécialement en solution mais la forme ionique existe parfois dans des sels fondus ce qui n'est pas notre cas dans un sol.

Les amplificateurs opérationnels que nous utilisons ont une résistance interne (R) très grande ($R \sim 10^{12} \Omega$).

Pour effectuer une mesure ils n'ont besoin que d'une très faible intensité électrique donc la conductivité du milieu peut être très faible sans gêner le déroulement de la mesure.

C'est uniquement quand la résistance du milieu dépasse R , que ces amplificateurs indiquent une d.d.p. égale à la d.d.p. d'alimentation, ceci s'appelle décrochement électrique de l'appareil (électrodes en l'air).

Or dans un sol, si sec soit-il, la résistance n'atteint jamais cette valeur de $10^{12} \Omega$, on aura toujours une mesure de l'électrode. Il n'y a donc jamais de décrochement au sens discontinuité électrique du milieu. Nous avons tenu à préciser cette notion de décrochement ceci parce que plusieurs auteurs parlent de "décrochement" au deçà d'une certaine humidité pondérale du sol d'environ 10-15 % sans toutefois définir ce terme et les facteurs déterminant la valeur de cette limite.

Par ailleurs, si nous avons montré que le décrochement électrique ne s'opère jamais quelle que soit l'humidité du sol, ce facteur humidité reste d'une importance capitale dans la lecture et l'interprétation des mesures d'une électrode :

- pour traduire le chiffre des meq/l de solutions de sol (lu) en meq/g de sol.
- et surtout pour savoir à quelle humidité l'électrode cesse de donner une valeur représentative de l'activité, de quoi dépend cette valeur limite et comment la déterminer.

.../...

~~Nous nous proposons de chercher~~ dans quelles conditions d'humidité l'électrode fonctionne et sur quelles bases interpréter ses résultats ?

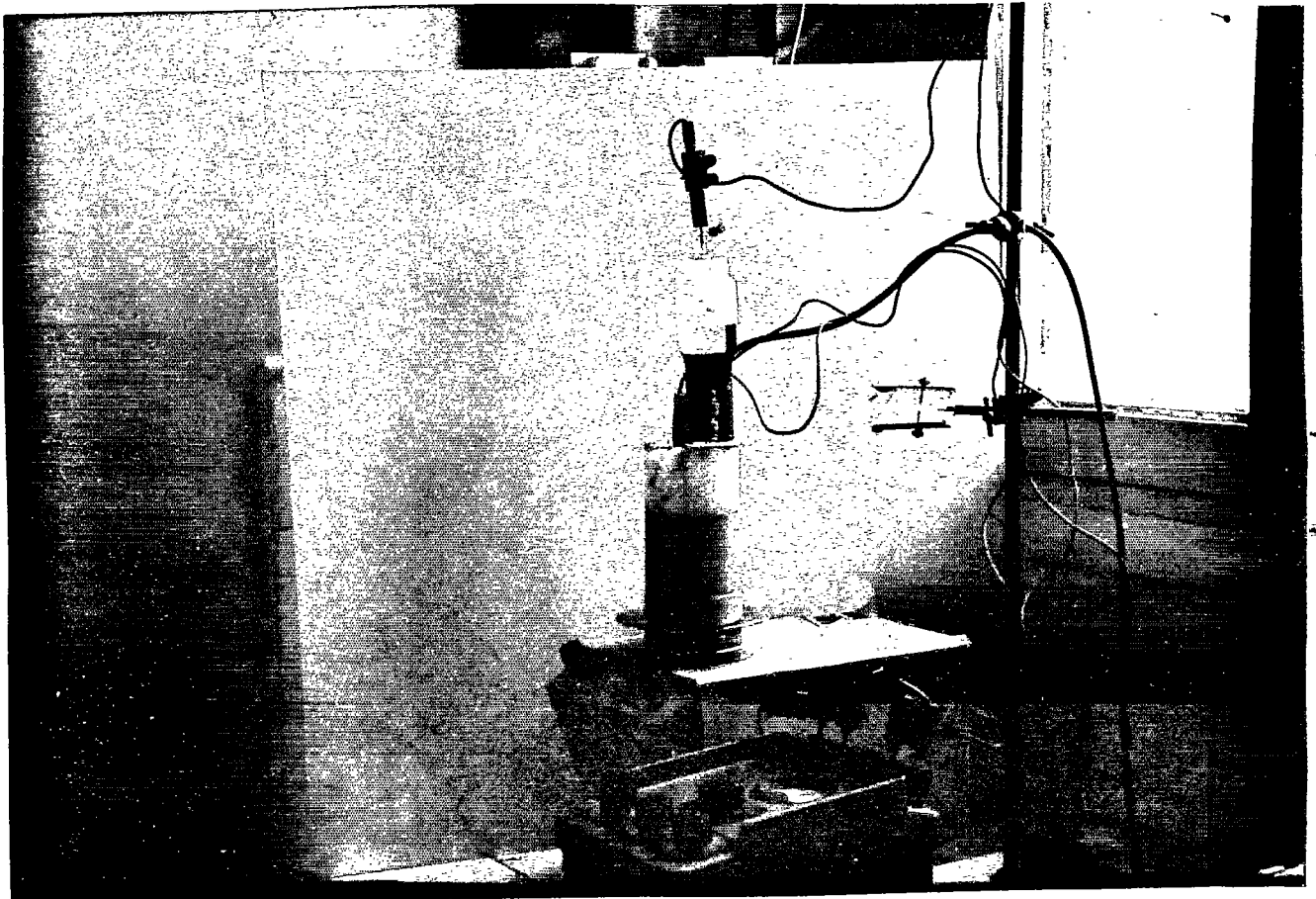
Nous avons procédé à deux expérimentations en utilisant des électrodes Na préétalonnées.

- La première manipulation en laboratoire est faite pour suivre les réponses données dans un cycle de dessiccation-humectation, et mettre en évidence les anomalies qui peuvent apparaître à partir de certaines valeurs d'humidité.

- La deuxième manipulation, sur le terrain, doit montrer l'importance de la disposition des électrodes de référence par rapport à l'électrode de mesure, cette expérience devrait fournir aussi un moyen indirect d'être alerté d'une mauvaise réponse, conséquence d'un taux trop faible d'humidité.

P R E M I E R E P A R T I E

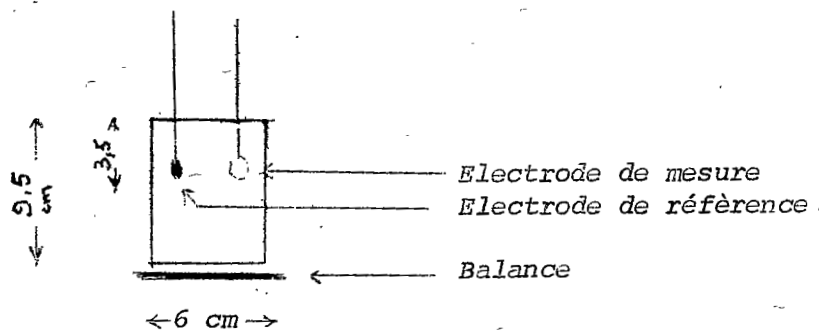




PREMIERE PARTIE
EXPERIMENTATION AU LABORATOIRE
L'ELECTRODE SODIUM DANS UNE COLONE DE SOL

Cette expérience a été faite avec le montage décrit dans la figure 1. 300 g de terre, de texture équilibrée de pourcentage de saturation 50 % environ ; le sodium présent dans l'extrait de saturation = 48 meq/l ou 24 % (24 meq/100g) (données complètes sur l'échantillon : annexe 1-1)

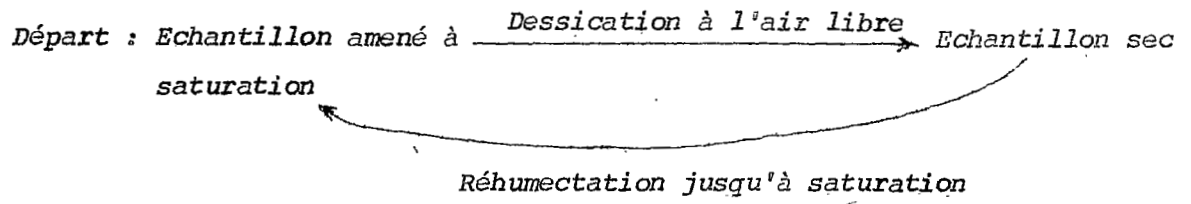
Après avoir été soigneusement amené à saturation, cet échantillon est mis dans un récipient cylindrique, l'électrode de mesure enfoncée de telle façon que la partie sensible soit au milieu de la masse ; l'électrode de référence est disposé à proximité et au même niveau que l'électrode de mesure ; l'électrode de référence est avec un pont intermédiaire gélosé diminuant les risques de fuite du liquide de la référence.

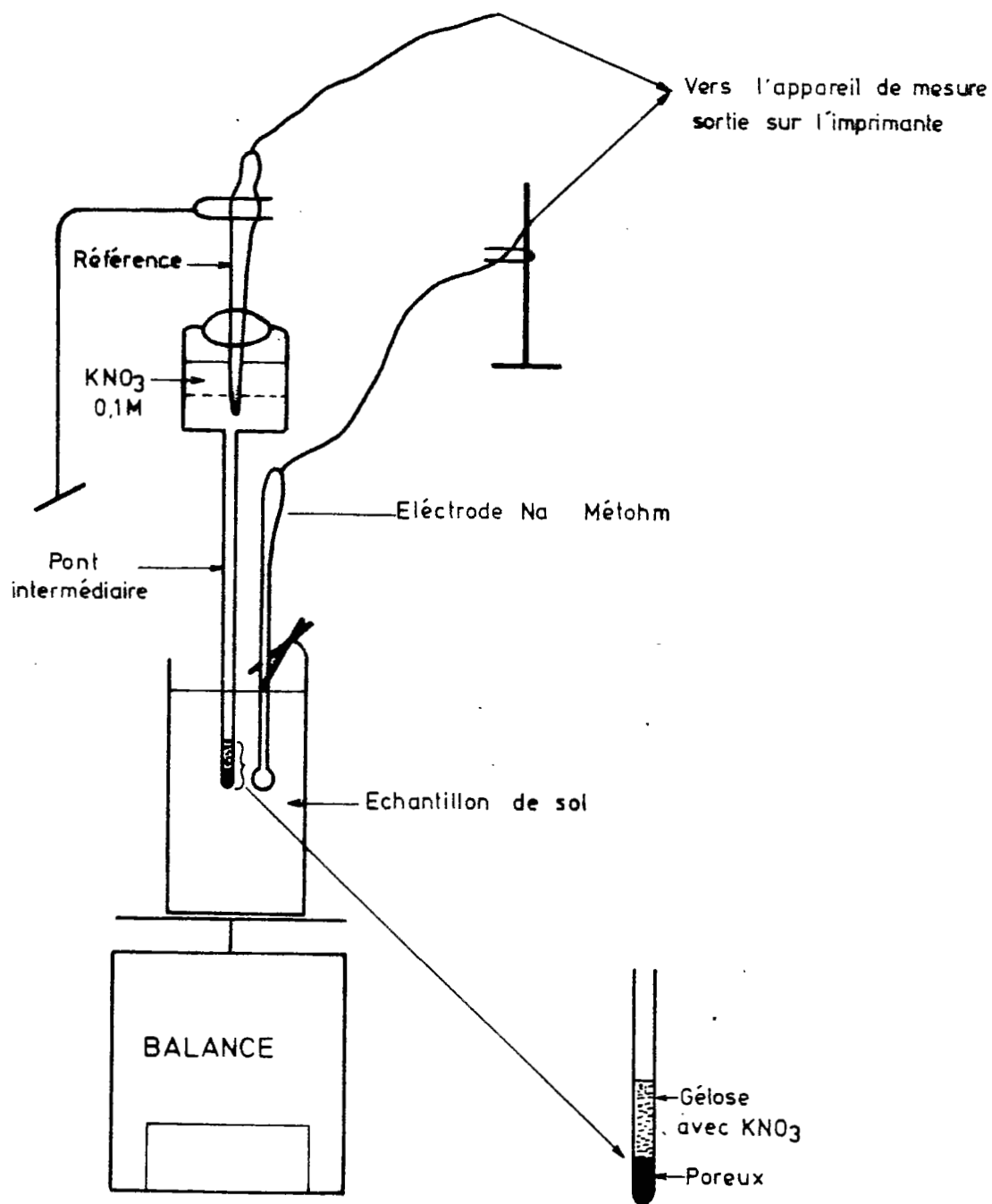


L'ensemble est disposé sur le plateau d'une balance de telle façon que le plateau puisse jouer librement, les variations de poids ne seraient donc que le fait de départ (ou d'apport) d'eau. Chaque jour, le poids est lu de même que la valeur du signal délivré par l'électrode (en mV), qui lui est converti en meq/l à l'aide de la droite d'étalonnage de l'électrode préétablie (annexe 2).

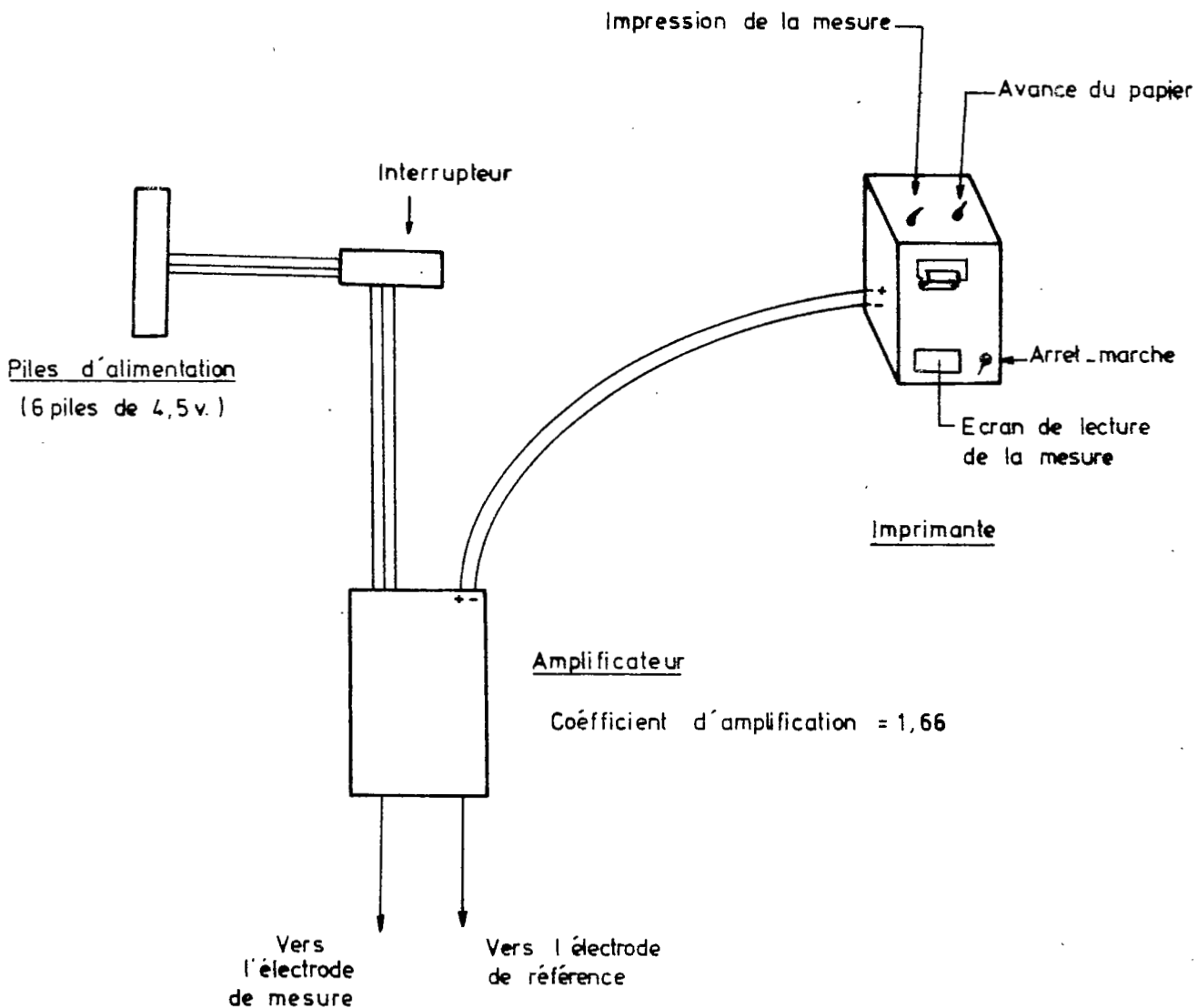
.../...

On a suivi un cycle de dessiccation-humectation.





DISPOSITIF EXPERIMENTAL



MONTAGE ELECTRIQUE

L'expérience a commencé le 23 Mars. A ce moment, l'humidité est de 45 % et le taux de sodium indiqué par l'électrode est de 27 meq/l (valeur en activité).

- La dessiccation s'est effectuée à l'air libre régulièrement jusqu'au 26 Mai, cependant il est apparu une fente de retrait importante le long de la paroi faisant que l'échantillon se trouve exposé à une plus grande surface d'évaporation.

Après quelques variations au départ, l'électrode semble se stabiliser autour d'une valeur correspondant à 25 meq/l et qui reste la même jusqu'à environ 10 - 11 % d'humidité, cela le 3 Mai. A partir de cette date et de cette valeur d'humidité, les valeurs en meq/l commencent à monter pour atteindre le 24 Mai, avec 2 % d'humidité, 300 meq/l.

- L'échantillon étant considéré "comme sec", nous avons commencé une expérience de réhumectation par portion de 5 cm³ d'eau distillée amenée à peu près tous les 5 minutes: Il est à signaler que dans cette expérience, on doit penser que des apports aussi restreints vont conduire au début à une humidité non homogène ; en tous cas, après 10 cm³ d'apport, l'électrode réagit et les valeurs sont croissantes pour atteindre 1900 meq/l après 25 cm³.

A partir de cette valeur, les apports d'eau vont les faire baisser pour rejoindre la valeur d'origine 25 meq/l, ceci après 110 cm³ d'eau apportée, soit autour de 30 % d'humidité.

INTERPRETATIONS :

Après conversion des mV lus à l'électrode en meq/l, à l'aide de la courbe étalon, nous avons représenté les deux courbes meq/l = f (temps) et humidité pondérale = f (temps)

.../...

Cette expérience nous conduit aux remarques suivantes :

1)- A aucun moment l'électrode ne "décroche" c'est à dire qu'il n'y a jamais eu de rupture du contact électrique qui est caractérisé par l'apparition d'un signal identique à l'alimentation (dans un montage avec amplificateurs opérationnels).

2)- Au début de l'expérience, encore à saturation, l'électrode indique 27 meq/l de sodium. Or la concentration en sodium dans l'extrait de saturation, mesurée par les méthodes classiques est de 48 meq/l. La différence, nettement significative est en accord avec le fait que l'électrode ne lit que la fraction active du sodium ou activité du sodium.*

Le traitement des données analytiques à l'aide d'un programme mathématique de calcul d'activité nous donne pour activité du Na 37 meq/l (voir ... annexe 1+ 1)

3) - L'examen de la courbe. Activité Na = f (temps)

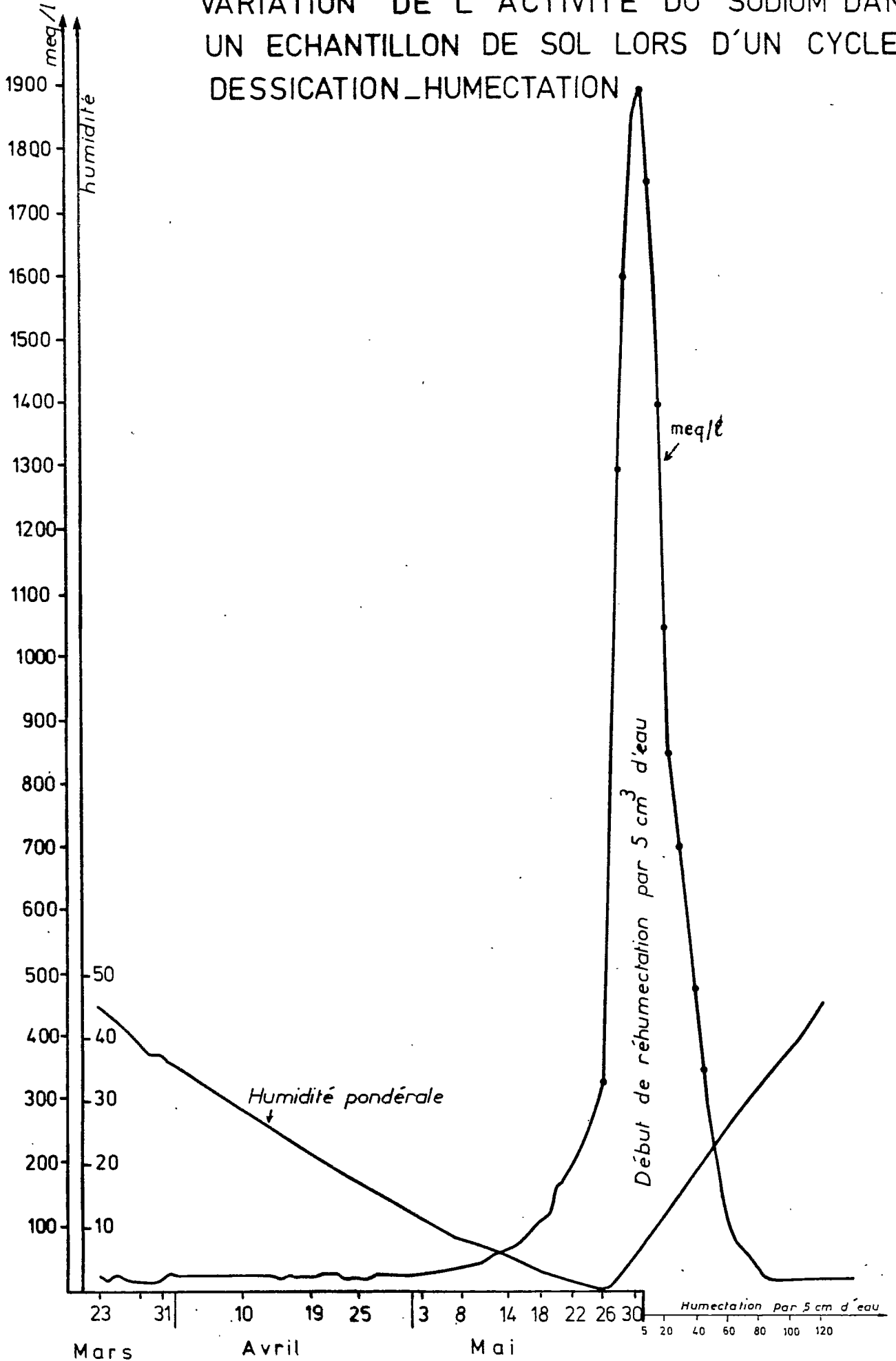
amène aux remarques suivantes :

Après les hésitations du début, les valeurs de l'électrode restent sensiblement constantes et égales à 25 - 27 meq/l jusqu'à 10 - 11 % d'humidité globale. Le palier constitue la première partie de la courbe. Il n'y a donc pas eu de concentration de la solution dans les environs immédiats de la partie sensible de l'électrode, ceci bien que l'humidité globale ait diminué de 45 % à 10 - 11 %.

Nous avons remarqué une baisse au niveau du liquide de la référence qui aurait alimenté l'humidité du sol, mais cette baisse n'est pas suffisante pour expliquer le phénomène. L'existence du palier nous amène à dire que l'évaporation n'a pas encore atteint l'électrode qui a alors gardé une concentration constante en sodium. La solution du

.../...

VARIATION DE L'ACTIVITE DU SODIUM DANS UN ECHANTILLON DE SOL LORS D'UN CYCLE DESSICATION-HUMECTION



sol peut migrer par dessiccation et appel de la surface mais elle migre avec ses sels tant que le front d'évaporation n'est pas arrivé au niveau de l'électrode.

Nous devons faire remarquer ici que, vu qu'il y a déplacement du front d'évaporation à partir de la surface, l'humidité du bulbe de l'électrode est inaccessible et que l'humidité calculée n'est qu'une valeur moyenne qu'on appellera humidité globale de l'échantillon.

Afin d'expliquer le premier palier de notre courbe, une deuxième hypothèse peut être émise c'est que, au fur et à mesure qu'il y a dessèchement, le sodium passerait de la solution du sol vers le complexe absorbant (réaction d'échange).

* Activité : C'est une propriété électrique des ions en solution dont la représentation se traduit par un chiffre d'autant plus près de celui qui exprime la concentration que celle-ci tend vers Zéro.

$$a_i = c_i \gamma_i$$

avec $\gamma_i \rightarrow 1$ quand $c_i \rightarrow 0$

.../...

4) - La deuxième partie de la courbe :

Ce n'est qu'à partir d'un bas seuil d'humidité globale (9-10%) que l'électrode indique une montée des valeurs ; vraisemblablement, à ce moment, le front d'évaporation est arrivé au niveau de l'électrode. Ceci définit la deuxième partie de la courbe. Cette montée assez régulière et de pente moyenne amène l'indication de l'électrode à 300 meq/l. Si on considère que ceci est dû à la concentration pure et simple de la solution, le facteur de concentration sera de $\frac{300 \text{ meq/l}}{25 \text{ meq/l}} = 12$; on est donc à une humidité de $\frac{45}{12} = 3,7\%$ qui représenterait l'humidité de l'environnement immédiat de l'électrode. Ce chiffre comparé à l'humidité globale de 10 % n'est pas impossible. Ceci nous amène à dire que le chiffre de 300 meq/l, à premier abord trop fort, paraît possible.

5) - Troisième partie : Début de la phase de réhumectation :

Le 26 Mai, l'échantillon étant sec par évaporation libre, nous avons commencé la phase de réhumectation par fraction de cm³ d'eau distillée à 5 mn d'intervalle.

Dès l'apport des premiers 5 cm³, les valeurs données par l'électrode croissent très vite pour atteindre 1900 meq/l, valeur étonnante.

Comment explique-t-on ce chiffre au début d'une humectation ?

- les premières gouttes d'eau se seraient chargées en sel dans les centimètres supérieurs puis, arrivant autour de l'électrode se seraient encore plus chargées par les sels déposés autour du bulbe de l'électrode lors de la phase d'évaporation. Autour de ce bulbe se serait formée une pellicule d'eau très chargée en sodium.

.../...

Ce phénomène est très important il traduit le "choc chimique" que peut subir une racine au début d'une pluie. Ce choc est non décelable avec les méthodes classiques d'analyse.

En effet, on voit que même un sol de salure moyenne ou faible peut passer par des "instants" de forte salinité. Mais ce phénomène ne peut expliquer le chiffre de 1900 meq/l qui, à lui seul, donnerait une masse en sel (NaCl par exemple) de $1900 \times 58,5 \times 10^{-3}$ soit environ 110 g/l.

Ceci est un chiffre aberrant, nous pensons que sous cette lecture résident deux valeurs :

- la salure du sol
- et la résistance de l'épaisseur du sol entre l'électrode et sa référence.

Ces deux chiffres s'additionnent.

Afin de distinguer ces 2 constatations, une expérience est à tenter (nous essaierons de la réaliser dans l'avenir) :

A l'aide de 2 capteurs de résistance placés à côté de nos 2 électrodes nous mesurons la résistance du sol. Nous noterons la valeur de cette résistance (lue en mV) de la lecture globale de l'électrode en mV. La différence trouvée sera lue sur la courbe étalon de l'électrode meq/mV pour en déduire le chiffre des meq/l traduisant la salure en Na.

6 - 4ème partie de la courbe : réhumectation du sol :

Après le pic de 1900 meq/l, la courbe redescend très vite pour rejoindre un niveau quasi constant et comparable à la première phase de la courbe. L'eau amenée conduit à la dilution des sels d'une part, et à l'humidification du sol qui diminue alors de résistance*.

.../...

Après 110 cm³ d'amenée d'eau, bien que la réhumectation continue, la lecture de l'électrode reste la même (20 meq/l). Du sodium passé sur le complexe absorbant lors des phases de dessiccation, se libérerait maintenant par dilution de la solution du sol ce qui garde une valeur de Na constante à l'électrode. Le bon fonctionnement de l'électrode est attesté par le fait que pour un apport d'eau voisin de la saturation, elle répond par sa valeur d'origine.

* Pour 80 cm³ d'eau amenée, on lit 160 meq/l

Pour 100 cm³ d'eau amenée, on lit 95 meq/l

Le facteur de dilution est $\frac{8}{10}$ or $160 \text{ meq/l} \times \frac{8}{10} = 128 > 95$.

La dilution toute seule n'explique pas la descente de la courbe, il faut faire intervenir la diminution de la résistance du sol par humidification.

.../...

CONCLUSION

Lors du phénomène de dessiccation, la courbe se distingue en 3 parties :

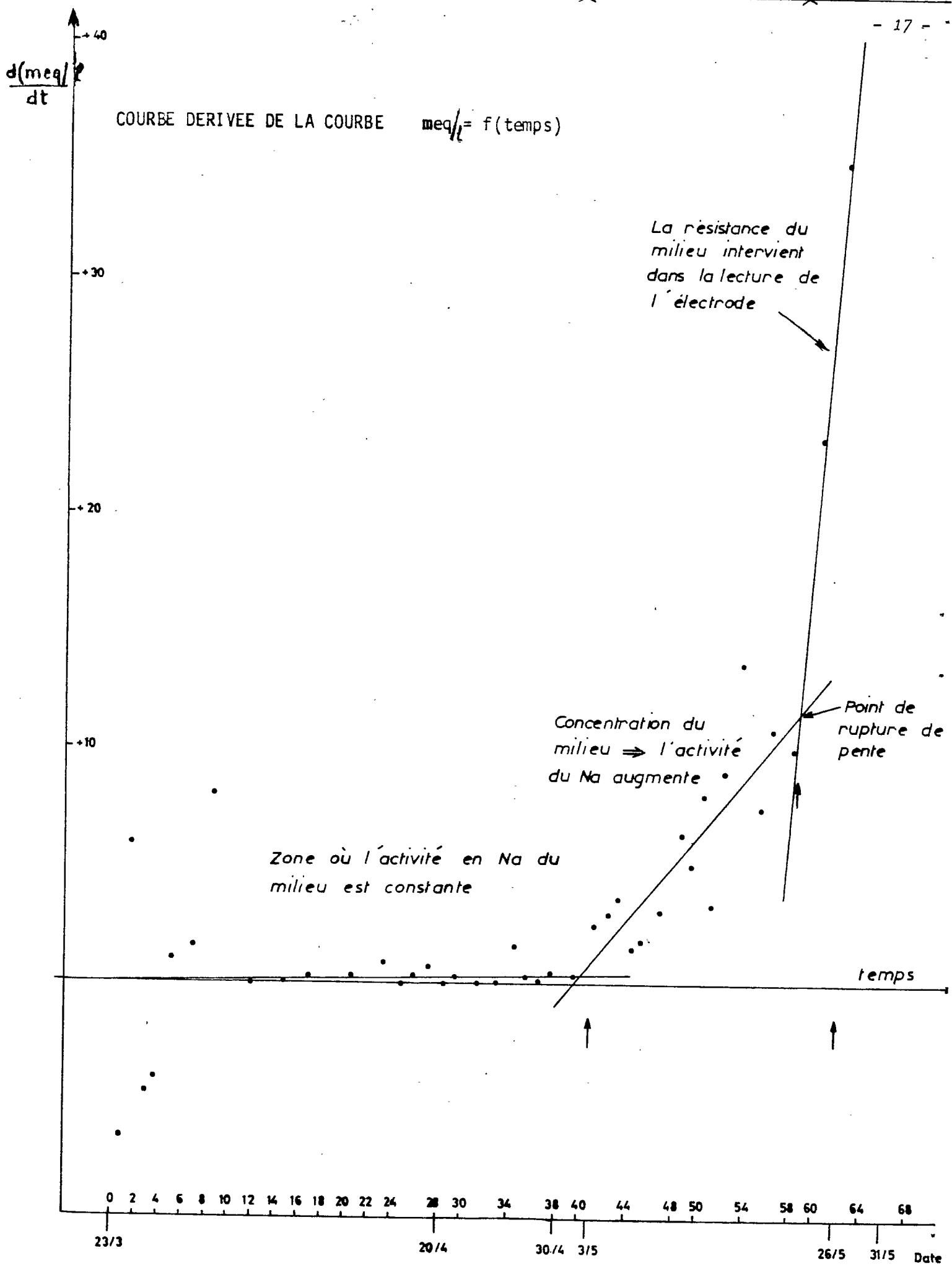
- Un palier : l'activité du Na dans la solution du sol reste constante
- Une partie ascendante de pente moyenne : la solution du sol se concentre autour de l'électrode
- Une partie ascendante de pente forte où la résistance du sol interfère dans la lecture de l'électrode.

La question qui se pose à nous est la suivante : à quel point l'électrode cesse de lire une activité pure et simple et fait intervenir la résistance du milieu ?

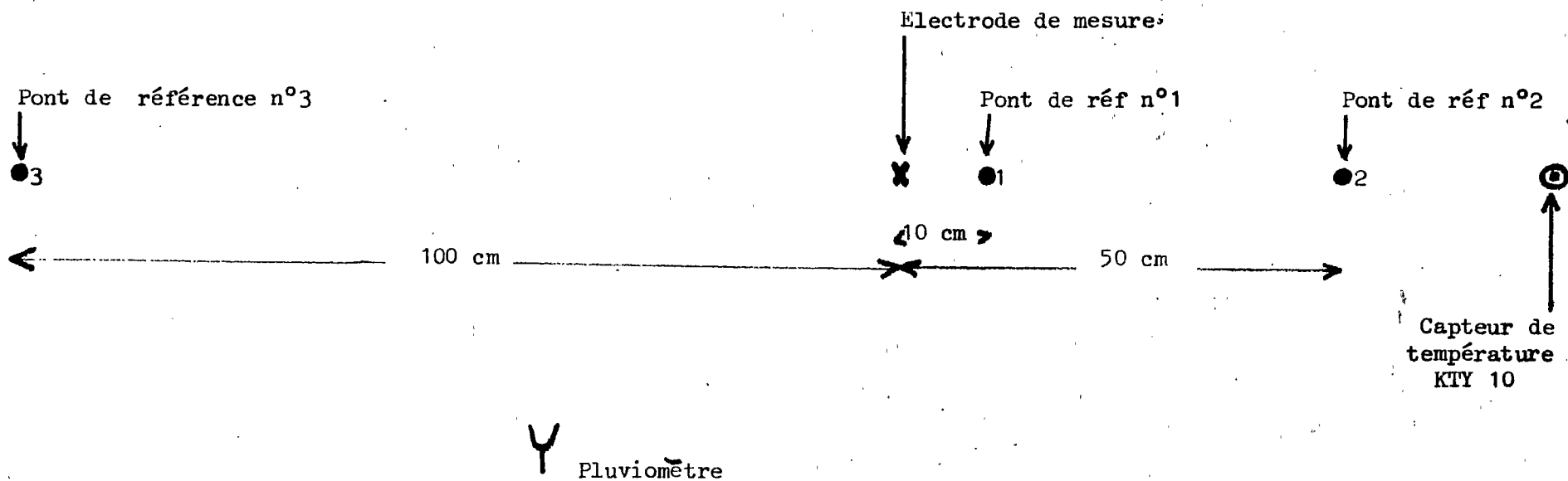
Pour déterminer ce point, nous avons procédé à un calcul approché de la dérivée de notre courbe $meq/l = f(\text{temps})$.

C'est au niveau de la rupture de pente qu'on situera ce point. En conclusion nous pouvons dire que cette expérimentation nous éclaire sur plusieurs points :

- A aucun moment du cycle dessiccation-humectation, l'électrode ne décroche dans le sens électrique du terme. La continuité électrique est toujours conservée quelle que soit l'humidité du sol.
- C'est seulement à des humidités très faibles (2-3 % pour notre cas de sol) que l'électrode devient aussi un capteur de résistance (point de rupture de pente).
- La détermination de ce dernier point n'est pas évidente sur la courbe $meq/l = f(\text{temps})$, on le détermine par des méthodes graphiques de dérivation.
- Le phénomène de choc chimique : la racine subit au début d'une pluie ou d'une irrigation une élévation de salinité soudaine et passagère mais très forte qu'il est difficile de détecter par nos méthodes classiques. Cette variation est un véritable choc chimique qui subit la racine même dans des sols de faible salinité.



DEUXIEME PARTIE



EMPLACEMENT DES ELECTRODES

DEUXIEME PARTIE

ESSAI SUR LE TERRAIN ELECTRODE Na IN SITU

Mise en place des électrodes. Protocole expérimental :

L'électrode de mesure Radiometer G 502 a été installée sur une parcelle non cultivée mais couverte de végétation naturelle.

L'électrode de mesure ainsi que les trois électrodes de référence sont installées sur une même ligne et à une même profondeur (25 cm). Les distances des électrodes de référence par rapport à l'électrode de mesure sont respectivement 10 cm - 50 cm et 100 cm. La référence utilisée (calomel KCl saturé) est la même pour les trois implantations permanentes qui sont des ponts de liaisons munis chacun d'un réservoir d'électrolyte (voir schéma ci-contre).

La mesure se fera en immergeant successivement la référence dans le réservoir 1 puis 2 puis 3. L'appareil de mesure est un millivoltmètre à forte impédance d'entrée.

A chaque mesure, un petit échantillon est prélevé à côté de l'électrode de mesure et au même niveau pour mesure d'humidité.

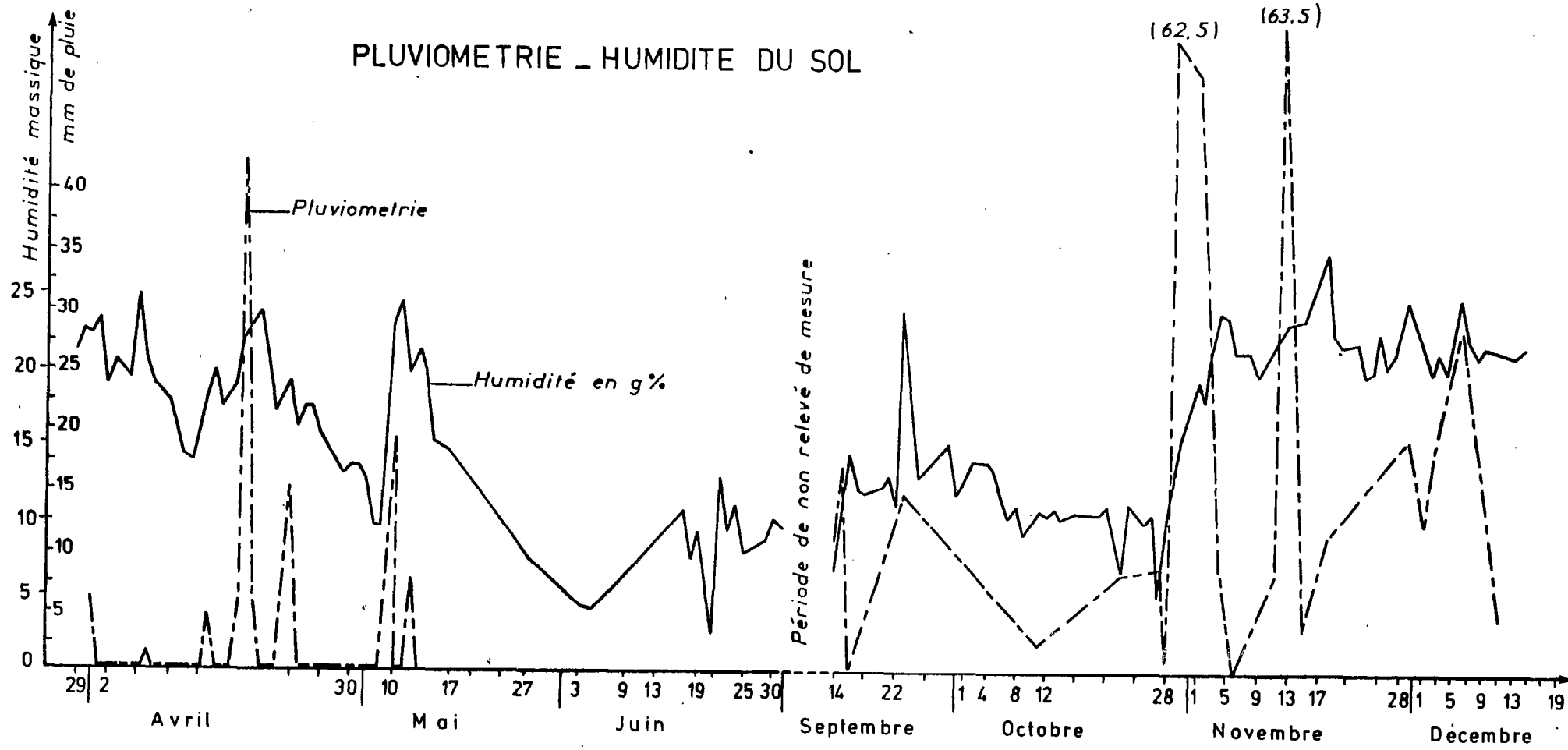
L'expérience a commencé le 29/3 et s'est poursuivie jusqu'à 1/12.

Le dispositif expérimental est complété par des mesures de température du sol à la même profondeur que celle de l'électrode (dispositif de mesure en annexe 3), et des mesures de pluviométrie.

Le sol de la parcelle expérimentale est argilo-limoneux de faible salure (C.E. = 0,9 sur extrait de pâte saturée, fiche d'analyse en annexe n° 2).

.../...

PLUVIOMETRIE - HUMIDITE DU SOL



Des résultats sont regroupés sur 3 graphiques ~~correspondants~~ chacun à des valeurs de meq/l en fonction du temps.

Chaque graphique se rapporte à une position de référence différente (10, 50 et 100 cm).

Examen des résultats :

Les mesures étant faites avec une électrode sensible aux ions, les lectures correspondent à des activités. Aussi, nous avons conservé l'expression en meq/l de la solution du sol, étant donné que la solution du sol est un facteur important qui intervient dans le développement des végétaux :

Cette expérience qui nous met dans les conditions d'une utilisation pratique des électrodes sur le terrain a pour objectif de préciser :

- 1 - La logique de la réponse de l'électrode pour l'ion sodium.
- 2 - L'humidité critique pour une bonne réponse de l'électrode.
- 3 - L'influence de la position de la référence par rapport à l'électrode de mesure.

1 - Logique de la réponse de l'électrode.

On entend par logique de la réponse de l'électrode, le comportement de celle-ci qui suit les fluctuations du sodium à la suite des phénomènes d'humectation de lessivage et de dessiccation. L'expérience a commencé fin Mars (29/3) avec une humidité de 21-22 %. (graphique ci-contre).

A partir de cette date, l'humidité va descendre à peu près régulièrement jusqu'au mois d'Avril (14 %).

.../...

A cette chute de l'humidité correspond une montée régulière du taux de sodium (on part de 2,5 meq/l pour atteindre 5,5 meq/l). A cette époque intervient une pluie importante (\approx 42 mm) qui ramène le taux de Na de 5,5 à 2 meq/l et qui fait remonter l'humidité du sol de 14 à 23 %.

A partir de ce taux l'humidité décroît malgré une légère fluctuation consécutive à une petite pluie de 15 mm. Après cette pluie, on enregistre une remontée importante du taux de Na (de 4,5 à 10 meq/l) ce qui peut paraître contradictoire.

Ceci nous amène à distinguer les grandes pluies des petites. La grande pluie dissout et lessive les sels (chute du taux de Na) alors que la petite pluie augmente l'humidité créant un milieu favorable à une dissolution des sels sans lessivage et à une hydrolyse partielle des sels du complexe absorbant entraînant une élévation du taux de Na (BEN HASSINE, SUSINI ES 172 - 1ère partie).

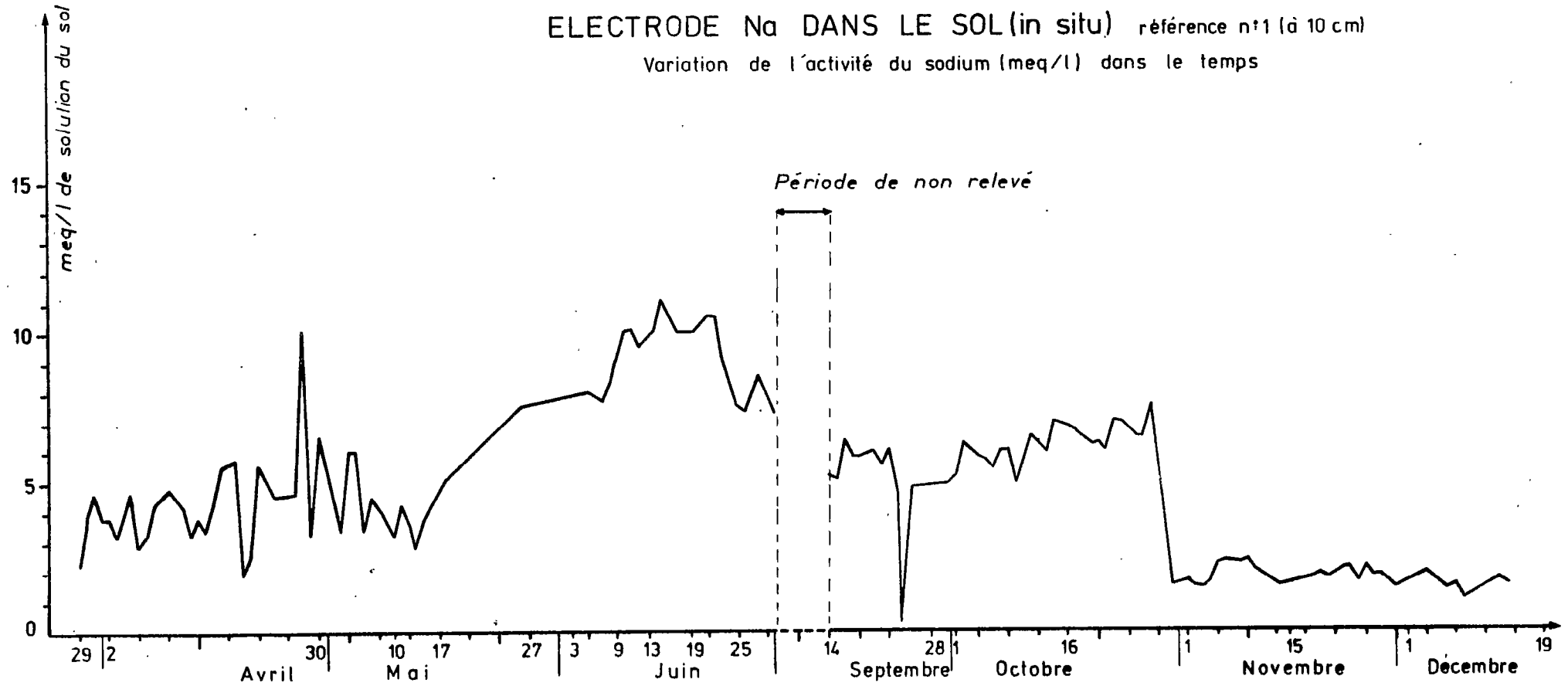
A partir de la mi-Mai et jusqu'à la mi-Septembre, il n'y a pas eu de pluie, l'humidité chute avec quelques oscillations et se maintient égale à 10 % et souvent bien inférieure (4%). A cette zone correspond une remontée du taux de sodium qui atteint ses plus fortes valeurs (10 - 12 meq/l).

A partir de Septembre, les premières pluies vont apparaître avec le même type de fluctuations que précédemment. Enfin, début Novembre, apparaissent des pluies très importantes qui font chuter le taux de Na à 3 meq/l environ.

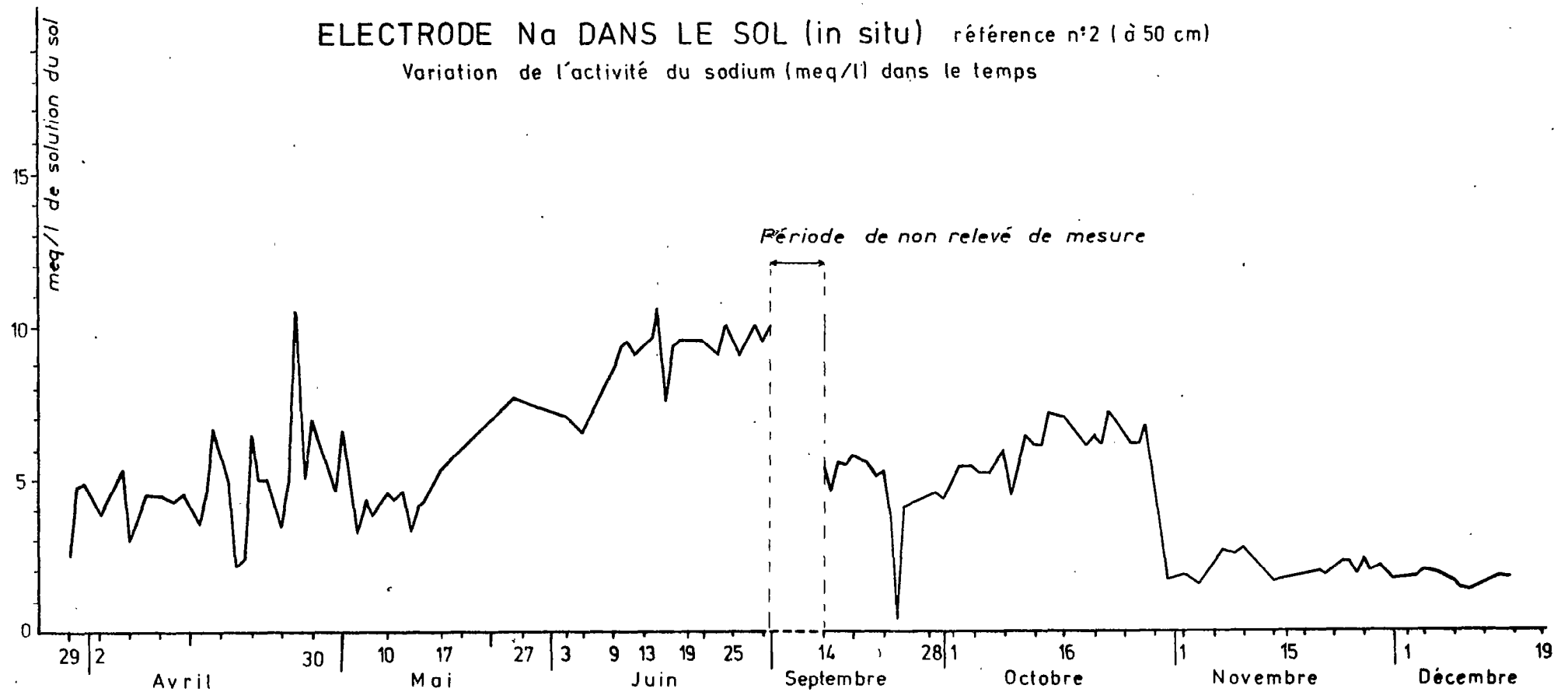
.../...

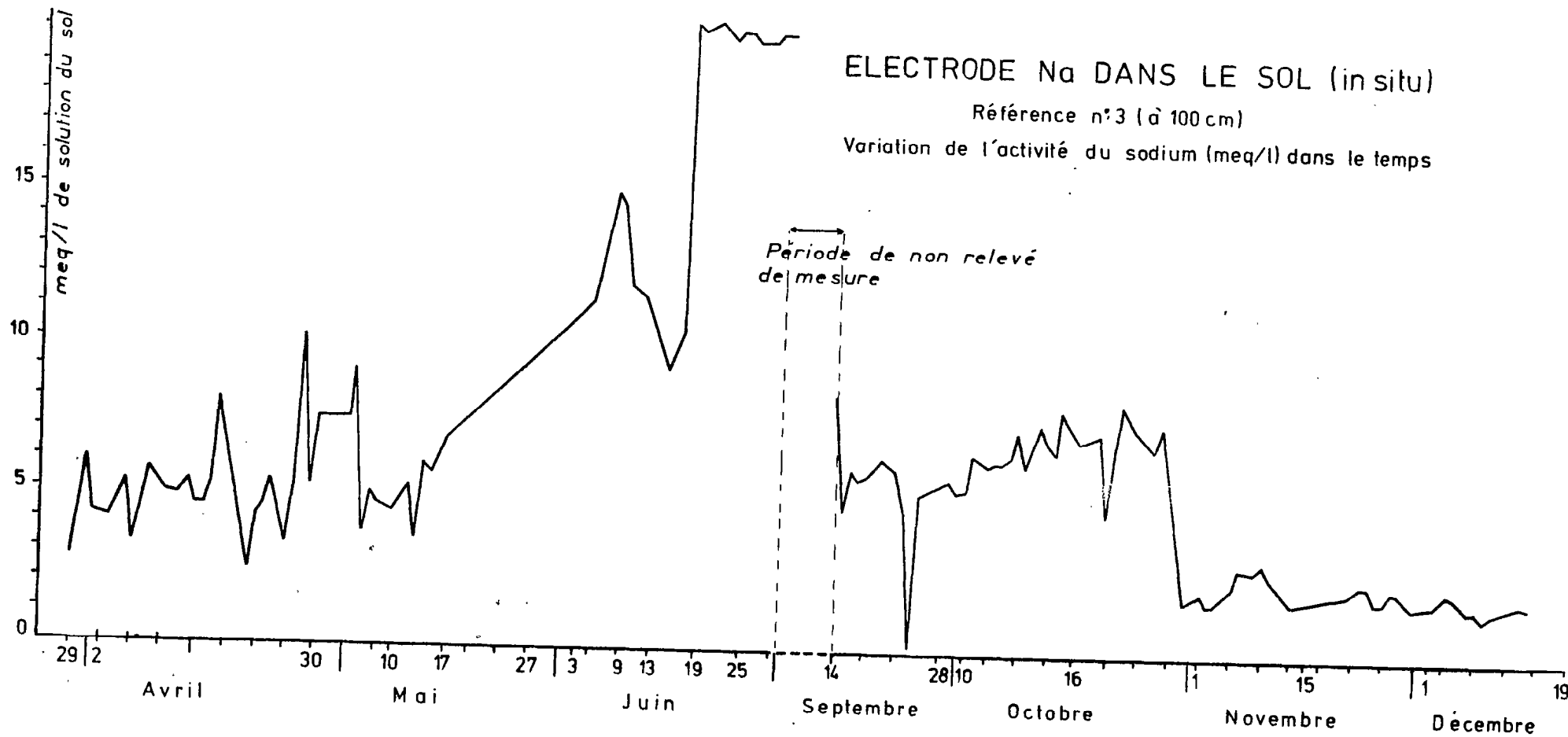
ELECTRODE Na DANS LE SOL (in situ) référence n°1 (à 10 cm)

Variation de l'activité du sodium (meq/l) dans le temps



ELECTRODE Na DANS LE SOL (in situ) référence n°2 (à 50 cm)
Variation de l'activité du sodium (meq/l) dans le temps





Le taux de Na se maintient à cette faible valeur jusqu'à l'arrêt de l'expérience à la fin du mois de Décembre.

Les valeurs interprétées ci-dessus sont celles obtenus avec la référence la plus proche de l'électrode de mesure (10 cm).

2 - L'humidité critique pour une bonne réponse de l'électrode.

Jamais, dans aucun des cas, l'électrode n'a décroché (rupture de la mesure) conformément à la première partie de cette note ce qui rend difficile l'appréciation d'un seuil où le taux d'humidité ne permettrait plus des mesures correctes.

3 - Influence de la position de la référence par rapport à l'électrode de mesure.

La position de l'électrode de référence semble ne pas avoir d'influence jusqu'à une certaine humidité ($\geq 10\%$). Au-delà de cette valeur, les positions 1 (10 cm) et 2 (50 cm) continuent à se superposer, l'humidité descendant jusqu'à 4 %.

Par contre la position 3 (100 cm) commence à donner des valeurs très écartées des deux autres positions pour des humidités $\leq 10\%$. L'écart atteint des valeurs de $20 - 6 = 14$ meq/l.

La récupération des mesures "correctes" se fait quand on revient à des taux d'humidité de 12 % environ.

Ces résultats nous suggèrent un moyen possible d'être prévenu que dans un sol donné on a atteint un taux d'humidité critique pour une bonne réponse de l'électrode :

.../...

- Quand on a une réponse identiques pour les 3 positions, l'humidité est satisfaisante pour un bon fonctionnement.
- Quand la troisième position donne des valeurs écartées des 2 autres, on est alerté que l'on approche d'une humidité critique,
- Les mesures deviennent suspectes si les indications des deux premières électrodes ne sont plus identique .

Ce seuil critique est bien entendu dépendant de la nature et de la structure du sol.

APP N N E X E S

ECHANTILLON DE SOL UTILISE

1 - Analyse classique :

Granulométrie						Texture globale
A	Lf	Lg	Sf	Sg		
23,5	13	9,5	45	6,5		Equilibrée
Matière humique %		0,9				
Calcaire tot. %		19				
Calcaire actif %		11				
Gypse %		0,19				
% Saturation		50				
pH		8,7				
C.E.		7,7				

Extrait de pate saturée (meq/l)

HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
4,0	26,0	44,5	15,2	12,8	48,0	1,2

Force ionique calculée 0,103

Complexe absorbant

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	T	$\frac{Na}{T}$
4,1	3,4	1,5	3,2	12,1	26

2 - Calcul d'activité :

A partir des résultats d'analyse classique de l'extrait de pate saturée et à l'aide d'un programme informatique, les activités des ions ont été calculées.

	CONCENTRATIONS E SPECES (MOLES/LI TRE)	ACTIVITE ESPECES (MOLES/LITRE)	SOLUTION PH 8.700 FORCE IONIQUE 8. 607E-02 PCO2 1.681E-04 ELECTRONEUTRALIT E-1.531E-06EQUIV /L SAR 1.868E 01 KSPCAL=0.4E-08 {CA} (CO3) = 5.57 7E-08 KSPGYP=0.2E-04 - (CA) (SO4) = 7.03 7E-06 FIN DES CALCULS
DONNEES INITIALE	NA 4.800E-02	NA 3.776E-02	
S	CA 4.468E-03	CA 1.870E-03	
JHC1.	MG 4.816E-03	MG 2.216E-03	
PHCO28.7	H 2.398E-09	H 1.995E-09	
NAT 4.800E-02MOL	OH 6.480E-06	OH 5.011E-06	
ES/L	CL 4.450E-02	CL 3.408E-02	
CAT 7.600E03MOL	SO4 1.014E-02	SO4 3.762E-03	
ES/L	CO3 7.778E-05	CO3 2.981E-05	
MGT 6.400E-03MOL	HCO3 1.616E-03	HCO3 1.272E-03	
ES/L	H2CO3 5.682E-06	H2CO3 5.682E-06	
CLT 4.450E-02MOL	CACO3 1.694E-03	CACO3 1.694E-03	
ES/L	CASO4 1.435E-03	CASO4 1.435E-03	
SO4T 1.300E-02MO	MGCO3 1.652E-04	MGCO3 1.652E-04	
LES/L	MGSO4 1.418E-03	MGSO4 1.418E-03	

1 DESSICATION

DATE	N° JOURS	MOYENNE meq/l	Humidité ponderale mg%	
22-3 - 82		30		Pâte saturée (300g de sol+140 ^{cm³} d'eau)
23-3	0	26,2	45,42	
24-3	1	19,6	44,21	
25-3	2	25,5	43,12	
26-3	3	21	42,21	
27-3	4	17	41,19	
29-3	6	18,9	37,96	
30-3	7		38,33	
31-3	8		37,54	erreur branchement
1 - 4	9	22,1	36,68	
2 - 4	10	30,2	36,05	
3 - 4	11	29,2	35,05	
5 - 4	13	28,2	33,21	
6 - 4	14	28,3	32,36	
7 - 4	15	27,5	31,69	
8 - 4	16	27,6	31,07	
10 - 4	18	26,85	29,31	
12 - 4	20	27,4	27,32	
13 - 4	21	26,85	26,25	
14 - 4	22	27,14	25,61	
15 - 4	23	26,42	24,99	
16 - 4	24	24,24	24,46	
17 - 4	25	25,2	23,89	
19 - 4	27	24,4	22,10	
20 - 4	28	24,7	21,59	
21 - 4	29	25,42	20,79	
22 - 4	30	25,42	20,01	
23 - 4	31	25,57	19,33	
24 - 4	32	24,64	18,46	
26 - 4	34	24,64	17,06	
27 - 4	35	24,64	16,36	
28 - 4	36	26,14	15,66	
29 - 4	37	26,31	14,88	
30 - 4	38	26,42	13,72	
3 - 5	41	26,8	11,86	
4 - 5	42	27,64	10,87	
5 - 5	43	30,14	10,22	
6 - 5	44	33,14	9,68	
7 - 5	45	36,71	8,95	
8 - 5	46	38,2	8,74	
11 - 5	49	40	7,0	
12 - 5	50	52,07	6,85	
13 - 5	51	57	6,35	
14 - 5	52	60,5	5,65	
15 - 5	53	68,2	5,05	
17 - 5	55	77,4	3,88	
18 - 5	56	104,7	3,28	
19 - 5	57	112,2	3,09	
20 - 5	58	123	2,46	
21 - 5	59	170	2,06	
24 - 5	62	180	1,14	
26 - 5	64	1250	0,60	
		1320		

HUMECTATION

Le début de la réhumectation s'est fait le 31 / 5 / 1982 le poids mesuré était alors de 416,86 g.

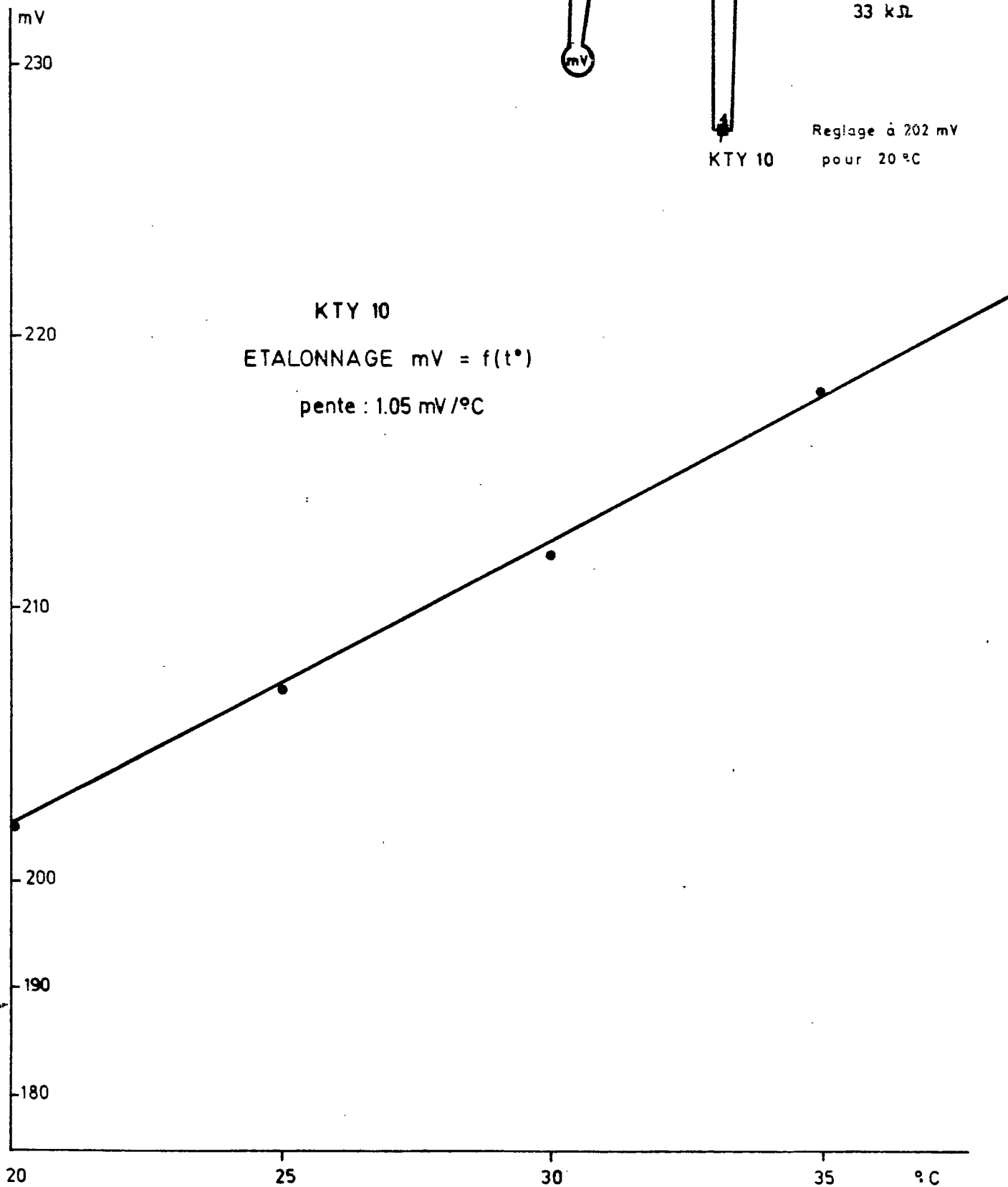
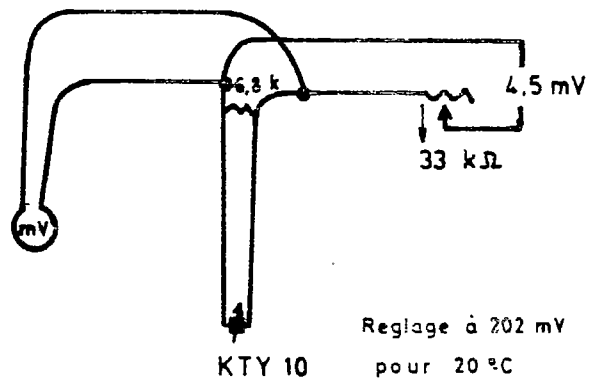
Temps mm	cm ³ eau	mV	meq/l	Humidité	Total cm ³	Poids 426,86	Perte par évaporation
2 mm	5	342	800	0,87	5		
2	5	359	1300	2,54	10		
2	5	366	1600	4,20	15		
5	5	371	1850	5,87	20		
15	5	369	1750	9,20	30		
15	5	361	1400	10,87	35		
10	5	352	1050	12,54	40		
10	5	344	850	14,20	45		
10	5	338	700	15,87	50		
10	5	333	600	17,54	55		
10	5	325	480	19,20	60		
10	5	314	350	20,87	65		
10	5	300	230	22,54	70		
10	5	288	160	24,20	75		
10	5	264	78	27,54	85		
10	500	mesure instable		29,20	90	516	516,86-
4/6/82			211	17			
10	5	210	16,5	22,67	95	492,61 492,24	492,61-24,25
10	5	210	16,5	24,33	100		
10	5	210	16,5	26	105		
10	5	210	16,5	27,67	110		
10	5	210	16,5	29,33	115		
10	5	211	17	31	120		
10	5	211	17	32,67	125		
10	5	212	17,5	36	135		
10	5	212	17,5	37,67	140		
5	5	213	18	39,33	145		
5	5	213	18	41	150	560,40	
5	10	213	18	44,33	160		

ECHANTILLON DE SOL ANALYSE

Argile	28
Limon fin	20
L. grossier	8
Sable fin	25
S. grossier	18

% Saturation	50
pH 1/2,5	8,2
C.E mmhos/cm	0,9

Densité réelle	2,6
pF 4,2 %	13,9
pF 2,8 %	20,7



BIBLIOGRAPHIE

- DURST, 1969 - Ion selective electrodes, National Bureau of Standards, Special publication N° 314 Washington DC-1969, Chapitre 2, ROSS J.W.
- KORYTA (J), 1975. - Ion Selective electrodes, Cambridge monographs in physical Chemistry 2.
- KOVDA (V.A), MATEROVA (E.A.) IKINA (R.K.) SNAKIN (V.V.), BISTRISKAIR (T.L.), TIOURI - OUKANOV (A.N.), 1977.
- Utilisation des électrodes spécifique dans les recherches pédologiques et agronomiques.
Conférence de A.N. SSSR, 1977, T. 235, N°1.
- MOODY (G.J.), THOMAS (J.D.R.), 1971 - Selective ion sensitive electrodes, MERROW Technical Librarry 1971. England.
- PUNGOR (E) 1977 - Ion Selective electrodes.
Conférence held at Budapest, Hungary, 5-9 September 1977. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam Oxford-New-York.
- SUSINI (J) et LOYER (J.Y.) 1977 - Réalisation d'un ensemble automatique pour la mesure en continu et "in situ" du pH, du Eh et du pNa du sol. Etude spéciale, Division des Sols, D.R.E.S. - TUNISIE.
- SUSINI (J) 1980 - Utilisation d'électrodes sensibles aux ions pour la mesure en continu dans l'étude des eaux d'irrigation et du drainage 1ère partie ES 172, Division des Sols, D.R.E.S. TUNISIE.
- SUSINI (J), BEN HASSINE (H) 1981 - Utilisation d'électrodes sensibles aux ions pour la mesure en continu dans l'étude des eaux d'irrigation et du drainage 2ème partie ES 172 Division des Sols D.R.E.S. - TUNISIE.
- SUSINI (J) 1981 - Electrode ionique sensible aux ions calcium : sa fabrication, son utilisation dans les eaux et suspensions de sol.
(non publiée).
- THOMAS (J.D.R.) 1979 - Ion selective Electrode Reviews - Applications, Theory and Development Vol 1 N° 2
1980 - Vol 2 N° 1 et 2.
1982 - Vol 4 N° 1 et 2.