

A.T.P. CNRS PIREN - ORSTOM - INRA - CIRAD

INFLUENCE A L'ECHELLE REGIONALE DES COUVERTURES
PEDOLOGIQUES ET VEGETALES SUR LES BILANS HYDRIQUES ET
MINERAUX DU SOL

Rapport scientifique synthétique des travaux réalisés
durant la période juin 1987 à août 1988 pour le projet :

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES RELATIONS EAU - SOL -
VEGETATION EN ZONE ARIDE DU NORD DU MEXIQUE

Responsable scientifique : Jean Pierre DELHOUME

A.T.P. CNRS PIREN - ORSTOM - INRA - CIRAD

INFLUENCE A L'ECHELLE REGIONALE DES COUVERTURES
PEDOLOGIQUES ET VEGETALES SUR LES BILANS HYDRIQUES ET
MINERAUX DU SOL

Rapport scientifique synthétique des travaux réalisés
durant la période juin 1987 à août 1988 pour le projet :

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES RELATIONS EAU - SOL -
VEGETATION EN ZONE ARIDE DU NORD DU MEXIQUE

Responsable scientifique : Jean Pierre DELHOUME

RAPPEL DU PROGRAMME

Le désert de Chihuahua, avec 357000 km² de superficie, est l'une des zones arides les plus étendues d'Amérique du nord. La majeure partie de ce désert, délimité bioclimatiquement, est situé dans le nord du Mexique où il s'étend sur 260000 km², constituant 13% du territoire mexicain.

Cette zone aride est exploitée essentiellement par l'élevage bovin extensif. Il s'agit d'une activité traditionnelle qui constitue de plus l'une des principales ressources économiques pour la population.

Les animaux consomment la végétation naturelle, dont la productivité est très largement conditionnée par la disponibilité en eau. Comme dans les autres régions arides du monde, ce facteur eau, et en particulier sa redistribution dans le paysage et son stockage dans le sol, apparaît comme le facteur primordial pour le maintien de l'activité agricole et de l'occupation humaine de cette zone aride du nord du Mexique.

Il s'agit cependant d'une région fragile dans ses équilibres écologiques qui pourtant, sous l'effet de pressions socio-économiques de plus en plus fortes, subit une intensification de l'exploitation des ressources naturelles renouvelables, qui se fait de manière irrationnelle. A terme, cela comporte des risques irréversibles de dégradation du milieu, ce qui doit être prévenu car il s'agit d'une région occupant une superficie notable du territoire utilisable et présentant un potentiel de productivité agricole non négligeable.

Par suite de l'insuffisance de données scientifiques de base concernant ce milieu aride nord-mexicain, divers programmes de recherches interdisciplinaires visant à étudier les mécanismes de fonctionnement et la dynamique de cet écosystème sont apparus comme indispensables et préalables à toutes propositions de scénarios d'aménagement et d'utilisation plus rationnels de cette région.

L'un de ces programmes de recherches est celui entrepris en 1982 conjointement par l'Institut d'Ecologie du Mexique et l'ORSTOM et réalisé dans une zone test du sud du désert de Chihuahua, la Réserve de la Biosphère de Mapimi, choisie pour sa représentativité et où différentes stations expérimentales ont été mises en place.

Les travaux réalisés dans le cadre du présent programme A.T.P. s'intègrent dans le programme général Institut d'Ecologie - ORSTOM défini ci-dessus et sont axés sur l'étude du fonctionnement, au niveau stationnel, des principales unités écologiques homogènes de base identifiées dans la Réserve de Mapimi, selon deux thèmes de recherches :

- dynamique et disponibilité de l'eau du sol.
- comportement de la végétation face aux contraintes d'aridité.

ETUDES ET TRAVAUX REALISES DURANT LA PERIODE JUIN 1987 - AOÛT 1988

1 - L'EAU ET LE SOL

Dans l'écosystème aride étudié, l'eau est le facteur primordial conditionnant l'existence des formes vivantes, en particulier de la végétation, ainsi que des activités agricoles et de l'occupation humaine. Dans un tel milieu, la connaissance aussi précise que possible de la quantité d'eau disponible ainsi que sa distribution et sa dynamique dans le paysage, apparaît donc comme indispensable.

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étude des modalités du stockage de l'eau d'origine pluviale dans la couverture pédologique et à sa disponibilité pour certaines espèces végétales d'intérêt fourrager caractéristiques de la zone aride du nord du Mexique.

Il en résulte que c'est essentiellement l'hydrodynamique des principaux types de sols que nous essayons de déterminer, en liaison avec la distribution discontinue de la couverture végétale. Dans cette optique, différents axes de recherches ont été abordés et étudiés au niveau stationnel, pour plusieurs unités écologiques homogènes de base :

- détermination du bilan hydrique du sol à partir de mesures périodiques de l'humidité de celui-ci à l'aide d'une sonde à neutrons, en fonction du temps et des conditions climatiques.
- étude de la variation de la densité apparente du matériau en fonction de l'humidité du sol.
- caractérisation hydrodynamique des différents types de sols étudiés à l'aide d'un mini-simulateur de pluies.
- étude de la variabilité spatiale de certains paramètres de la couverture pédologique : stock hydrique, densité apparente, texture...
- caractérisation des flux hydriques du sol à partir de mesures tensiométriques en fonction du temps.

1.1. Distribution discontinue de la couverture végétale.

L'une des principales caractéristiques des formations végétales de la zone aride du nord du Mexique est leur répartition spatiale discontinue ou contractée, selon deux échelles de distribution (fig. 1).

A un niveau supérieur (échelle multidécamétrique), il y a alternance de zones de végétation ou plages végétales de plusieurs centaines à plusieurs milliers de m² de superficie et de zones totalement dénudées, approximativement de même étendue que les zones de végétation. La distribution de ces alternances dans le paysage est soit régulière et répétitive (cas des formations du type "brousse tigrée" ou "vegetation arcs", fig. 1B), soit irrégulière et désordonnée (fig. 1A).

A l'intérieur des plages végétales ci-dessus, il existe une autre discontinuité dans la distribution de la végétation, mais à un niveau inférieur (échelle métrique), essentiellement pour certaines formations herbacées qui se présentent sous forme d'une alternance de touffes de quelques décimètres de diamètre en léger relief sur le sol et d'espaces dénudés sans aucune végétation et en dépression par rapport aux touffes végétales.

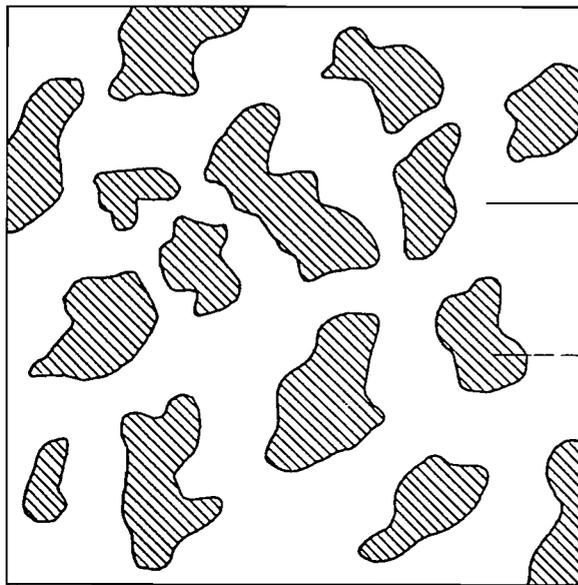
1.2. Variabilité spatiale du stock hydrique du sol.

Cette dernière distribution discontinue de la couverture végétale correspond au module de base constitutif du milieu et la détermination du bilan hydrique du sol au niveau stationnel doit prendre en compte cette hétérogénéité spatiale, afin que les sites de mesure de l'humidité soient représentatifs.

Ces derniers ont été installés en 1983 et positionnés en fonction de la topographie et de la végétation. Il nous est apparu cependant indispensable de tester, à posteriori, leur représentativité au niveau de la station (50 x 70 m.).

Pour cela, nous avons réalisé pour l'une des stations ("Hilaria mutica") un échantillonnage systématique de manière à déterminer la loi de distribution du stock hydrique du sol et à étudier les facteurs qui déterminent celle-ci.

Fig. 1. Schéma de la distribution spatiale discontinue, irrégulière ou régulière de la végétation.

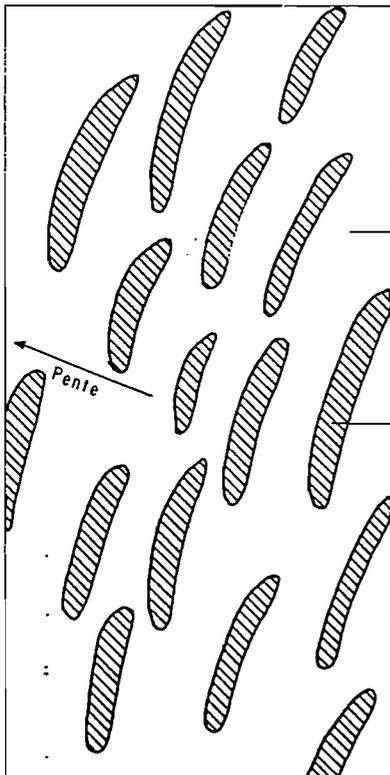


A - DISTRIBUTION IRREGULIERE

zones dénudées

plages de végétation avec alternance à l'échelle métrique de touffes et d'espaces inter-touffes

0 250 m.



B - DISTRIBUTION REGULIERE

zones dénudées

arcs de végétation

0 250 m.

Des prélèvements ont été ainsi effectués selon deux axes (fig. 2), l'un orienté selon la pente (axe AA), l'autre perpendiculaire au précédent (axe BB), avec un pas d'échantillonnage de 2,50 m. et pour deux états hydriques extrêmes du sol : état sec et état humide après des pluies naturelles.

Les résultats obtenus montrent que malgré la très faible pente, de l'ordre de 0,5 %, il existe un classement du stock hydrique du sol avec la distance, qui est ordonné selon la ligne de plus grande pente (fig. 3A). En effet, les quantités d'eau emmagasinées dans le sol augmentent progressivement lorsque on passe de l'amont vers l'aval. Pour deux points consécutifs, il peut y avoir une variation importante, surtout à l'état humide, ce qui est lié comme nous le verrons ci-dessous, à la présence ou l'absence d'une touffe végétale. Mais globalement, la variabilité du stock hydrique se fait en fonction de la pente.

Inversement, perpendiculairement à cette dernière (fig. 3B), il n'existe pas de variation marquée du stock hydrique à l'état sec, alors qu'à l'état humide, le transect comporte deux parties très distinctes. Mais pour cet axe de prélèvement BB, il semblerait que la longueur d'échantillonnage soit trop faible. Aussi, de nouveaux prélèvements actuellement en cours, se font sur une distance plus longue.

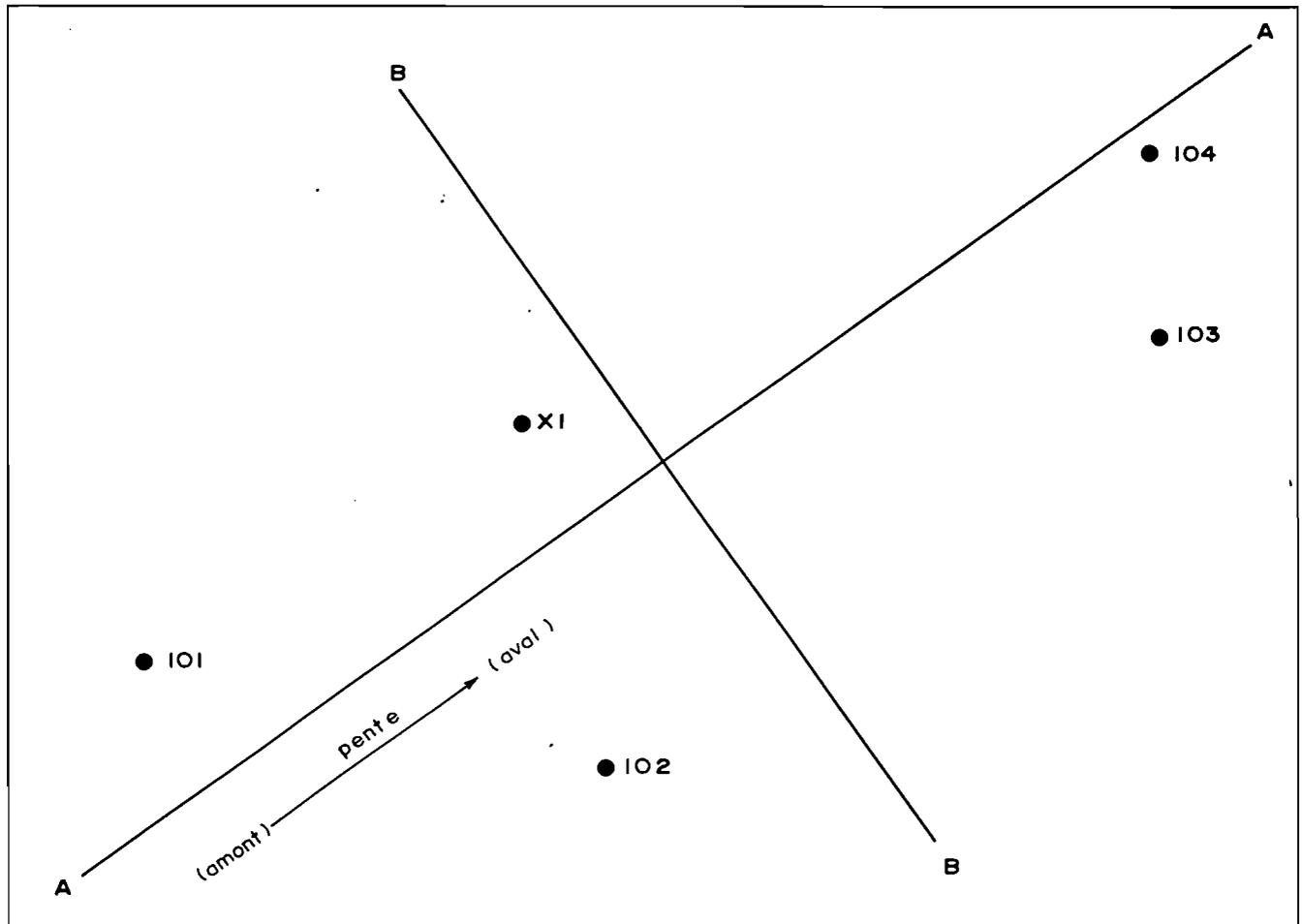
Nous avons vérifié par ailleurs (probabilité cumulée) que la loi de distribution du stock hydrique obéissait à une loi normale et la variance de ce stock est plus importante (tableau 1) pour l'axe AA, c'est-à-dire selon la pente, que pour l'axe BB.

En fonction de ces premiers résultats, nous pouvons considérer que la localisation des cinq tubes de sonde de cette station, bien qu'installés antérieurement à ce travail, permettra de caractériser de manière représentative toute la variabilité spatiale du stock hydrique au niveau de la station. En effet, trois des tubes (101, 103 et 104) sont situés respectivement à l'amont et à l'aval de la parcelle étudiée, ce qui donnera les valeurs extrêmes du stock hydrique. Les autres tubes occupent des positions intermédiaires et nous permettront de caractériser le bilan hydrique médian de la station.

Ces résultats ont été obtenus durant l'été 1987 et d'autres échantillonnages sont en cours de réalisation (été 1988), d'une part afin de vérifier que la distribution spatiale du stock hydrique se fait toujours de la même manière (prélèvements en fonction du temps et pour différents états hydriques du sol), et d'autre part pour étudier les relations d'interdépendance spatiale et les distances d'autocorrélation entre les échantillons (pas d'échantillonnage variable : 1, 2,5 et 5 m.).

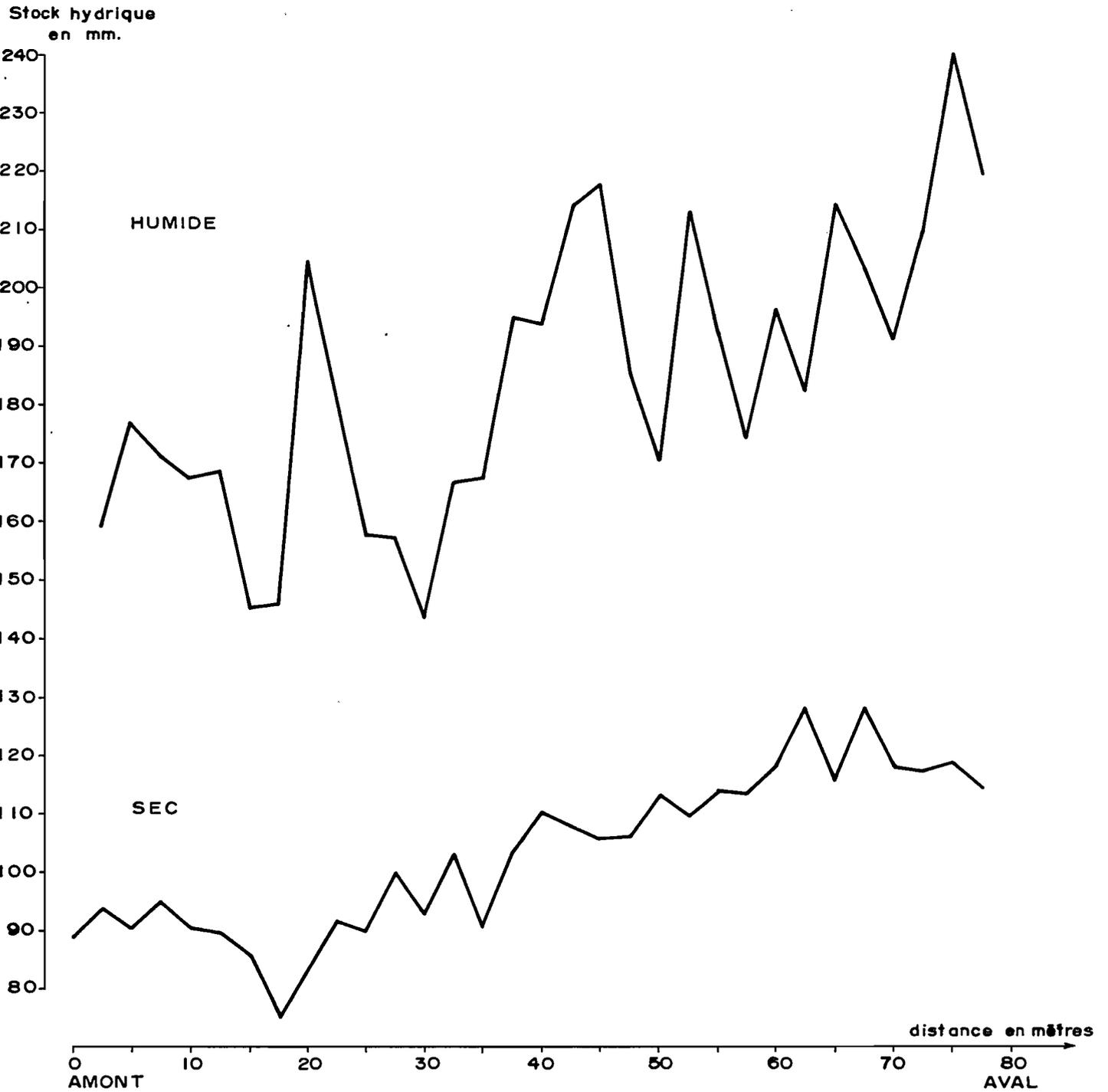
A côté de cette variabilité du stock hydrique selon la pente, il existe une autre variabilité de ce stock en fonction de la microtopographie et de la couverture végétale, comme nous allons le voir ci-dessous.

Fig.2- STATION HILARIA MUTICA-PLAN D' ECHANTILLONNAGE POUR L'ETUDE DE LA VARIABILITE SPATIALE DU STOCK HYDRIQUE DU SOL.
 (Distance d'échantillonnage = 2,50 m.)



- tube de sonde à neutrons.
- AA axe d'échantillonnage selon la pente.
- BB axe d'échantillonnage perpendiculaire à AA.

Fig. 3A- VARIATION DU STOCK HYDRIQUE DU SOL (0-60 cm.) SELON LA PENTE
(axe d'échantillonnage AA)



**Fig. 3B- VARIATION DU STOCK HYDRIQUE DU SOL (0-60cm.)
PERPENDICULAIREMENT A LA PENTE
(axe d'échantillonnage BB)**

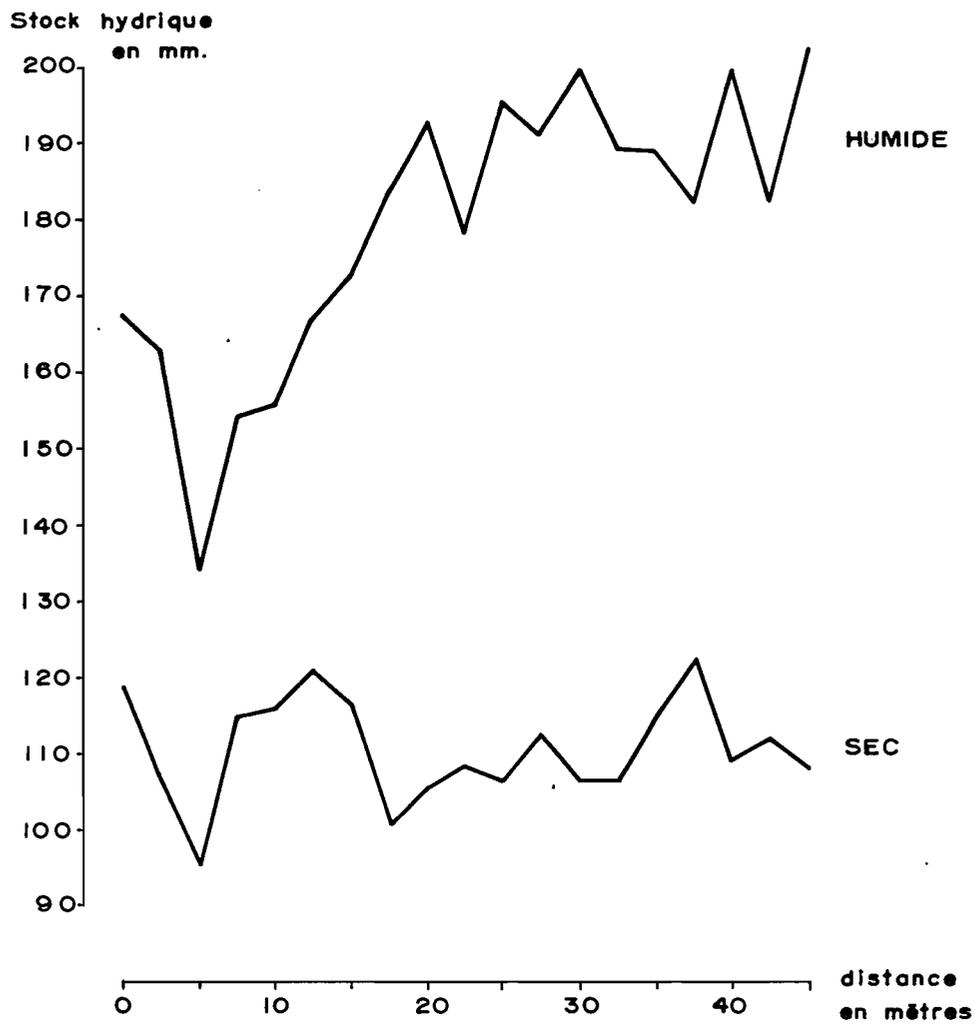


Tableau 1. Moyenne et variance du stock hydrique (en mm) par tranches de sol de la station Hilaria mutica pour deux états hydriques.

Etat sec.

| Tranches de sol | Axe AA (n=32) | | Axe BB (n=18) | |
|-----------------|---------------|----------|---------------|----------|
| | Moyenne | Variance | Moyenne | Variance |
| 0 - 15 cm | 18,5 | 10,2 | 21,5 | 7,8 |
| 15 - 30 cm | 25,9 | 9,0 | 27,4 | 3,2 |
| 30 - 45 cm | 29,4 | 13,0 | 31,6 | 3,2 |
| 45 - 60 cm | 29,3 | 32,5 | 30,4 | 21,2 |
| stock 0 - 60 cm | 103,2 | 183,1 | 110,8 | 46,2 |

Etat humide.

| Tranches de sol | Axe AA (n=40) | | Axe BB (n=19) | |
|-----------------|---------------|----------|---------------|----------|
| | Moyenne | Variance | Moyenne | Variance |
| 0 - 15 cm | 54,9 | 23,0 | 50,4 | 22,1 |
| 15 - 30 cm | 57,1 | 23,0 | 54,1 | 15,2 |
| 30 - 45 cm | 43,8 | 114,5 | 43,6 | 56,3 |
| 45 - 60 cm | 31,6 | 77,4 | 30,8 | 36,0 |
| stock 0 - 60 cm | 187,5 | 529,0 | 179,0 | 313,3 |

Pour la station étudiée ici, "Hilaria mutica", et comme nous l'avons déjà signalé ci-dessus, la végétation se distribue de manière contractée. Il y a en effet alternances de touffes végétales de 20 à 60 cm. de diamètre en relief de 5 à 10 cm., et d'espaces dénudés sans aucune végétation et en dépression par rapport aux touffes.

Des mesures d'humidité du sol avec une sonde à neutrons(*) réalisées dans cette station, nous ont permis d'individualiser trois milieux ou sites différents qui permettent à eux seuls de caractériser la dynamique de l'eau de cette unité. Ces trois milieux se définissent de la manière suivante :

- la touffe végétale de "Hilaria mutica" (site 104) telle que décrite ci-dessus.
- l'espace dénudé inter-touffe (site 103).
- le sol nu (site 105), de plusieurs centaines à plusieurs milliers de m² de superficie correspondant aux zones sans végétation qui alternent de manière irrégulière avec des plages végétales, comme nous l'avons décrit ci-dessus (fig. 1).

La couverture pédologique est homogène et continue pour ces trois milieux et la localisation géomorphologique de ceux-ci est identique.

Les profils hydriques du sol pour ces trois sites, mesurés avant et après deux pluies différentes, mettent en évidence un stockage différentiel de l'eau dans le sol, qui concerne à la fois la quantité accumulée et la profondeur humectée (fig. 4).

Durant ces deux événements pluviométriques, l'infiltration a été plus profonde pour le site 104 (touffe) que pour les autres sites. En ce qui concerne l'eau accumulée dans le sol, c'est aussi le site 104 qui emmagasine le plus d'eau avec une quantité égale à près du double de la hauteur précipitée (tableau 2). Le site inter-touffe stocke la majeure partie de cette dernière, soit 80%, tandis que le site 105 (sol nu) n'emmagasine que le tiers environ de la pluie, présentant ainsi un fort déficit d'accumulation.

Pour ce dernier site, le fonctionnement hydrodynamique s'explique par l'état de la partie superficielle du sol. Celle-ci se présente en effet sous forme d'une croûte dure et continue formant un milieu beaucoup plus favorable au ruissellement qu'à l'infiltration. De plus, ces zones ont une topographie plane à pente très faible sans micro-relief de surface, ce qui ne permet pas la stagnation de l'eau. Il s'agit ainsi d'un milieu essentiellement de transit pour les eaux de ruissellement. Ces dernières s'écoulent alors selon la pente jusqu'à ce qu'elles soient piégées par les zones de végétation adjacentes.

Celles-ci reçoivent ainsi, en plus de l'eau de pluie, un apport d'eau complémentaire par ruissellement, l'ensemble se redistribuant de manière différentielle au niveau de la zone à végétation.

(*) Les résultats de l'étalonnage de la sonde utilisée, réalisé selon deux méthodes, sont présentés en annexe.

Fig. 4. Profils hydriques, avant et après la pluie, et stockage de l'eau dans le sol pour les trois sites caractéristiques de la station *Hilaria mutica*, pour deux pluies distinctes.

Pluie du 17-5-84

θ (cm³/cm³)

0.2

0.4

0

0.2

0

0

20

40

60

80

Z (cm)

site 104

site 103

site 105

Pluie du 10-4-85

θ (cm³/cm³)

0.2

0.4

0

0.2

0

0

20

40

60

80

100

Z (cm)

site 104

site 103

site 105

 stock d'eau accumulée
durant la pluie

site 104 = touffe végétale — site 103 = espace inter-touffe — site 105 = sol nu

Tableau 2. Accumulation de l'eau dans le sol, par tranches, pour les trois sites caractéristiques de la station *Hilaria mutica*, pour deux pluies distinctes et bilan par rapport à la hauteur d'eau précipitée.

| | | PLUIE DU 17.5.84 (h = 29,7 mm) | | | PLUIE DU 10.4.85 (h = 44,7 mm) | | |
|----------|----------------------|--------------------------------|-------------|------------|--------------------------------|-------------|----------|
| | Tranches de sol (cm) | Stock d'eau du sol (mm) | | | Stock d'eau du sol (mm) | | |
| | | Avant pluie | Après pluie | Accumulé | Avant pluie | Après pluie | Accumulé |
| Site 104 | 0 - 20 | 27,6 | 54,0 | 26,4 | 22,8 | 72,5 | 48,7 |
| | 20 - 40 | 36,8 | 65,0 | 28,2 | 34,5 | 72,6 | 38,1 |
| | 40 - 60 | 37,2 | 40,5 | 3,3 | 42,6 | 52,6 | 10,0 |
| | 60 - 80 | 33,0 | 33,0 | 0 | 31,8 | 33,4 | 1,6 |
| | Total | 57,9 | | | 98,4 | | |
| Bilan | Excès 95% | | | Excès 120% | | | |
| Site 103 | 0 - 20 | 14,0 | 35,7 | 21,7 | 18,1 | 48,9 | 30,8 |
| | 20 - 40 | 27,3 | 28,8 | 1,5 | 34,2 | 39,5 | 4,3 |
| | 40 - 60 | 34,8 | 34,8 | 0 | 37,7 | 37,7 | 0 |
| | Total | 23,2 | | | 35,1 | | |
| | Bilan | Déficit 22% | | | Déficit 21% | | |
| Site 105 | 0 - 20 | 9,4 | 17,8 | 8,4 | 18,4 | 31,7 | 13,3 |
| | 20 - 40 | 16,7 | 18,7 | 2,0 | 24,3 | 27,2 | 2,9 |
| | 40 - 60 | 25,0 | 25,0 | 0 | 26,4 | 26,4 | 0 |
| | Total | 10,4 | | | 16,1 | | |
| | Bilan | Déficit 65% | | | Déficit 64% | | |

(Site 104 = touffe végétale

Site 103 = espace inter-touffe végétale

Site 105 = sol nu à croûte superficielle)

Par suite de la microtopographie de la surface du sol existant dans cette dernière, il y a stagnation de l'eau dans les dépressions fermées qui correspondent aux sites "inter-touffes". Une proportion importante de cette eau est perdue par évaporation directe, mais du fait de ce micro-relief, il y a piégeage de l'eau dans ces dépressions avec une infiltration forcée de celle-ci, qui se produit cependant lentement du fait de la présence là aussi d'une croûte en surface du sol.

Les touffes végétales de "*Hilaria mutica*" sont circulaires et présentent en leur centre une très légère dépression où l'eau peut s'accumuler. Celle-ci est protégée de l'évaporation grâce à la protection qu'offre le couvert végétal. De plus, les propriétés physiques du sol sont plus favorables à l'infiltration à ce niveau (meilleure structure et porosité plus forte par suite d'une activité biologique notable, présence de nombreuses racines et teneur en matière organique plus élevée). Il en résulte un stockage plus important de l'eau dans ces sites "touffes végétales".

EN CONCLUSION, pour la station étudiée ici, le stockage de l'eau dans le sol obéit à deux paramètres. D'une part, il existe une distribution spatiale de ce stock qui est ordonnée selon la pente, et cela indépendamment de la végétation, d'autre part, la microtopographie de surface et la distance par rapport à une touffe végétale déterminent une accumulation différentielle de l'eau dans la couverture pédologique.

Un article intitulé "Dynamique et disponibilité de l'eau du sol dans un écosystème aride du nord du Mexique" a été rédigé et présente les résultats concernant le fonctionnement hydrodynamique du sol de deux stations de la Réserve de Mapimi, dont "*Hilaria mutica*". Cet article doit être publié dans un ouvrage collectif sur l'eau en zone aride (éditeur : "réseau zones arides", ORSTOM).

1.3. Variabilité de la densité apparente du sol.

Le stock d'eau du sol est calculé à partir de l'humidité et de la densité apparente de celui-ci. Or le sol de la station "*Hilaria mutica*" étudiée ici présente une texture très fine de 10 à 60 cm. de profondeur (50 à 55% d'argile), avec des argiles minéralogiques où prédominent des smectites, lesquelles confèrent au sol des propriétés d'expansion avec l'humidité et de rétraction avec la dessiccation. Il en résulte que la densité apparente varie avec l'état d'humectation du sol et il nous a semblé nécessaire d'établir la relation entre ces deux paramètres, afin d'aboutir à une estimation plus précise du bilan hydrique.

Ce travail a débuté au printemps 1988 et se poursuit actuellement. Il consiste à prélever des échantillons de sol non perturbé, de volume connu (méthode du cylindre), sur lesquels on détermine l'humidité pondérale et la masse de l'échantillon. On obtient ainsi la densité apparente pour une humidité donnée. Pour chaque profondeur étudiée, 6 à 10 échantillons sont prélevés de manière à limiter les erreurs inhérentes à la méthode elle-même.

Plusieurs fosses pédologiques sont échantillonnées pour la même station, afin d'étudier la variabilité spatiale de ce paramètre. Pour obtenir l'humidité voulue, on réalise une infiltration sur une surface de quelques m² de sol où l'on ouvre ensuite une fosse pour prélever les échantillons. Cette méthode est destructive et les différentes séries de prélèvements à diverses humidités pour un même site ne sont pas réalisées exactement au même endroit, mais à proximité les unes des autres. C'est un inconvénient dont il faut tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

Actuellement, ce sont 980 échantillons qui ont été prélevés dans 6 fosses réparties dans la station "Hilaria mutica", avec une gamme d'humidité pondérale de 5 à 35%, ce qui correspond aux teneurs existantes dans le sol en conditions naturelles.

1.3.1. Relation densité apparente - humidité du sol.

Les premiers résultats obtenus montrent qu'il existe une variation notable de la densité apparente en fonction de l'humidité du sol (fig. 5), surtout à partir de 12 cm. de profondeur, ce qui correspond à l'horizon argileux du sol de la station étudiée.

Pour ces échantillons prélevés à l'état humide, nous constatons (tableau 3) que le coefficient de variation de la densité apparente, compris entre 1,2 et 5,8% est légèrement inférieur à celui des prélèvements réalisés à l'état sec (tableau 5), lequel varie de 1 à 8%, bien que le nombre d'échantillons par niveau soit plus élevé (10 au lieu de 6). Cette moindre dispersion des valeurs de densité apparente peut être due à une meilleure facilité de prélèvement permise par l'état humide du sol.

Globalement, tous niveaux confondus, la densité apparente du matériau argileux varie de 1,40 à 1,70 lorsque l'humidité pondérale du sol passe de 30 à 5%.

A l'aide d'un exemple, nous avons estimé l'influence de cette variation sur le calcul du stock hydrique. Nous avons calculé ce dernier à partir d'un profil d'humidité obtenu par infiltration lors de l'étalonnage de la sonde à neutrons utilisée, avec deux densités apparentes, l'une correspondant à l'état sec, l'autre à l'état d'humidité du sol.

Les résultats (tableau 4) montrent que la variation du stock hydrique au cours de cette infiltration varie en valeur absolue de 26,5 mm. pour une variation totale de stock de 96,6 et 123,1 mm., selon le type de densité apparente utilisée, ce qui correspond à une variation relative de l'ordre de 20 à 25%. D'une manière générale, on surestime le stock hydrique en n'utilisant que la densité apparente sèche et cela d'autant plus que l'humidité du sol est plus élevée. Cette variabilité de la densité apparente en fonction de l'humidité est donc un facteur dont il faut tenir compte dans l'estimation du bilan hydrique du sol.

Fig. 5- VARIATION DE LA DENSITE APPARENTE DU SOL EN FONCTION DE L' HUMIDITE. STATION HILARIA 1.

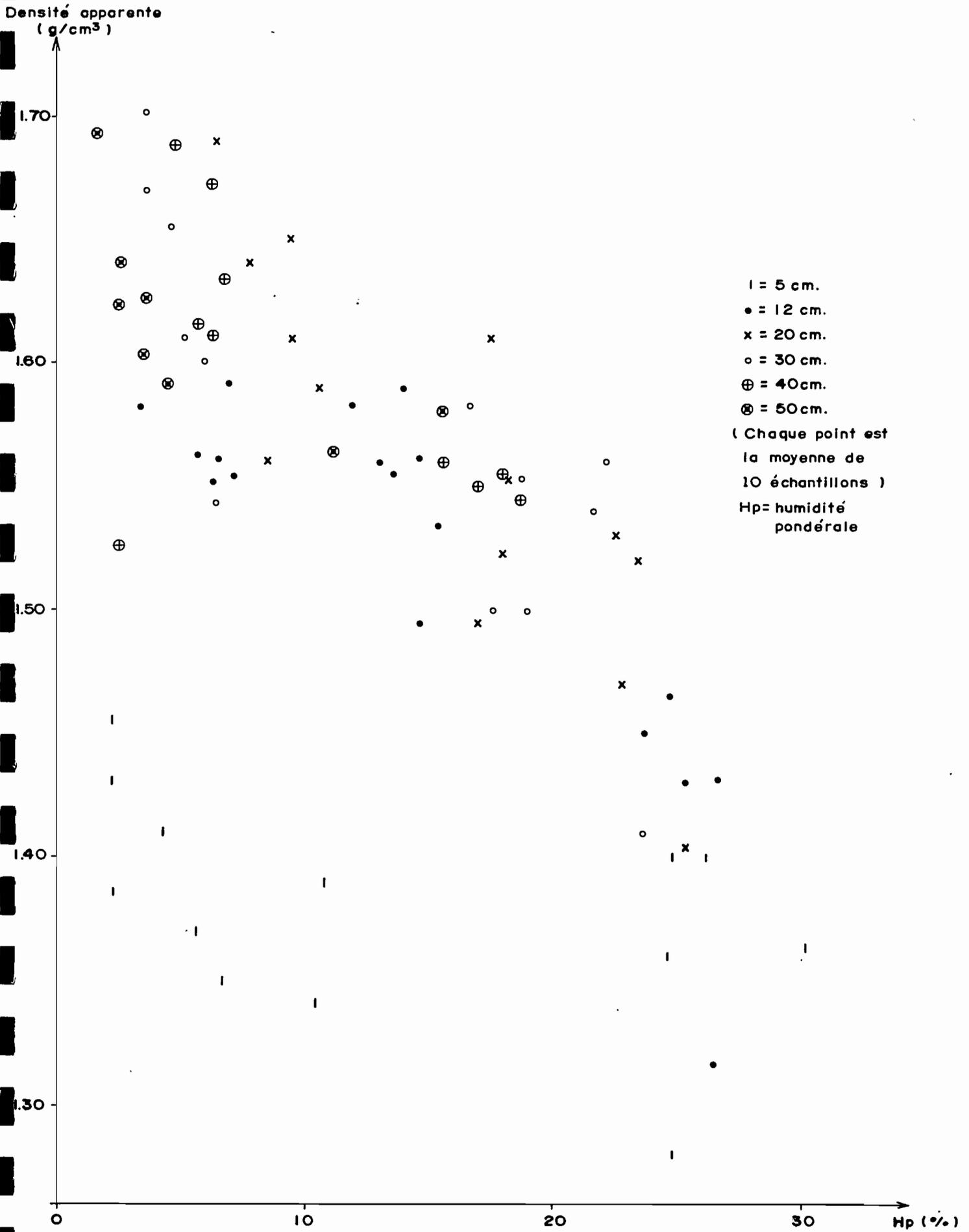


Tableau 3. HILARIA 1. Densité apparente du sol à l'état humide.
(Méthode du cylindre V = 150 cm³)

(5 profils de sols échantillonnés avec 10 répétitions par niveau de prélèvement)

| Profil | | 1 (n = 10) | | | | 2 (n = 10) | | | | 3 (n = 10) | | 4 (n = 10) | | 5 (n = 10) | |
|-----------------------|----|---------------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| No. de prélèvement | | 1 | | 2 | | 1 | | 2 | | 1 | | 1 | | 1 | |
| Z (cm) | | da | hp | da | hp | da | hp | da | hp | da | hp | da | hp | da | hp |
| 5 | m | 1,364 | 30,15 | 1,403 | 24,93 | 1,404 | 26,11 | 1,363 | 24,63 | 1,282 | 24,84 | 1,390 | 10,62 | 1,343 | 10,42 |
| | σ | 0,038 | 2,27 | 0,030 | 1,137 | 0,035 | 0,921 | 0,043 | 0,883 | 0,045 | 1,54 | 0,08 | 0,757 | 0,057 | 1,47 |
| | cv | 2,8 | 7,5 | 2,2 | 4,6 | 2,5 | 3,5 | 3,1 | 3,6 | 3,5 | 6,2 | 5,8 | 7,1 | 4,2 | 14,1 |
| 12 | m | 1,432 | 26,70 | 1,456 | 23,79 | 1,465 | 24,69 | 1,439 | 25,14 | 1,318 | 26,50 | 1,496 | 15,19 | 1,535 | 15,21 |
| | σ | 0,024 | 1,942 | 0,017 | 0,842 | 0,025 | 0,573 | 0,025 | 0,811 | 0,059 | 1,058 | 0,066 | 0,992 | 0,024 | 1,433 |
| | cv | 1,7 | 7,3 | 1,2 | 3,5 | 1,7 | 2,3 | 1,7 | 3,2 | 4,5 | 4,0 | 4,4 | 6,5 | 1,6 | 9,4 |
| 20 | m | 1,536 | 22,91 | 1,526 | 23,12 | 1,523 | 20,31 | 1,47 | 22,92 | 1,404 | 25,25 | 1,611 | 17,64 | 1,497 | 17,10 |
| | σ | 0,032 | 1,565 | 0,034 | 0,611 | 0,040 | 0,650 | 0,054 | 0,949 | 0,03 | 1,124 | 0,029 | 0,984 | 0,067 | 1,13 |
| | cv | 2,1 | 6,8 | 2,2 | 2,6 | 2,6 | 3,2 | 3,7 | 4,1 | 2,1 | 4,5 | 1,8 | 5,6 | 4,5 | 6,6 |
| 30 | m | 1,562 | 22,19 | 1,549 | 21,84 | 1,584 | 16,78 | 1,502 | 19,14 | 1,411 | 23,78 | 1,556 | 18,91 | 1,500 | 17,52 |
| | σ | 0,039 | 1,170 | 0,035 | 0,458 | 0,052 | 1,918 | 0,049 | 1,04 | 0,027 | 0,986 | 0,043 | 1,99 | 0,04 | 0,54 |
| | cv | 2,5 | 5,3 | 2,3 | 2,1 | 3,3 | 11,4 | 3,3 | 5,4 | 1,9 | 4,1 | 2,8 | 10,5 | 2,7 | 3,1 |
| 40 | m | 1,553 | 18,12 | 1,548 | 18,42 | | | | | 1,343 | 21,28 | 1,567 | 16,84 | 1,559 | 17,57 |
| | σ | 0,046 | 0,948 | 0,051 | 0,859 | | | | | 0,063 | 0,758 | 0,04 | 1,038 | 0,061 | 1,45 |
| | cv | 3,0 | 5,2 | 3,3 | 4,7 | | | | | 4,7 | 3,6 | 2,6 | 6,2 | 3,9 | 8,3 |
| 50 | m | | | | | | | | | | | 1,566 | 11,17 | 1,584 | 15,59 |
| | σ | | | | | | | | | | | 0,074 | 1,138 | 0,05 | 1,268 |
| | cv | | | | | | | | | | | 4,7 | 10,2 | 3,2 | 8,1 |

m = moyenne

σ = écart-type

cv = coefficient de variation en %

da = densité apparente

hp = humidité pondérale en %

Tableau 4. Stock hydrique du sol de la station *Hilaria mutica* calculé avec la densité apparente sèche et humide.

| Z (cm) | Avec Da état humide | | | | | | Avec Da état sec | | |
|-----------|---------------------|---------------|-----------|-------|------------|-------|------------------|---------------|---------------|
| | Hp(%) | | Av.Infil. | | Ap. Infil. | | Hv(%) | | |
| | Av. Inf. | Ap. Infil. | Da | Hv(%) | Da | Hv(%) | Da | Av. Infil. | Ap. Infil. |
| 10 | 10,0 | 30,5 | 1,62 | 16,2 | 1,38 | 42,1 | 1,51 | 15,1 | 46,1 |
| 20 | 12,0 | 29,5 | 1,60 | 19,2 | 1,38 | 40,7 | 1,62 | 19,4 | 47,8 |
| 30 | 14,0 | 27,8 | 1,58 | 22,1 | 1,40 | 38,9 | 1,63 | 22,8 | 45,3 |
| 40 | 16,0 | 25,6 | 1,55 | 24,8 | 1,44 | 36,7 | 1,63 | 26,1 | 41,7 |
| 50 | 18,0 | 23,8 | 1,54 | 27,7 | 1,46 | 34,7 | 1,63 | 29,3 | 38,8 |
| 60 | 18,0 | 18,8 | 1,54 | 27,7 | 1,54 | 28,9 | 1,58 | 28,4 | 29,7 |

| Stock hydrique (mm) par tranche | Avec Da état humide | | | Avec Da état sec | | |
|---------------------------------------|------------------------|---------------|-------|---------------------|---------------|-------|
| | Av. Infil. | Ap. Infil. | Diff. | Av. Infil. | Ap. Infil. | Diff. |
| 0 - 20 cm | 33,9 | 83,5 | 49,6 | 32,4 | 93,1 | 60,7 |
| 20 - 40 cm | 44,1 | 77,6 | 33,5 | 45,6 | 90,1 | 44,5 |
| 40 - 60 cm | 54,0 | 67,5 | 13,5 | 56,6 | 74,5 | 17,9 |
| Total | 132,0 | 228,6 | 96,6 | 134,6 | 257,7 | 123,1 |

Z = profondeur (cm)
 Hp = humidité pondérale (%)
 Hv = humidité volumique (%)
 Da = densité apparente (g/cm³)
 Av. Infil. = avant infiltration
 Ap. Infil. = après infiltration

1.3.2. Variabilité spatiale de la densité apparente pour un état hydrique donné.

Nous avons étudié la variabilité spatiale de la densité apparente pour un état hydrique donné (état sec).

Pour l'ensemble des échantillons des six profils et par niveau de prélèvement (n=36), nous constatons (tableau 5) que c'est en surface (niveau 5 cm.) et en profondeur (niveaux 70 et 80 cm.) que la variation de la densité apparente est la plus élevée : les coefficients de variation sont respectivement de 5,6 , 5,8 et 8,1 %. Au contraire, pour les autres niveaux, ce coefficient de variation reste inférieur à 4%, sauf pour le niveau 60 cm. Cette différence s'explique par l'homogénéité du matériau argileux qui permet un échantillonnage plus facile et avec une bonne reproductibilité. En surface, 5 cm., la présence de nombreuses racines perturbent le prélèvement, alors qu'à partir de 50 cm. et surtout en profondeur, le matériau est plus hétérogène et se présente sous forme de plaquettes et polyèdres qui rendent l'échantillonnage plus délicat à réaliser.

D'un profil à l'autre, le coefficient de variation est compris entre 1 et 4% dans la majorité des cas, et pour chacun des niveaux, la densité apparente suit une loi de distribution normale (probabilité cumulée).

En première approximation, on peut donc considérer que la variabilité du paramètre densité apparente, pour un état hydrique donné, est faible pour les horizons argileux alors qu'elle devient plus importante en surface et en profondeur. Cependant, dans le détail, on s'aperçoit que pour une profondeur donnée et par profil, la gamme des valeurs de la densité apparente, exprimée avec l'écart-type (fig. 6), est relativement étendue, en particulier pour les niveaux 5, 70 et 80 cm. et dans une moindre mesure pour 30, 40 et 60 cm. Au contraire, pour les niveaux 12, 20 et 50 cm., la gamme de valeurs est plus réduite.

Ces variations de la densité apparente pour un même niveau ne sont pas imputables uniquement à la méthode elle-même, car pour chacune des séries de prélèvements d'un même profil, le coefficient de variation reste du même ordre de grandeur sauf pour quelques séries, comme nous l'avons signalé ci-dessus. Il faut donc admettre qu'il existe une variabilité de la densité apparente au niveau de la station étudiée, mais qui est plus ou moins prononcée selon le type de matériau prélevé.

1.3.3. Influence du volume de l'échantillon.

L'étude de l'influence du volume de prélèvement (méthode du cylindre) sur la valeur de la densité apparente a été abordée. Un échantillonnage a été ainsi réalisé, à l'état sec, dans la même station et pour les mêmes profils de sols que ci-dessus, avec un cylindre de volume 85 cm³ (le volume du cylindre utilisé précédemment était de 150 cm³).

Tableau 5. STATION HILARIA 1. Densité apparente du sol à l'état sec.
(Hp = 2 à 5% - Méthode du cylindre: V = 150 cm³)

(6 profils de sols échantillonnés avec 6 échantillons par niveau de prélèvement).

| Profil Z (cm) | | 1 (n = 6) | 2 (n = 6) | 3 (n = 6) | 4 (n = 6) | 5 (n = 6) | 6 (n = 6) | Total (n = 36) |
|------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|
| 5 | m | 1,418 | 1,349 | 1,282 | 1,378 | 1,458 | 1,433 | 1,386 |
| | σ | 0,043 | 0,050 | 0,031 | 0,026 | 0,063 | 0,069 | 0,077 |
| | cv | 3,0 | 3,7 | 2,4 | 1,9 | 4,3 | 4,8 | 5,6 |
| 12 | m | 1,557 | 1,562 | 1,514 | 1,582 | 1,593 | 1,563 | 1,562 |
| | σ | 0,029 | 0,050 | 0,046 | 0,057 | 0,018 | 0,056 | 0,051 |
| | cv | 1,9 | 3,2 | 3,0 | 3,6 | 1,1 | 3,6 | 3,3 |
| 20 | m | 1,654 | 1,690 | 1,639 | 1,590 | 1,614 | 1,562 | 1,625 |
| | σ | 0,047 | 0,030 | 0,030 | 0,036 | 0,037 | 0,033 | 0,055 |
| | cv | 2,8 | 1,8 | 1,8 | 2,3 | 2,3 | 2,1 | 3,4 |
| 30 | m | 1,703 | 1,657 | 1,673 | 1,600 | 1,618 | 1,546 | 1,633 |
| | σ | 0,042 | 0,034 | 0,044 | 0,040 | 0,028 | 0,031 | 0,063 |
| | cv | 2,5 | 2,1 | 2,6 | 2,5 | 1,7 | 2,0 | 3,9 |
| 40 | m | 1,689 | 1,635 | 1,675 | 1,613 | 1,612 | 1,527 | 1,625 |
| | σ | 0,034 | 0,030 | 0,025 | 0,039 | 0,033 | 0,042 | 0,063 |
| | cv | 2,0 | 1,8 | 1,5 | 2,4 | 2,0 | 2,7 | 3,9 |
| 50 | m | 1,640 | 1,609 | 1,693 | 1,628 | 1,626 | 1,591 | 1,631 |
| | σ | 0,023 | 0,040 | 0,029 | 0,033 | 0,022 | 0,025 | 0,043 |
| | cv | 1,4 | 2,5 | 1,7 | 2,0 | 1,3 | 1,6 | 2,6 |
| 60 | m | 1,533 | 1,541 | 1,704 | 1,606 | 1,539 | 1,528 | 1,575 |
| | σ | 0,050 | 0,044 | 0,017 | 0,020 | 0,057 | 0,041 | 0,075 |
| | cv | 3,3 | 2,9 | 1,0 | 1,2 | 3,7 | 2,7 | 4,8 |
| 70 | m | 1,420 | 1,647 | 1,560 | 1,593 | 1,577 | 1,658 | 1,576 |
| | σ | 0,051 | 0,052 | 0,051 | 0,039 | 0,022 | 0,052 | 0,091 |
| | cv | 3,6 | 3,1 | 3,3 | 2,4 | 1,4 | 3,1 | 5,8 |
| 80 | m | 1,436 | 1,747 | 1,517 | 1,601 | 1,656 | 1,765 | 1,620 |
| | σ | 0,115 | 0,031 | 0,045 | 0,035 | 0,034 | 0,046 | 0,131 |
| | cv | 8,0 | 1,8 | 3,0 | 2,2 | 2,0 | 2,6 | 8,1 |

Hp = humidité pondérale du sol

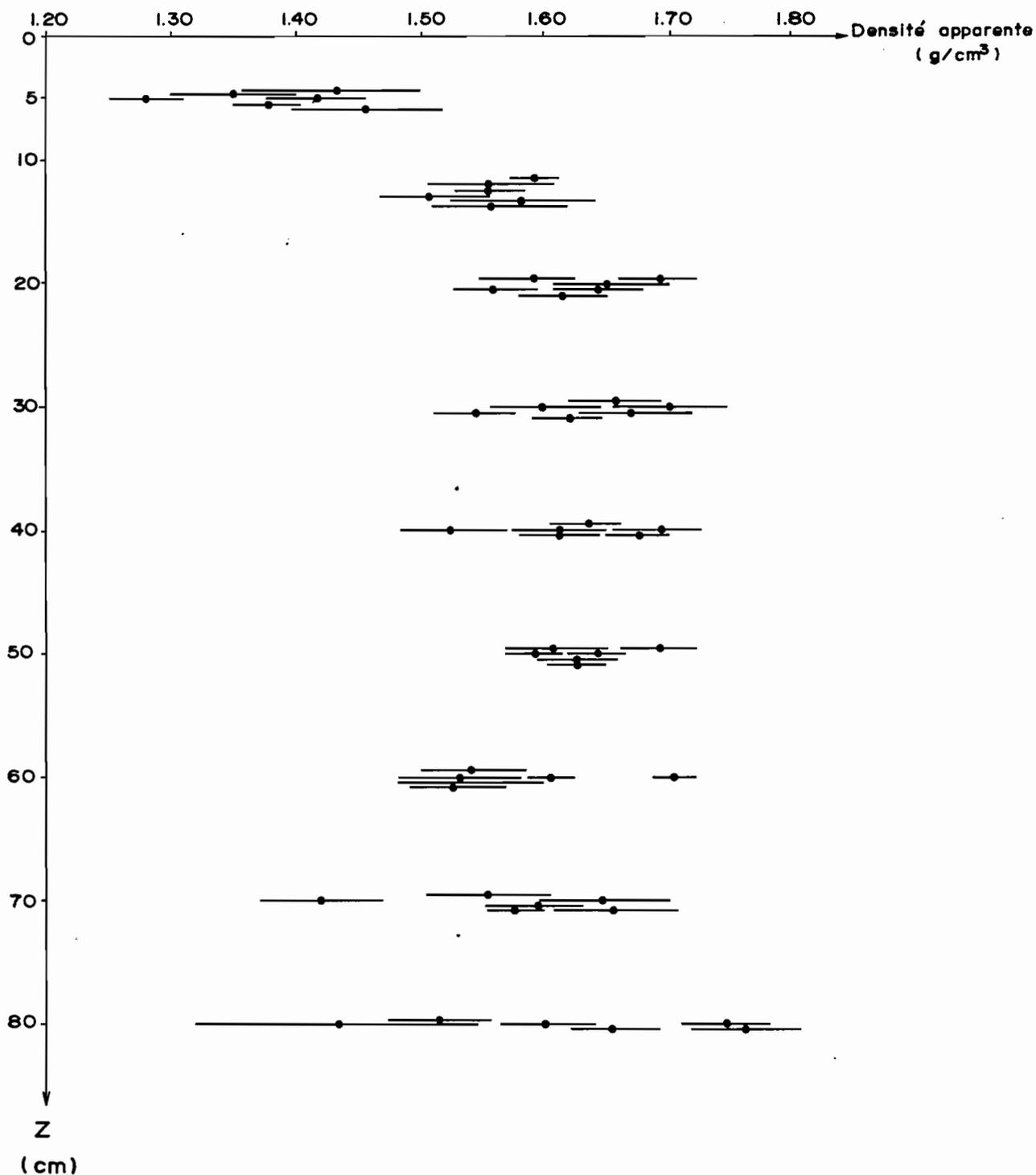
m = moyenne

σ = écart-type

cv = coefficient de variation en %

Z = profondeur d'échantillonnage

Fig. 6 - STATION HILARIA I - DENSITE APPARENTE DU SOL A L' ETAT SEC -
 (Hp = 2 δ 5 % . Méthode du cylindre V = 150 cm³ - 6 profils de sols échantillonnés avec 6 répétitions
 par niveau de prélèvement)



Pour chaque profil et pour chaque niveau d' échantillonnage,
 la densité apparente est la moyenne (•) de 6 prélèvements
 avec l'écart-type (—).
 Niveaux d'échantillonnage = 5-12-20-30-40-50-60-70 et 80 cm.

Nous constatons (tableau 6) qu'avec ce cylindre de 85 cm³, la moyenne de la densité apparente de tous les échantillons d'un même niveau est systématiquement inférieure à celle obtenue avec le cylindre de 150 cm³, sauf pour le niveau 5 cm. La différence reste cependant faible, de l'ordre de 0,02 à 0,07 en valeur absolue. Les coefficients de variation sont plus élevés pour les échantillons obtenus avec le petit cylindre, que ce soit pour l'ensemble ou par niveau de prélèvement.

Pour une profondeur donnée, la gamme des valeurs de la densité apparente, exprimée avec l'écart-type (fig. 7), est plus importante que celle existant pour les échantillons obtenus avec le grand cylindre (fig. 6).

Ces résultats montrent l'intérêt de réaliser l'échantillonnage de la densité apparente avec un cylindre de volume aussi grand que possible, ce dernier étant cependant limité par un problème de réalisation pratique des prélèvements.

EN CONCLUSION, la variabilité de la densité apparente, à la fois spatiale et de la mesure elle-même, est relativement faible pour la station étudiée. Cependant, l'un des paramètres à prendre en compte est la variation de la densité en fonction de l'humidité du sol qui influe de manière notable sur le bilan hydrique.

1.4. Caractérisation hydrodynamique du sol.

Pour caractériser le comportement hydrodynamique du sol, nous avons utilisé la technique de simulation de pluies à l'aide d'un infiltromètre à aspersion (modèle ORSTOM, J. Asseline). Cinq parcelles de 1m² chacune ont été installées dans la station "Hilaria mutica", à l'emplacement des tubes d'accès pour la mesure de l'humidité à la sonde à neutrons qui préexistaient.

Sur chacune des parcelles, nous avons réalisé des pluies d'intensité (12 à 100 mm/h) et de durée (15 à 60 mn) variables, avec deux états d'humectation initiale de la partie supérieure du sol : état très sec et état humide proche de la saturation.

Pour ces cinq parcelles, la seule variable est le taux de recouvrement de la végétation compris entre 0 (sol nu) et 90%, avec des intermédiaires de 30, 40 et 50%, les autres paramètres, sol et pente (0,5%) étant identiques.

Actuellement 130 pluies ont été réalisées avec pour chacune d'elles détermination des paramètres de ruissellement et d'infiltration et suivi dans le temps du ressuyage par des mesures d'humidité à la sonde à neutrons. Les pluies simulées sont de deux types : des pluies dites unitaires, c'est-à-dire de même intensité durant toute la durée de la pluie, et des pluies composées constituées d'une succession d'averses de différentes intensités. Nous ne présenterons ici que les résultats obtenus avec les pluies unitaires.

Tableau 6. STATION HILARIA 1. Densité apparente du sol à l'état sec.
(Hp = 2 à 5% - Méthode du cylindre: V = 85 cm³)

(6 profils de sols échantillonnés avec 6 échantillons par niveau de prélèvement).

| Profil Z (cm) | | 1 (n = 6) | 2 (n = 6) | 3 (n = 6) | 4 (n = 6) | 5 (n = 6) | 6 (n = 6) | Total (n = 36) |
|------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|
| 5 | m | 1,443 | 1,312 | 1,570 | 1,301 | 1,460 | 1,223 | 1,385 |
| | σ | 0,037 | 0,067 | 0,071 | 0,034 | 0,048 | 0,034 | 0,127 |
| | cv | 2,6 | 5,1 | 4,5 | 2,6 | 3,3 | 2,8 | 9,2 |
| 12 | m | | 1,528 | 1,494 | 1,491 | 1,601 | 1,510 | 1,525 |
| | σ | | 0,069 | 0,064 | 0,065 | 0,058 | 0,081 | 0,079 |
| | cv | | 4,5 | 4,3 | 4,4 | 3,6 | 5,4 | 5,2 |
| 20 | m | 1,671 | 1,597 | 1,575 | 1,550 | 1,625 | 1,546 | 1,594 |
| | σ | 0,019 | 0,057 | 0,064 | 0,076 | 0,056 | 0,048 | 0,071 |
| | cv | 1,1 | 3,5 | 4,1 | 4,9 | 3,4 | 3,1 | 4,5 |
| 30 | m | 1,613 | 1,564 | 1,600 | 1,562 | 1,651 | 1,520 | 1,585 |
| | σ | 0,055 | 0,052 | 0,034 | 0,104 | 0,065 | 0,047 | 0,076 |
| | cv | 3,4 | 3,3 | 2,1 | 6,7 | 4,0 | 3,1 | 4,8 |
| 40 | m | 1,646 | 1,574 | 1,636 | 1,577 | 1,707 | 1,522 | 1,610 |
| | σ | 0,050 | 0,031 | 0,045 | 0,079 | 0,035 | 0,044 | 0,078 |
| | cv | 3,0 | 2,0 | 2,8 | 5,0 | 2,0 | 2,9 | 4,8 |
| 50 | m | 1,590 | 1,486 | 1,597 | 1,579 | 1,657 | 1,509 | 1,570 |
| | σ | 0,070 | 0,047 | 0,052 | 0,028 | 0,035 | 0,019 | 0,073 |
| | cv | 4,4 | 3,2 | 3,2 | 1,7 | 2,1 | 1,2 | 4,6 |
| 60 | m | 1,522 | 1,461 | 1,632 | 1,554 | 1,688 | 1,513 | 1,561 |
| | σ | 0,072 | 0,072 | 0,010 | 0,025 | 0,039 | 0,057 | 0,092 |
| | cv | 4,7 | 5,0 | 0,6 | 1,6 | 2,3 | 3,8 | 5,9 |
| 70 | m | 1,474 | 1,460 | 1,484 | 1,557 | 1,536 | 1,478 | 1,498 |
| | σ | 0,032 | 0,073 | 0,054 | 0,051 | 0,063 | 0,113 | 0,078 |
| | cv | 2,2 | 5,0 | 3,7 | 3,3 | 4,1 | 7,7 | 5,2 |
| 80 | m | 1,496 | 1,469 | 1,392 | 1,554 | 1,434 | 1,617 | 1,494 |
| | σ | 0,055 | 0,073 | 0,057 | 0,032 | 0,074 | 0,080 | 0,098 |
| | cv | 3,7 | 4,9 | 4,1 | 2,0 | 5,1 | 4,9 | 6,6 |

Hp = humidité pondérale du sol

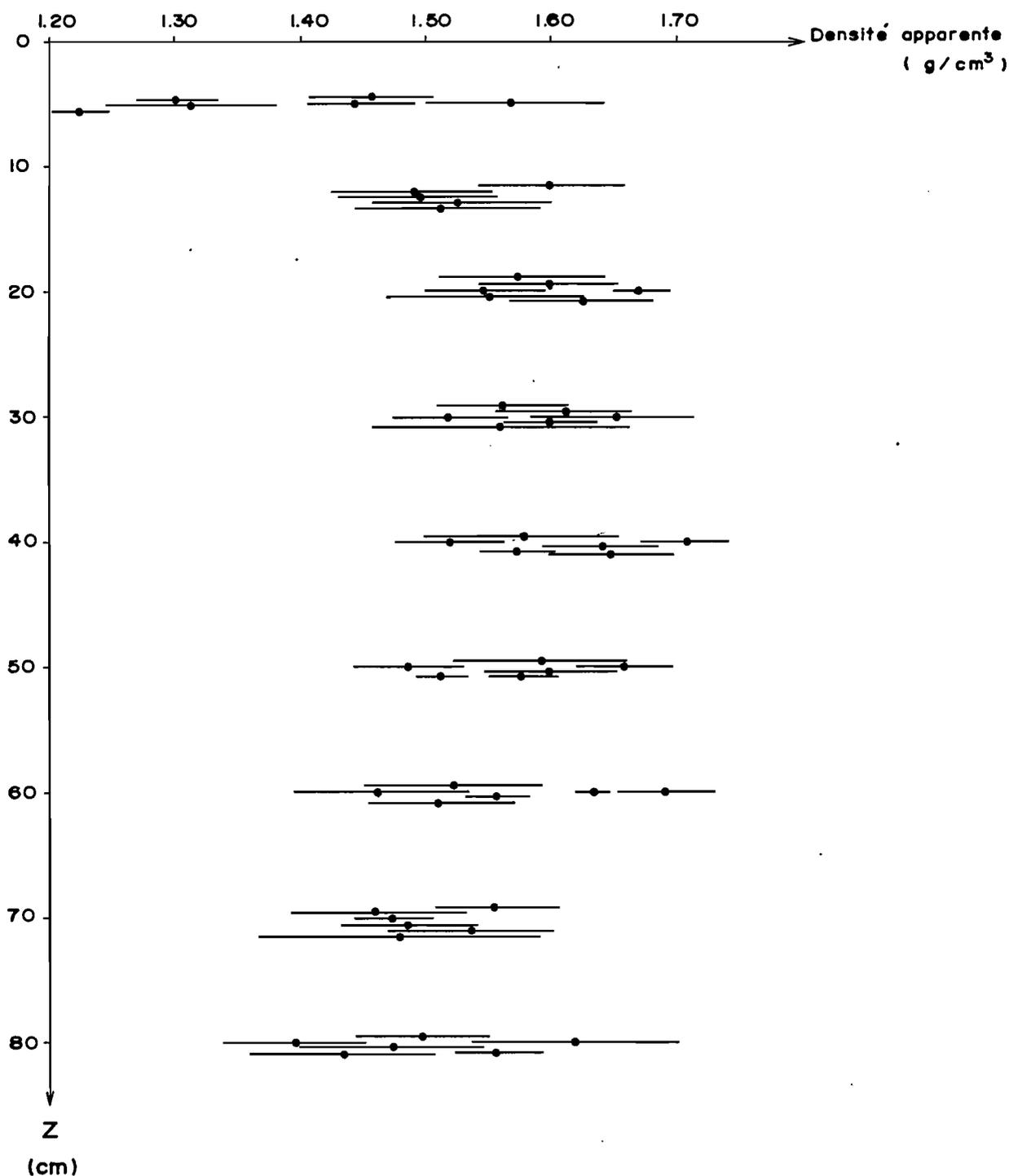
m = moyenne

σ = écart-type

cv = coefficient de variation en %

Z = profondeur d'échantillonnage

Fig. 7- STATION HILARIA 1- DENSITE APPARENTE DU SOL A L' ETAT SEC-
 ($H_p = 28.5\%$. Méthode du cylindre $V = 85\text{ cm}^3$ - 6 profils de sols échantillonnés avec 6 répétitions
 par niveau de prélèvement)



Pour chaque profil et pour chaque niveau d' échantillonnage,
 la densité apparente est la moyenne (•) de 6 prélèvements
 avec l'écart-type (—).

Niveaux d' échantillonnage = 5-12-20-30-40-50-60-70 et 80 cm.

1.4.1. Pluie d'imbibition.

La pluie d'imbibition correspond à la période d'infiltration totale au début de la pluie, avant qu'il y ait apparition du ruissellement. La relation entre la durée (T_i) de cette phase d'infiltration totale en fonction de l'intensité de la pluie pour chacune des cinq parcelles et en fonction de l'état d'humectation initiale (fig. 8) met en évidence l'influence du couvert végétal. En effet, nous constatons que plus ce dernier augmente, plus la durée de la phase d'imbibition est longue, surtout à partir d'un recouvrement végétal de 50% et pour des pluies de faible intensité.

Les courbes ci-dessus permettent d'établir, pour une intensité donnée, la relation entre la durée d'imbibition et le couvert végétal (fig. 9). Cette relation synthétique met en évidence de manière très nette le rôle de l'état d'humectation initial sec du sol, tandis que l'état initial humide n'a qu'une très faible influence sur T_i , quels que soient l'intensité de la pluie et le taux de couvert végétal.

1.4.2. Régimes permanents d'écoulement et d'infiltration.

Après la phase d'imbibition du sol, le ruissellement apparaît et augmente jusqu'à atteindre un régime permanent correspondant à l'intensité maximale de ruissellement (R_x) avec inversement une infiltration à intensité minimale (F_n).

Les courbes $R_x = f(I)$ sont des droites pratiquement parallèles entre elles, ce qui indique que le régime permanent de ruissellement dépend uniquement de l'intensité de la pluie elle-même (fig. 10, tableau 7). L'équation de ces courbes permet d'établir la relation $F_n = f(I)$ à partir de $I = R_x + F_n$.

Le rôle de la végétation est mis en évidence par l'ordonnée à l'origine des courbes $R_x = f(I)$, qui augmente avec le taux de couvert végétal, et qui détermine l'intensité minimale au-dessous de laquelle le ruissellement permanent ne sera pas atteint. Cette intensité minimale est très faible (1,5 mm/h) pour la parcelle sans végétation (P0), tandis qu'elle est de 10 et 11 mm/h pour les parcelles P30 et P40. Le passage à une couverture végétale de 50% fait augmenter brutalement l'intensité minimale ci-dessus à 21 mm/h, laquelle n'augmente ensuite que très peu (22 mm/h), même si le taux de couvert végétal devient important (P90).

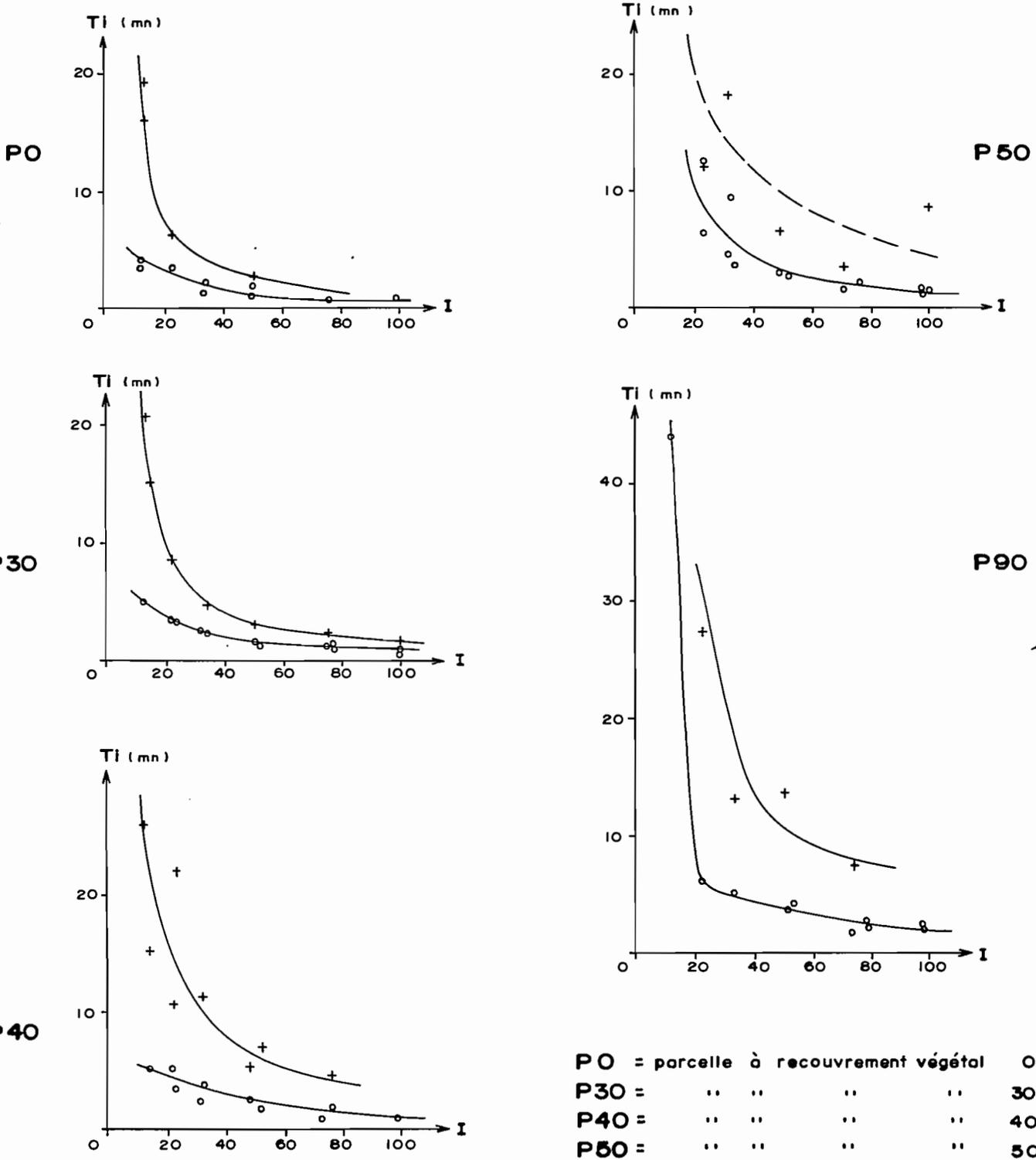
C'est à partir d'un recouvrement de 50% de la végétation que le régime permanent de ruissellement est notablement différent selon l'état d'humectation du sol, surtout lorsque le couvert végétal est dense.

1.4.3. Lamme ruisselée.

Pour chacune des parcelles étudiées, nous avons établi la relation entre la lamme d'eau ruisselée (L_r) et la pluie utile (P_u). De manière à ce que les résultats soient comparables d'une parcelle à l'autre, la lamme ruisselée est calculée pour une pluie utile de durée 60 mn.

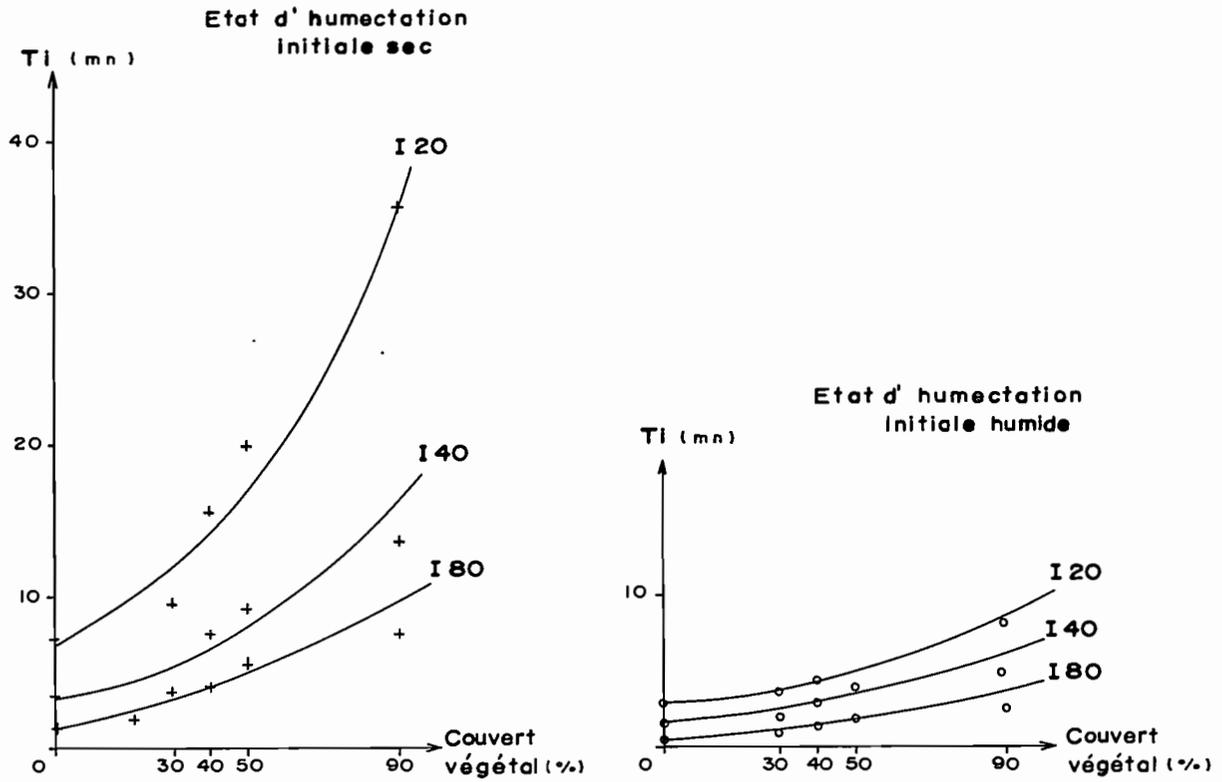
Fig. 8 - RELATION DUREE PHASE D'IMBIBITION (TI) - INTENSITE DE LA PLUIE (I) - STATION HILARIA MUTICA.

état d'humectation initiale du sol: + sec
o humide



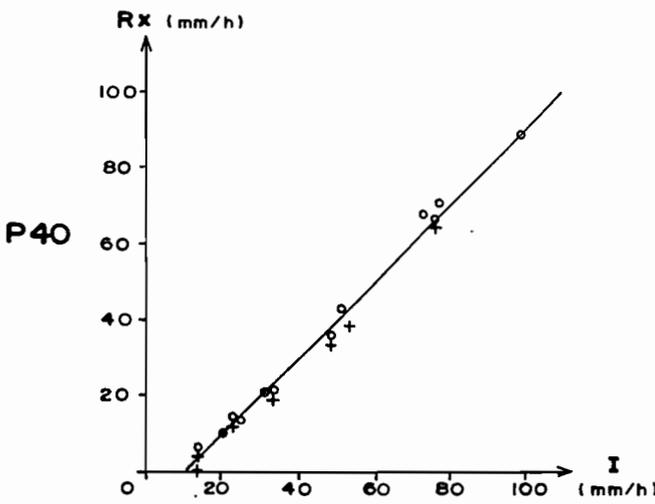
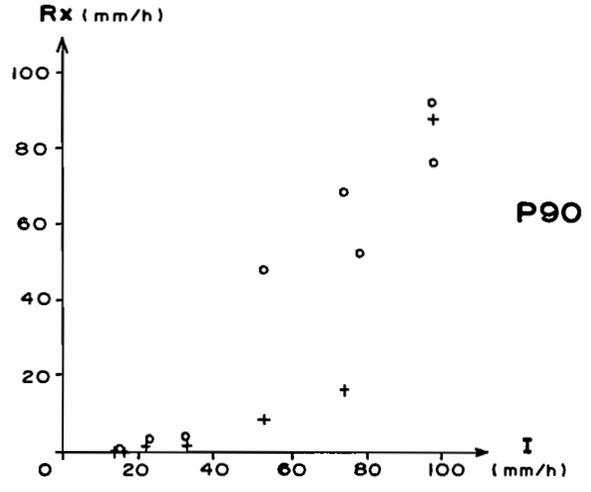
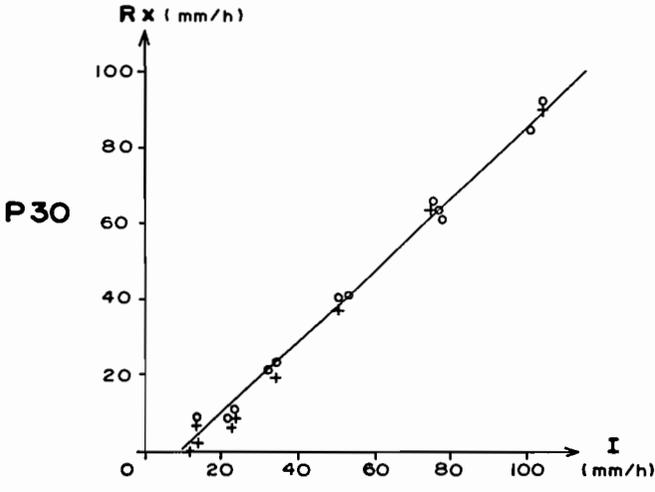
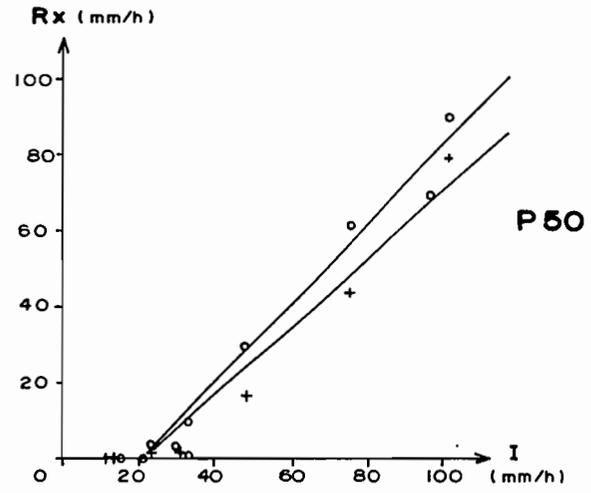
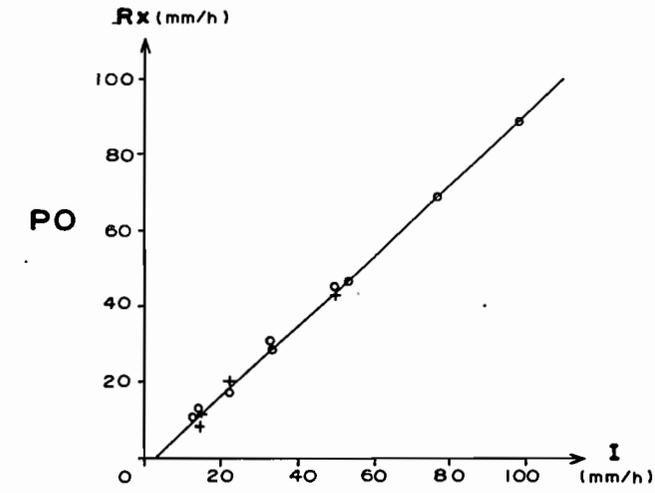
| | | | |
|-----|---|---------------------------------|------|
| P0 | = | parcelle à recouvrement végétal | 0 % |
| P30 | = | " " " " " " | 30 " |
| P40 | = | " " " " " " | 40 " |
| P50 | = | " " " " " " | 50 " |
| P90 | = | " " " " " " | 90 " |

Fig. 9 - RELATION DUREE PHASE D'IMBIBITION (Ti) - COUVERT VEGETAL
STATION HILARIA MUTICA



I20=Intensité de la pluie 20 mm/h
 I40= " " " " 40 "
 I80= " " " " 80 "

Fig. 10-RELATION INTENSITE DU RUISSELLEMENT EN REGIME PERMANENT (Rx) EN FONCTION DE L'INTENSITE DE LA PLUIE (I) STATION HILARIA MUTICA



état d'humectation initiale du sol:

- + sec
- o humide

| | | | |
|-----|---|---------------------------------|------|
| P0 | = | parcelle à recouvrement végétal | 0 % |
| P30 | = | " " " " " " | 30 " |
| P40 | = | " " " " " " | 40 " |
| P50 | = | " " " " " " | 50 " |
| P90 | = | " " " " " " | 90 " |

Tableau 7. Relations ruissellement maximum (Rx) et infiltration minimum (Fn) en fonction de l'intensité de la pluie pour la station Hilaria mutica.

| Parcelle | Tous points (état initial du sol sec et humide) | Humectation initiale du sol = état sec | Humectation initiale du sol = état humide |
|----------|---|--|---|
| P 0 | Rx = 0,919 I - 1,39 (r=0,999) Fn = 0,081 I + 1,39 | Rx = 0,916 I - 1,79 (r = 0,998) Fn = 0,084 I + 1,79 | Rx = 0,914 I - 0,95 (r=0,999) Fn = 0,086 I + 0,95 |
| P 30 | Rx = 0,945 I - 9,09 (r=0,996) Fn = 0,055 I + 9,09 | Rx = 0,963 I - 10,46 (r=0,997) Fn = 0,037 I + 10,46 | Rx = 0,922 I - 7,32 (r=0,997) FN = 0,078 I + 7,32 |
| P 40 | Rx = 1,020 I - 10,98 (r=0,995) Fn = -0,020 I + 10,98 | Rx = 0,962 I - 10,75 (r=0,997) Fn = 0,038 I + 10,75 | Rx = 1,018 I - 9,61 (r=0,998) Fn = -0,018 I + 9,61 |
| P 50 | Rx = 0,996 I - 21,24 (r=0,971) Fn = 0,004 I + 21,24 | Rx = 0,895 I - 18,95 (r=0,974) Fn = 0,105 I + 18,95 | Rx = 1,071 I - 23,71 (r=0,978) Fn = -0,071 I + 23,71 |
| P 90 | Rx = 1,010 I - 21,78 (r=0,911) Fn = -0,010 I + 21,78 | Rx = 0,841 I - 20,56 (r=0,848) Fn = 0,159 I + 20,56 | Rx = 1,064 I - 19,46 (r=0,964) Fn = -0,064 I + 19,46 |

P 0 = parcelle à recouvrement végétal de 0%
P 30 = " " " 30%
P 40 = " " " 40%
P 50 = " " " 50%
P 90 = " " " 90%

La lame ruisselée, pour une pluie utile donnée, est toujours plus importante avec un état d'humectation initial du sol humide, ce qui est très net à partir d'un recouvrement de la végétation de 50% (fig. 10bis).

La pluie utile minimale (Pu mini) pour qu'il y ait ruissellement est la suivante pour chacune des parcelles :

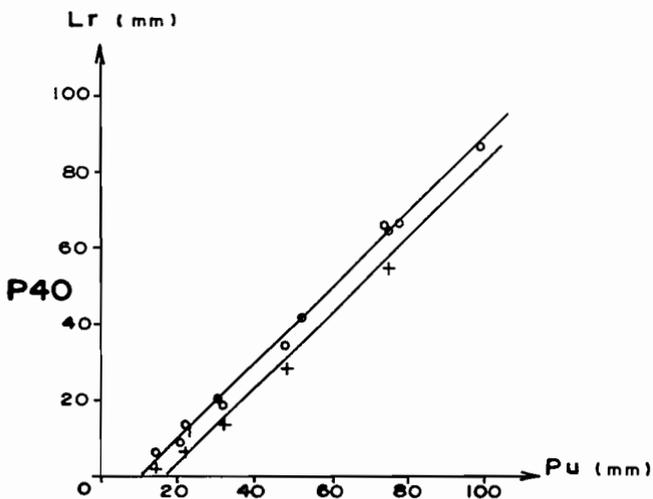
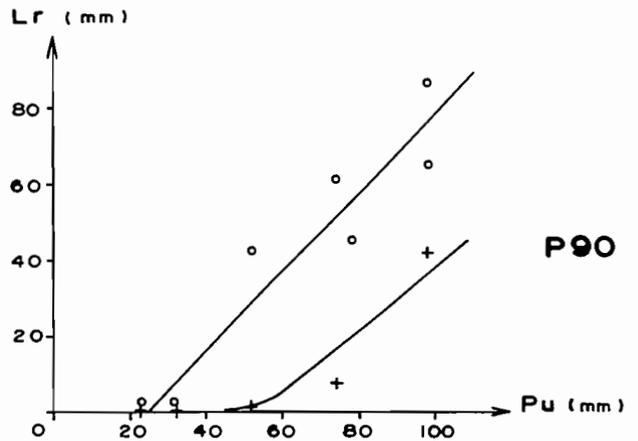
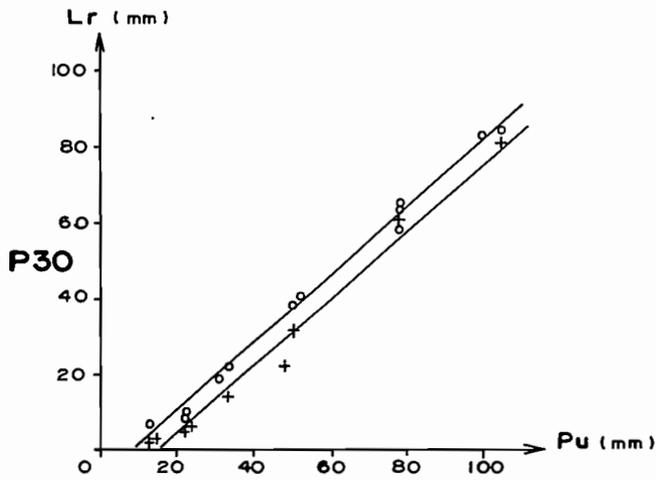
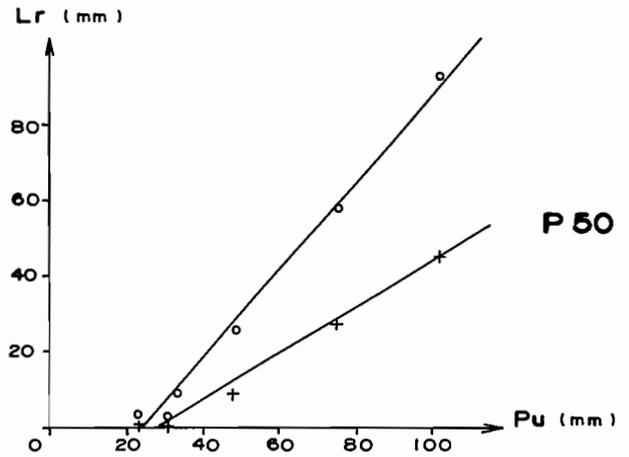
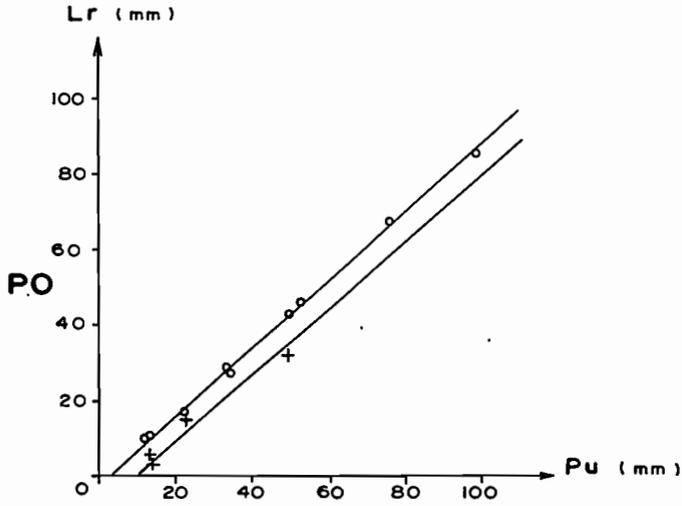
| | | | | | | | | | | | |
|---|----------|--------------|-----|---|---------|------|---------|--------|--------|---|----|
| - | Parcelle | recouvrement | 0% | : | Pu mini | état | initial | humide | = | 4 | mm |
| | | | | | " | " | " | " | sec | = | 10 |
| - | " | " | 30% | : | " | " | " | " | humide | = | 9 |
| | | | | | " | " | " | " | sec | = | 15 |
| - | " | " | 40% | : | " | " | " | " | humide | = | 10 |
| | | | | | " | " | " | " | sec | = | 17 |
| - | " | " | 50% | : | " | " | " | " | humide | = | 24 |
| | | | | | " | " | " | " | sec | = | 28 |
| - | " | " | 90% | : | " | " | " | " | humide | = | 26 |
| | | | | | " | " | " | " | sec | = | 40 |

Les courbes ci-dessus permettent d'établir, de manière synthétique, pour une pluie utile donnée, la hauteur de la lame ruisselée en fonction du taux de couverture végétale et de l'état d'humectation initiale du sol (fig. 10ter).

EN CONCLUSION, les résultats ci-dessus concernant la caractérisation hydrodynamique du sol de la station "Hilaria mutica", mettent en évidence le rôle important d'une part de l'état d'humectation initiale du sol avant la pluie, et d'autre part de la couverture végétale. C'est surtout à partir d'un taux de recouvrement de l'ordre de 40 à 50 % que cette dernière influe notablement sur les processus de ruissellement et d'infiltration.

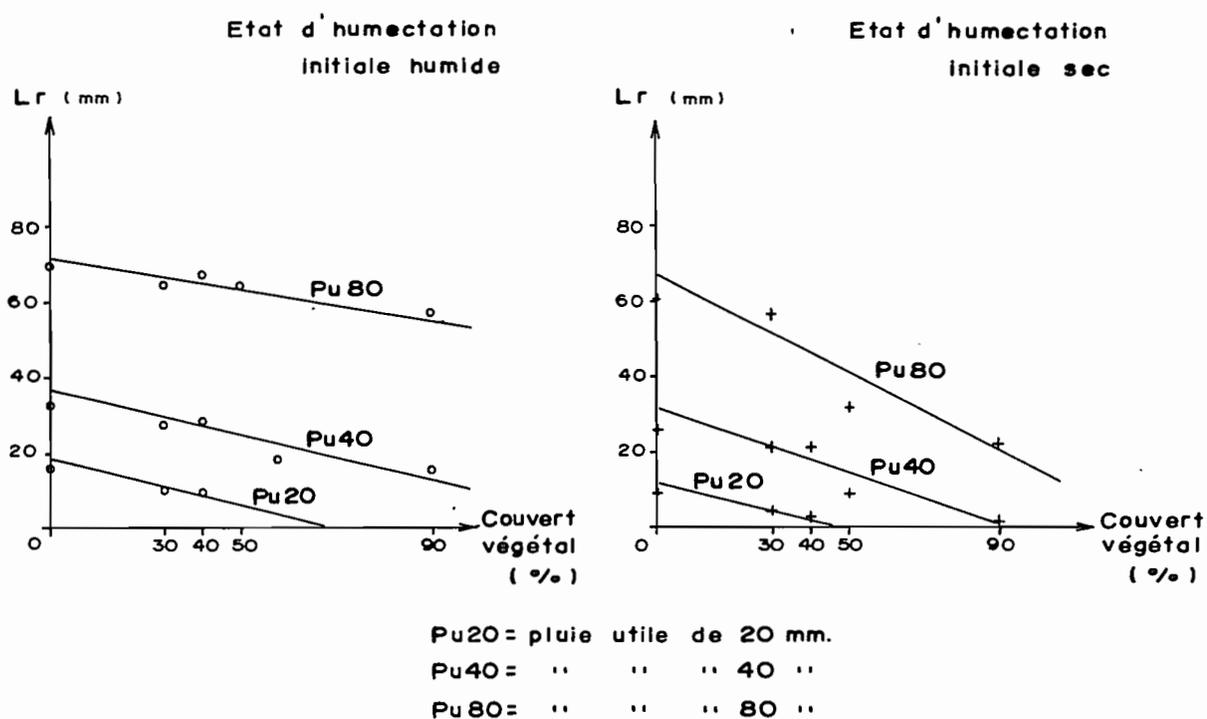
**Fig. 10bis-RELATION LAME RUISSELEE(Lr)-PLUIE UTILE (Pu) -
STATION HILARIA MUTICA**

état d'humectation initiale du sol: + sec
o humide



| | | | | |
|------------|---|---------------------------------|----|---|
| P0 | = | parcelle à recouvrement végétal | 0 | % |
| P30 | = | " " | 30 | " |
| P40 | = | " " | 40 | " |
| P50 | = | " " | 50 | " |
| P90 | = | " " | 90 | " |

Fig. 10ter - RELATION LAME RUISSELEE (Lr) - COUVERT VEGETAL
 EN FONCTION DE LA PLUIE UTILE (Pu)
 STATION HILARIA MUTICA



11 - LA VEGETATION

(rédaction Gilles BESNARD)

Dans le cadre d'un programme de recherches sur les modalités de production des principales formations végétales à intérêt fourrager entreprise dès 1982 par l'Institut d'Ecologie du Mexique et l'ORSTOM en zone aride, une étude sur le fonctionnement hydrodynamique du sol a été réalisée dans le cadre de cette ATP. Afin d'intégrer dans les bilans hydriques la composante consommation d'eau par les végétaux, ce programme a été complété au cours de l'été 1988 par des travaux sur le comportement écophysiological et la résistance au stress hydrique des principales espèces fourragères.

Les espèces étudiées sont deux graminées pérennes parmi les plus répandues et donc les plus importantes pour cette zone où se pratique un élevage bovin extensif : "Hilaria mutica" et "Sporobolus airoides".

Nous présentons ci-dessous les techniques utilisées et les résultats obtenus jusqu'à présent, les travaux de terrain se poursuivant actuellement.

II.1. Stations d'étude.

Cinq stations sont étudiées, dont quatre sont situées dans un pâturage homogène où l'espèce étudiée représente à elle seule 90% de la couverture végétale, celle-ci étant de l'ordre de 40 à 50%. Il s'agit des stations Hilaria 1, Hilaria 2, Sporobolus 1 et Sporobolus 2. La dernière station, Mogote, est localisée dans une formation végétale de type "brousse tigrée" ou arc de végétation, avec deux sites de mesure pour l'espèce Hilaria, l'une à l'intérieur de l'arc végétal, l'autre à l'extérieur en limite amont qui est colonisée progressivement par la végétation.

Les types de sol de ces cinq stations sont les suivants :

- station Hilaria 1 : yermosol gypseux sur alluvions argileuses.
- station Hilaria 2 : yermosol salin sur alluvions argileuses.
- station Mogote : xérosol modal sur alluvions moyennes.
- station Sporobolus 1 : vertisol chromique sur alluvions argileuses.
- station Sporobolus 2 : solontchak modal sur alluvions argileuses.

Cette étude permettra de mettre en évidence l'influence de la salinité et du gypse sur le comportement écophysiological de Hilaria et de Sporobolus.

II.2. Méthodologie.

Dans chacune des stations sont mesurées les précipitations et l'humidité du sol en fonction de la profondeur et du temps à l'aide d'une sonde SOLO 25 (Nardeux).

Les potentiels hydriques foliaires ou pression de sève sont déterminés avec une bombe de Scholander (Soil Moisture). L'intérieur de la chambre de mesure est tapissé d'un papier filtre imbibé d'eau afin d'y maintenir une humidité voisine de la saturation et pour éviter la transpiration de la plante durant la mesure.

La bombe de pression permet des mesures de potentiel théorique jusqu'à 100 bars, mais en pratique il n'est guère possible d'aller au-delà de 70 bars, car à cette dernière pression, le joint qui maintient l'échantillon végétal se détériore rapidement et il peut apparaître alors des fuites d'air importantes qui faussent la mesure. De plus, à cette pression, l'échantillon végétal a tendance à sortir de la chambre, surtout pour *Sporobolus*.

Les mesures sont effectuées sur des tiges/feuilles entières coupées à ras du sol, vertes et bien développées (chez *Hilaria*, les tiges sont parfois ramifiées). En général, chaque mesure est répétée 9 fois. La pression dans la chambre est augmentée de façon constante et suffisamment lentement (1 bar toutes les 4 à 5 secondes) pour que l'échantillon végétal soit toujours en équilibre avec la pression exercée.

Les potentiels sont déterminés à deux moments différents de la journée : lorsque le potentiel est maximal (en fin de nuit) et lorsque il est minimal (en milieu de journée quand l'ensoleillement et la transpiration sont maximaux). En pratique, pour le potentiel maximal, ces mesures sont effectuées entre 1H.30 avant le lever du soleil et 1H. après, avant que l'ensoleillement ne soit suffisant pour provoquer une baisse du potentiel par la transpiration. En ce qui concerne le potentiel minimal, les mesures sont effectuées entre 12H. et 14H.30 solaires. Des mesures en continu durant la journée ont confirmé cette dernière tranche horaire comme étant celle où les potentiels sont minimaux.

11.3. Résultats.

11.3.1. Pluviométrie.

Les hauteurs de pluie et leur répartition sont présentées sur les figures 11, 12 et 13. La première pluie de la saison a été très précoce (7 avril) avec une répartition irrégulière qui ne provoqua la croissance de la végétation que dans les stations *Hilaria* 1, *Mogote* et *Sporobolus* 1. Malheureusement, du fait de la précocité de cette pluie, le matériel de mesure des potentiels n'était pas fonctionnel à cette époque.

Une période sèche a succédé à cette première pluie jusqu'au 29 juin. Ensuite des pluies fin juin-début juillet ont provoqué une croissance de la végétation pour l'ensemble des stations, mais celle-ci est restée très limitée en *Sporobolus* 1. Cette période pluvieuse a duré jusqu'à la fin juillet et a été suivie d'une nouvelle phase sèche. A partir du 18 août de fortes pluies ont réhumecté le sol des stations *Sporobolus* 1 et *Hilaria* 2, alors que la période sèche s'est prolongée pour *Sporobolus* 1. Pour les deux autres stations, la situation est intermédiaire.

11.3.2. Evolution saisonnière des potentiels hydriques foliaires.

Les potentiels hydriques foliaires sont suivis régulièrement depuis début juin (fig. 11, 12 et 13) et les mesures vont se poursuivre jusqu'à la fin de la période végétative.

Fig.II - EVOLUTION SAISONNIERE DU POTENTIEL HYDRIQUE DE HILARIA MUTICA

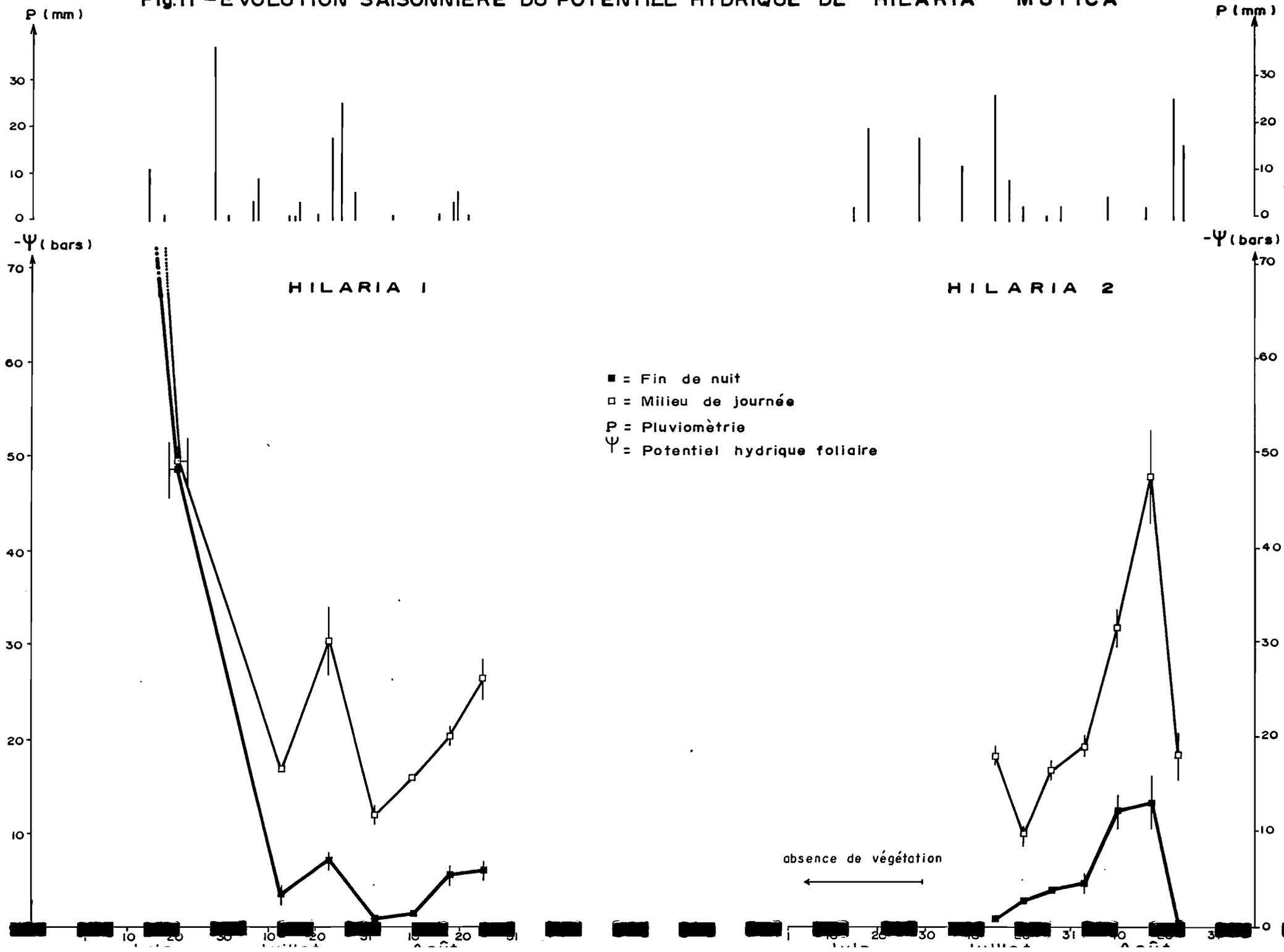


Fig.12 - EVOLUTION SAISONNIERE DU POTENTIEL HYDRIQUE DE HILARIA MUTICA. STATION MOGOTE

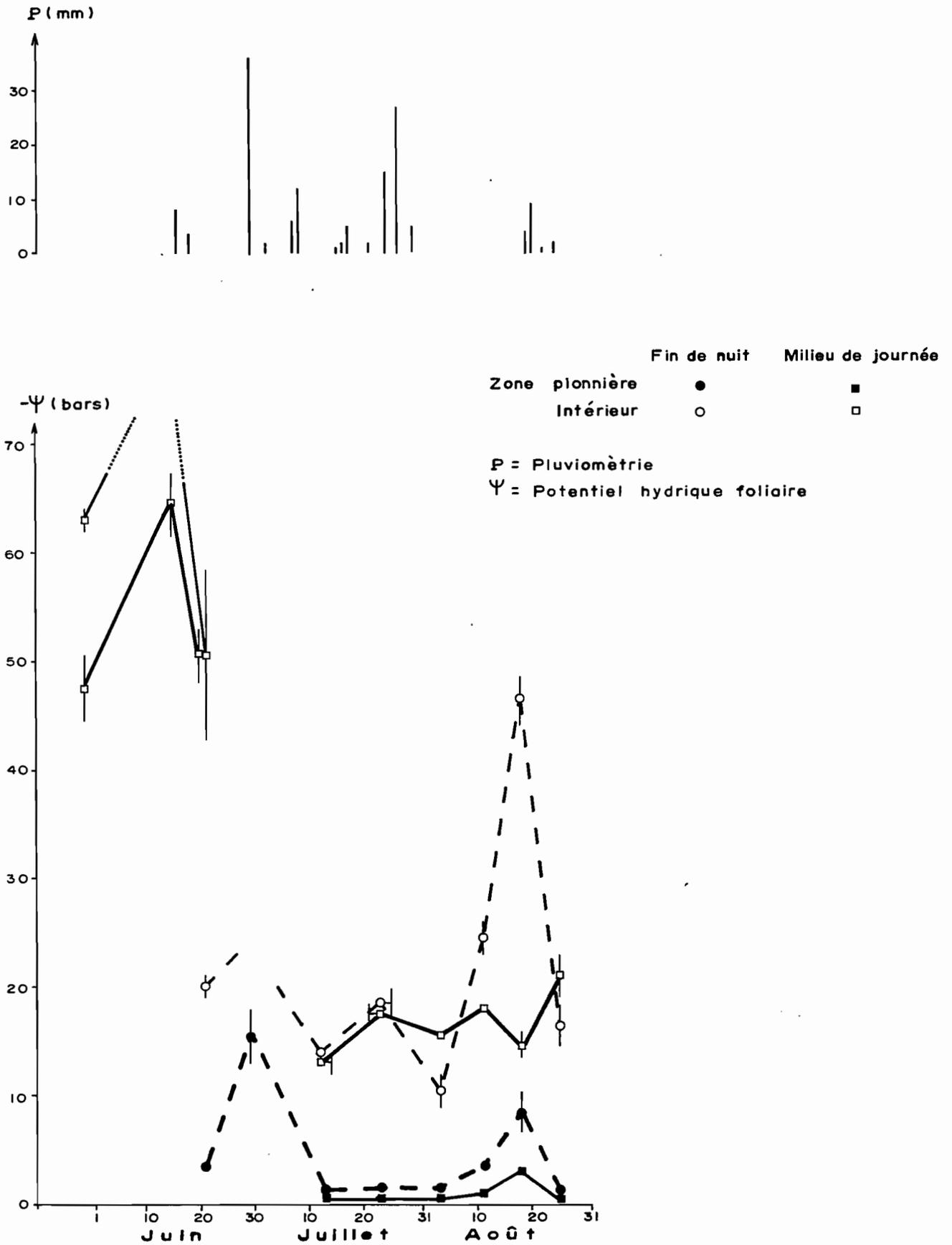
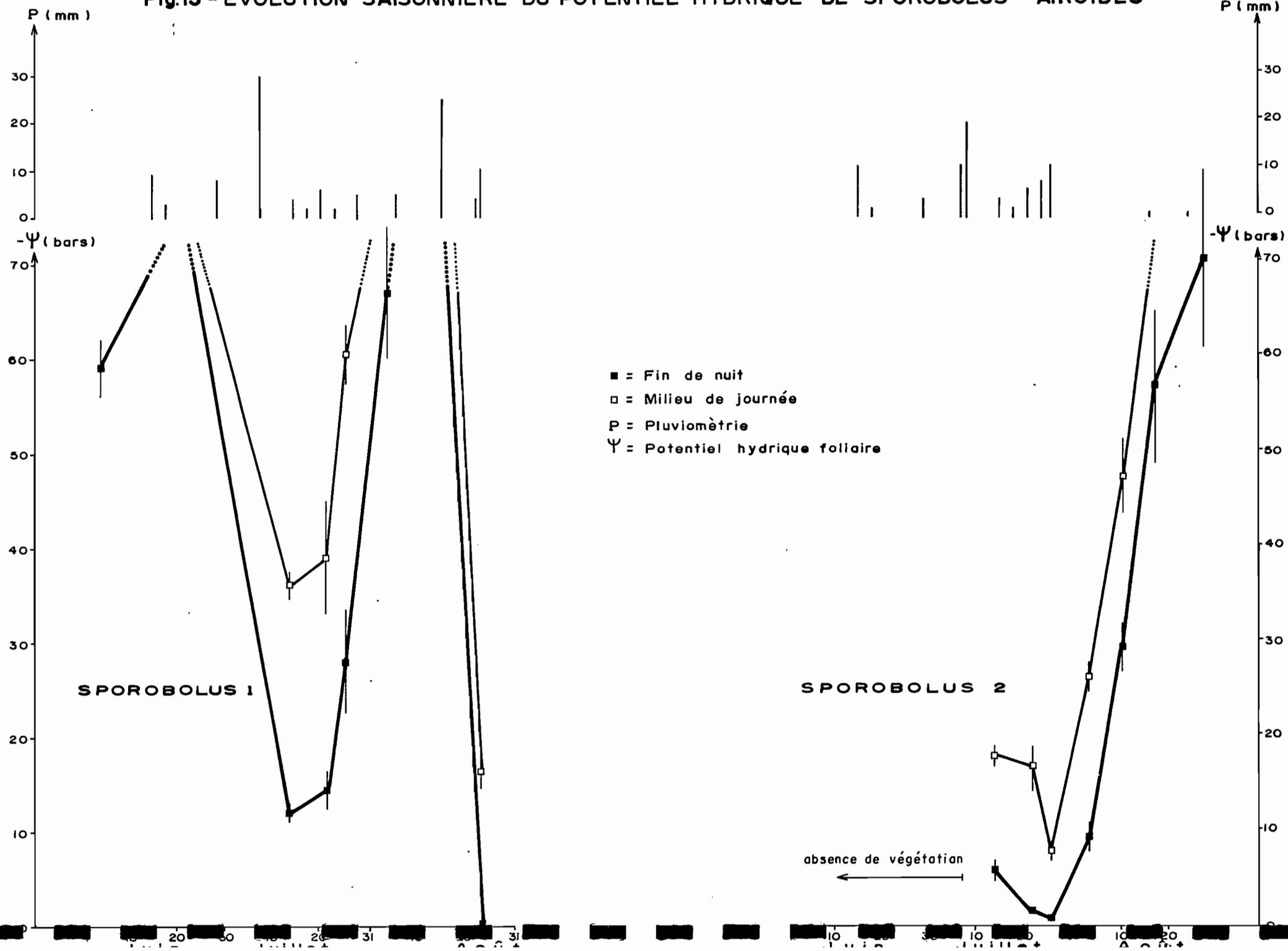


Fig.13 - EVOLUTION SAISONNIERE DU POTENTIEL HYDRIQUE DE SPOROBOLUS AIROIDES



Station Hilaria 1.

La croissance de Hilaria a commencé en avril. Les potentiels, mesurés à partir de début juin, étaient supérieurs à 70 bars et n'ont commencé à baisser qu'avec la pluie du 15 juin et surtout après celle du 29 juin. Malgré les faibles pluies de juillet, les potentiels au lever du jour et en milieu de journée ont fortement augmenté vers la fin juillet. Les pluies de fin août ne semblent pas avoir fait baisser le potentiel mesuré en milieu de journée.

Station Hilaria 2.

Malgré les 23 mm. de pluie des 15 et 18 juin, Hilaria n'a développé que de très rares tiges. Il a fallu attendre la pluie du 29 juin pour que de nouvelles tiges et feuilles apparaissent. A partir de la mi-juillet, il y a eu dessèchement progressif des plantes, le potentiel du milieu de journée évoluant beaucoup moins vite que celui mesuré à l'aube.

Station Mogote.

Avec des précipitations voisines pour les stations Hilaria 1 et Mogote, les potentiels hydriques sont toujours supérieurs à l'intérieur du Mogote par rapport à ceux mesurés en Hilaria 1. Ceux mesurés à l'extérieur du Mogote sont généralement inférieurs à ceux mesurés dans le Mogote.

Station Sporobolus 1.

Dans cette station, les potentiels hydriques foliaires sont toujours restés très bas, ce qui n'a pas permis une reprise de la croissance végétale jusqu'aux pluies de fin août. Même la forte pluie du 8 juillet n'a pas été suffisante, même si elle a permis une forte remontée du potentiel. Toutes les autres petites pluies de fin juillet-début août ne semblent pas avoir eu d'effet sur le dessèchement de Sporobolus.

Par rapport à Hilaria, Sporobolus semble exiger une plus grande quantité d'eau pour croître. Le sol de cette station étant salé, une partie relativement importante de celle-ci ne doit pas être utilisable, par suite d'une forte pression osmotique.

Station Sporobolus 2.

Avec les pluies de fin juin et début juillet, les potentiels sont restés très élevés, puis ensuite ils ont très rapidement diminué lors de la sécheresse du mois d'août.

Pour expliquer l'évolution des potentiels hydriques foliaires des différentes stations et définir la résistance des plantes au déficit hydrique, il faudrait disposer des données d'humidité et de potentiel hydrique du sol. Ces dernières ne sont pas disponibles actuellement, leur traitement étant en cours de réalisation. De plus, les mesures de terrain vont se poursuivre jusqu'en novembre et l'interprétation de l'ensemble des résultats pourra alors être effectuée.

II.4. Courbes "pression-volume".

Ces courbes permettent de décrire la dépendance du potentiel hydrique d'une plante vis-à-vis de son contenu en eau.

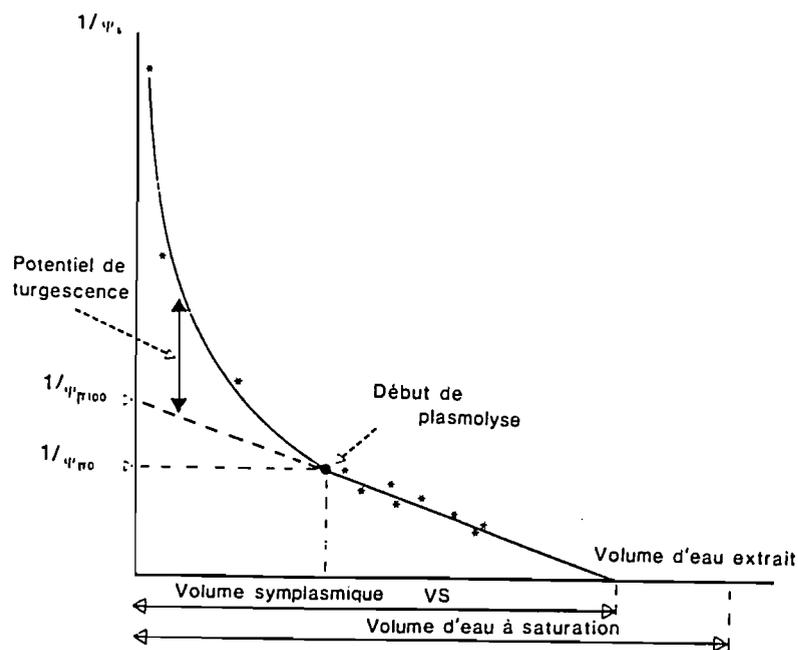
11.4.1. Méthodologie.

Les mesures sont effectuées sur des tiges entières des deux espèces étudiées. Après avoir été prélevée, la tige est immergée dans l'eau pure à 4°C pendant 48 heures afin d'obtenir la pleine turgescence. Puis la tige est séchée de façon à éliminer l'eau de surface. On s'assure alors que le potentiel foliaire est bien nul. La tige est ensuite pesée pour obtenir la masse à pleine turgescence. On laisse ensuite transpirer la plante, puis on détermine la quantité d'eau perdue par pesée avec en même temps mesure du nouveau potentiel foliaire, et ainsi de suite.

Les résultats obtenus permettent de tracer le graphe : inverse de la pression en fonction du volume d'eau perdue. Cette courbe présente deux portions (voir ci-dessous) :

- la partie hyperbolique correspond à l'évolution combinée du potentiel osmotique et du potentiel de turgescence.
- la partie linéaire représente seulement le potentiel osmotique.

L'intersection de ces deux courbes correspond à une pression de turgescence nulle pour la plante.



— Représentation schématique d'une courbe « pression-volume ».

$\psi_{\pi 100}$ Potentiel à pleine turgescence

$\psi_{\pi 0}$ Potentiel à turgescence nulle

11.4.2. Résultats.

Cette expérimentation est en cours de réalisation et les premiers résultats, pour la station Mogote, donnent pour Π_0 une valeur de -25 et -20 bars et de -16,7 et -11,1 bars pour Π_{100} . Pour la station Sporobolus 1, ces valeurs sont respectivement de -10 bars et -6,7 bars.

Ces valeurs, qui demandent à être confirmées par de nombreuses autres mesures, permettent de dégager une conséquence sur les potentialités de croissance lors des phases de sécheresse. En effet, il est nécessaire qu'existe une pression de turgescence pour maintenir de nombreuses activités physiologiques, en particulier pour l'élongation des tissus. Or nous constatons que l'espèce *Hilaria* peut maintenir une certaine croissance avec des potentiels deux fois inférieurs à ceux de *Sporobolus*. En première analyse, *Hilaria* semble mieux adapté pour survivre dans ce milieu aride à fort déficit hydrique.

11.5. Conclusion.

Les résultats ci-dessus ne sont que fragmentaires et ne donnent seulement qu'une vue globale du travail entrepris. Lorsque toutes les mesures seront terminées et les résultats traités, nous aurons des données plus précises sur la résistance des deux espèces étudiées à la sécheresse, ainsi qu'une comparaison entre celles-ci et leur comportement écophysologique vis-à-vis du substrat édaphique.

PERSONNEL PARTICIPANT AU PROGRAMME ATP ET THEMES DE
RECHERCHES

- Jean Pierre DELHOUME : - responsable scientifique du projet.
- direction de thèses.
- sols et eau dans la Réserve de Mapimi : bilan hydrique du sol; ruissellement et érosion en parcelles et bassins versants hydrologiques; hétérogénéité spatiale de la couverture pédologique; caractérisation morphologique, analytique et hydrodynamique des sols.
- Gilles BESNARD : - étude du comportement écophysologique des principales espèces à intérêt fourrager de la zone d'étude.
- Jean ASSELINE : - simulation de pluies.
- installation et maintenance des stations d'étude du ruissellement et de l'érosion (parcelles, bassins versants).
- appui et aide aux thésistes.
- Joaquin RUIZ et David VIRAMONTES : - réalisation en commun d'une thèse de "licenciatura" intitulée : "Etude du ruissellement et de l'érosion le long d'un transect topographique en fonction des sols, de la pente et de la végétation, dans la Réserve de Mapimi."
responsable de thèse : J.P. Delhoume.
- Mercédès SAENZ : - réalisation d'une thèse de "licenciatura" intitulée : "Etude des caractéristiques hydrodynamiques de sols représentatifs de la Réserve de Mapimi".
responsable de thèse : J.P. Delhoume.
- Juan RANGEL : - réalisation d'une thèse de "licenciatura" intitulée : "Etude du ruissellement et des sols du bassin versant hydrologique du preson San Ignacio, dans la Réserve de Mapimi."
responsable de thèse : J.P. Delhoume.
- Gerardo TARIN : - réalisation d'une thèse de "licenciatura" intitulée : "Caractérisation hydrodynamique (simulation de pluies) des sols du bassin versant hydrologique du preson San Ignacio, dans la Réserve de Mapimi."
responsable de thèse : J.P. Delhoume.

CONCLUSIONS

Le présent rapport est synthétique et montre essentiellement les travaux réalisés durant la période concernée et l'état d'avancement du programme.

Les données acquises durant cette période sont relativement nombreuses et leur traitement est en cours de réalisation ou d'achèvement. Les travaux de terrain se poursuivent actuellement et vont continuer durant l'année 1989.

Les résultats obtenus jusqu'à présent vont donner lieu dans les prochains mois à la publication de deux rapports présentant de manière exhaustive l'ensemble de ces résultats concernant d'une part le fonctionnement hydrodynamique du sol de la station "Hilaria mutica" et d'autre part le comportement écophysiological des deux espèces végétales d'intérêt fourrager étudiées.

Les études de variabilité de la densité apparente en fonction de l'humidité et la caractérisation hydrodynamique du sol vont être développées dans deux autres stations de la réserve de Mapimi.

En liaison avec un autre programme de recherches sur le ruissellement et l'érosion, les problèmes de transfert d'échelle seront abordés par comparaison des résultats obtenus sur micro-parcelles (1 m²), parcelles (500 à 1000 m²) et bassins versants hydrologiques (quelques hectares à quelques km²), par emboîtement progressif d'échelle.

Gomez-Palacio, août 1988

Jean-Pierre DELHOUME

ATP "INFLUENCE DES COUVERTURES PEDOLOGIQUES ET
VEGETALES SUR LES BILANS HYDRIQUES ET MINERAUX DU SOL"

ETALONNAGE D'HUMIDIMETRE NEUTRONIQUE

EQUIPE : J.P. DELHOUME - MEXIQUE

1. CARACTERISTIQUES DU SITE

Les études réalisées par l'équipe Mexique de l'ATP sont localisées dans la ZONE ARIDE du nord-Mexique (Mapimi).

DEUX des STATIONS pour lesquelles nous étudions le bilan hydrique du sol à l'aide d'un humidimètre neutronique (type SOLO 20) ont été étalonnées A LA FOIS par la méthode "GRAVIMETRIQUE" et par la méthode "CADARACHE". Il s'agit des stations HILARIA et SPOROBOLUS (noms de deux espèces végétales d'intérêt fourrager).

STATION HILARIA : localisée en zone de "bajada" inférieure (glacis) à pente faible (1%). Végétation constituée par l'espèce herbacée "Hilaria" très largement dominante (90%), la couverture végétale totale de la station étant de 40%, avec une distribution spatiale discontinue sous forme de touffes alternant avec des espaces dénudés inter-touffes. Le sol est un Yermosol gypseux (Aridisol) caractérisé par les horizons suivants :

- 0 à 8 cm : horizon développé surtout sous les touffes de végétation, texture limono-argileuse, structure polyédrique sub-anguleuse fine, poreux, pores tubulaires fins et moyens, racines, transition nette et régulière.
- 8 à 60 cm : horizon argileux (type smectite) avec une augmentation de la teneur en argile du sommet à la base de l'horizon (26 à 52 %), très peu poreux, pores tubulaires très fins, structure polyédrique moyenne, racines, transition distincte et régulière.
- 60 à 90 cm : horizon d'accumulation secondaire de gypse en amas et taches, texture argilo-limoneuse, peu poreux, pores tubulaires fins et très fins, pas de racines, transition distincte et régulière.
- au-delà de 90 cm : roche-mère de type marne à débit en plaquettes.

Caractéristiques analytiques du sol : voir tableau 1.

STATION SPOROBOLUS : localisée en zone de "playa" à pente très faible (0,3 %). Végétation constituée par l'espèce herbacée "Sporobolus" présentant les mêmes caractéristiques que "Hilaria" ci-dessus, avec cependant un taux de recouvrement végétal de 25 % seulement. Le sol est un Solontchak caractérisé par les horizons suivants :

- 0 à 10 cm : texture argileuse, structure polyédrique sub-anguleuse, peu poreux, pores tubulaires fins et très fins, quelques racines, fines, transition nette et régulière.
- 10 à 70 cm : texture argileuse, structure prismatique grossière, peu à très peu poreux, pores tubulaires très fins, très peu de racines, transition distincte et légèrement ondulée.
- 70 à 115 cm : texture argileuse, structure polyédrique moyenne, très peu poreux, pores tubulaires très fins, pas de racines, transition graduelle et régulière.
- au-delà de 115 cm : texture argileuse, structure polyédrique sub-anguleuse très nette, peu poreux, pores tubulaires très fins et fins.

Caractéristiques analytiques du sol : voir tableau 1.

2. CARACTERISTIQUES DE LA SONDE

La sonde à neutrons utilisée est une SOLO 20 (nous n'avons pas de sonde gammadensimétrique disponible).

Temps de comptage pour l'étalonnage : chaque mesure est effectuée en temps LONG soit 32 secondes, avec deux répétitions par mesure.

Comptage moyen dans l'eau : 1012 (Ecart-type : 5)

Comptage dans l'étui : non effectué.

3. RESULTATS D'ETALONNAGE

Voir tableaux et graphiques ci-joint pour chacune des 2 stations :

- tableau 1 : caractéristiques analytiques du sol.
- tableau 2 : paramètres d'étalonnage.
- graphique, par couche de sol, de la teneur en eau volumique en fonction du comptage sonde corrigé.
- tableau des droites d'étalonnage par les deux méthodes et pour les deux stations.

4. OBSERVATIONS

A l'origine, nous avons réalisé pour les deux stations ci-dessus un étalonnage gravimétrique, mais par suite des faibles variations de l'humidité du sol à partir de 40 cm. de profondeur (infiltration réduite, sol gonflant...), nous avons eu recours à l'étalonnage Cadarache.

Les résultats présentés ici ne concernent, pour chacune des 2 stations, qu'un seul et même site sur lequel nous avons réalisé simultanément les deux types d'étalonnage. Nous possédons cependant des points supplémentaires d'étalonnage provenant d'autres sites, obtenus lors de l'installation des tubes de sonde. L'ensemble de ces résultats sera présenté dans un document plus complet que celui-ci.

J.P. Delhoume
02 Août 1988

Station HILARIA = tableau 1. Résultats analytiques du sol.

| Profondeur (cm) | Texture (%) 0 - 2 mm | | | | | pH eau | CaCO ₃ (%) | Gypse (%) | Conduct. Electrique (mS/cm) |
|-----------------|----------------------|-----------|----------------|-----------|----------------|--------|-----------------------|-----------|-----------------------------|
| | Argile | limon fin | limon grossier | sable fin | sable grossier | | | | |
| 0 - 6 | 25,9 | 24,9 | 6,3 | 32,1 | 7,1 | 8,3 | 17,2 | 6,4 | 1,8 |
| 10 - 18 | 48,2 | 16,5 | 4,6 | 22,5 | 3,9 | 8,3 | 21,6 | 8,3 | 0,7 |
| 28 - 36 | 48,7 | 15,5 | 4,4 | 22,2 | 5,1 | 8,4 | 21,4 | 8,5 | 2,0 |
| 45 - 55 | 51,8 | 15,0 | 4,2 | 20,1 | 4,6 | 8,4 | 20,9 | 8,8 | 4,2 |
| 65 - 75 | 42,5 | 26,3 | 8,5 | 14,4 | 2,5 | 8,2 | 20,3 | 16,9 | 11,9 |
| 95 - 105 | 24,3 | 51,8 | 10,8 | 9,7 | 0,5 | 8,4 | 20,9 | 7,4 | 12,9 |

| Profondeur (cm) | Carb. organ. (%) | Azote total (‰) | C/N |
|-----------------|------------------|-----------------|-----|
| 0 - 6 | 0,81 | 1,36 | 6,0 |
| 10 - 18 | 0,43 | 0,63 | 6,8 |
| 28 - 36 | 0,36 | 0,52 | 6,9 |
| 45 - 55 | 0,30 | 0,50 | 6,0 |

(Classes de texture: argile = 0 - 0,002 mm
 limon fin = 0,002 - 0,020 mm
 limon grossier = 0,020 - 0,050 mm
 sable fin = 0,050 - 0,200 mm
 sable grossier = 0,200 - 2,000 mm)

(Résultats exprimés en teneur par rapport à la terre fine (0-2 mm) totale)

| Profondeur (cm) | Densité apparente sèche | Densité réelle | Porosité (%) |
|-----------------|-------------------------|----------------|--------------|
| 10 | 1,44 | 2,60 | 44,6 |
| 20 | 1,57 | 2,61 | 39,8 |
| 30 | 1,63 | 2,63 | 38,0 |
| 40 | 1,64 | 2,66 | 38,3 |
| 50 | 1,56 | 2,64 | 40,9 |
| 60 | 1,48 | 2,63 | 43,7 |
| 70 | 1,47 | 2,58 | 43,0 |
| 80 | 1,56 | 2,57 | 39,3 |
| 90 | 1,60 | 2,65 | 39,6 |
| 100 | 1,67 | 2,66 | 37,2 |

Densité apparente = méthode du cylindre ($V = 150 \text{ cm}^3$).

Station HILARIA - Tableau 2 - Paramètres d'Etalonnage -

| Prof. (cm) | Granimétrie | | | | Cadarache | | | | | | D _{app} |
|---------------|-------------|-------|-------|---|----------------|----------------|------|------|-------|--------|------------------|
| | a | b | r | n | ε _a | ε _d | α | β | γ | δ | |
| 10 | 0,089 | -3,35 | 0,991 | 9 | 0,764 | 21,740 | 1,38 | 9,60 | 90,46 | -77,12 | 1,44 |
| 20 | 0,092 | -4,79 | 0,981 | 9 | 0,778 | 22,420 | 1,33 | 9,63 | 93,15 | -78,62 | 1,57 |
| 30 | 0,103 | -9,30 | 0,991 | 9 | | | | | | | 1,63 |
| 40 | 0,101 | -7,24 | 0,989 | 9 | 0,843 | 19,260 | 1,24 | 9,24 | 73,05 | -66,12 | 1,64 |
| 50 | 0,108 | -8,62 | 0,960 | 9 | | | | | | | 1,56 |
| 60 | 0,070 | 4,73 | 0,628 | 9 | 0,905 | 19,440 | 1,10 | 9,14 | 70,98 | -64,36 | 1,48 |
| 80 | | | | | 0,897 | 22,700 | 1,05 | 9,42 | 86,84 | -73,69 | 1,56 |
| 100 | | | | | 0,861 | 20,310 | 1,17 | 9,30 | 77,31 | -68,55 | 1,67 |
| 120 | | | | | 0,919 | 19,260 | 1,07 | 9,09 | 69,50 | -63,33 | 1,72 |

(Toutes les valeurs sont positives, sauf celles indiquées avec le signe -).

D_{app} = densité apparente sèche.

Prof. = profondeur, en cm.

a = pente

b = ordonnée à l'origine.

r = coefficient de corrélation.

n = nombre de couples (Humidité, comptage sonde).

ε_a = coefficient d'absorption en mm²/DGR.

ε_d = " de diffusion en mm²/GR.

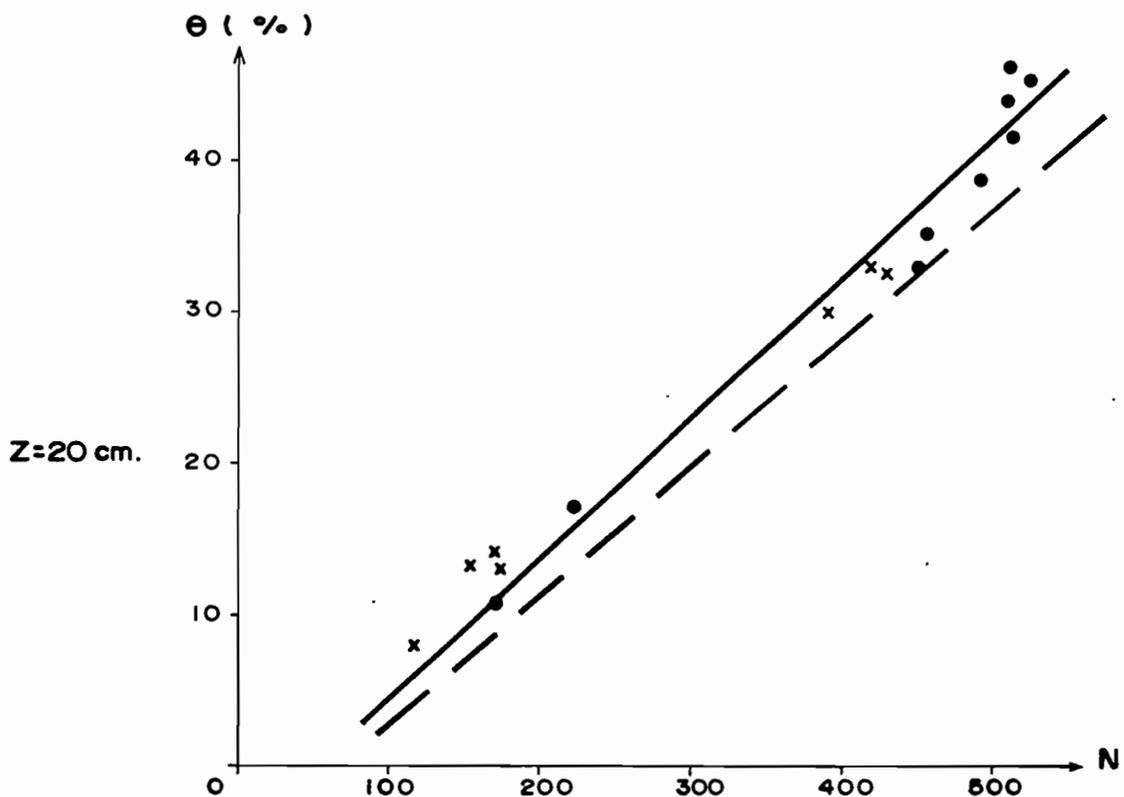
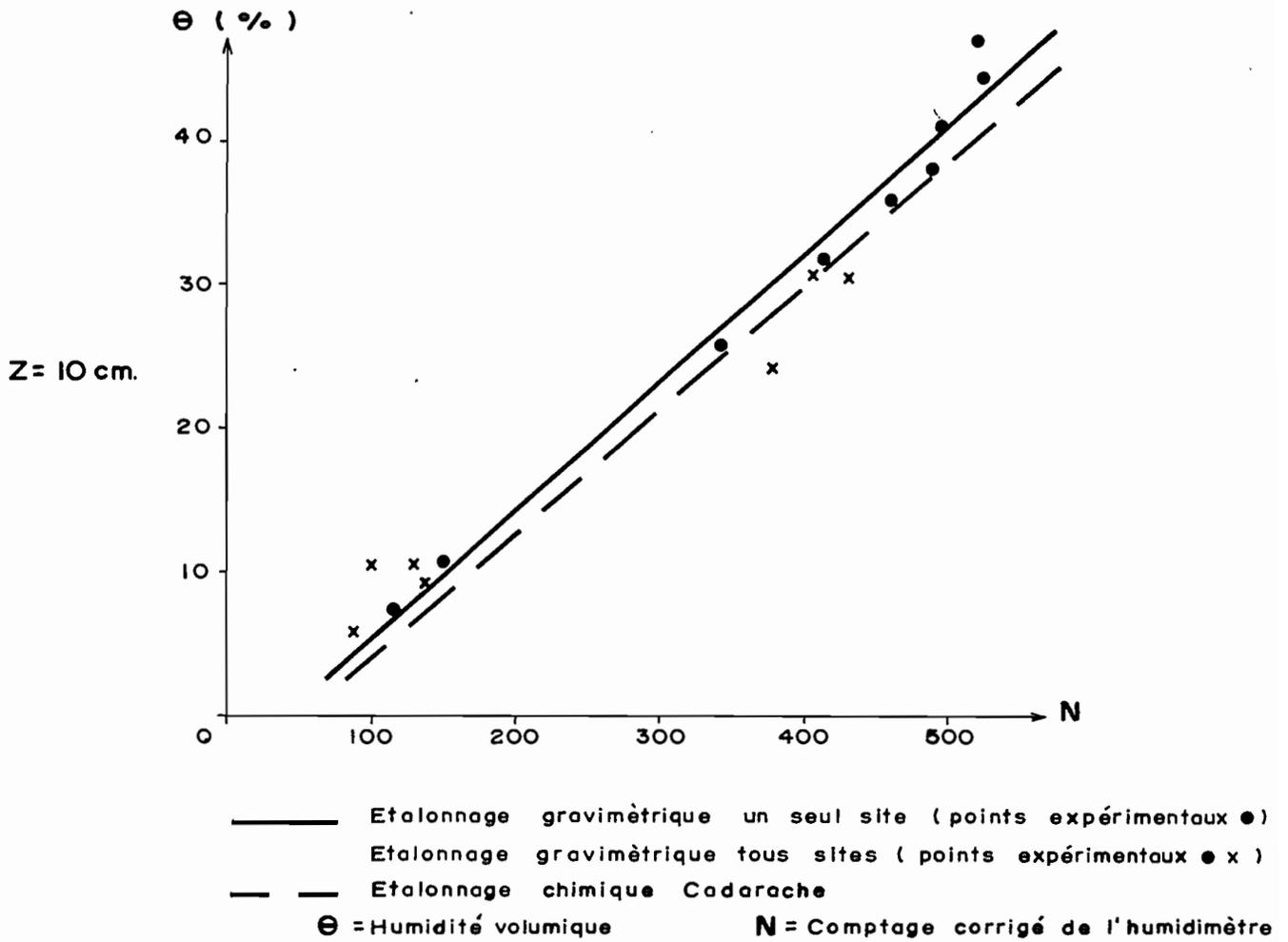
α, β, γ, δ = paramètres de l'équation d'étalonnage de la forme :

$$N = (\alpha D_s + \beta) \theta \pm \gamma D_s \pm \delta \quad \text{avec } N : \text{comptage sonde}$$

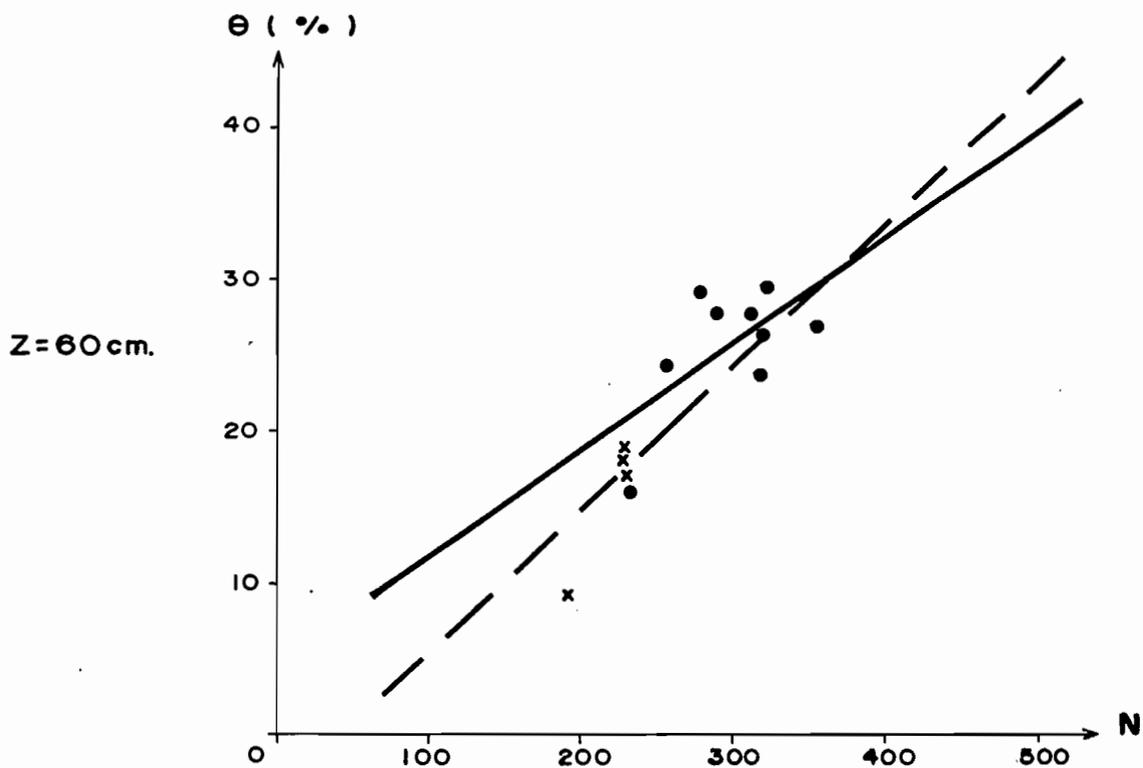
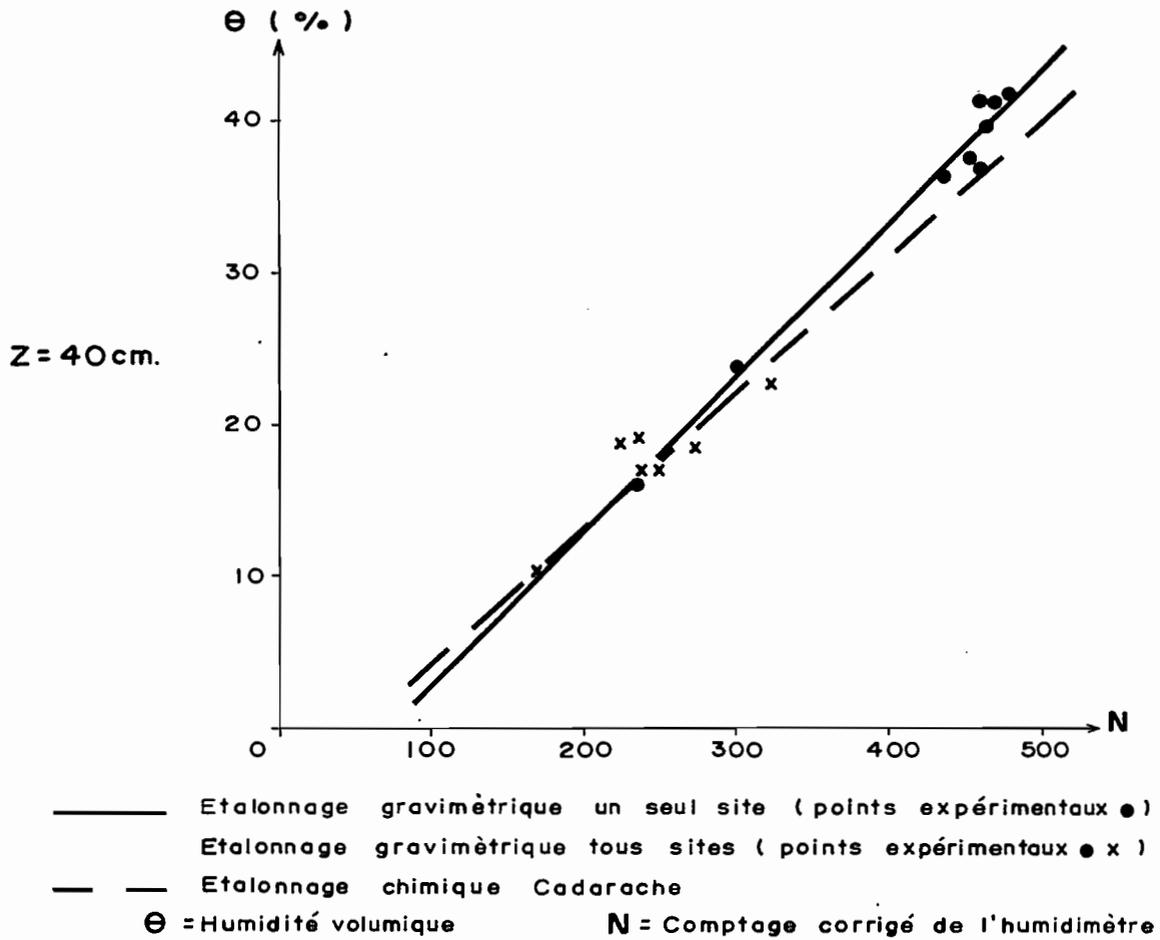
θ = humidité volumique pourcent

D_s = densité apparente sèche (méthode du cylindre).

STATION HILARIA 1 - ETALONNAGE
DE L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS



STATION HILARIA 1 - ETALONNAGE
DE L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS



Station SPOROBOLUS = tableau 1 -

Caractéristiques analytiques DU SOL.

| Profondeur (cm) | Horizon | Texture (%) | | | pH | Carbone org. (%) | Azote total (%) | C/N | CaCO ₃ (%) | Gypse (%) |
|-----------------|---------|-------------|-------|-------|-----|------------------|-----------------|-----|-----------------------|-----------|
| | | Argile | Limon | Sable | | | | | | |
| 0 - 10 | All | 40.2 | 45.0 | 14.8 | 8.2 | 0.62 | 0.080 | 7.8 | 23.6 | 11.8 |
| 20 - 32 | B21sa | 46.8 | 38.4 | 14.6 | 8.7 | 0.47 | 0.062 | 7.6 | 23.1 | 12.7 |
| 40 - 56 | B21sa | 45.5 | 40.3 | 12.3 | 8.7 | 0.34 | 0.050 | 6.8 | 23.6 | 13.7 |
| 80 - 96 | B22sa | 49.8 | 38.8 | 9.3 | 8.5 | | | | 26.8 | 14.5 |
| 132 - 148 | B23sa | 46.1 | 42.9 | 8.6 | 8.4 | | | | 27.5 | 14.2 |

| Profondeur (cm) | Horizon | Conduct. Électr. (mS/cm) | Capacité d'échange (mEq/100g) | Na échangeable (mEq/100g) | % Na échangeable |
|-----------------|---------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------|
| 0 - 10 | All | 24.0 | 22.3 | 6.8 | 30.5 |
| 20 - 32 | B21sa | 21.7 | 23.6 | 14.2 | 60.2 |
| 40 - 56 | B21sa | 17.6 | 24.8 | 18.8 | 75.6 |
| 80 - 96 | B22sa | 13.8 | 25.4 | 17.9 | 70.5 |
| 132 - 148 | B23sa | 12.0 | 24.9 | 17.3 | 69.5 |

| Profondeur (cm) | Densité apparente sèche |
|-----------------|-------------------------|
| 10 | 1,40 |
| 20 | 1,54 |
| 30 | 1,55 |
| 40 | 1,59 |
| 50 | 1,60 |
| 60 | 1,56 |
| 70 | 1,54 |
| 80 | 1,59 |
| 90 | 1,59 |
| 100 | 1,52 |

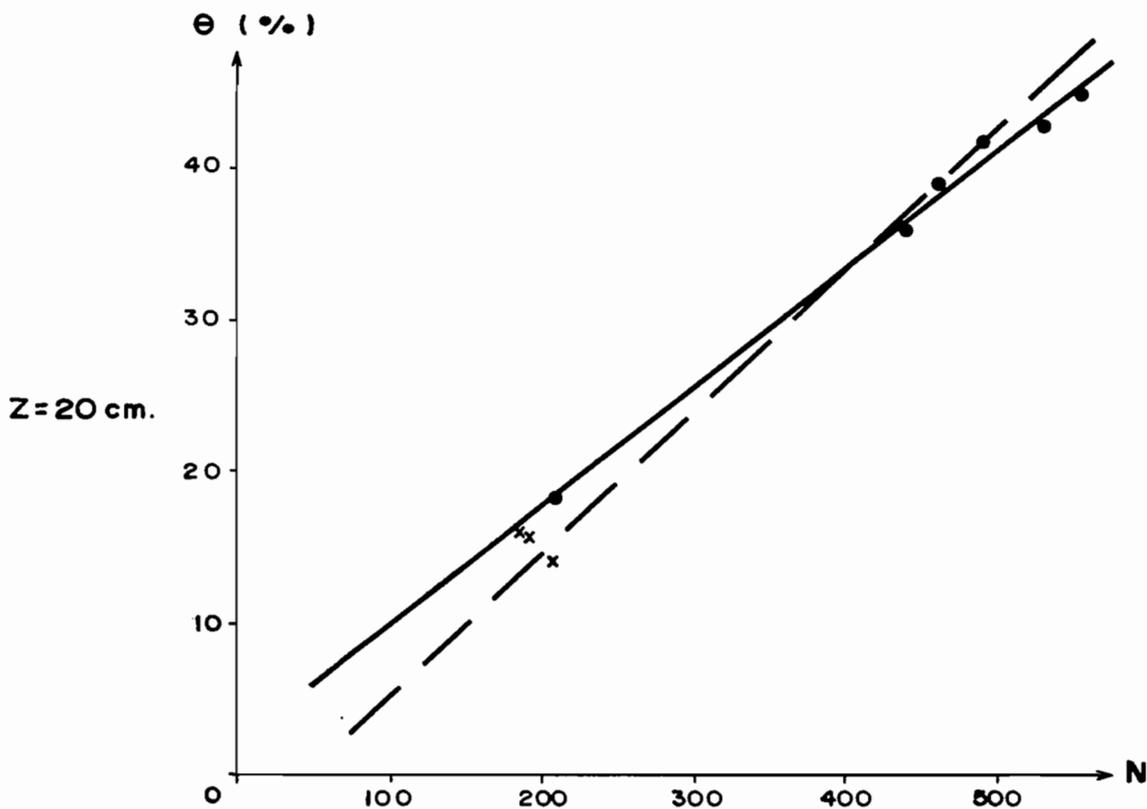
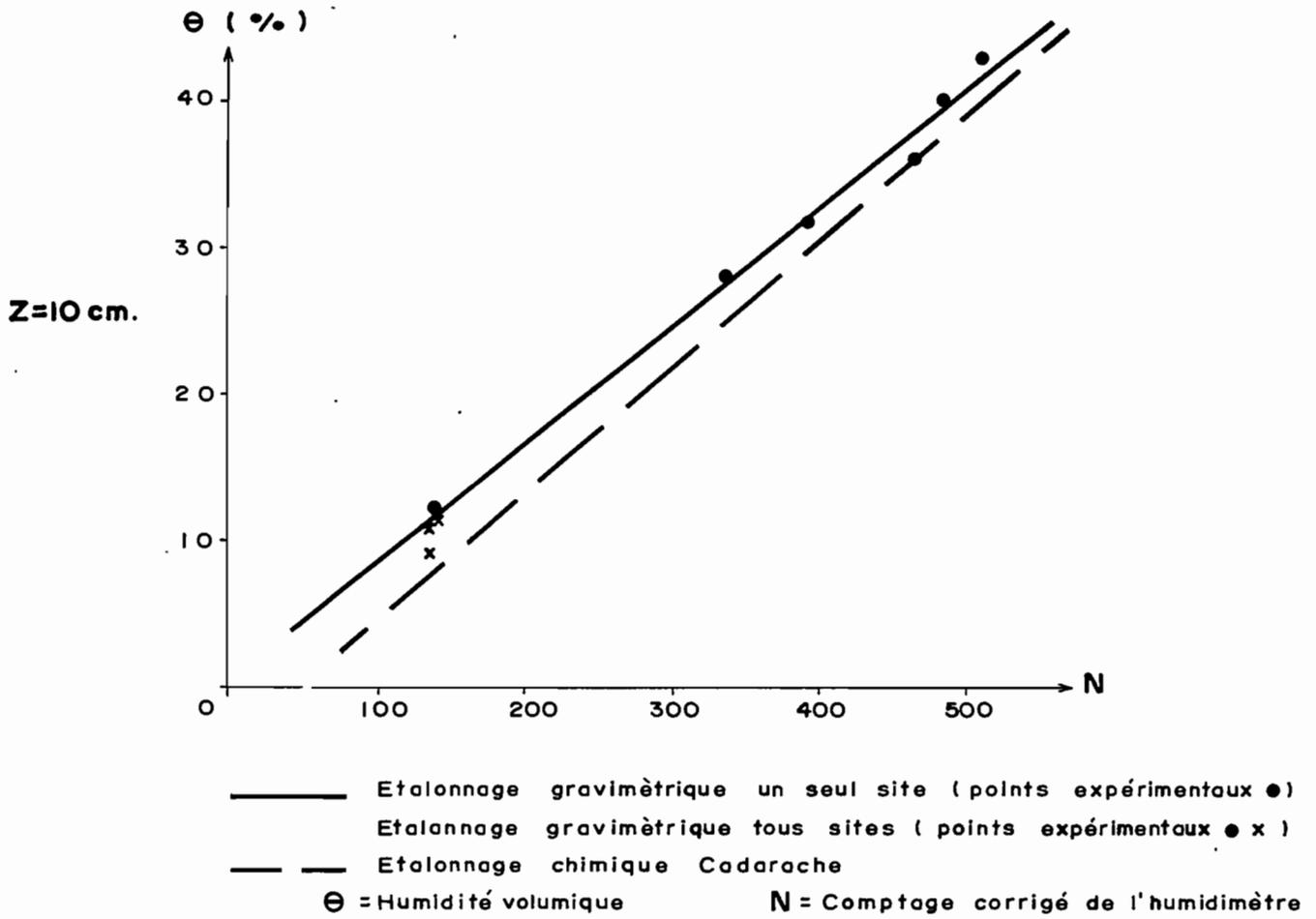
Densité apparente = méthode du cylindre (V = 145 cm³).

Station SPOROBOLUS - Tableau 2 - Paramètres d'Etalonnage.

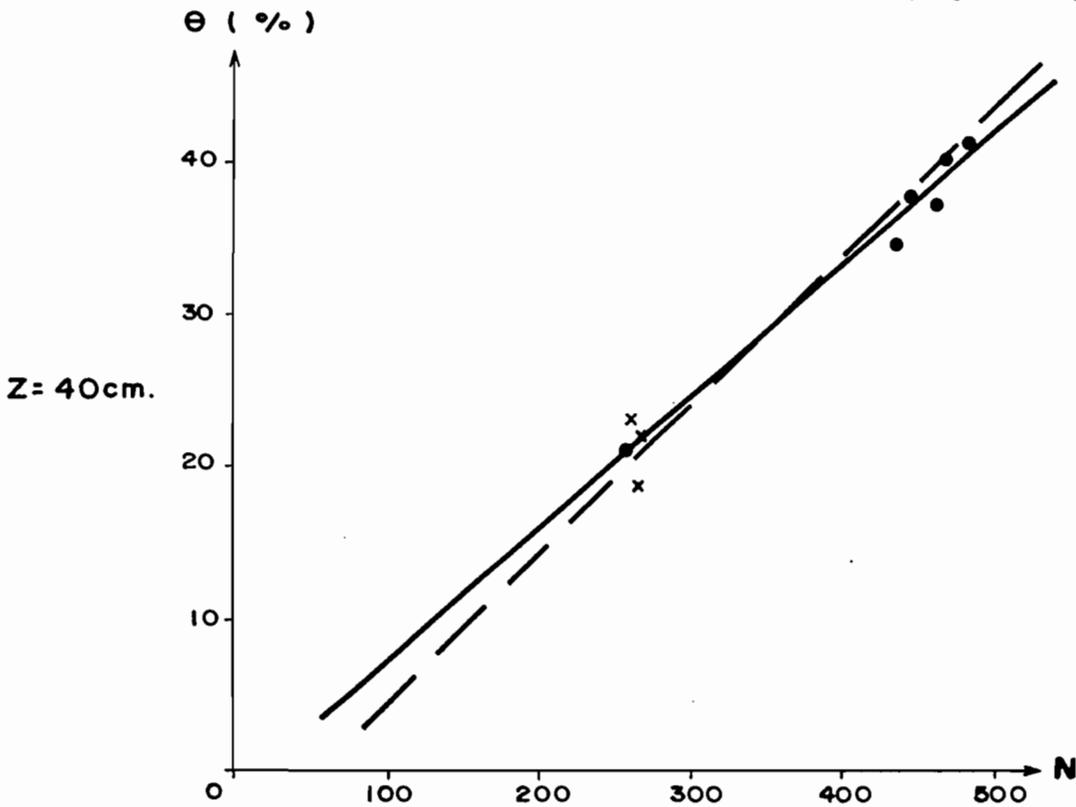
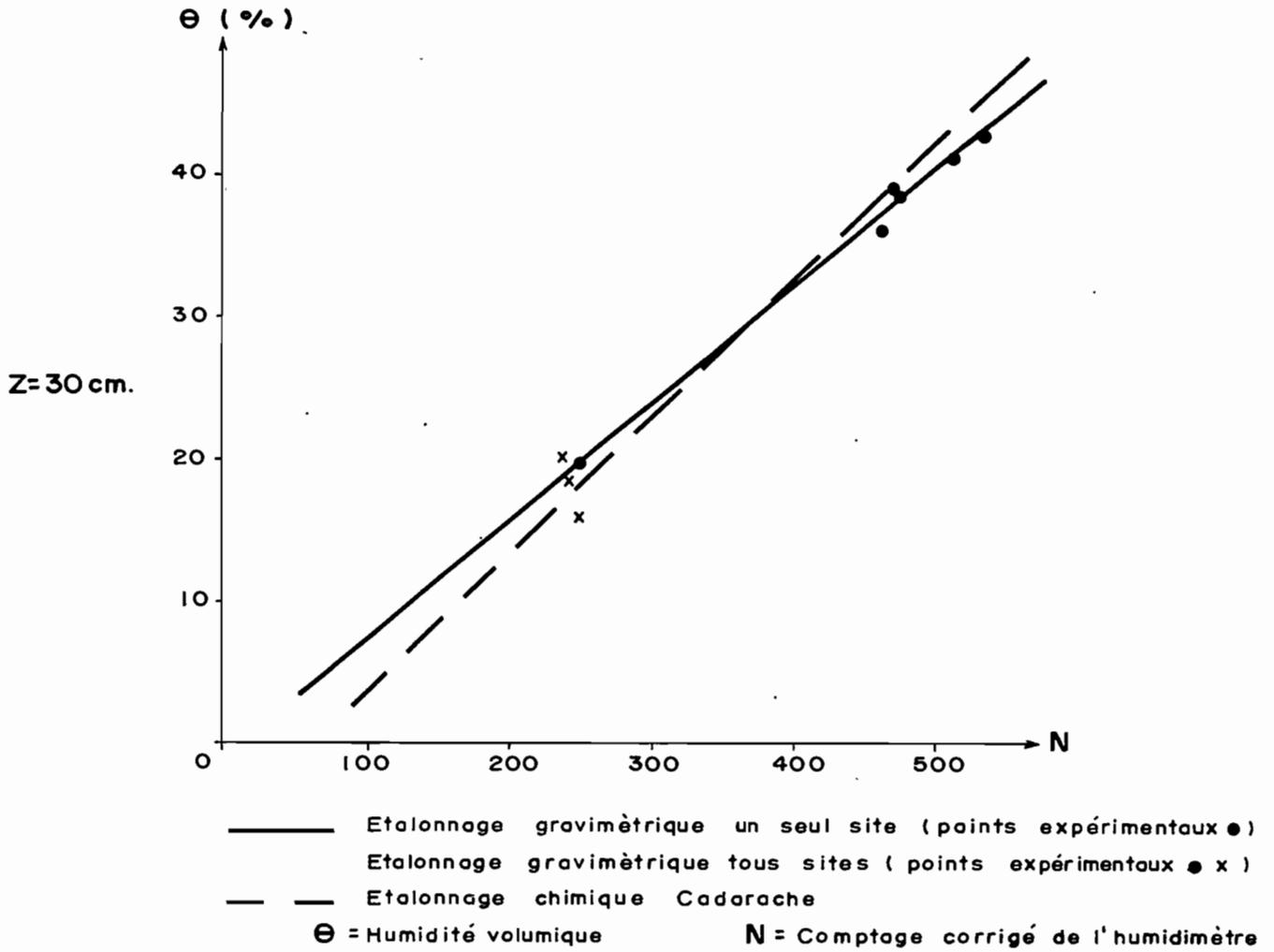
| Prof. (cm) | <u>Granimétrie</u> | | | | <u>Cadarache</u> | | | | | | Dapp |
|---------------|--------------------|--------|-------|---|------------------|--------|----------|---------|----------|----------|------|
| | a | b | z | n | Ea | Ed | α | β | γ | δ | |
| 10 | 0,080 | 0,831 | 0,995 | 6 | 0,743 | 20,530 | 1,48 | 9,53 | 85,33 | -74,23 | 1,40 |
| 20 | 0,078 | 2,261 | 0,996 | 6 | 0,908 | 18,930 | 1,10 | 9,09 | 68,52 | -62,91 | 1,54 |
| 30 | 0,082 | -0,614 | 0,996 | 6 | 1,034 | 23,870 | 0,76 | 9,23 | 84,78 | -70,99 | 1,55 |
| 40 | 0,087 | -1,449 | 0,987 | 6 | 1,111 | 23,200 | 0,65 | 9,02 | 78,32 | -66,51 | 1,59 |
| 50 | 0,085 | 0,361 | 0,978 | 6 | | | | | | | 1,60 |
| 60 | 0,088 | -0,632 | 0,980 | 6 | 1,368 | 24,490 | 0,31 | 8,58 | 73,22 | -60,62 | 1,56 |
| 80 | | | | | 1,376 | 23,320 | 0,32 | 8,48 | 68,84 | -58,15 | 1,59 |
| 100 | | | | | 1,271 | 24,020 | 0,42 | 8,74 | 75,03 | -62,77 | 1,52 |
| 120 | | | | | 1,242 | 24,450 | 0,44 | 8,84 | 77,79 | -64,65 | 1,47 |

(Pour explication des signes, voir tableau HILARIA).

STATION SPOROBOLUS 1- ETALONNAGE
DE L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS

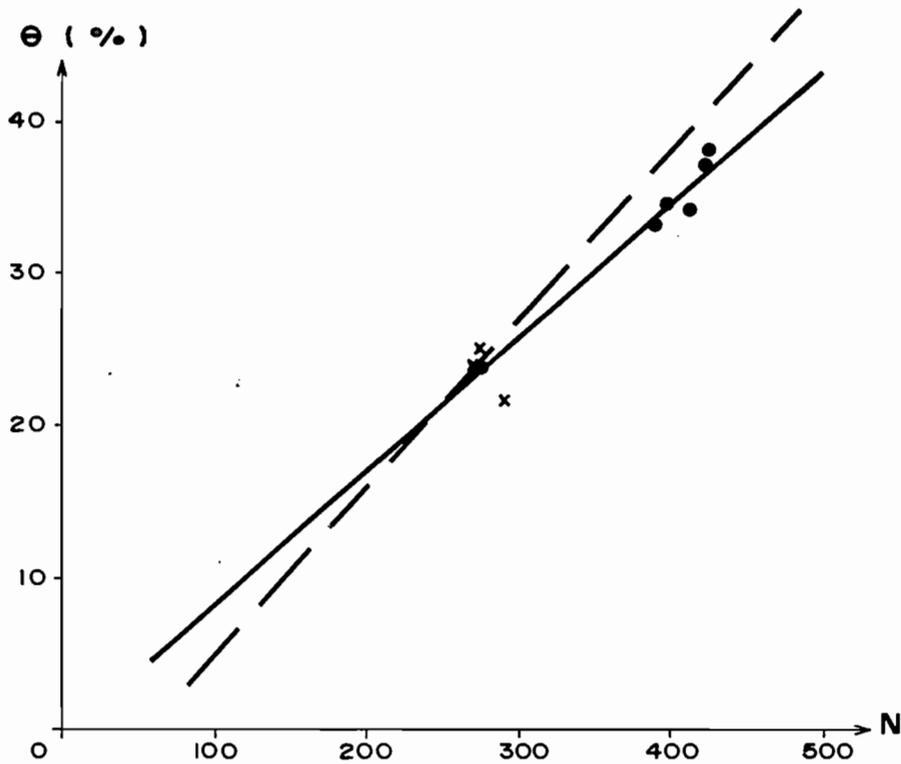


STATION SPOROBOLUS 1-ETALONNAGE
DE L HUMIDIMETRE A NEUTRONS



STATION SPOROBOLUS 1-ETALONNAGE
DE L'HUMIDIMETRE A NEUTRONS

Z = 60 cm.



- Etalonnage gravimétrique un seul site (points expérimentaux o)
 - Etalonnage gravimétrique tous sites (points expérimentaux o x)
 - - - Etalonnage chimique Cadarache
- Θ = Humidité volumique N = Comptage corrigé de l'humidimètre