

LE TRAVAIL DU SOL
de la zone
tropical semi-aride

Rapport final d'un projet de recherche

1984

lh



DEVELOPPEMENT DES CRITERES ET DES METHODES
POUR L'AMELIORATION DE L'EFFICACITE DE L'AMENAGEMENT
ET DES OPERATIONS DE PREPARATION DU SOL,
PARTICULIEREMENT DANS LES REGIONS ARIDES ET SEMI-ARIDES.

Rapport final des activités de recherche effectuées en Israël et en Hollande, sur les effets des travaux de préparation primaire, le contrôle et la modification des croûtes de surface sur la réaction des cultures, l'infiltrabilité des sols et l'efficacité des mesures de conservation de l'eau.

E. RAWITZ,¹ W.B. HOOGMOED² and Y. MORIN³

JUIN 1981

Traduit du texte anglais par

P. AVISSAR¹

Janvier 1984

¹ The Seagram Center for Soil and Water Sciences, The faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem, Israël.

² The Tillage Laboratory, The Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

³ The Soil Erosion Research Station, The Ministry of Agriculture, Israël.

TABLE DES MATIERES

1 - Préface	1
2 - Introduction	5
3 - Résumé	23
3.1 - Revue Bibliographique	25
4 - Travail Expérimental	49
4.1 - L'effet des opérations de préparation primaire sur la culture de la plante et sur le régime hydrique du sol sous conditions semi-arides	49
4.2 - Quelques aspects de la formation des croûtes de surface du sol dans les climats semi-arides	133
4.3 - Mesures de préparation et d'aménagement du sol pour la conservation de l'eau	153
4.4 - Infiltration de l'eau dans les sols à croûte	224
4.5 - Observations sur les activités d'un exploitant local	269
5 - Résumé et Conclusions Générales	288
6 - Perspectives sur l'Avenir	294
7 - Réalisations Supplémentaires de ce Projet	296

Références

Scanned from original by ISRIC - World Soil Information, as ICSU World Data Centre for Soils. The purpose is to make a safe depository for endangered documents and to make the accrued information available for consultation, following Fair Use Guidelines. Every effort is taken to respect Copyright of the materials within the archives where the identification of the Copyright holder is clear and, where feasible, to contact the originators. For questions please contact soil.isric@wur.nl indicating the item reference number concerned.

<u>Travail expérimental</u>	49
Expérience sur sorgho en Israël, 1978-1979	49
Effets des travaux de préparation du sol sur le régime hydrique du sol et sur le rendement d'arachide. Expérience au champ en Israël, 1979	106
Effet des travaux de préparation du sol sur le début de la croissance et le développement du millet. Expérience au champ au Mali, 1979	121
Influence de la profondeur du semis sur la germination et l'émergence du millet. Expérience au champ au Mali, 1979	126
Quelques aspects de la formation de croûtes de surface du sol dans les climats semi-arides	133
Expériences au laboratoire (Wageningen) et au champ (Israël)	136
Mesures de préparation et d'aménagement du sol pour la conservation de l'eau	153
Plan et méthodes expérimentales - expériences au champ - Israël	156
Plan et méthodes expérimentales - expérience au champ - Mali	163
Résultats et discussion - Mali et Inde	164
Résultats et discussion - Israël, 1979-1980	190
Résultats et discussion - Israël, 1980-1981	202
Infiltration de l'eau dans les sols à croûte	224
Expériences avec simulateur de pluie au Mali	227
Expérience avec simulateur de pluie en Israël	260
Observations sur les activités d'un exploitant local	269
<u>Résumé et conclusions générales</u>	288

1 - PREFACE

Ce projet a été proposé en 1975 par les Professeurs D. Hillel et H. Kuipers. Le but premier de ce projet fut d'examiner le rôle des méthodes traditionnelles et nouvelles de préparation du sol, sous des conditions arides et semi-arides, en rapport avec les besoins actuels du monde. Ceux-ci comprennent tout d'abord le fait qu'une grande partie de la population des "pays en voie de développement" vit dans la partie la plus sèche du globe, et c'est là que la poussée démographique, dépassant toute prévision, ainsi que des quantités de pluie insuffisantes et imprévisibles donnent une importance particulière à l'amélioration des méthodes de production alimentaire. Sous de telles conditions climatiques, la question-clé est d'augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau par sa conservation, ou par tout autre moyen capable d'augmenter la production par unité d'eau disponible. Ainsi, en ce qui concerne les travaux de préparation du sol, toute méthode qui améliorerait la germination, l'émergence, l'établissement des cultures et leur vigueur générale pourra augmenter la production tout en conservant l'eau.

Le second objectif se rapporte aux besoins en énergie des travaux de préparation du sol en relation avec leur profit supposé. Ce problème est commun aux pays en voie de développement ainsi qu'aux pays développés, bien que différents aspects soient considérés dans les deux cas. En agriculture non mécanisée, l'apport d'énergie demandé limite la surface à travailler pour une période donnée, généralement dictée par le climat; en agriculture mécanisée, l'augmentation constante des frais en énergie, en équipement agricole et en main d'oeuvre stimulent le développement de pratiques rentables de préparation du sol.

Ce projet fut donc destiné à étudier les conditions de sol non adaptées à l'exploitation, à rechercher des méthodes d'aménagement qui pourraient

permettre d'éviter de telles conditions, et à développer les méthodes de labour permettant une meilleure utilisation de l'eau, particulièrement par l'usage de matériel simple, ou répondant aux critères précédents, et dont l'emploi serait adapté à l'échelle agricole des pays en voie de développement.

Tout au cours de nos recherches, nous avons reçu l'aide de nombreuses personnes et d'organismes que nous tenons ici à remercier. L'aide financière principale nous a été donnée par le Directeur Général de la Coopération Internationale du Gouvernement Hollandais et par l'Université Hébraïque de Jérusalem. Une aide supplémentaire nous a été fournie par l'Agence Internationale à l'Energie Atomique, en particulier pour les recherches de la conservation de l'eau par les méthodes de préparation du sol.

Le Professeur Hillel, qui a dirigé ce programme du côté israélien pendant la période de planning, a dû se retirer pour des raisons personnelles avant la mise en oeuvre expérimentale. L'aperçu des problèmes scientifiques et des besoins des pays en voie de développement combinés par les Professeurs Kuipers et Hillel, a fourni les plans de travail tout au long de la recherche. Le Dr. L. Stroosnijder a participé scientifiquement à différentes étapes des plans du projet "Production Primaire au Sahel", ainsi que le Dr. I. Unver de l'Université d'Ankara qui était en 1979 invité en tant que chercheur à la Faculté d'Agriculture de Rehovot.

Plusieurs étudiants hollandais et israéliens ont travaillé sur ce projet pendant différentes périodes et, sans leur participation, il aurait été impossible de rassembler et d'analyser l'importante quantité de données. Nous voulons remercier pour leur aide Messieurs A.H. de Boer, D.T.I Kievit, A. Hazan, H. Etkin, A. Reznick, A. Pinkas, H. Swinkels et W. Rhebergen.

Une grande partie du travail d'organisation, de la préparation des instruments et des opérations aux champs a été fournie par les techniciens du

département de Sols et Eaux, Messieurs M. Margolin, G. Lipperman et feu Michael Kraus, qui ont contribué à la continuité de ce long projet, et nous les remercions pour leur inestimable aide et dévouement. Nos remerciements sont aussi dus aux techniciens de la "Station de Recherche sur l'Erosion" du Ministère Israélien de l'Agriculture pour leur travail d'organisation des expériences de ruissellement de surface, et pour leur travaux sur les simulateurs de pluie. Nous sommes également reconnaissants à Monsieur Meir Naveh, chef de l'Exploitation Agricole Expérimentale de Kiriat Gat, pour son assistance, et aux membres de la ferme d'exploitation agricole expérimentale de Gilat, appartenant à l'Organisation de Recherche Agricole.

Nous remercions particulièrement Monsieur Menachem Gutman et les autres membres du Kibboutz Alumim où s'est réalisée l'expérience de conservation de l'eau, et qui ont donné de leur temps, de leur complaisance, de leur bienveillance et de leur remarquable hospitalité à notre équipe.

A tous, nos sincères remerciements.

Notre espoir est que les efforts investis apporteront une contribution utile aux besoins mondiaux de productions alimentaire et de fibres.

Ce rapport comprend les plus importants résultats du projet, présentés de façon très détaillée. Certains aspects techniques et certaines données détaillées supplémentaires n'ont pas été inclus dans ce rapport pour des raisons de place, mais sont rapportés dans les Appendices.

Les travaux au champ ont été réalisés en Israël et au Mali par les membres de l'équipe. Les travaux en laboratoire et l'analyse des données ont été effectués en Hollande et en Israël. Nous avons profité du climat semi-aride de type méditerranéen d'Israël pour cultiver des cultures d'été du même type que celles qui poussent dans la région du Sahel de l'Ouest de l'Afrique, où les pluies naturelles d'été ont été remplacées par une

irrigation contrôlée. Les expériences effectuées en Israël se sont concentrées sur les aspects du problème exigeant un équipement sophistiqué, un personnel technique qualifié et un équipement motorisé pour réussir dans les travaux de recherche. Cependant, durant toute la recherche, nous avons pris en ligne de compte que l'objectif final était d'améliorer la production dans les pays en voie de développement qui exigent des solutions simples. Ainsi, les méthodes appliquées ont un lien étroit avec les techniques qui pourraient être adaptées, même si elles ne peuvent pas être directement transférées aux conditions existant dans les pays en voie de développement.

2 - INTRODUCTION

Il semble difficile de donner une image précise du degré et de l'étendue de la crise dans le monde actuel, et encore plus difficile de prévoir les tendances futures de l'accroissement de la population et de l'approvisionnement, même si la lecture des journaux ne laissent aucun doute sur le fait qu'une grande partie du monde d'aujourd'hui est constamment menacée par la faim. Etant donné le nombre de personnes concernées, et vu le nombre de raisons objectives et subjectives, telles que les disponibilités d'embarquement, le temps exigé pour transporter de grandes quantités de nourriture, les difficultés de distribution intérieure ainsi que le complexe jeu des forces économiques et politiques, même un apport supplémentaire convenable de nourriture dans une certaine partie du globe n'est pas une garantie suffisante contre la faim dans d'autres endroits. C'est pourquoi, il est de toute urgence de développer les moyens de fournir un approvisionnement plus grand et plus sûr dans ces régions constamment au bord de la crise. Un grand pourcentage des populations qui se trouvent face à la crise vit dans les zones climatiques semi-arides, et c'est là que les pressions de l'accroissement démographique actuel et futur se combinent avec des pluies insuffisantes et incertaines qui rendent particulièrement difficile l'augmentation de la production.

Bien que les conditions climatiques soient le facteur limitant essentiel de production alimentaire, dans bon nombre de cas il existe des facteurs limitants d'un autre ordre qui, une fois éliminés, peuvent entraîner un plus grand accroissement de la production. Ces facteurs peuvent être l'absence d'un marché économique, le manque d'une infrastructure nécessaire et de capitaux pour l'acquisition d'un outillage perfectionné, de semences et d'engrais ainsi que beaucoup d'autres facteurs économiques, sociaux et

culturels. Cependant, l'objectif technologique majeur, est d'augmenter l'efficacité de l'utilisation de l'eau nécessaire aux cultures. Cette efficacité étant définie comme production par unité d'eau, tout facteur qui augmenterait la valeur de ce rapport améliorerait l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

Puisqu'une "unité d'eau" peut être définie de plusieurs façons, une des questions qui se posent est de savoir si la méthode permettant d'accroître la production alimentaire implique l'augmentation des zones cultivables ou l'accroissement de la production par unité de surface. Il n'existe probablement pas de réponse unique à cette question, mais un bon nombre de faits nous indique que l'augmentation de la production par unité de surface constitue une partie essentielle de la solution. Dans de nombreux cas, les méthodes d'utilisation des terres ne laissent pas aux cultivateurs la possibilité d'en exploiter d'autres. Dans d'autres cas, l'augmentation de la production par augmentation des zones cultivées ne couvre pas les frais d'exploitation de ces zones. De plus, si les méthodes d'exploitation traditionnelles sont employées, le temps supplémentaire, la main d'oeuvre et l'énergie nécessaires pour cultiver de plus grandes surfaces par famille ne sont tout simplement pas accessibles.

Puisque les zones semi-arides sont sujet d'intérêt, la place occupée par l'irrigation doit y être rectifiée. Il est hors de doute qu'une irrigation appropriée peut entraîner une augmentation spectaculaire de la production, et c'est en effet une pratique très répandue dans les zones semi-arides et arides, où cela est d'une importance fondamentale pour l'existence de l'agriculture. Une agriculture d'irrigation appropriée sera introduite et maintenue là où ce sera possible. Cependant, il est clair qu'il existe de grandes surfaces dans les zones semi-arides qui ne sont pas

irrigables, du moins dans un avenir proche, bien qu'elles soient appropriées à la production alimentaire. La plus grande partie de l'approvisionnement mondial de pain, de graines et de légumineuses pour la consommation humaine provient de zones où l'eau nécessaire à l'agriculture est naturellement fournie par les pluies, et cette situation est un fait établi. De même, presque tout le bétail élevé dans les zones semi-arides dépend pour son alimentation des grains de terres sèches et de pâturages. Donc, tout plan d'amélioration de l'approvisionnement alimentaire dans les zones semi-arides est inextricablement lié à la possibilité d'augmenter l'efficacité d'une agriculture sous pluie. Ceci rapporte l'attention sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau.

Un des concepts classiques en rapport avec l'efficacité de l'utilisation de l'eau est le rapport de transpiration, défini comme la quantité d'eau transpirée par une plante par unité de masse de matière sèche produite. Ainsi, l'efficacité d'utilisation de l'eau est considérée comme la matière sèche produite par unité d'évapotranspiration, et la "production utile" peut être remplacée par la production de matière sèche. Autrefois en agriculture irriguée, c'était presque un réflexe conditionné d'essayer d'utiliser moins d'eau afin d'augmenter l'efficacité. Cette méthode est généralement valable dans la mesure où l'eau est gaspillée, c'est-à-dire lorsque la quantité d'eau pénétrant dans la zone racinaire est plus grande que la quantité nécessaire à la plante. Ce n'est généralement pas le cas pour les exploitations agricoles en région sèche ("dryland") dans les régions semi-arides. Un autre moyen pour augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau est d'améliorer la récolte pour un approvisionnement d'eau donné. Parmi les facteurs qui peuvent contribuer à cela, on peut mentionner le choix des cultures, l'amélioration des variétés, la protection des plantes, l'épandage des engrais appropriés et

les pratiques de labour améliorées. D'autres mesures, ainsi que celles précédemment citées, sont appropriées à l'exploitation des régions sèches. Cependant, il ne faut pas oublier qu'après l'optimisation de tous ces facteurs, un approvisionnement insuffisant en eau dû au climat, reste le facteur limitant de la production des cultures dans la zone semi-aride.

En cas d'approvisionnement insuffisant en eau, il est évidemment désirable de l'augmenter, ou du moins de le rendre plus efficient. Une des possibilités est de changer le rapport entre l'évaporation et la transpiration qui sont les constituants de la perte par évapotranspiration, afin qu'il y ait plus d'eau disponible pour la transpiration. En termes pratiques, cela signifie la suppression de l'évaporation, ce qui en principe est réalisable en changeant les propriétés physiques de la surface du sol, c'est-à-dire par des travaux de préparation et/ou par l'application de produits chimiques, communément appelés agents de conditionnement du sol.

Une autre façon possible d'augmenter l'approvisionnement en eau disponible aux cultures est applicable à un phénomène assez courant dans les régions semi-arides, à savoir l'excédent temporaire de pluie (qui n'arrive pas à pénétrer dans le sol) bien que la quantité de pluie saisonnière soit insuffisante. Ainsi le profil du sol n'est pas suffisamment humidifié, même avec un excédent de pluie, à cause des faibles propriétés d'infiltration. L'infiltrabilité du sol peut être améliorée en modifiant la structure de la surface du sol, à nouveau par des moyens mécaniques ou chimiques.

Dans ce cas, la définition conventionnelle de l'efficacité de l'utilisation de l'eau reste inchangée, mais l'apport total est augmenté. Si cependant le dénominateur de l'équation d'efficacité est redéfinie de telle façon que l'ensemble des pluies représente le terme d'approvisionnement en eau, on obtient l'équation classique de l'efficacité de l'approvisionnement en

eau utilisée dans les sciences d'irrigation, et la valeur de cette efficacité est définie comme le rapport entre le stockage de l'eau pénétrant dans la zone racinaire et la totalité d'eau appliquée à la surface du sol. Ce terme d'efficacité peut certainement être accru par l'augmentation de l'infiltration et par l'empêchement du ruissellement de surface.

En considérant d'une façon générale le problème de l'économie de l'eau des cultures sous des conditions semi-arides, il faudrait mentionner la possibilité de contrôle du rapport de la transpiration de la plante. D'une part, il n'y a pas de preuve physiologique évidente que la transpiration per se soit essentielle au processus de croissance de la plante. Un point évident est la végétation souterraine excessive dans les jungles tropicales, où les taux de transpiration sont faibles à cause de la forte humidité et la faible radiation solaire due à l'ombrage. Les adaptations morphologiques de la végétation du désert dont l'effet est de réduire la transpiration sont un autre exemple. Cependant, il faut se rappeler que ces deux types de végétation sont le résultat d'une très longue évolution naturelle, et aussi que ces communautés de plantes ne produisent pas nécessairement de hauts rendements. De plus, la plupart des cultures agricoles sont des plantes mésophytes qui ne possèdent pas de propriétés spéciales d'adaptation. Il existe néanmoins une place pour la sélection de cultures adaptées, et pour l'amélioration des variétés par des techniques d'amélioration des plantes, afin de rendre les cultures plus tolérantes à la sécheresse, et ceci a déjà été réalisé. Un exemple bien connu est la supériorité du sorgho sur le maïs, en ce qui concerne la production de graines dans la zone semi-aride. Le fait est que dans beaucoup de cas où des recherches ont été faites, la production de matière sèche par différentes cultures sous des conditions de "champs ouverts" et d'approvisionnement sub-optimal en eau, est une fonction

plus ou moins linéaire de la transpiration. Des essais qui visaient à améliorer artificiellement le rapport de transpiration par l'application d'anti-transpirants n'ont pas véritablement réussi, car ils provoquent généralement une baisse dans les récoltes. Un des problèmes est que la transpiration a pour rôle de régulariser la température des feuilles, et si la transpiration est limitée artificiellement, les feuilles dépassent la température optimale, ce qui entraîne un changement dans le rapport entre la photosynthèse et la respiration, au détriment de la première. Un élément qui revient souvent au cours de cette discussion est le rôle de la préparation du sol dans l'optimisation de l'environnement des cultures, et c'est effectivement le sujet principal de ce travail de recherche rapporté ici. La préparation du sol peut être définie comme les manipulations mécaniques du sol ayant pour but d'améliorer les conditions qui influencent la production. Cela peut inclure, par exemple, une certaine quantité de restructuration de la terre, mais on n'inclut généralement pas les opérations de déplacement de terre qui provoquent des changements majeurs de glissement ou d'élévation de terrains. Ce sont les travaux de préparation du sol qui sont généralement les plus coûteux, et qui demandent le plus d'apport en énergie dans les exploitations de terre sèche ("dryland farming"), mais ils viennent après l'approvisionnement en eau dans les exploitations d'agriculture irriguée. Puisque le travail de préparation est pratiqué dans tous les systèmes d'exploitation agricole (à l'exception de quelques vergers) et alors que les buts de la préparation peuvent être énoncés de façon concise, l'utilité et l'efficacité actuelles de différentes formes de préparation sous des conditions données sont loin d'être bien comprises. Les pratiques varient d'une extrême à l'autre: pas de préparation du tout, préparation minimale et à un travail intensif et répété du sol pendant une saison de culture. Du

fait du grand nombre de conditions rencontrées, toute pratique entre ces extrêmes peut être optimale sous certaines conditions. Malheureusement, le criterium du choix des moyens appropriés est imparfait, et en fait, les décisions actuelles sont basées sur le principe du "procédé par tâtonnements". L'importance de faire un choix opportun ne réside pas seulement dans les conséquences économiques à court terme, mais aussi dans le fait que certaines méthodes de préparation peuvent provoquer une détérioration progressive et difficilement perceptible de la structure du sol. Ainsi la tendance à l'utilisation de tracteurs plus lourds, plus rapides et d'un outillage dont l'action est plus profonde et plus agressive, peut causer un effondrement total et le compactage du sol, ce qui peut entraîner de sérieuses difficultés, qui sont difficiles à réparer une fois causées. Ce danger, en plus de l'augmentation constante des frais en énergie, exige la réexamination des pratiques de préparation du sol spécifiques à l'agriculture hautement mécanisée, intensive et techniquement efficace des pays occidentaux. Par contre, dans les régions en voie de développement où l'agriculture est généralement à un bas niveau de mécanisation et de motorisation, la préparation du sol peut être le facteur limitant de la production. Les plus simples raisons sont le besoin de préparer le terrain pour la récolte prochaine en un temps court et approprié, et le besoin de lutter contre les mauvaises herbes auquel cas la grandeur du terrain que l'exploitant peut cultiver est limitée par les investissements en main d'oeuvre et en animaux de labour. En plus du fait qu'on se rend compte de plus en plus que le transfert direct de technologie des pays développés, du point de vue technologique, aux pays en voie de développement peut échouer pour de multiples raisons, dans le cas des pratiques de préparation du sol, il y a une raison supplémentaire et particulière de prêter attention. Les économies techniquement avancées sont

toutes localisées dans les zones tempérées plus ou moins humides, et même si les techniques de préparation du sol ont été optimisées, elles sont le mieux adaptées aux conditions du sol et du climat de ces zones. En fait, on en sait beaucoup plus sur les objectifs et les effets des travaux de préparation du sol dans ces régions, que pour les zones semi-arides, et ceci est une bonne raison de croire que les besoins sont différents. Dans les régions tempérées, on accorde en général trois buts à la préparation du sol: amélioration de la structure du sol, lutte contre les mauvaises herbes et incorporation de matières organiques. Une fonction supplémentaire, pas assez bien comprise, est le contrôle du régime hydrique du sol, qui peut comprendre soit la conservation de l'eau par le contrôle de l'évaporation et de l'infiltration, soit le drainage en vue d'améliorer l'état d'aération de la zone racinaire.

En zone semi-aride, la lutte contre les mauvaises herbes est certainement un des buts de la préparation du sol, mais les buts essentiels sont encore étudiés, et doivent certainement être traités de façon différente qu'en climat humide. D'autre part, la possibilité du contrôle de l'humidité du sol est d'une très grande importance.

La meilleure façon de réévaluer les buts des opérations de préparation du sol en climat semi-aride est d'étudier les relations entre le climat, les propriétés du sol et les besoins fonctionnels de la plante. Un fait tout particulier au climat semi-aride est que la saison des pluies fait suite, après une brusque transition, à une longue période de sécheresse. Les types communs de sol qui ont une vaste distribution géographique sont des terres grasses alluviales argileuses, souvent riches en montmorillonite, qui provoquent la contraction et le gonflement, et la formation de vertisols typiques contenant généralement un pourcentage élevé d'agrégats stables; des terres sableuses contenant une quantité importante de limon, parfois d'origine

éolienne et une fraction d'argiles constituée de kaolinite (souvent aussi d'illite) mais non de montmorillonite, dont la structure est très faiblement développée et très instable et qui a une très forte tendance à la formation de croûte et à une faible infiltrabilité; des sables argileux et à fine structure qui ont tendance à se tasser et sont souvent recouverts d'une fine croûte hydrophobe. Ces trois types de sol ont un très faible contenu de matière organique en comparaison avec les sols des zones plus tempérées. Tous sont difficiles à labourer à sec, même avec des outils puissants, et sont souvent impossibles à labourer manuellement ou à l'aide d'animaux.

Pour l'exploitant non mécanisé, la seule solution pour la préparation du sol est d'attendre que le sol soit ramolli par les premières pluies. Dans de nombreux cas, il fait face à un aigu problème de temps pendant lequel il doit labourer le sol et planter ses cultures avant que les pluies suivantes ne rendent les sols plus lourds et le labour impossible; cependant dans les conditions typiques de climat semi-aride, le fait de retarder la mise en culture peut considérablement diminuer les rendements. Le cultivateur motorisé peut, bien entendu, labourer des étendues plus vastes mais lui aussi est limité par le temps et peut labourer le sol alors que celui-ci n'est pas au degré d'humidité adéquat, provoquant ainsi le compactage, ce qui est tout à fait contraire à l'amélioration de la structure du sol.

Quels sont donc les buts principaux de la préparation du sol dans ces conditions?

Premièrement, il est essentiel de fournir un lit de semence, c'est-à-dire un espace dans le sol où il est physiquement possible de placer la graine, et qui peut remplir les conditions nécessaires à la germination de la graine. Les propriétés exactes de ce lit de semence peuvent varier suivant le type de graine et sa taille, suivant les propriétés du sol, et pour une large part,

suivant la méthode utilisée pour déposer la graine dans le sol. Ceci est un point important auquel on n'attache pas l'attention nécessaire, car les propriétés exigées par le lit de semence sont souvent en contradiction avec les conditions requises après l'ensemencement, mais le lit de semence est préparé uniquement de façon à remplir les exigences de tel ou tel système de culture.

Chronologiquement, le second but de la préparation du sol est d'offrir les conditions favorables à l'établissement de la jeune pousse, c'est-à-dire une quantité et une température adéquates d'eau et d'air dans la zone radiculaire, et des conditions de surface qui facilitent l'émergence de la pousse à la surface du sol. Pour la plupart des cultures, il n'est pas envisageable de créer un environnement propice à la formation des racines par voie de labour. Seulement des circonstances tout à fait exceptionnelles peuvent justifier les très rares cas de labour en grande profondeur (jusqu'à 200cm).

La lutte contre les mauvaises herbes peut être effectuée pendant le travail préparatoire, et aussi par des opérations pendant la période de croissance de la plante. Sous les tropiques, la pousse des mauvaises herbes est plus rapide que dans les zones tempérées et peut déterminer le sort de la culture. Le type de climat joue un rôle important dans le choix du système pour lutter contre les mauvaises herbes: en période sèche, il est efficace de couper les racines, tandis qu'en période humide, il est plus efficace d'enterrer les mauvaises herbes. Une lutte efficace contre les mauvaises herbes par des moyens de labour simples et appropriés peut aussi considérablement réduire le travail demandé pendant la période des récoltes.

Le contrôle de l'humidité du sol est un but essentiel des travaux de préparation du sol dans les zones semi-arides, et n'est pas d'ordre

chronologique. C'est un problème très complexe du fait qu'on ait à modifier plusieurs processus différents, à des moments différents dans le même champ. Plusieurs cas typiques seront discutés, mais il faut se rappeler que les conditions et les méthodes de récoltes diffèrent dans les trois types principaux de climat semi-aride (voir revue bibliographique).

1) Augmentation de l'infiltration: il a déjà été mentionné plus haut qu'un excès de pluie peut provoquer une rétention et un ruissellement de surface dans les zones semi-arides, même si le déficit en humidité du sol n'a pas été comblé. Ceci pose un problème non seulement de perte d'eau, mais aussi de dégâts dus à l'érosion. La raison en est que le taux des précipitations dépasse l'infiltrabilité du sol, et, en effet, d'intenses quantités de pluies et une faible infiltrabilité du sol sont des propriétés courantes de cette région climatique. Seule l'infiltrabilité du sol est contrôlable en potentiel. Quelles que soient les méthodes de conservation de l'eau utilisées, aucune ne peut être efficace à moins que l'eau ne soit conservée dans le sol. De plus, l'augmentation de l'infiltration est apparemment l'une des approches les plus prometteuses de la conservation de l'eau. D'une façon générale, l'infiltration peut être augmentée par:

- a) l'amélioration de la structure de toute couche du sol qui constitue le "goulot de la bouteille" dans le processus d'infiltration, soit d'une façon permanente en modifiant les propriétés même du sol, soit de façon temporaire par le travail du sol;
- b) un travail en profondeur pour "ouvrir" le sol, ce qui peut avoir pour effet d'augmenter légèrement la capacité de stockage apparente du sol, mais surtout d'augmenter la surface d'infiltration. Une des techniques utilisées en rapport avec l'ouverture de canaux verticaux dans le sol,

est de remplir avec des déchets végétaux découpés, ou "paillage vertical", ayant pour but d'empêcher le canal de se refermer et de conserver le contact avec l'eau fraîche de la surface du sol. Une conséquence supplémentaire de cette technique est peut être l'amélioration de la structure du sol grâce à la décomposition éventuelle de cette matière organique;

- c) la prévention de la formation d'une croûte, ce qui conserve donc au sol son infiltrabilité naturelle, en stabilisant la surface du sol et/ou en la protégeant de l'impact des gouttes de pluies. Ceci n'est pas réalisable en pratique, car l'amélioration de la structure du sol exige l'utilisation d'agents chimiques de conditionnement du sol, qui sont à la fois problématiques et chers, ou bien l'utilisation de grandes quantités de matière organique qui soient incorporées dans le sol, ou qui servent de paillage du sol. De telles quantités de matière organique ne sont généralement pas accessibles en région semi-aride, et quand elles le sont, les lourds paillages de surface constitués de déchets organiques présentent des problèmes techniques supplémentaires. Ceci ne doit pas éliminer l'utilisation des déchets organiques pour la surface du sol, mais ceux-ci ont probablement d'autres buts et d'autres conséquences;
- d) l'augmentation du volume de rétention en surface, en augmentant la rugosité de la surface. On peut augmenter le stockage de dépression de plusieurs façons en créant un système de dépressions, distribuées au hasard ou ordonnées d'une façon particulière. Les principales propriétés de ces mesures sont les suivantes: elles augmentent les quantités de pluies en excès pouvant être stockées à la surface du sol; leur efficacité ne dépend pas d'une amélioration permanente de la

structure du sol; en limitant le ruissellement de surface, elles limitent les dégâts dus à l'érosion; elles font partie intégrante des opérations de labour ou peuvent y être combinées facilement, avec un outillage simple; elles sont adaptables au travail manuel, au travail animal et à un équipement motorisé; ces méthodes existent dans un grand choix, qui permet de s'adapter aux différentes cultures, saisons et quantités de pluies prévues. Les cas suivants sont des exemples de l'éventail des possibilités: un champ peut être grossièrement labouré et motteux pour une période de jachère pendant la saison pluvieuse; des levées ou des rigoles peuvent être construites dans une rangée de culture pendant la saison pluvieuse, et peuvent également être utilisés dans un champ à levées en jachère; des terrasses à large base peuvent être construites et ensemencées de cultures annuelles ou pérennes et, dans certains cas, peuvent inclure des systèmes de levées sur ces terrasses.

- 2) Suppression de l'évaporation. Puisque le contrôle de la transpiration a déjà été traité plus haut, ici il s'agit seulement du contrôle de l'évaporation du sol nu. Ceci a fait l'objet de nombreuses recherches, dont les résultats, d'un point de vue pratique, ont été assez décourageants. On sait déjà qu'une couche de surface ayant les propriétés de diminuer le ruissellement de surface de l'eau et même le transfert de vapeur, peut réduire de façon appréciable le taux d'évaporation du sol. De tels paillages pourraient être constitués de matériaux granuleux stables qui ne soient pas des éléments naturels du sol (gravier, copeaux de bois, granules de plastique), d'agrégats de sol stabilisés et de préférence hydrophobes, de déchets végétaux, et de films imperméables, ou couverture plastique, en matériaux bitumeux atomisés, en feuilles de métal ou en

métal-même. Toutes ces méthodes ont déjà été expérimentées et couronnées de quelques succès techniques, mais elles ont été prouvées impraticables et trop chères, à l'exception des couvertures plastiques et de paillage atomisé en usage limité. Ces deux méthodes sont également trop coûteuses pour des vastes cultures à base de pluie.

Les expériences de contrôle d'évaporation uniquement par des travaux du sol, elles non plus, n'ont pas du tout réussi. Le conditionnement de la surface du sol avant la pluie échoue en général, car l'impact des gouttes de pluie provoque la destruction de la structure. D'autre part, les travaux de préparation effectués après les pluies sont inefficaces car tandis que le sol est suffisamment sec pour être travaillé, la plus grande partie de l'évaporation évitable a déjà eu lieu. Les essais qui ont été faits dans les grandes plaines des Etats Unis d'Amérique dans les années 20, essais qui visaient à augmenter le stockage d'eau à long terme, ont provoqué de désastreux dommages dus au vent et à l'érosion, phénomène que l'on rappelle sous le nom de "Dust Bowl".

Les seuls cas où le travail du sol peut limiter les pertes dues à l'évaporation sont les cas où il colmate les fentes profondes qui se propagent dans les vertisols, et où la lutte contre les mauvaises herbes est le but des travaux de préparation du sol.

- 3) Le contrôle de redistribution et de drainage. On sait qu'après l'infiltration de l'eau dans le sol, sa redistribution est influencée par la présence des différentes couvertures du sol. L'effet exact dépend des propriétés de ces différentes couches, ainsi que de la profondeur à laquelle l'eau a pénétré. En général, la présence de toute couverture a tendance à empêcher la redistribution en comparaison avec un profil uniforme de l'une de ces couches. En principe, la préparation du sol peut

produire deux couches distinctes dans un profil initialement uniforme, et ceci influence le processus de redistribution. Cependant, en pratique, la profondeur du sol que peuvent atteindre les outils de labour est trop faible pour avoir une réelle influence sur la redistribution. On peut réaliser le contrôle de la redistribution en plaçant dans le sol, à la profondeur voulue, des films imperméables artificiels. Ils ont pour effet d'élever la capacité apparente au champ des couches supérieures, et d'augmenter aussi la capacité de stockage d'eau du sol. Pour les sols très sableux, de tels films faits de feuille plastique ou d'asphalte atomisé peuvent empêcher la perte par drainage dans la zone racinaire, et augmenter le régime hydrique du sol. Cependant, le coût de la mise en place de ces films à une telle profondeur est actuellement trop élevé pour être assumé dans la plupart des cas de culture de pluie. Si l'on doit irriguer des sols très sableux, il existe de meilleures solutions, et moins chères, au problème du contrôle de la redistribution.

Ce projet de recherche a été conçu dans le but de découvrir des méthodes d'aménagement et de préparation du sol qui soient prometteuses, a priori, afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau pour les cultures de pluie dans la zone semi-aride, tout en accordant une attention particulière aux méthodes adaptables dans les pays en voie de développement. On a tiré parti des différences de saison entre le type de climat méditerranéen d'Israël et le climat tropical semi-aride de régions comme l'Afrique de l'Ouest et l'Inde, pour expérimenter pendant l'été sans pluie d'Israël des cultures d'été des tropiques semi-arides en simulant d'une façon contrôlée les modèles de pluie par des techniques d'arrosage. Les propriétés du sol ont été définies en Israël et au Mali à l'aide de simulateurs de pluie, et on a évalué l'efficacité potentielle de différentes méthodes de préparation à l'aide d'une

analyse statistique des données de pluie à long terme, en rapport avec les propriétés d'infiltration des sols.

On n'a pas écarté des méthodes modernes et un outillage mécanisé, sous le prétexte qu'ils ne sont peut-être pas applicables, actuellement, dans certains pays. Premièrement, l'utilisation d'un outillage qui exigerait de très larges tracteurs n'est évidemment pas appropriée, et de ce fait a diminué. Deuxièmement, on a choisi les méthodes et l'outillage dont l'effet peut être imité par un outillage de travail manuel ou animal. De plus, on a tenu compte du fait que certains pays en voie de développement utilisent déjà certains équipements mécanisés, et que c'est une tendance qui se propage.

En plus de la recherche effectuée en Israël, des travaux au champ ont été réalisés au Mali et des travaux de laboratoire à Wageningen.

A Wageningen ont eu lieu les activités suivantes:

a. Des expériences de laboratoire sur l'influence de la taille de l'agrégat de la couche supérieure d'un sol sur la formation de croûte par la pluie, l'évaporation à partir du sol qui s'en suit et l'émergence de jeunes pousses.

Ces travaux sont rapportés dans l'Appendice n° 1. Les expériences comprennent le développement et l'application de nouvelles techniques pour mesurer les paramètres de la croûte.

b. L'analyse par modèles sur ordinateur de données de pluies et l'application des résultats obtenus pour la prévision du ruissellement de surface. Ces travaux sont rapportés dans les sections 4.4.3 et 4.4.4.

c. La détermination des caractéristiques physiques des différents sols d'Israël et du Mali.

d. Le développement d'un modèle pour simuler sur ordinateur le mouvement de l'eau dans la zone non saturée du sol sur de longues périodes. Une

application de ce modèle est donnée dans l'Appendice 5.

e. Une étude bibliographique à l'aide d'un système de banque de données sur ordinateur à Pudoc, centre de publication et de documentation agricole à Wageningen. Une revue bibliographique générale est donnée dans la section 3.1.

Au Mali, les travaux de recherche ont été effectués en coopération avec les membres du projet PPS: Production Primaire dans le Sahel (Penning de Vries et Djiteye, 1980). Quelques uns des problèmes importants rencontrés lors des recherches au Mali dans le domaine de sol et eau ont été:

- la très grande variabilité dans les modes de précipitation,
- les très grandes intensités de pluie,
- les taux élevés de ruissellement de surface pendant la pluie à cause des très faibles capacités d'infiltration,
- la dureté et la nature sableuse des sols.

En particulier la tendance des sols (même sableux) à former une croûte à la surface, combinée à la grande intensité des pluies, peut provoquer de grandes pertes d'eau de pluie par ruissellement de surface. Par conséquent, même durant les années où les pluies seraient suffisantes à la production, il peut y avoir un faible rendement à cause des pertes dues au ruissellement de surface. Afin de trouver le mécanisme de formation de la croûte, et les moyens de minimiser ou d'éliminer ce problème, un simulateur de pluies a été utilisé pour créer des pluies "sur mesure". Pendant ces averses (artificielles) on peut mesurer l'infiltration et le ruissellement de surface. Durant l'année 1978, on fit des expériences préliminaires avec un simple simulateur de pluie (voir Appendice 3), en 1979, on en utilisa une version améliorée et le programme de recherche s'intensifia. Avant et pendant la saison des pluies en 1979, on fit les recherches suivantes:

- a. Infiltration et ruissellement de surface pendant la pluie en sols sableux et l'influence de la préparation du sol et de la constitution de la surface sur ces phénomènes,
- b. Germination de la graine et émergence de la pousse en relation avec la profondeur de labour et d'ensemencement,
- c. Observation des activités d'un exploitant local, en se référant en particulier aux opérations de préparation du sol et de mise en culture.

Au laboratoire de Wageningen, les caractéristiques physiques de différents sols ont été mesurées et les données de pluies analysées.

Les expériences au Mali, ont été faites près de la ville de Niono, située à 14°35' latitude Nord, à 300km environ au Nord-Est de la capitale Bamoko. Les sites expérimentaux se trouvaient dans un "ranch", à l'abri du pâturage habituel des troupeaux et des incendies de végétation. Les champs de l'exploitant se trouvaient environ à 8km au Sud de ce ranch.

3 - RESUME

Des travaux de recherche au champ et au laboratoire ont été effectués en Israël et au Mali, dans le but d'identifier les conditions importantes pour la culture, qui sont en relation avec les méthodes de préparation du sol. On a porté une attention particulière à l'exploitation à base de pluie en zone semi-aride, et à l'adaptation de ces méthodes aux pays en voie de développement. Les conditions principales furent les conditions de structure du sol, et d'approvisionnement d'eau pendant la germination et l'émergence des plantes, ainsi que l'approvisionnement en eau de la saison pour la croissance des plantes. Il a été démontré que la formation d'une croûte de surface joue un rôle prédominant dans les deux cas, à tel point qu'elle empêche l'émergence de la jeune pousse dans les premiers temps, et l'infiltration de l'eau à tout moment. La densité de pousse, qui dépend de l'émergence et de la germination, joue un rôle déterminant dans la production finale.

Une surface de sol rugueuse augmente le régime hydrique du sol de deux façons: elle ralentit la vitesse de formation de la croûte, et elle augmente la capacité de stockage de surface dans le cas d'excès de pluie. Cependant, même une structure motteuse est temporaire dans les sols instables, et de plus elle ne permet pas la construction d'un lit de semence. On n'a pas trouvé d'effets majeurs au travail de préparation primaire sauf lorsque celui-ci influence l'infiltration de l'eau. Le labour secondaire, en altérant la croûte de surface, peut améliorer l'infiltration, mais ne subsiste généralement pas après une deuxième averse. La seule méthode vraiment efficace pour améliorer le régime d'humidité du sol, à la fois pendant les périodes de jachère et pendant les périodes de croissance des cultures en rangées, s'est avérée être le système de levées à barrages, ou de barrages de rigoles. La différence entre une terre à levées normales et

une à terre en levées à barrages a été évaluée à plusieurs dizaines de pourcents, en terme de ruissellement de surface et d'érosion. La méthode est applicable à une exploitation mécanisée aussi bien qu'à une exploitation basée sur travail manuel ou animal, et son application peut expliquer la différence entre le succès ou l'insuccès d'une culture, lorsque les pluies sont limitées.

La caractérisation des propriétés hydrauliques du sol à l'aide d'un simulateur statique de pluie a bien correspondu aux résultats obtenus dans les champs, et ceci nous offre la possibilité de prévoir le ruissellement de surface de différents sols de constitution différente, en montrant que la formation d'une croûte est bien le facteur limitant de l'infiltration. En combinant les propriétés du sol, déterminées empiriquement, avec les données sur les pluies locales suffisamment détaillées pour permettre de calculer la probabilité de quantités et d'intensité données de pluies, on peut également calculer la probabilité des quantités de ruissellement de surface.

Le labour profond s'est avéré être généralement avantageux en conditions expérimentales, parce qu'il a pour résultat de rendre la structure de la surface rugueuse, et donc d'améliorer l'infiltration. Une préparation minimale du sol avec une adosseuse sous-terrainne, suivi d'un travail en surface de la rangée à semer par une fraiseuse pour la préparation du lit de semence, résulte en des zones de labour assez distinctes à l'intérieur de chaque rangée, et laisse une surface motteuse entre deux rangées. Ce système semble prometteur, mais demande des recherches supplémentaires, en particulier en tant que partie de tout un système. Le compactage du sol dû aux roues des tracteurs est évident, et du fait qu'un outillage à rangées multiples est disponible en Israël, il est recommandé de poursuivre les recherches sur les dégâts de structure du sol à long terme, sous différents systèmes de labour en zone semi-aride.

3.1 - Revue bibliographique

Les régions semi-arides de région sèche dans le monde.

Pour bien comprendre l'importance de ces régions semi-arides sur la production agricole mondiale, il faut entrer dans les détails. Les zones semi-arides, d'un point de vue agricole, peuvent être définies comme des zones où les pluies sont en quantité suffisante pour certaines cultures adaptées, par comparaison avec les zones arides où les quantités de pluie sont insuffisantes pour la production.

Des détails sur le climat semi-aride sont donnés par Meigs (1953) dont la carte de répartition des zones arides et semi-aride dans le monde est basée sur le système de classification de Thornthwaite (1948), où la précipitation est comparée à l'évaporation. Le climat semi-aride a été décrit récemment par Bailey (1979). La géographie de ces régions est traitée par Bowden (1978). Brichambaut (1970) a différencié trois classes de régions d'exploitation de "dryland farming" climatiquement distinctes:

- a. Le climat méditerranéen, autour du littoral méditerranéen, le Proche-Orient, mais aussi en Australie, en Californie, en Afrique du Sud et au Chili. Le climat se caractérise par des pluies d'hiver (300-600 mm) et des étés chauds et secs. Les hivers sont relativement doux.
- b. Le climat continental se trouve dans les zones tempérées, principalement en Europe orientale et dans les grandes plaines d'Amérique du Nord. Les hivers y sont longs et froids, il y a des pluies en hiver et au printemps (300-500 mm). Sur le haut plateau du centre de l'Espagne, en Algérie, au Maroc, au centre de la Tunisie, au Nord de l'Iran et en Afghanistan, ainsi que dans la région inter-montagneuse de l'Ouest des U.S.A, l'hiver est froid mais plus court, les journées d'été sont également plus courtes. Ici

le climat se rapproche du type méditerranéen.

c. Le climat tropical semi - aride inclut le Sud de l'Afrique du Sahara, le haut plateau de l'Afrique de l'Est, et de vastes étendues en Inde, au Pakistan, au Brésil, en Australie et la côte-Est de l'Amérique Centrale. Les températures permettent en général la culture tout au long de l'année, et les facteurs limitants sont la durée et l'intensité de la saison des pluies. Même les cultures les plus adaptées ne peuvent réussir de façon consistante à moins de 400 mm de pluie.

Les systèmes actuels d'exploitation de "dryland farming" dans ces régions sont discutés par Bowden (1979), Brichambaut (1970) et Arnon (1972).

Au Proche-Orient et en Afrique du Nord, l'agriculture est basée sur une monoculture céréalière d'hiver, de blé et d'orge (orge pour les régions moins pluvieuses). Les cultures sont semées en automne (Novembre-Décembre) au début des pluies, se développent durant l'hiver qui est doux, et sont récoltées tard au printemps. La production céréalière fait partie de la rotation céréale-jachère, lorsque la durée de la jachère dépend de la quantité de pluie. Dans la plupart des cas le labour n'est pas mécanisé mais effectué par des chameaux, des chevaux, des boeufs etc..., souvent en utilisant un simple soc en bois. Israël et certaines parties d'Afrique du Nord, où des tracteurs sont disponibles, font exception.

En Australie aussi le blé est la culture principale. Dès le début du siècle il s'est avéré qu'une culture continue ou même un système culture-jachère provoquait une détérioration progressive de la structure du sol. Ce problème a été résolu en introduisant la rotation légumineuse-blé, en utilisant des espèces de légumineuses comme la luzerne fertilisées par du phosphate. Une rotation typique est constituée de quatre années (ou deux) de légumineuses suivies par trois années (ou une) de culture de blé. Les chaumes

de blé, ainsi que les champs de pâturage, servent de pâturage aux moutons. Ce système d'utilisation des terres est très bien adapté aux conditions semi-arides en Australie.

Dans les régions semi-arides d'Asie Centrale, du Caucase et des plaines de Russie, la plupart des précipitations annuelles a lieu pendant la saison froide. La culture est le blé d'hiver, semé en automne. Du fait qu'il ne pleut pas en été, la culture du blé épuise, pendant la période de croissance d'été, presque toutes les réserves d'eau accumulées dans le sol, bien que l'humidité restant dans le sol soit suffisante pour débiter avec une nouvelle culture en automne. La jachère, cependant, est aussi pratiquée quand l'humidité n'est pas assez élevée. La plupart des opérations sont mécanisées dans le but de profiter des périodes optimales au cours de la saison.

Sur les grandes plaines d'Amérique du Nord, la plupart des précipitations a lieu sous forme de pluies d'été. C'est la principale région de culture du blé des U.S.A et du Canada. L'histoire du développement de ces techniques actuelles de "dryland farming" est connue: la principale théorie sur la conservation de l'humidité demande un paillage de poussière de sol fin afin d'empêcher l'évaporation. Cependant, lors d'une période de sécheresse de plusieurs années, d'énormes dégâts furent causés par l'érosion du vent, et par une faible infiltration due à des problèmes de structure du sol (Hargreaves, 1977; Schlebecker, 1977). En conséquence de cela, de nouvelles techniques furent introduites, visant à placer une couverture végétative pendant les périodes critiques de l'année. Comme dans d'autres régions, le système le plus communément employé est la rotation blé-jachère, lorsque la jachère est effectuée une fois en plusieurs années suivant les conditions d'humidité du sol. Les systèmes maïs-blé sont également en usage dans la partie Est plus humide de cette région, et le blé peut utiliser l'humidité du sol qui n'a pas

été employée par le maïs.

Dans les régions tropicales semi-arides de l'Inde, on distingue également deux saisons: le "Kharif", ou saison chaude des pluies de Mai-Juin à Octobre-Novembre et le "Rabi" ou saison sèche (et froide) d'Octobre-Novembre à Mars-Avril (Chowdhury, 1974). Les cultures habituelles de "Kharif" sont le millet, le sorgho, le maïs, les légumineuses à graines etc... tandis que les cultures de "Rabi" peuvent être le blé, l'orge, les pois-chiches etc.... En fait les cultures sont beaucoup plus variées que ce qui est indiqué ici, car il s'agit de très vastes étendues. Dans de nombreux cas, les conditions du sol influencent les systèmes d'exploitation: ainsi, sur les lourds vertisols de la région d'Hyderabad (Andhra Pradesh), on ne peut effectuer de travaux conventionnels pendant la saison des pluies, de sorte que seule une culture de "Rabi" peut y être faite. La mécanisation n'est pas encore très répandue dans la partie Sud de l'Inde, et on y utilise des charrues à boeufs et un simple outillage en bois. Dans la région Nord de l'Inde qui est plus humide, l'agriculture est plus développée.

La région tropicale semi-aride au Sud du Sahara, en Afrique, se transforme progressivement d'un désert parfait (Sahara) au Nord, en une zone humide près de la côte au Sud. Ce sont les zones appelées Sahel et Savanne qui reçoivent la plus grande attention dans ce projet. Dans la partie plus au Nord de cette zone bordée par l'isohyète de 500 mm, on cultive pendant la saison des pluies le millet et le sorgho en rotation avec une jachère. Au Sud de cette zone, on cultive l'arachide, le coton et le maïs. Le choix des cultures dépend très largement des précipitations annuelles.

Les travaux de préparation du sol dans les régions semi-arides.

La culture du sol a toujours joué un rôle très important en

agriculture. Dans de nombreux cas cette opération requiert la plupart de l'énergie en comparaison à d'autres activités, spécialement en agriculture moins évoluée dont l'investissement total en énergie est faible.

Au Proche-Orient et en pays méditerranéen. Dans cette région, l'agriculture a une très longue histoire (Arnon, 1970; Nuttonson, 1961). Un soc en bois ou en fer simplement constitué d'un bâton dont l'extrémité est dure, sert à remuer superficiellement le sol. Ce soc n'a pas d'action inverse, et est tiré par des animaux. A cause du pouvoir de traction limité l'agriculteur est obligé d'attendre le ramollissement du sol par les pluies. En ce qui concerne les céréales d'hiver, les graines sont semées à la volée avant le passage du soc qui est la seule opération de labour. Pour les cultures d'été le sol est remué pendant l'hiver humide pour lutter contre les mauvaises herbes, empêchant ainsi la perte d'eau par (évapo)transpiration. Le soc n'a en effet que peu d'effet sur les mauvaises herbes. C'est aussi le système de préparation le plus répandu en Afrique du Nord. Afin de surmonter les problèmes posés par un système de pluie défectueux, ou pour améliorer la fertilité du sol, on peut avoir recours à un système de jachère. Il peut s'agir d'une jachère proprement dite, dans le but principal de conserver l'humidité; dans ce cas la lutte contre les mauvaises herbes se fait par le travail de préparation. Une jachère, lorsque la terre a été "abandonnée" plusieurs années, a pour but de restaurer la fertilité après des années de culture continue. La végétation qui y pousse alors peut servir de pâturage aux moutons, aux chèvres et au bétail (Labouesse, 1977; Sebillotte, 1977; Leeuwrik, 1975). L'outillage mécanisé utilisé en agriculture traditionnelle n'a pas beaucoup changé depuis longtemps, bien que le métal ait remplacé le bois dans les parties essentielles du soc. Dans l'agriculture moderne (à haut apport d'énergie) de ces régions, comme en Israël par exemple, la conception

est essentiellement différente en cela que l'exploitant a les moyens d'effectuer les travaux de préparation d'un sol à sec. La préparation d'un sol sec et dur exige un très grand effort; elle résulte en un champ rugueux et motteux, ce qui demande des travaux supplémentaires et un outillage mécanisé spécial pour venir à bout de ces mottes (Hillel et autres, 1969; Hadas, 1977; Wolf et Luth, 1979). La culture du blé est commencée avant la début des pluies. L'usage d'engrais et de variétés améliorées peut élever la production à un tel niveau que l'exploitation est rendue rentable pour la plupart des années. Cependant il faut souligner que les risques provoqués par le climat (pluies éparses) sont considérablement amortis par des garanties du gouvernement et par d'éventuelles irrigations d'urgence.

Recherches et développements.

Dans les pays moins développées, on met l'accent dans le domaine de la recherche sur le perfectionnement de l'outillage pour le "dryland farming", et sur les systèmes d'aménagement du sol pour améliorer la conservation de l'eau et l'émergence des plantes. Souvent le nombre d'opérations de labour est élevé (haute consommation d'énergie). De même, il y a des problèmes au niveau de la conservation de l'eau à cause des sols nus pendant l'hiver pluvieux et de la formation d'une croûte de surface sur le lit de semence. Al-Fahkry (1976) et Choudhury et autres (1977) ont donné quelques informations sur la situation en Irak. Henderson (1979) a fait le rapport sur des expériences de préparation du sol au Liban. Des travaux sur la préparation d'un sol destiné à la production de blé (en irrigation) ont été rapportés par Sorour et autres (1975) et par El-Sharkawy et Sgaier (1975). Les développements des travaux de préparation du sol pour la production de blé en Turquie ont été discutés par Yesilsoy (1978). Sta-M'Rad (1978) a fait une

description de l'agriculture à base de pluie en Tunisie.

Dans l'Inde semi-aride. Ici aussi les pratiques agricoles ont une longue histoire; le même outillage de base qu'au Proche-Orient est utilisé (animaux de trait), en particulier le soc sans action inverse. D'autres outils spéciaux sont le "bakhar", une sorte de herse aiguisée, à la fois pour égaliser la surface du sol et pour lutter contre les mauvaises herbes, et un cultivateur avec des tubes fixés pour les semis. Il est difficile de tracer une image globale à cause de la grande variété de climats et de conditions de sol, mais d'une façon générale, le sol est trop dur pour être cultivé à sec, même dans les sols humides à coton (vertisols). (Arakeri, 1967; Chowdhury, 1975; Spratt et Chowdhury, 1978).

Recherches et développements.

En ce qui concerne la recherche, il faut mentionner les activités de l'ICRISAT (Institut International de Recherche pour la Culture sous les Tropiques Semi-Arides). Le programme de recherche pour les systèmes d'exploitation accorde une attention particulière aux problèmes des pratiques agricoles du petit exploitant (indou) (ICRISAT, 1980; Kampen, 1979; FSRP, 1977, 1978, 1979). On développe actuellement un système de lit de semence permanent, basé sur une construction d'eau, avec un labour à traction bovine et un équipement approprié pour semer. En termes de productivité, les résultats, la facilité de culture et la conservation de l'eau se montrent assez prometteurs. Un important travail sur le "dryland farming" en Inde est mené par le projet de recherche coordonné de toute l'Inde sur ce mode d'agriculture (Spratt et Chowdhury, 1978). Des recherches concernant les travaux de préparation du sol sont également effectués par d'autres instituts

et universités (par exemple, Ali et Prasad, 1974; Das et autres, 1977; Agarwal et Raj, 1975; Bhushan et autres, 1977; Bhan, 1974; Singh et Singh, 1973).

En Australie semi-aride. Une discussion détaillée de la situation du labour en Australie semi-aride est faite par Sims (1977). Tous les travaux agricoles sont réalisés à l'aide de tracteurs et d'un équipement mécanisé. Le sol est préparé pour semer des céréales à la fin de l'automne par une charrue à versoir ou à disques, et par un outillage en métal.

Recherches et développements.

L'attention est portée sur les systèmes de préparation minimale et sur les systèmes de culture en rapport avec la lutte contre les mauvaises herbes en période de jachère (Schulz et autres, 1976; Grierson, 1979). Une culture intensive et "propre" pendant la période de jachère rend le sol plus sensible à l'érosion par le vent. Du fait de l'augmentation du coût de l'énergie, on accorde plus d'attention à la diminution travaux de préparation du sol, (en nombre ou en intensité), (Hutchings, 1977).

Sur les grandes plaines d'Amérique du Nord: Le labour est très hautement mécanisé (Bolton et Booster, 1978). En fonction des précipitations (moyennes) annuelles, on fait pousser du blé de façon continue, ou on utilise un système blé-jachère-blé (Hanway, 1970). On utilise encore fréquemment la charrue à disque ou à versoir pour enterrer les résidus de plantes, pour lutter contre les mauvaises herbes et pour préparer le lit de semence de la prochaine culture. Pour l'année de jachère, le sol est retourné et soumis à plusieurs opérations de labour (3 à 5) pour la lutte contre les mauvaises herbes

(Boersma et Jackson, 1978). Avec ce système, la surface du sol est exposée à l'érosion par le vent et par l'eau. Par contre, le but d'un système de paillage en chaume est de maintenir les déchets végétaux de façon continue à la surface du sol. Un équipement spécial a été conçu; des charrues balayeuses ou des désherbeurs à bras sont souvent utilisés dans ces systèmes en même temps qu'un outillage métallique conventionnel. En général on doit aussi utiliser un équipement spécial pour les semis.

Recherches et développements.

Dans les plaines semi-arides des U.S.A, on porte une attention considérable à l'exploitation conservatrice, ainsi que le démontrent plusieurs articles-revues et publications: Publications spéciales au SCSA (1977, 1979), SCSA (1973), Burrows et autres (1970), Toughton et Cummins (1978), Phillip et Yong (1973). Cependant la majorité des exploitants utilise encore des systèmes conventionnels, bien que la tendance soit à une préparation primaire moins intensive (charrue à versoir ou système à disques) (Wiese, 1977). Parmi les 150 millions d'hectares de terres cultivables, seulement un sixième est exploité avec quelque forme réduite de préparation du sol.

La zone semi-aride de l'Afrique de l'Est et du Sud: celle-ci inclut des régions dans le Nord-Est du Kenya et une grande partie de la République d'Afrique du Sud, ainsi que des régions du Botswana. Il est difficile de faire une description générale des pratiques agricoles: l'exploitation agricole en R.A.S est hautement mécanisée, et la mécanisation est moins développée au Botswana et au Kenya. De nombreux agriculteurs utilisent encore un équipement à traction animale (Botswana: Gibbon, 1974; Kenya: de Wilde, 1967). Les problèmes typiques de ces régions semi-arides y sont rapportés:

des sols à la fois secs et durs, dont le travail demande beaucoup d'énergie lorsque les animaux de trait se trouvent dans une condition physique très faible, à la fin de la saison sèche.

Recherches et développements.

Au Botswana, c'est le Ministère de l'Agriculture, en coopération avec le U.K. Overseas Development Administration (Administration pour le Développement à l'Etranger) qui prend en charge le programme de recherche sur le "dryland farming" (Dryland Farming Research Scheme) (DFLRS, 1977, 1980 a, b; Whiteman, 1975; Willcocks, 1979; Salmon, 1979). Les activités de ce programme ont pour but l'amélioration des variétés (sorgho, pois fourrager, maïs et tournesol comme cultures principales); l'usage (éventuel) d'engrais, le perfectionnement du matériel et des techniques de labour. D'autres activités sur l'amélioration du labour au Botswana sont rapportées par Orev (1976).

Au Kenya, l'attention est portée sur l'amélioration des techniques en zone semi-aride par l'Université de Nairobi, entre autres, dont les travaux comprennent l'identification d'un matériel approprié et l'amélioration des techniques de labour (Muchiri, 1979).

La zone semi-aride en Afrique de l'Ouest. Cette région compte un grand nombre de pays ouest-africains, dont les plus importants (en superficie) sont le Sénégal, le Mali, la Haute-Volta, le Niger, le Nigéria, le Tchad et le Soudan. La grande majorité des agriculteurs de cette région cultive manuellement le sol, bien que dans certains pays des animaux de trait soient fréquemment (localement) utilisés.

A part le climat, qui a été très bien traité par Cocheme et Franquin (1967), et par Davy et autres (1976), c'est le sol qui détermine les

possibilités ou la facilité des travaux de préparation. Une étude des sols ouest-africains a été faite, entre autres par Ahn (1974, 1978) Jones et Wilde (1975) et pour certaines régions par Charreau et Nicou (1971), Charreau (1978), Stroosnijder (1981) et d'autres. Dans la plupart des études pédologiques, la carte du sol de d'Hoore (1964) sert de base aux travaux ultérieurs. D'une façon générale, les sols peuvent être classés suivant la table 3.1 (d'après Jones et Wild, 1975, Table 6). De nombreux sols du Sahel et de la Savanne sont complètement sableux, ou du moins sableux dans la couche de surface avec un horizon B texturé plus lourd. En accord avec les données de Jones et Wilde sur la couche de surface du type de sol le plus répandu (sols rouges-bruns et tropicaux-ferrugineux) le contenu moyen d'argiles ne dépasse pas 7 à 9%.

Recherches et développements.

L'agriculture dans les régions ouest-africaines du Sahel et de la Savanne s'accompagne de nombreux problèmes. En plus des pluies violentes et imprévisibles, les sols sont généralement pauvres en éléments nutritifs (dans les zones cultivées). Les agriculteurs n'ont pas la possibilité d'utiliser des variétés améliorées; les engrais et les produits chimiques destinés à la protection des plantes ou à la lutte contre les mauvaises herbes ne sont pas disponibles ou bien sont trop coûteux. De plus, l'absence fréquente d'une infrastructure fonctionnelle (transport, marché, etc...) n'encourage pas les efforts pour améliorer la situation.

Dans ce chapitre, on portera attention aux aspects de l'agriculture qui ont un rapport quelque'il soit avec les travaux de labour.

Table 3.1: La répartition relative des sols en Savanne ouest-africaine d'après la carte du sol de l'Afrique (d'Hoore, 1964).

	POURCENTAGE APPROXIMATIF DE LA SURFACE TOTALE:	
	TOTAL PARTIEL	TOTAL
1. Roches, débris de roches et sols faiblement développés, y compris croûtes ferrugineuses	-	9.2
2. Vertisols et sols similaires	1.3	
Vertisols et sols similaires associés à des sols faiblement développés sur croûtes ferrugineuses	0.6	1.9
3. Sols bruns et bruns-rougeâtre des régions arides et semi-arides	3.6	
Sols bruns et bruns-rougeâtre des régions arides et semi-arides associés à des croûtes ferrugineuses	1.0	4.6
4. Sols bruns eutrophiques	1.0	
Sols bruns eutrophiques associés à des sols faiblement développés sur roches basiques	1.7	2.7
5. Sols tropicaux ferrugineux sur roche-mère sableuse	7.2	
Sols tropicaux ferrugineux sur roches cristallines acides	26.6	
Sols tropicaux ferrugineux sur roche-mère non différenciée	2.3	
Sols tropicaux ferrugineux associés à des sols faiblement développés sur croûtes ferrugineuses et autres roches-mère	22.2	58.3
6. Ferrisols	4.1	
Ferrisols associés à des sols faiblement développés sur roches basiques	0.2	
Ferrisols associés à des sols faiblement développés sur croûtes ferrugineuses	3.0	7.3
7. Sols ferralitiques	7.6	
sols ferralitiques associés à des croûtes ferrugineuses et des débris de roches	2.5	10.1
8. Sols hydromorphiques	-	5.1
9. Sols halomorphiques	-	0.6
10. Sols calcimorphiques	-	0.1

La majorité des agriculteurs du Sahel et de la Savanne cultivent manuellement leurs sols en se servant de houe et de faux. La houe, généralement à bras court, prend des formes et des tailles différentes, suivant les besoins locaux et les traditions (Morgan et Pugh, 1969; Andrews et Sheldrick, 1979). Cependant, dans certaines régions, les agriculteurs utilisent un matériel de labour simple à traction animale. Gaury (1977) donne un rapport détaillé de la situation du point de vue de la mécanisation et de la motorisation en Afrique de l'Ouest. Environ 80 à 90% des terres cultivées sont probablement encore cultivées manuellement. Quant à l'équipement de trait, il est traité pays par pays par Gaury:

Au Sénégal, un grand nombre de charrues (1971: 12000-15000) a été utilisé non seulement pour les cultures comme l'arachide et le coton, mais aussi pour le maïs et le sorgho. On se servait d'habitude de chevaux de trait mais aujourd'hui ils sont remplacés par les boeufs qui sont plus forts.

Au Mali, un nombre encore plus grand d'instruments de labour est utilisé (1971: 82000 charrues, 30000 cultivateurs et herses; en 1975-1976 ces nombres ont augmenté jusqu'à 107000 charrues et 50000 polyculteurs et herses, selon des données non publiées du Ministère de l'Agriculture du Mali). La plupart des instruments a été importée d'Europe ou du Sénégal, mais une usine a été fondée en 1974. La majorité des cultures commerciales est effectuée par un outillage à traction animale, ainsi qu'une grande partie des cultures alimentaires comme le sorgho, le millet et le maïs.

En Haute-Volta, un très faible pourcentage des terres est cultivé par animaux de trait. On introduit actuellement une houe mécanique légère (houe "marga") tirée par des ânes, qui sont disponibles en grand nombre dans ce pays.

Au Niger, on utilise encore beaucoup un équipement à traction animale.

Au Tchad, le gouvernement a encouragé la traction animale pour le coton et l'arachide (1971: 30000 charrues). Les animaux de trait sont les zébus (boeufs) comme au Mali.

Dans la région Nord du Cameroun, on utilise un équipement à traction animale dans la production de coton et d'arachide, principalement pour des raisons de politique du gouvernement.

Au Nigéria, on voit encore un équipement à traction dans les états du Nord (région de la Savanne). Des adosseuses à la place de charrues sont l'outillage le plus commun, et en 1966 on trouvait une adosseuse pour cent exploitants. Du fait que le Nigéria a une économie plus puissante, la politique gouvernementale de certains états a pour effet de passer directement du travail manuel à la tractorisation. L'usage de tracteurs et d'autres équipements agricoles mécanisés est encore limité dans toute la région, et n'existe pas encore dans la région du Sahel-Savanne en système de "dryland farming". Des tracteurs ont été introduits dans de plus grands projets d'irrigation (comme l'office du Niger au Mali) ou d'autres programmes qui reçoivent une aide gouvernementale ou internationale. Les gouvernements des pays anglo-saxons ont en général beaucoup plus insisté sur l'introduction de la motorisation que les pays francophones. Un inventaire de la motorisation est fait par Gaury (1977) et de Wilde (1966), et discute des problèmes que posent la mécanisation et la tractorisation en Afrique.

Pour une revue plus détaillée de la recherche sur les travaux de labour en Afrique de l'Ouest on peut faire les distinctions suivantes:

- a. l'influence des travaux de labour sur le mouvement de l'eau (dans le sol et à la surface du sol).

- b. l'influence des travaux de labour sur la germination, l'émergence et l'établissement de la plante.
- c. l'influence multiple des travaux de labour sur les rendements (cette influence comprend de nombreux facteurs de a et de b)
- d. de nouvelles techniques et méthodes de labour, ainsi que de nouveaux instruments.

a. Comme il l'a déjà été expliqué plus haut, les caractéristiques des précipitations (type de précipitation, intensités) sont telles qu'il est essentiel de fournir de l'eau au début de la saison pluvieuse aux grains plantés). Il semble que c'est à ce moment qu'ont lieu des périodes de sécheresse; ainsi toute perte d'eau (par ruissellement de surface) peut constituer une raison à l'échec d'une culture. Plus tard dans la saison, les précipitations généralement égalisent ou dépassent l'évapotranspiration (suivant la latitude).

Des recherches sur la conservation de l'eau et du sol ont été effectuées en Afrique de l'Ouest, et rapportées par Fournier (1967) et par Roose (1967) pour quelques endroits de l'Afrique de l'Ouest française, principalement à des endroits où les précipitations annuelles sont supérieures ou égales à 1000mm. Dans les expériences décrites, des mesures de contrôle comme le terrassage, le paillage, etc... ont également été incluses.

L'effet de la culture sur le ruissellement de surface et sur l'érosion a également été rapporté par Roose (1967) et par Verney et Williams (1965). Ils ont conclu que les travaux de préparation du sol peuvent être néfastes à la conservation d'eau et du sol. Par contre les travaux de l'IRAT au Sénégal ont trouvé qu'un labour profond améliore le processus

d'infiltration de telle façon que le ruissellement de surface et l'érosion sont considérablement réduits.

D'autres systèmes de culture dont le but est d'empêcher le ruissellement de surface ont été testés dans quelques pays anglophones (Ghana, Nigéria): on a introduit le système de levées à barrages (Lawes, 1966; FAO, 1966). Le ruissellement de surface a été considérablement réduit, mais l'accumulation d'eau au milieu de la période de pluie a posé de gros problèmes (tout le travail expérimental fut fait à des endroits ayant une moyenne de précipitation annuelle supérieure à 1000mm). Bien qu'un équipement pour la construction des levées ait été conçu pour l'exploitation mécanisée, le système n'a jamais été expérimenté complètement dans les régions du Nord, où l'intensité des pluies est de 500 à 800mm, et l'exploitation est basée sur un travail manuel ou sur un équipement à traction animale.

Le recouvrement du sol (formation d'une croûte) est un problème pour de nombreux sols ouest-africains, même les plus sableux (Sombroek et Zonneveld, 1971; Kowal, 1968; Charreau, 1978; ce rapport-même). L'effet d'ameublissement du sol (en surface) dû aux travaux de labour peut être de courte durée, tandis que l'augmentation de la surface de stockage de surface par les levées à barrages peut durer toute la saison ou presque toute la saison.

- b. Dans les conditions climatiques ouest-africaines, le travail de la terre, qu'il soit fait avant, pendant ou après les semis, doit assurer à la graine et à la jeune pousse un approvisionnement optimal en eau, de même qu'un environnement optimal pour la croissance et le développement des racines. Le faible degré d'agrégation du sol implique que le contact graine-sol soit adéquat dans des conditions normales sans opération supplémentaire. Le

durcissement de la surface peut poser des problèmes d'émergence seulement pour les sols plus lourds, où des croûtes plus épaisses constituent une barrière mécanique plus grande.

Hormis ce problème de durcissement du sol, les sols sableux ouest-africains du Sahel et de la Savanne ont tendance à devenir compacts et durs pendant la saison sèche. Ceci a un sérieux effet sur le développement des racines. De nouveau, c'est sur cet aspect que la plupart des travaux de recherche au Sénégal ont été effectués et décrits par Charreau et Nicou (1971). Kowal (1968 a, b, 1965) et Lawes (1966) ont rapporté leurs travaux effectués dans la région du Samaru (au Nord du Nigéria). Il est clair que les densités apparentes des sols sableux fins sont élevées; des valeurs supérieures à $1,60-1,65 \text{ g/cm}^3$ ne sont pas exceptionnelles. Ces valeurs peuvent être considérablement réduites par le travail de la terre, mais le compactage peut se reproduire très vite, en particulier lorsque des pluies font suite à la mise en culture.

Blondel (1965), ainsi que Charreau et Nicou (1971), ont trouvé un rapport très net entre les densités apparentes, la formation des racines et les rendements finaux. Ils pensent que de grandes densités apparentes créent une résistance mécanique à la pénétration des racines. Une faible porosité (une conséquence des grandes densités apparentes) provoque aussi une diminution du contenu en air et de la capacité de transport de l'eau. Les problèmes dus à une faible aération ne se rencontrent que lorsque la surface du sol est très mouillée. La faible capacité de transport de l'eau peut rendre plus difficile aux cultures de surmonter les périodes de sécheresse.

Siband (1972) a comparé des champs en culture depuis longtemps avec des champs cultivés peu de temps après une jachère. Le compactage (à la

fin de la saison de culture) est plus important dans les champs longtemps cultivés, ce qui indique que la culture provoque une lente détérioration de la structure.

- c. Un grand nombre d'expériences de préparation de la terre a été résumé dans les articles de Charreau et Nicou (1971). La plupart des expériences ont comparé le labour (avec ou sans incorporation de déchet végétal) avec la préparation superficielle du sol.

Dans près de 90% des cas le labour s'est révélé avoir un effet positif comme il l'est indiqué dans la table suivante (3.2).

Poulain et Tourte (1970) ont trouvé que la réaction du sorho au labour (en profondeur) en sols sableux légers était plus faible qu'au labour en sols plus lourds.

Dans la plupart des cas, les plus grands rendements après labour sont expliqués par un meilleur développement des racines. Cependant le labour améliore également la capacité d'infiltration de la surface du sol, de telle sorte qu'il se crée un effet combiné d'une meilleure formation des racines et de disponibilité de l'eau. Puisque les racines ne poussent que lorsqu'il y a suffisamment d'eau disponible, on ne sait pas quel est le facteur qui cause ces différences.

Dans les régions plus humides, où l'humidité n'est apparemment pas limitée, le labour a également amélioré les rendements, ainsi que le montre la table suivante (3.3).

Table 3.2: Influence du labour sur les rendements avec et sans incorporation de matériel végétal (Charreau et Nicou, 1976c).

PLANTE CULTIVEE	<u>RENDEMENTS MOYENS (KG/HA)</u>				
	<u>NOMBRE D'EXPERIENCES</u>		CONTROLE	AUGMENTATION	
	TOTALES	POSITIVES		DUE AU LABOUR	AUGMENTATION %
(a) Labour ordinaire (sans incorporation)					
Millet	22	21	1245	254	21
Sorgho	46	39	1874	536	29
Maïs	6	6	2093	568	27
Coton	7	7	1629	433	27
Arachide	31	27	1412	274	19
(b) Labour avec incorporation					
Millet	5	4	971	365	38
Sorgho	2	2	2039	532	26
Maïs	12	10	1474	970	66
Coton	12	10	1240	423	34
Arachide	113	81	1661	119	7

n.b. Les sites et les années des expériences n'ayant pas toujours été les mêmes, on ne peut faire de comparaison directe entre la partie (a) et la partie (b) de cette table.

Table 3.3: Résumé des rendements obtenus en fonction du labour dans sept sites d'Afrique de l'Ouest.

SITE ET PRECIP. ANNUELLE MOYEN. MM	DESCRIPTION DU SOL	CULTURE	NOMBRE D'EXP.	TRAITEMENTS	RENDEM. MOYEN KG/HA	AUGMENT. PAR RAPP. AU CONT. %
1. Kwadaso, Ghana (1500)	Terre rouge sableuse bien drainée	Maïs	4	Houe	1374	-
				Char.(23cm)	1580	15
				Char.(38cm)	1538	12
		Cassava	1	Houe	18875	-
				Char.(23cm)	24795	31
			Char.(30cm)	24857	32	
2. Man, Côte d'Ivoire (1715)	Ferral- litique	Riz	1	Houe	775	-
				Charrue	1160	50
		Maïs	1	Houe	590	-
				Charrue	810	37
3. Ferkesse- dougou, Côte d'Ivoire (1715)	Ferral- litique	Riz	2	Houe	1243	-
				Charrue	1110	11
		Maïs	2	Houe	1758	-
				Charrue	1795	2
4. Bouake, Côte d'Ivoire (1150)	Ferral- litique	Riz	3	Houe	967	-
				Charrue	1117	16
		Maïs	3	Houe	1558	-
				Charrue	1887	21
5. Farako Ba, Haute-Volta (1100)	Légèrement Ferral- litique	Coton	2	Houe	933	-
				Herse	990	6
				Charrue	1155	24
		Arachide	1	Houe	2461	-
				Herse	2732	11
				Charrue	2811	14
		Sorgho	1	Houe	1077	-
				Herse	1220	13
		Charrue	1517	41		
6. Saria, Haute-Volta (900)	Ferrugineux	Sorgho	3	Houe	1393	-
				Herse	1711	23
				Charrue	1931	39
		Coton	1	Houe	1593	-
				Herse	1586	0
				Charrue	1652	4
7. Guetele, N. Cameroun (820)	Sol à dunes légèrement développé	Sorgho	2	Charrue v.	-	30
				Houe		
		Sorgho	2	Charrue v.	-	76
				Houe		

Ceci soutiendrait la thèse que l'amélioration du rendement est fonction d'une meilleure formation des racines due à des densités apparentes plus faibles. Il existe une étroite relation entre la densité après émergence et le rendement final. Cependant, même en cas d'humidité plus grande, il se peut que le labour améliore l'approvisionnement d'eau, en augmentant l'infiltration lors des étapes critiques que sont la germination et l'émergence, à des périodes de sécheresse.

La lutte contre les mauvaises herbes doit aussi être mentionnée dans ce paragraphe; les mauvaises herbes peuvent rivaliser avec la plante, tant pour la consommation de l'eau (et d'éléments nutritifs) que pour l'interception de la lumière. Si une véritable opération de labour est effectuée avant la mise en culture avec des outils qui retournent le sol, comme les charrues à versoir, la pousse des mauvaises herbes peut être retardée, permettant ainsi un meilleur départ à la plante. On n'utilise pas d'herbicides chimiques parce qu'ils sont très puissants et parce qu'on ne peut pratiquement pas s'en procurer, de ce fait, la lutte contre les mauvaises herbes se fait par sarclage à la main, ou par un outillage à traction animale (charrue ou houe). Cependant très peu de publications ont été faites en Afrique de l'Ouest sur les problèmes de lutte contre les mauvaises herbes (Kassam et autres, 1976; ICRISAT, 1971).

- d. Il n'est pas du domaine de ce rapport d'étudier l'équipement de labour utilisé en agriculture hautement mécanisée (motorisée), c'est pourquoi on ne s'attardera pas sur les machines adaptables aux tracteurs, bien que cet équipement soit d'usage dans quelques régions irriguées d'Afrique de l'Ouest. L'équipement de labour motorisé dans les régions tropicales a été résumé par Krause et Lorentz (1979).

Comme cela a déjà été mentionné, les instruments de labour manuel sont

la houe et le coutelas, celui-ci étant utilisé principalement pour dégager les buissons, les mauvaises herbes longues, etc.... La houe est utilisée pour ouvrir le sol, construire des monticules et des levées, désherber, récolter les cultures de racines, etc.... La taille et la forme des houes varient suivant leur usage et aussi suivant les traditions. Contrairement à ce qui existe par exemple au Proche-Orient, il n'y a pas en Afrique de l'Ouest une utilisation traditionnelle ou historique de charrues à traction animale, et les premiers outils sont de simples charrues à versoir et des planteuses venant d'Europe.

La recherche sur l'équipement de labour s'est concentrée sur l'amélioration des types existant, sur la sélection de meilleurs instruments et méthodes, et sur le développement de simples machines à outils ("polyculteurs") afin de permettre aux agriculteurs de se procurer à bas prix toute une série d'outils (charrues, buttoirs, planteurs, désherbeurs, houes, etc...). Le coût d'une machine à outil rend cependant encore inabordable à l'agriculteur un vaste usage, et la seule chose qu'il peut généralement s'offrir est une simple charrue à versoir. Lorsque les cultures sont faites sur levées (élevées par une charrue à versoir), la qualité du travail est loin d'être optimale.

Les recherches sur l'usage des machines de labour à traction animale ont été résumées par Gaury (1977). En 1979, un atelier sur les techniques et instruments de labour appropriés a été créé dans le Nord du Nigéria. Dans les rapports qui ont été faits, on y discute de la situation de l'équipement de labour à traction animale dans un certain nombre de pays ouest-africains (Secrétariat du Commonwealth, 1979).

En plus des aspects techniques impliqués dans le passage à l'équipement à traction animale, il y a aussi le problème de l'introduction

et du dressage de l'animal de trait. Il existe trois types fondamentaux d'animal: l'âne, le cheval et le boeuf. Bien qu'il y ait des chameaux dans les parties les plus au Nord de l'Afrique de l'Ouest, ceux-ci servent rarement d'animaux de trait, mais plutôt de moyen de transport. Les boeufs de préférence sont utilisés pour le labour; ils sont plus forts, peuvent être fournis par les troupeaux de bétail et ont une meilleure valeur d'achat (certains agriculteurs entretiennent du bétail comme un investissement de capitaux).

Les désavantages principaux de l'usage des animaux sont:

1. Le coût à l'achat de ces animaux. Les boeufs sont chers, même si le bétail est abondant.
2. La nourriture des animaux. Les boeufs doivent fournir un gros effort, c'est pourquoi ils doivent être nourris en conséquence. Ceci crée un problème majeur pendant la période sèche, alors que seule une nourriture de basse qualité est disponible, et que les animaux doivent être préparés au labour pour le début de la saison humide.
3. La sensibilité des animaux aux maladies; dans les régions où la trypanosomiasis est répandue par la mouche Tsé-Tsé on ne peut utiliser d'animaux de trait à part la race N'Dama qui y est résistante. Cependant ces animaux sont plus petits et moins forts que le plus moyen des zébus. La mouche Tsé-Tsé se trouve dans les basses vallées de rivière et la partie humide du Sud.
4. L'entraînement de l'agriculteur et le dressage des animaux. L'agriculteur habitué à un équipement manuel de labour n'a pas l'expérience du travail avec des animaux (les guider, les attacher à la charrue, etc...). De même, le dressage demande de l'expérience.

Une revue générale sur la mécanisation de la traction animale dans

cette région est faite par Gregoire (1976). Monnier (1965 a, b) décrit les recherches faites sur l'introduction et l'entretien des animaux de trait au Sénégal. Defraigne (1967) décrit l'établissement en Haute-Volta d'une exploitation mécanisée utilisant des animaux de trait. Matthews et Pullen (1977) font le rapport sur la culture faite par un équipement à traction bovine en Gambie.

4 - TRAVAIL EXPERIMENTAL

4.1 - L'effet des opérations de préparation primaire sur la culture de la plante et sur le régime hydrique du sol sous conditions semi-arides.

4.1.1 - Expérience sur sorgho en Israël, 1978 et 1979.

4.1.1.1 - Introduction

Pendant les saisons d'été 1978 et 1979, des expériences au champ ont été faites sur du sorgho à la Ferme Expérimentale de Gilat, dans le Nord du Néguev d'Israël, dans le but de simuler les conditions de croissance dans la région du Sahel ouest-africain. Les pluies d'été, comme celles qui ont lieu au Sahel, ont été simulées par un système d'irrigation, suivant un programme simulant les différents types possibles de précipitation. Les buts précis de ces expériences étaient de rechercher les méthodes capables d'améliorer le régime d'utilisation de l'eau des cultures à base de pluie, dans les conditions où la terre doit être préparée seulement au début de la saison des pluies.

4.1.1.2 - Méthodes et procédés

4.1.1.2.1 - Régime de précipitation, 1978:

Pendant la saison 1978, fut menée une expérience comprenant six traitements de labour et quatre régimes d'eau. Les régimes d'eau ont imité deux régions du Sahel. L'une est Zinder dans le Sud du Niger (13°48' N, 9°00' E), avec une précipitation annuelle moyenne de 550mm. La deuxième est Kano, au Nord du Nigéria (12°03' N, 8°32' E), avec une précipitation annuelle

moyenne de 800mm. La distribution moyenne des pluies, basée sur les données de la période 1951-1960 est donnée dans la table 4.1.

Table 4.1: Distribution mensuelle des précipitations (mm) à Zinder et à Kano.

SITE	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	TOTAL
Zinder	30	60	160	240	60	-	550
Kano	60	110	190	270	150	30	810

Coheme et Franquin (1961) rapportent les données d'évapotranspiration potentielle (ETP), calculées d'après Penman pour les deux régions, ainsi que le montre la table 4.2.

Table 4.2: Valeurs de l'évapotranspiration potentielle à Zinder et à Kano.

SITE	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	TOTAL
Zinder	198	185	158	128	146	167	982
Kano	205	164	136	115	133	151	904

Comme les conditions d'évapotranspiration d'Israël ne sont pas identiques à celles du Sahel, les régimes d'irrigation ont été adaptés de façon à maintenir dans ces expériences le même rapport entre l'eau fournie et l'ETP pour chaque mois comme au Sahel. Ces rapports sont donnés dans la table 4.3.

Table 4.3: Rapports entre pluie et ETP à Zinder et à Kano.

SITE	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE
Zinder	0,15	0,32	1,01	1,88	0,41	-
Kano	0,29	0,67	1,40	2,35	1,13	0,20

Une expérience préliminaire à Gilat a montré que l'ETP représente environ 80% de l'évaporation à partir d'une cuve à évaporation (de classe-A) et que l'évapotranspiration réelle d'une culture irriguée sous conditions optimales est environ 70% de l'évaporation à partir du bac. Les données d'évaporation de cuve de Gilat et les quantités d'irrigation adaptées, telles qu'elles auraient dû être données à Gilat afin de simuler exactement les conditions du Sahel, sont rapportées dans la table 4.4.

Table 4.4: Données d'évaporation de cuve de Gilat et quantités (mm) d'irrigation adaptées.

SITE	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	TOTAL
Gilat Ecuve	248	264	273	239	204	1228
Zinder	26	60	194	314	84	678
Kano	50	125	269	392	163	1000

Les quantités d'irrigation adaptées calculées ne concordaient pas exactement avec celles données en pratique. Premièrement, il a fallu irriguer 100mm au printemps, pour permettre d'effectuer les traitements de préparation du sol prévus, bien que cette eau ne soit pas disponible au Sahel à cette période-là. Deuxièmement, pendant les mois où les pluies excèdent l'évapotranspiration ou même l'évaporation de cuve, cet excès d'eau aurait

été simplement gaspillé, et donc seul le déficit du sol en eau sur le moment fut comblé pendant la période de demande maximale. Quatre régimes d'humidité ont été établis de la façon suivante:

"Zinder-sec": pour simuler un premier mois relativement sec, avec deux pluies simulées totalisant 85mm.

"Zinder-humide": pour simuler un premier mois favorable, avec trois apports totalisant 90mm dans le mois.

"Kano": dans le premier mois une irrigation de 30mm avant l'émergence et irrigations hebdomadaires d'un total de 130mm après l'émergence.

"Traitement israélien": pour simuler les conditions locales de région sèche après un hiver pluvieux, simulé par une pré-irrigation de 160mm.

Les plantes ont été semées le 18 Mai, et les quantités réelles d'irrigation sont données dans la table 4.5. Après les six premières semaines, le traitement "Zinder" a reçu 50mm d'approvisionnement d'eau chaque semaine, et la parcelle "Kano" 70mm par semaine jusqu'à la fin de Juillet. En Août, on a irrigué trois fois 80mm à une semaine d'intervalle, pour stimuler le grossissement des graines.

Table 4.5: Quantités mensuelles de pluie simulée (mm) pour les différents traitements (100mm de pré-irrigation inclus).

TRAITEMENT	MAI-JUIN	JUIN-JUIL.	JUIL.-AOUT	TOTAL
Israël	160	0	0	160
Zinder-sec	170	180	340	690
Zinder-humide	180	170	340	690
Kano	240	240	380	860

4.1.1.2.2 - Traitements de préparation du sol:

Avant cette expérience, du blé avait été cultivé pendant l'hiver et le printemps 1977, ce qui a épuisé l'eau du sol en profondeur, et laissé sa surface dure, sèche et recouverte de chaume de blé au moment du labourage primaire en Novembre 1977. A ce moment, les traitements de préparation suivants furent appliqués (les noms de code de ces traitements figurent entre parenthèses).

- Contrôle (C): sans préparation primaire.
- Labour profond (L.P): labour à 35cm de profondeur, avec un soc Ghirardi 2-16 pouces réversible, mû par un tracteur à chenille (modèle Fiat 80C).
- Labour léger (L.L): labour à 15cm de profondeur, avec une charrue à versoir de 2 pouces de base, à pénétration faible et irrégulière.
- Sous-solage (S.S): avec un sous-soleur à 11 bras espacés de 30cm, pénétrant à 32cm, mû par un tracteur à chenilles Fiat.
- Disquage léger (D.L): par disque complètement ouvert de 3m de large, pénétrant à 12cm, mû par un tracteur à chenilles Fiat.
- Levées (L): avec une sillonneuse triple de 1m de distance, la distance entre le sillon et la levée étant de 35cm environ, mue par un tracteur à chenilles Fiat.

Le champ avait été mis en jachère l'hiver précédent, pendant lequel il n'y eut que 86mm de précipitation, les pluies se terminant au début de Janvier (en comparaison avec des précipitations annuelles moyennes de 200mm). Après la pré-irrigation de 100mm au début du mois de Mai, tous les traitements, sauf les levées, furent soumis à une préparation minimale du lit de semence et au contrôle des mauvaises herbes, à l'aide d'une herse dentelée passée une fois parallèlement au labourage primaire. Cette opération a permis également

d'incorporer les engrais. La quantité d'engrais, recommandée par Stroosnijder pour le pâturage au Sahel, était de 300kg/ha de N, 100kg/ha de P et 50kg/ha de K.

4.1.1.2.3 - Régimes de précipitations, 1979.

Comme l'indiquent les résultats de la saison précédente, on ne trouve pas de différence entre les deux variations du traitement "Zinder", et en conséquence, les types simulés de précipitations furent changés dans l'expérience de 1979. Les quatre régimes d'humidité furent les suivants:

(I) Contrôle, avec une humidité du sol suffisante tout le long de la période de croissance simulée du Sahel. L'ensemencement fut fait après une légère pluie précoce simulée, après que le sol eut stocké suffisamment d'eau pour environ deux semaines d'évapotranspiration. L'ensemencement fut suivi par un deuxième apport d'eau convenant à la germination et aux premières étapes de croissance. Ensuite, l'humidité du sol a été maintenue au moyen d'irrigations régulières, toutes les deux semaines, pour combler au moins le taux d'évapotranspiration.

(II) Traitement de sécheresse précoce, essentiellement identique au contrôle, mis à part le fait que la première irrigation après l'ensemencement est reportée jusqu'au moment où les jeunes plantes manifestent des signes visibles de manque d'humidité. Par la suite, un apport suffisant en eau a été fourni comme précédemment.

(III) Traitement de sécheresse tardive, identique au traitement de contrôle pendant la première partie de la saison, avec une irrigation décroissante à partir du début du fleurissement, dans le but de créer un manque d'humidité pour les plantes pendant la période du développement de la graine.

(IV) Traitement sans sécheresse, destiné à simuler le cas (actuellement)

hypothétique, où l'agriculteur pourrait repousser le semis jusqu'à ce qu'il y ait eu assez de pluies pour assurer l'établissement des plantes, et pour situer les premières étapes de leur développement dans la partie la plus sûre et la plus humide du Sahel pendant la saison des pluies. Comme il fallait semer tout le champ pour l'expérience à la même date, la situation a été simulée en irriguant plus abondamment avant le semis, et en maintenant un apport suffisant en humidité après le semis, jusqu'à la mi-saison. Par la suite, l'irrigation a été diminuée, provoquant ainsi un manque d'humidité pendant le mûrissement du grain.

Les détails de ces régimes d'humidité sont donnés dans la table 4.6. Les travaux de préparation furent les mêmes que l'année précédente, avec, en plus, l'addition de lits larges (planches), avec deux rangées plantées par lit. Ces lits furent édifiés par un cultivateur lourd et une sillonneuse produisant un lit de semence assez rugueux.

Table 4.6: Taux d'irrigation et quantités d'évapotranspiration estimées (mm) pour la saison 1979.

TRAITEMENT	TAUX D'IRRIGATION									TOTAL
	26/5	2/6	17/6	30/6	14/7	28/7	11/8	25/8	8/9	
I Contrôle, humidité adéquate	65*	28	46	46	46	60	60	80	70	501
II Sécheresse précoce	65*	0	0	28	46	60	60	60	70	389
III Sécheresse tardive	65*	28	46	46	46	30	60	30	25	376
IV Plantation tardive	125*	28	46	46	46	30	30	30	35	416
0,7 Ecuve (std.)			197		193		178		132	700
0,7 Ecuve (champ)			(140)estim.		143		120		(92)estim.	

* Irrigation avant semis

4.1.1.2.4 - Traitements de préparation du sol et régimes d'irrigation, 1979:

Tous les traitements de labourage primaire, sauf les traitements de levées et de lits plats, ont reçu un léger disquage quatre jours après la pré-irrigation comme préparation du lit de semence. La plante fut semée le 30 Mai.

Des recherches préliminaires sur place, avec des lysimètres à système de pesée, ont montré que l'E.T potentielle d'une rangée (de maïs) pleine représentait environ 70% de l'évapotranspiration totale. Pendant Juin et Septembre, l'E.T.P n'est pas un très bon indice pour l'irrigation, du fait qu'en Juin les plantes sont encore petites et ne recouvrent pas le sol au maximum, et qu'en Septembre les plantes vieillissent, la récolte commençant le 6 Octobre. Une cuve d'évaporation non fixe fut installée dans le champ-même et fut régulièrement rehaussée pour être à peu près à la hauteur de la plante, en supposant que la perte par évaporation de cette cuve se rapproche de l'E.T.P du traitement I. La quantité réelle irriguée fut plus petite que celle prévue en Juillet, car durant cet été il y eut une importante réduction d'eau en Israël, et que l'application d'un système d'approvisionnement en eau de tout le pays a réduit les quantités disponibles. Il semble que le rapport entre l'évaporation de cuve au champ et l'évaporation de cuve standart approche 0.7 en Juillet et en Août, ce qui est aussi un rapport très raisonnable entre l'E.T réelle et l'E.T. potentielle, pour une fréquence d'irrigation de 14 jours, alors qu'on suppose que l'E.T n'a pas lieu à sa vitesse potentielle pendant l'intervalle de temps entre deux irrigations. Ce rapport est évidemment le même pour les taux d'évaporation mesurés en cuve et l'E.T évaluée, puisque dans chaque cas l'évaporation mesurée en cuve a été multipliée par un coefficient de 0.7. Ainsi, on voit que les traitements III et IV ont été soumis à un apport très insuffisant en eau, comme à la

mi-Juillet, et que le traitement IV plus que le traitement III au mois d'Août, dans le but de vérifier si un stockage initial plus grand dans la zone des racines peut compenser le déficit de la plante.

Le profil hydrique du sol a été enregistré par un humidimètre à neutrons de profondeur auquel fut rajouté en 1979 un humidimètre à neutrons de surface pour la couche arable. Les instruments ont été ajustés in situ par un échantillonnage gravimétrique converti en teneur volumique d'eau, en utilisant les valeurs de densité apparente du sol déterminées à l'aide des deux sondes Gamma. L'infiltrabilité du sol a été déterminée par un simulateur de pluies, à différents endroits du champ en fin de saison. Les lectures du pénétromètre ont été recueillies peu après le semis. Des observations extérieures ont été faites régulièrement, et l'évaporation en cuve a été notée chaque jour, à la fois celle de la cuve surrélevée dans le champ-même et celle d'une cuve placée dans une station météorologique standart. En raison des dégats causés aux têtes de grains par les oiseaux lors de la saison précédente, cette année, au début du grossissement de la graine, un certain nombre de têtes de fleurs dans chaque parcelle ont été recouvertes de sacs de plastique. La comparaison entre le rendement des têtes recouvertes avec celui de têtes choisies non recouvertes a servi à calculer le rendement ajusté de toutes les parcelles (non recouvertes).

4.1.1.3 - Résultats et discussion

Les résultats détaillés, ainsi qu'une description plus détaillée des différentes mesures, ont été présentés par Hoogmoed et Rawitz (1979) et dans l'appendice 2, partie I, par A.H de Boer et W.B. Hoogmoed. Ici, seuls les faits les plus importants seront résumés, ainsi que les résultats de l'expérience de 1979.

4.1.1.3.1 - Croissance des mauvaises herbes en hiver après un labourage primaire, 1978:

La croissance des mauvaises herbes fut faible et tardive à cause de l'hiver inhabituellement sec cette année-là. La plupart des mauvaises herbes furent du blé poussant spontanément. Dans la parcelle sans préparation, la production de mauvaises herbes fut de 2,8 tonnes/ha, tandis que dans la parcelle de labour profond, il n'y eut pratiquement pas de mauvaises herbes. Dans les autres traitements, la production de mauvaises herbes variait de 1,32 t/ha pour la parcelle de disquage, à 2,24 t/ha pour la parcelle de labour léger. Statistiquement, il n'y a pas de différence réelle dans la production de mauvaises herbes de ces traitements intermédiaires, et il n'existe pas de raison évidente pour qu'il y en ait. Un labour profond a manifestement été très efficace, du moins dans le cas d'un hiver sec, en cela qu'il a rapporté les mauvaises herbes à la surface du sol ou dans la couche supérieure du sol, apparemment sans rapporter à la surface des graines de mauvaises herbes enfouies plus en profondeur. De même, il semble qu'il n'y eut pas de transport de graines de mauvaises herbes, ni par le vent ni par les oiseaux, graines qui auraient très bien pu germer aussi dans la parcelle de labour léger.

4.1.1.3.2 - Répartition de la taille des agrégats:

Cet index a été déterminé en tamisant à sec, à l'aide d'un tamis oscillant mû par moteur, des échantillons de la surface du sol, après la préparation du lit de semence et après l'ensemencement. Les différences principales que l'on peut discerner sont dans le pourcentage d'agrégats plus petits que 2mm, et de ceux plus grands que 4,5mm. Le traitement qui n'a pas

subi de labourage primaire a la quantité la plus grande d'agrégats fins (67% contre 50% environ pour les autres traitements) et la plus petite quantité de gros agrégats (23% contre 38% pour les autres traitements). Le traitement de levées a la plus grande quantité de gros agrégats (43%), la quantité de gros agrégats des autres traitements se situant entre 32 et 39%. Comme les levées ont été édifiées par une sillonneuse semblable à une lame de charrue, mais qu'elles n'ont pas été travaillées par un labourage secondaire comme le furent les autres parcelles, on peut expliquer les gros agrégats de ce traitement par la décomposition des agrégats dans toutes les parcelles sous l'action de la herse dentelée, même lorsque le labourage a été effectué en sol sec, quand les mottes étaient très dures.

Afin d'en faciliter la comparaison, les données des années 1978 et 1979 sont rapportées dans la table 4.7.

Table 4.7: Pourcentage d'agrégats plus petits que 2mm et plus gros que 12,7mm après la plantation de 1978 et 1979, et à la fin de la saison 1979.

	TRAITEMENT DE LABOURAGE						
	SS	LP	D	LL	C	L	L1
<u>% < 2mm</u>							
1978	48	56	58	53	67	50	-
1979	59	37	55	54	63	53	66
Fin 1979	48	39	52	59	55	57	-
<u>% > 12,7mm</u>							
1978	16	21	12	15	8	25	-
1979	18	37	12	20	10	19	13
Fin 1979	16	25	18	12	14	11	-

Il faut noter qu'en 1979 un échantillonnage fut fait après le semis, et un autre après la fin de la saison, afin de suivre les éventuels changements pendant la période de croissance. En général, les résultats furent les mêmes pour les deux années. C'est le traitement sans préparation (comme en 1979 les lits larges) qui ont eu le plus grand pourcentage de petits agrégats, pourcentage nettement plus élevé que celui de tous les autres traitements. Ce traitement a eu également le pourcentage le plus faible de gros agrégats. Le traitement de labour profond a eu, comme prévu, une proportion élevée de gros agrégats pendant les deux années. Il est intéressant de noter que ce traitement a eu un pourcentage élevé des agrégats les plus fins en 1978 mais pas en 1979. Ceci a également été montré par le fait qu'en 1978 le traitement de labour profond a obtenu une proportion élevée, mais pas la plus élevée, de gros agrégats.

Pendant la croissance il y eut une diminution importante du nombre d'agrégats fins dans les traitements de contrôle et de sous-solage. Dans les autres traitements, les changements furent faibles, ou bien il y eut une légère augmentation d'agrégats fins. Ces changements peuvent être expliqués par la formation plus prononcée d'une croûte dans les traitements ayant une proportion élevée d'agrégats fins, et par le fait que cette croûte s'est transformée en gros agrégats pendant l'échantillonnage d'après la saison. Dans les autres traitements, il est évident qu'une décomposition des agrégats a eu lieu pendant la saison, due aux actions d'étanchage, de mouillage et de séchage. Une décomposition importante des grands agrégats est à noter dans les traitements de labourage profond, de levées et de labourage léger, tandis qu'une légère augmentation a eu lieu dans les traitements de contrôle et de disquage. En gros, les changements ne sont pas importants. Apparemment, il n'existe pas de rapport entre la taille de l'agrégat, ni avec la densité de

pousse, ni avec le rendement de 1979.

4.1.1.3.3 - Résistance à la pénétration:

En 1978, des essais ont été faits avec un pénétromètre à impact dans trois endroits: sur les traces de roues du tracteur, sur les traces du planteur et sur l'espace entre deux rangées où les roues de tracteur ne sont pas passées. Dans les deux premiers endroits, il y eut un compactage important évident, et il n'y eut aucune différence perceptible entre les traitements dans le cas des traces de roues. Le sabot du planteur a causé un compactage d'une importance surprenante et dans la plupart des traitements, le degré de compactage fut à peu près le même jusqu'à une profondeur de 50cm. Le traitement de levées fait nettement exception: la résistance de pénétration ne représente que 20 à 40% de celle des autres traitements à une profondeur de 15cm, et de 60 à 80% entre 20 et 35cm. En dessous de ces profondeurs, il n'y eut pas de différence entre les traitements.

Dans l'espace entre rangées où il n'y eut pas de compactage après préparation du sol, de nettes différences dans la résistance de pénétration furent observées, et celles-ci reflètent essentiellement la profondeur de la préparation primaire.

La résistance de pénétration fut donc uniformément élevée dans tous les traitements au dessous d'une profondeur de 45cm. Pour le traitement de labour profond, la résistance fut très faible en dessous de 40cm, pour le traitement de levées en dessous de 25cm, mais seulement à 10cm pour les traitements de contrôle et de disquage. Pour le traitement de labour léger il y eut une augmentation progressive avec la profondeur dans la résistance de pénétration, ce qui est difficile à expliquer, tandis que dans la parcelle de sous-solage, la résistance de pénétration fut élevée dès la surface.

En 1979, la résistance de pénétration du sol a été mesurée à des intervalles de 5cm de profondeur, par un pénétromètre circulaire muni d'un cadran indicateur et d'un cône de 2cm^2 . Des mesures furent faites à deux dates, le 7 et le 28 Juin. A la première date, le pénétromètre fut introduit dans le sol manuellement, et il s'avéra que dans différents traitements et différentes régions, le pénétromètre ne put pas être introduit à profondeur maximale, car la résistance du sol fut plus grande que le poids de l'opérateur. Le 28 Juin, un perforateur à mécanisme hydraulique servit à introduire le pénétromètre dans le sol, ce qui a effectivement rendu possible les mesures à la longueur maximale du manche. Cependant, l'instrument a été endommagé car l'axe du perforateur et le manche du pénétromètre n'étaient pas placés dans le prolongement l'un de l'autre, et de ce fait, les deux traitements de levées n'ont pas pu être échantillonnés à cette date. La comparaison entre les résultats où les échantillonnages furent faits aux deux dates, a montré des résultats assez identiques, et tous les résultats, sauf pour les traitements 6 et 8, ont été obtenus par le pénétromètre mû mécaniquement. Les résultats sont montrés dans la figure 4.1. La mise à zéro du cadran indicateur a été faite avant toute opération, en plaçant des poids sur le manche du pénétromètre, et chaque déviation de $0,01\text{mm}$ de l'anneau équivalait à $0,66\text{kg}$. Dans la figure 4.1, les unités en abscisse sont des millimètres de déviation cumulée. Les données représentent deux répétitions pour chaque mesure, sauf pour les traitements 6 et 8 où il y eut trois répétitions.

Les données cumulées sont données, et tout changement de la résistance de pénétration est indiqué dans les graphes par un changement de pente. En général, on voit qu'il faut fournir un plus grand travail pour enfoncer le pénétromètre dans le sol sur les traces de roues du tracteur que dans l'espace

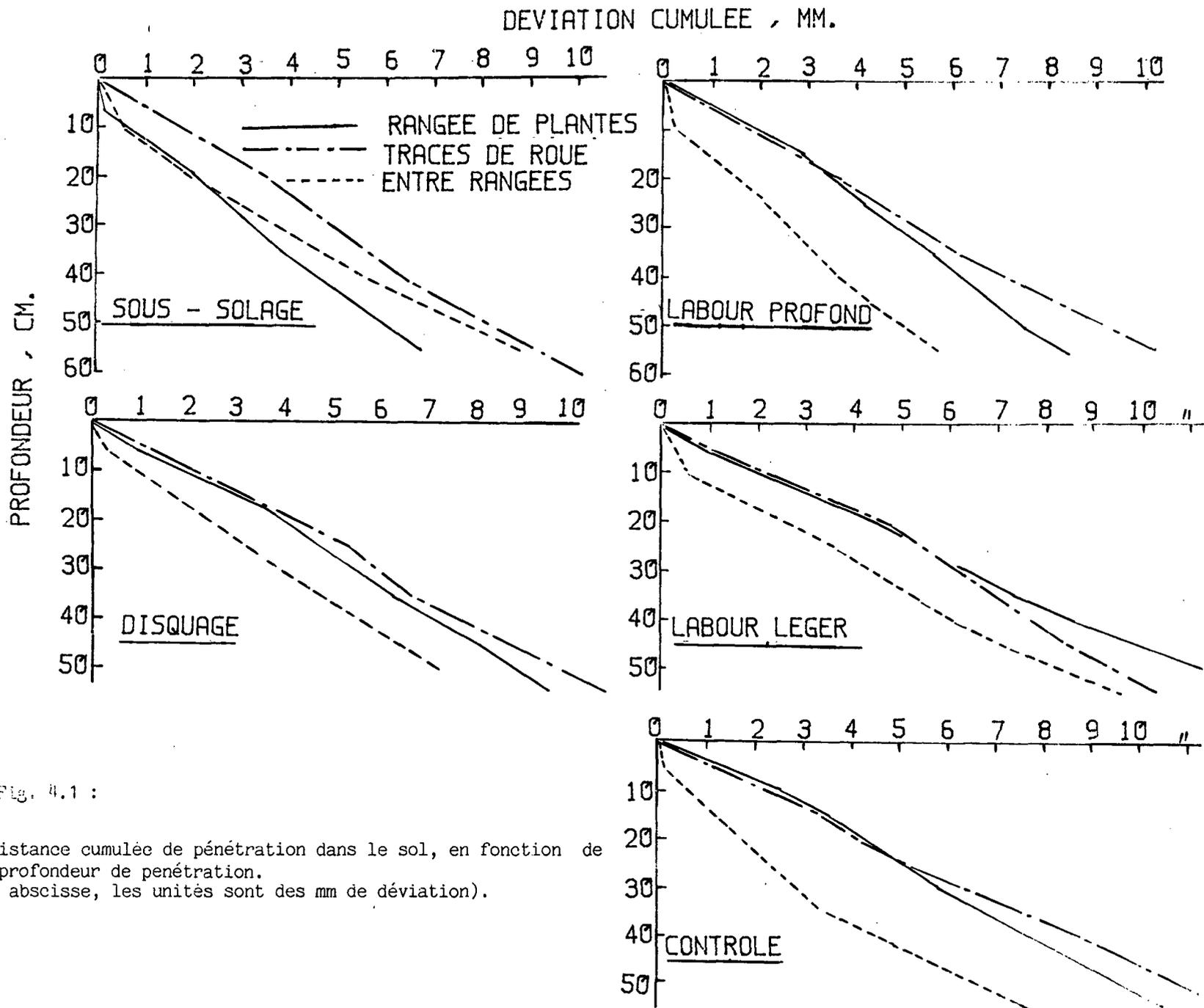


Fig. 4.1 :

Résistance cumulée de pénétration dans le sol, en fonction de la profondeur de pénétration.
(En abscisse, les unités sont des mm de déviation).

entre deux rangées, où les roues de tracteur ne sont pas passées, et ceci était prévisible. Cependant, dans les traitements de labour profond, de disquage, de labour léger et de contrôle, la résistance dans la rangée de la plante est essentiellement identique à celle des traces de roues et plus élevée que dans la région entre deux rangées. Dans le traitement de sous-solage, la résistance entre rangées est au début la même que celle de la rangée de la plante, mais en dessous de 30cm elle augmente progressivement, jusqu'à ce qu'elle soit la même que celle des traces de roues. Seulement dans le cas de levées très fragiles et de planches (lits larges), la résistance de la rangée de la plante et celle d'entre deux rangées furent identiques à toutes les profondeurs. On doit noter que la différence entre la résistance des traces de roues et celle d'entre deux rangées provient principalement du comportement de la couche supérieure du sol, et que les pentes des droites dans les couches plus profondes sont presque similaires. Cependant ceci ne s'applique pas aux traitements de labour profond et de levées, et reflète effectivement la nature et la profondeur des opérations de préparation du sol. Dans les trois derniers traitements, la résistance spécifique reste de façon constante plus faible dans la région entre deux rangées, respectivement dans les régions entre deux rangées et dans la rangée de plantes, que sur les traces de roues.

Il est intéressant de noter le changement de la pente à 35cm dans le traitement de contrôle. Du fait qu'il ne s'agissait pas d'un champ vierge, on a conclu que la pente en dessous des 35cm représente les conditions naturelles du sol, tandis que la couche supérieure montre l'effet de précédentes opérations de préparation. Le fait que la résistance dans la rangée de plantes tend à être égale à celle sur les traces de roues, indique que le sabot du planteur provoque un certain compactage à la surface du sol.

Il n'y a pas d'indication dans les données sur une corrélation éventuelle entre la résistance de pénétration et le rendement. De ce fait, quels que soient les changements dans la résistance de pénétration qui aient pu être provoqués par les différentes opérations de préparation, et indépendamment de l'effet de tels changements sur la profondeur de pénétration de l'humidité, on ne peut conclure que dans les conditions de cette expérience ayant trait aux travaux de préparation, la pénétrabilité a eu un effet quelconque sur le rendement de la culture.

4.1.1.3.4 - Caractéristiques des plantes

4.1.1.3.4.1 - Emergence

La densité de pousse en 1978 fut une fonction linéaire inverse du pourcentage d'agrégats plus grands que 12,7mm, la meilleure pousse étant obtenue dans les parcelles de contrôle et de disquage, et la plus basse dans la parcelle de levées. Les résultats indiquent que dans ce cas la croûte de surface n'était pas le facteur déterminant dans l'établissement de la pousse, puisque c'est le sol à agrégats les plus fins qui finalement est le plus susceptible de former une croûte. Trois mécanismes sont suggérés pour expliquer le mode d'émergence observé.

Premièrement, quelques grains ont probablement été recouverts par de gros agrégats ou par de petites mottes pendant le semis, et la jeune plante germée a dû rencontrer une résistance à traverser le sol vers le haut, ce qui a pu retarder ou empêcher l'émergence. Deuxièmement, de gros agrégats peuvent être responsables d'un faible contact entre le sol et la graine, diminuant l'absorption d'eau par le grain et empêchant ainsi la germination. Ces deux problèmes pourraient au moins être rendus moindres par une irrigation après

le semis. La troisième raison a un rapport avec la condition rugueuse et la mauvaise qualité de la surface du sol pendant le semis, avec comme conséquence, le fait que certaines graines restent à la surface du sol sans être recouvertes, ou sont déposées sur de larges cavités dans la dernière couche. Dans ces deux cas, la germination n'a pas lieu. Ce phénomène est particulièrement prononcé dans le traitement des levées qui n'a pas été hersé avant le semis. En résumé, dans ce cas la germination et l'émergence ont été favorisées par un lit de semence fin au moment de planter, ce qui est aussi l'expérience des agriculteurs israéliens qui ont une agriculture d'irrigation intensive. Les résultats sont résumés dans les figures 4.2-4.5.

En 1979, la densité de pousse a été déterminée le 28 Juin, en comptant le nombre de plantes établies sur une longueur de rangée de 2m, avec quatre répétitions dans chaque parcelle. Les résultats sont donnés dans la table 4.8.

Table 4.8: Nombre moyen de plantes par mètre dans les différents traitements.

TRAITEMENT D' IRRIGATION	TRAITEMENT DE LABOURAGE							MOY.
	SS	LP	D	LL	C	L	L1	
	PLANTES PAR METRE							
Contrôle, humidité adéquate	26,2	14,6	20,4	17,6	20,3	25,6	21,5	21,5
Sécheresse précoce	13,8	18,4	14,5	16,8	11,1	15,4	23,6	16,1
Sécheresse tardive	16,4	18,6	20,8	19,9	15,1	28,5	24,6	21,4
Plantation tardive	18,1	16,4	15,1	11,8	16,6	19,1	24,8	17,6
Moyenne	18,6	17,0	17,7	16,3	15,8	22,1	23,6	19,2

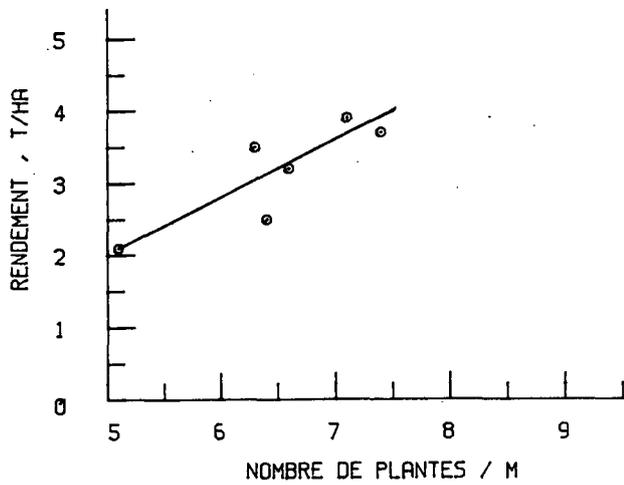


Fig. 4.2 : Rendement en grain en fonction de la densité de pousse.

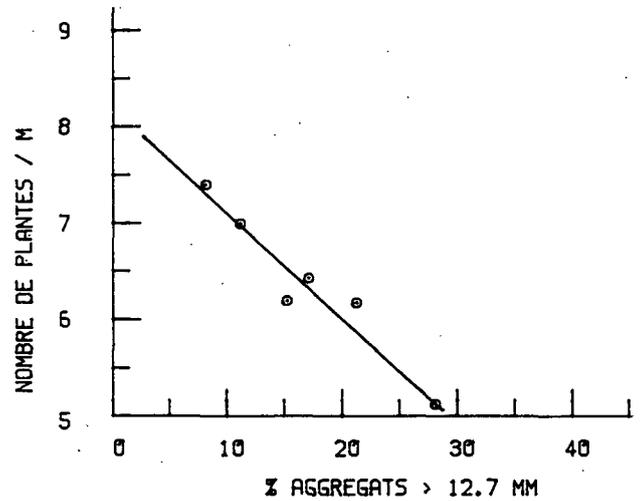


Fig. 4.3 : Densité de pousse en fonction de la taille de l'agrégat.

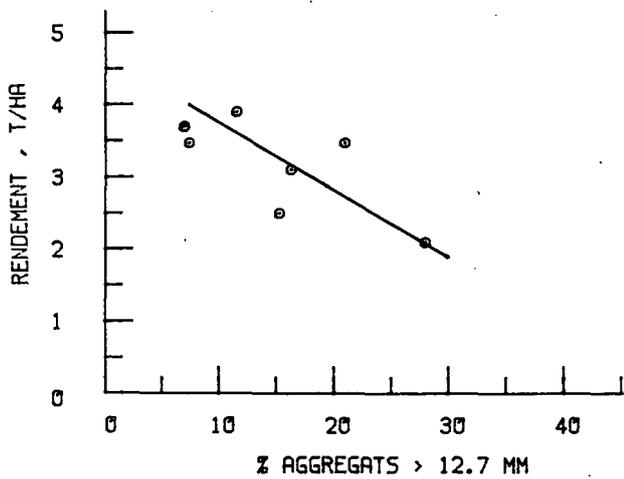


Fig. 4.4 : Rendement en fonction de la taille de l'agrégat.

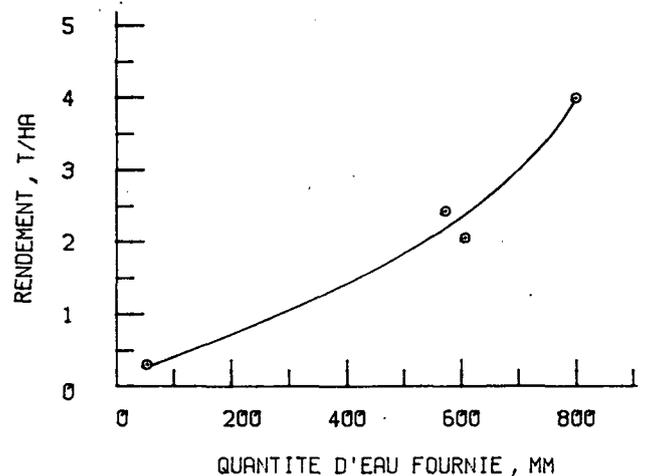


Fig. 4.5 : Rendement en fonction de l'apport d'eau.

L'écart-type moyen des résultats ci-dessus est de ± 3 , et on voit que la pousse était un peu moins dense dans les traitements de labour léger et de contrôle, et plus dense de façon significative dans les lits larges. Il n'y a aucun signe de corrélation avec le rendement final, et de ce fait la densité de pousse au début de la saison ne représente pas une bonne prédiction du rendement de l'année.

4.1.1.3.4.2 - Hauteur des plantes:

La hauteur des plantes a été mesurée le 9 Juillet, en mesurant la hauteur totale de vingt plantes dans chaque parcelle. L'écart-type variait de 5 à 10cm suivant le traitement, le traitement de sécheresse précoce ayant eu l'écart-type le plus grand. Ainsi que le montrent les résultats présentés dans la table 4.9, la hauteur ne semble pas être une bonne prédiction du rendement final, sauf pour le traitement II. Ceci peut être expliqué par le fait qu'à la date où a été effectué son échantillonnage, le traitement II avait déjà subi une sécheresse précoce et le développement de la plante avait été influencé. Cependant, la hauteur de la plante à cette date ne peut refléter une sécheresse tardive. On n'a pas d'indication non plus sur la réaction de la plante aux traitements de préparation du sol concernant cette caractéristique.

Table 4.9: Hauteur des plantes (moyenne de 20 plantes par parcelle) le 9 Juillet 1979.

TRAITEMENT D' IRRIGATION	TRAITEMENT DE LABOURAGE							MOY.
	SS	LP	D	LL	C	L	LI	
Contrôle, humidité adéquate	HAUTEUR DES PLANTES, CM							
	91	82	76	82	87	89	90	86
Sécheresse précoce	63	47	50	72	70	72	62	64
Sécheresse tardive	88	85	75	84	85	87	88	85
Plantation tardive	90	84	80	83	90	91	90	88
Moyenne	83	75	70	80	83	85	90	88

4.1.1.3.4.3 - Accumulation de matière sèche:

Le 1er Août et le 4 Septembre 1979, des échantillons individuels de masses de tiges et de têtes de fleurs furent pris dans tous les traitements de labour du traitement d'irrigation I, et dans tous les traitements d'irrigation du traitement de labour 5 (sans préparation). Les résultats sont présentés dans les figures 4.6 et 4.7. Il semble que déjà le 1er Août, la hauteur des tiges et celles des têtes de fleurs pouvaient être de bonnes prédictions du rendement final en grain, pour le traitement de labour mais non pour celui d'irrigation. Pour le traitement d'irrigation (et non de labour) c'est le poids d'une tête de grain qui est un bon indice du rendement final.

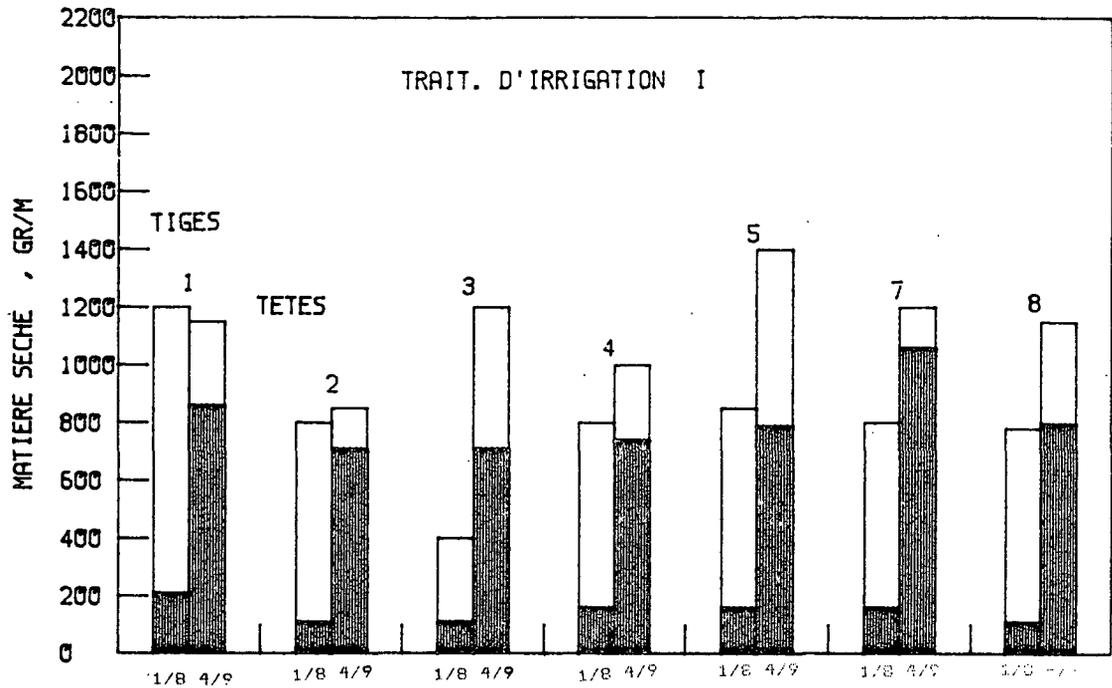


Fig. 4.6 : Accumulation de matière sèche le 1er Août et le 4 septembre, pour tous les traitements de préparation du traitement d'irrigation I.

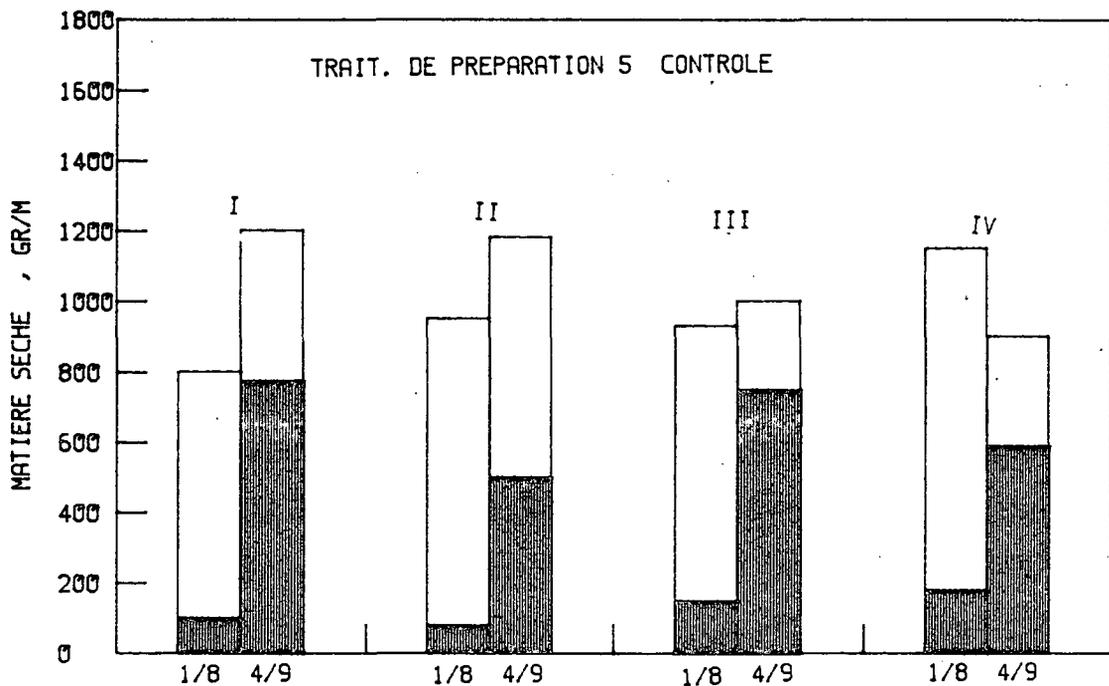


Fig. 4.7 : Accumulation de matière sèche le 1er Août et le 4 septembre, pour tous les traitements d'irrigation du traitement de préparation 5 (contrôle, sans préparation).

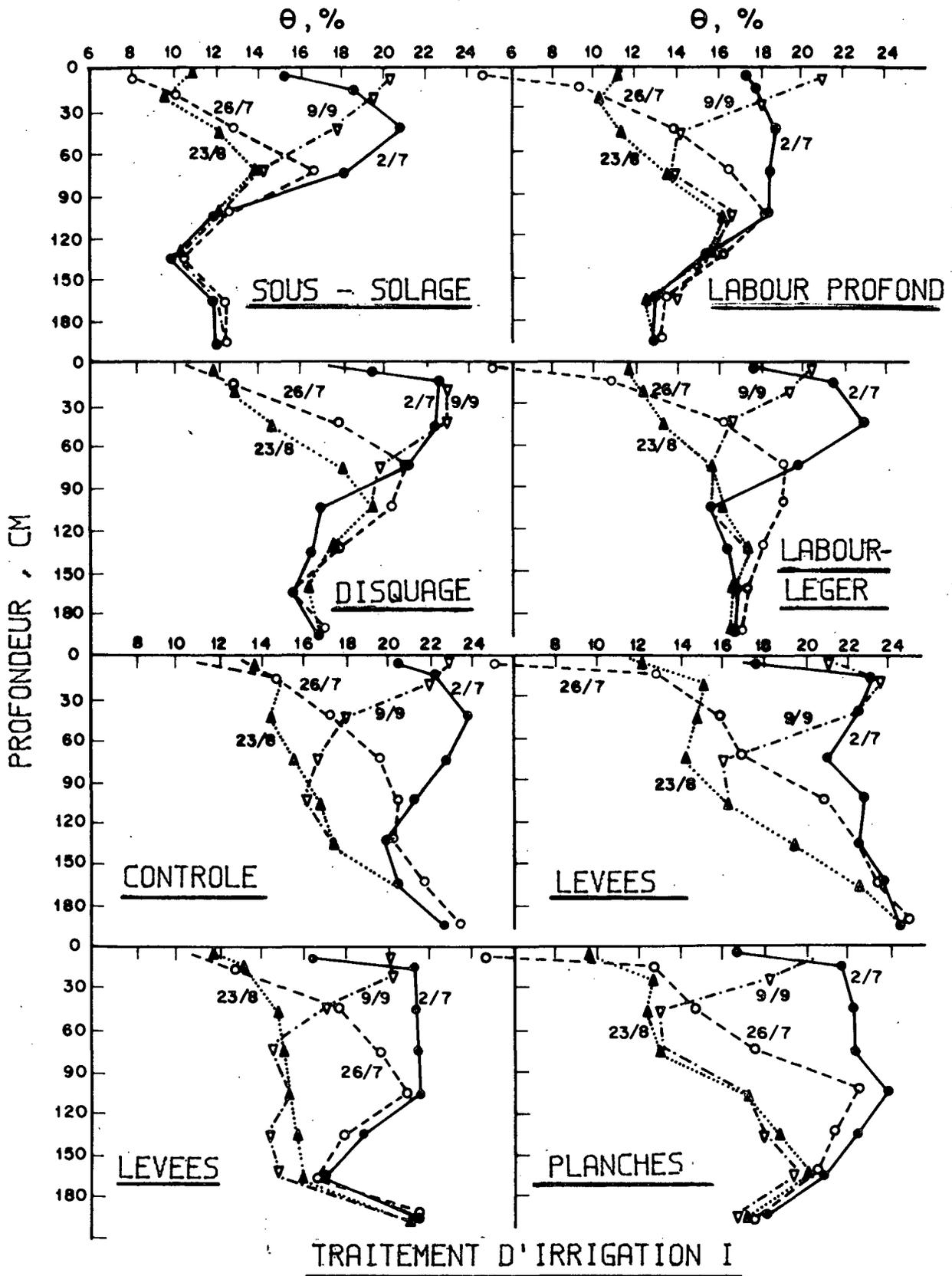


Fig. 4.8 : Profils hydriques verticaux à certaines dates, pour tous les traitements de préparation du traitement d'irrigation I.

4.1.1.3.4.4 - Profondeur de l'activité des racines:

L'activité des racines a été estimée en 1979 par deux méthodes, en prenant des échantillons de sol au milieu de Juillet et après la récolte, et en analysant les modes d'extraction de l'humidité comme le montre la figure 4.8. Des échantillons de racines furent pris aux deux dates dans les traitements de contrôle, de labour profond et de labour léger. Il n'y eut pas de grandes différences entre les traitements aux deux dates. En Juillet, on ne trouva pas du tout de racines en dessous de 80cm, et 90% ou plus du total des racines se trouvaient au dessus d'une profondeur de 60cm. Près de 30% se trouvaient au dessus de 30cm. Dans le traitement de labour léger 90% des racines étaient au dessus de 40cm et 80% au dessus de 60cm, ce qui indique une formation de racines plus en surface dans ce traitement que dans les deux autres. A la fin de la saison, cette situation s'est quelque peu transformée. Premièrement, on a trouvé des racines à une profondeur de 110cm, avec environ 2% de racines dans la couche 100-110cm. A ce moment, 90% des racines se trouvaient dans la couche 0-85cm, ce qui montre que le système racinaire s'est étendu depuis Juillet. Près de 55% des racines étaient au dessus de la couche de 30cm, ce qui est un léger changement depuis Juillet. Le traitement de labour léger a encore une distribution de racines plus superficielle, mais dans ce traitement et dans le traitement de labour profond, 90% des racines se trouvent au dessus de 80cm de profondeur.

4.1.1.3.4.5 - Rendement

Les résultats de rendement sont donnés dans la table 4.10. Les récoltes furent faites à la mi-Septembre, 120 jours après le semis. Tous les grains n'étaient pas secs et mûrs à ce moment-là, mais il fallait absolument

effectuer les récoltes, car un champ de sorgho isolé attire un grand nombre d'oiseaux, et au moment des récoltes quelques dégâts avaient déjà été causés. La table montre clairement que l'apport d'eau à la plante a été, de loin, le facteur dominant dans la détermination du rendement. Il est évident que le traitement de "dryland farming" n'a pas disposé d'une quantité d'eau suffisante pour permettre aux pousses initialement convenables de donner des têtes de fleurs et du rendement. Le niveau de rendement total fut si bas, qu'on peut se demander si les différences relativement importantes trouvées entre les traitements de préparation du sol ne sont pas dues à autre chose qu'au hasard.

Table 4.10: Rendement de matière sèche des grains de sorgho (tonnes/hectare) pour l'année 1978.

TRAITEMENT DE PLUIE*	TRAITEMENT DE LABOURAGE					
	LP	C	L	LL	D	SS
Région sèche (60)	0,293	0,093	0,220	0,680	0,270	0,820
Zinder-sec (590)	2,87	3,43	2,20	1,68	2,26	3,14
Zinder-humide (590)	3,24	1,44	1,98	1,42	3,32	2,87
Kano (760)	4,54	6,16	2,73	4,56	6,04	3,12

* indique l'eau appliquée en irrigation, sans les 100mm de pré-irrigation.

A première vue, on peut noter que la performance relative des différents traitements de labour et d'irrigation n'est pas très constante, à savoir qu'on ne trouve pas toujours un rendement maximal dans un traitement de labour donné pour tous les traitements d'irrigation, et vice-versa. Par exemple, on ne s'attend pas à ce qu'il y ait de différence entre les deux traitements de

levées (6 et 7), ni de grande différence entre ceux-ci et celui des lits larges (traitement 8). Cependant les données de rendement montrent une variabilité considérable, et de plus, le classement relatif de ces traitements, qui sont essentiellement ressemblants, n'est pas non plus constant. Malgré cela, un examen minutieux de ces traitements montre qu'un modèle est discernable.

Le rendement des deux traitements "Zinder" est en général beaucoup plus élevé que "Kano", mais aucune différence systématique n'a été relevée entre les deux versions. De même, la réponse aux traitements de préparation primaire n'a pas été tout à fait constante. Il y a une tendance générale à de hauts rendements pour les traitements de contrôle et de disquage, et à de bas rendements pour le traitement de levées. Les autres traitements donnent des rendements intermédiaires. En prenant la valeur moyenne des trois traitements seulement irrigués, on trouve que le rendement en grain est une fonction linéaire de la densité de pousse, qui est elle-même une fonction linéaire, mais inverse, du pourcentage d'agrégats plus gros que 12,7mm (figures 4.2 et 4.3). Le rendement final est donc lui aussi une fonction linéaire inverse de la taille des agrégats (figure 4.4). Un examen des régimes hydriques du sol tout le long de la période de croissance n'a pas montré un effet quelconque des travaux de préparation primaire, lors de l'automne précédent, sur le régime hydrique du sol, en ce qui concerne la profondeur de pénétration ou la vitesse d'extraction de l'eau par la plante. Dans ce cas cependant, le principal effet de la préparation primaire a été sur la condition du lit de semence au moment de la mise en culture, ce qui influence de façon évidente la densité de pousse de la plante, et donc le rendement final. L'effet de l'apport en eau sur la croissance se montre dominant lorsque l'on fait la moyenne du rendement de tous les traitements de

labour, en exprimant le rendement en fonction de l'apport en eau (figure 4.5).

Dans le but de faciliter l'interprétation des résultats des différentes mesures et d'évaluer leur influence sur la performance de la plante, il semble utile de présenter d'abord les données sur le rendement final (table 4.11) sans faire d'interprétation détaillée.

Table 4.11: Rendement de matière sèche du grain, corrigé après les pertes dues aux oiseaux.

TRAITEMENT D' IRRIGATION	TRAITEMENT DE LABOURAGE								
	SS	LP	D	LL	C	L	L	L1	MOY.
	RENDEMENT, TONNES/HA								
Contrôle, humidité adéquate	4,30	3,25	1,90	3,98	3,95	4,25	3,60	2,56	3,48
Sécheresse précoce	2,63	1,51	1,32	4,29	2,73	3,05	2,19	2,16	2,48
Sécheresse tardive	4,82	2,14	2,91	3,03	2,06	3,00	3,88	2,35	3,02
Plantation tardive	3,33	0,73	2,93	1,76	1,13	2,15	2,18	2,15	2,05
moyenne	3,77	1,91	2,27	3,26	2,47	3,11	2,96	2,30	2,76

Premièrement, le traitement de contrôle, qui devait assurer un apport suffisant d'humidité à la plante tout au long de la période de croissance, a manifestement donné les meilleurs rendements, et a effectivement subi une perte d'exactly 70% de l'évaporation en cuve dans le champ. L'exception principale dans ce traitement d'eau est le traitement de labour à disques, et il n'y a pas à cela d'explication satisfaisante. Le traitement d'ensemencement tardif (IV) a donné généralement les rendements les plus bas, et ceci semble être la conséquence d'avoir appliqué seulement 50% de l'E.T

actuelle évaluée pendant les mois de Juillet et Août. Etant donné que le traitement de sécheresse tardive (III) a généralement donné des rendements plus élevés que le traitement de sécheresse précoce, on pouvait s'attendre à ce que le traitement IV donnât des rendements au moins égaux à ceux du traitement III, dans la mesure où la précipitation a été efficace. La relation entre le traitement II et le traitement III montre que la "sécheresse tardive" est en réalité plus modérée que celle du traitement IV.

La comparaison entre les traitements de labour montre une supériorité claire et constante du traitement de sous-solage (1). Alors que la performance moyenne la plus basse est celle du traitement de labour profond (2), ce traitement n'a donné le plus bas rendement qu'avec le traitement d'irrigation d'ensemencement tardif (IV). A part pour le très bas rendement du traitement IV, le rendement moyen le plus bas a probablement été obtenu pour le traitement de disquage (3). Les rendements moyens des deux traitements de levées identiques (6 et 7) sont très ressemblants, comme prévu, et montrent de façon qualitative la variabilité des résultats.

Le niveau général de rendement est similaire à celui des traitements irrigués de l'année précédente, mis à part qu'en aucun cas le rendement maximum de 6t/ha n'a été atteint, contrairement à deux traitements l'année précédente.

L'activité des racines peut aussi être déduite à partir des modèles d'extraction de l'humidité comme le montre la figure 4.8. Il n'y eut pas de grandes différences entre les traitements, mais on voit bien qu'en général ni l'extraction ni l'apport en humidité ne sont évidents à moins de 60cm de profondeur. En Septembre, lorsque les plantes ont déjà mûri, le changement d'humidité avec le temps est faible. En fin-Juillet et en Août, on peut voir que les changements d'humidité dans les couches plus profondes dans le

traitement de labour léger sont plus prononcés que dans les deux autres.

4.1.1.3.5 - Régime hydrique du sol:

4.1.1.3.5.1 - Le bilan hydrique, 1979.

L'humidité du sol a été enregistrée avant et après chaque irrigation, avec une sonde à neutrons en profondeur et une sonde à neutrons de surface, les deux ayant été mises à zero in situ. Il y avait un tube d'accès de la sonde à neutrons de profondeur dans chaque parcelle, dans l'une des deux rangées centrales, le tube étant placé à 10cm en dedans de la rangée de graines. Les lectures de la sonde de surface ont été faites à des endroits précis et permanents, adjacents à la rangée de plantes. Les données d'humidité du sol furent aussitôt mises sur graphe de deux façons: les profils hydriques verticaux selon les dates d'échantillonnage, jusqu'à une profondeur de 210cm, et, en millimètres d'eau stockée dans la couche 0-150cm en fonction du temps. Les résultats des échantillonnages sont donnés dans les figures 4.8 et 4.9.

Il faut noter que dans la figure 4.9, à la date de l'irrigation il y a un vide inévitable dans l'enregistrement des données. Alors qu'il est techniquement possible de déterminer l'humidité du sol le jour précédant l'irrigation, qui est toujours effectuée la nuit, l'état boueux du champ après l'irrigation rend les mesures infaisables. La mesure de l'humidité d'après l'irrigation ne peut se faire qu'un à trois jours après l'irrigation. Si l'on désire obtenir une estimation de l'efficience de l'apport en eau, ou analyser le bilan hydrique au champ, on doit d'une façon ou d'une autre passer par ce vide. Ce vide dans l'échantillonnage entre la pré-irrigation et le moment de l'initiation de l'irrigation est la partie la moins problématique des deux

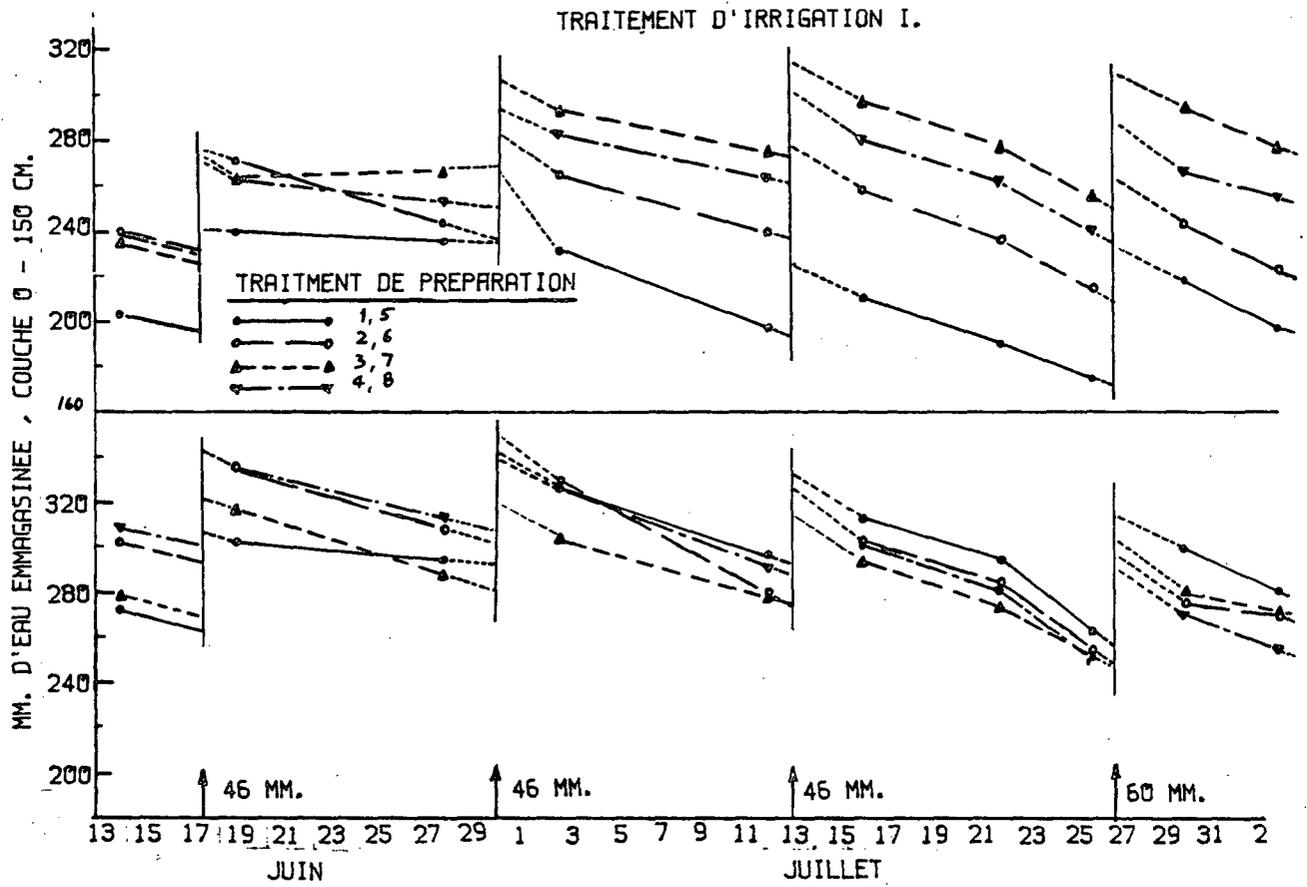


Fig. 4.9 : Résultats saisonniers de la quantité d'eau stockée dans la couche 0-150cm du traitement d'irrigation I.

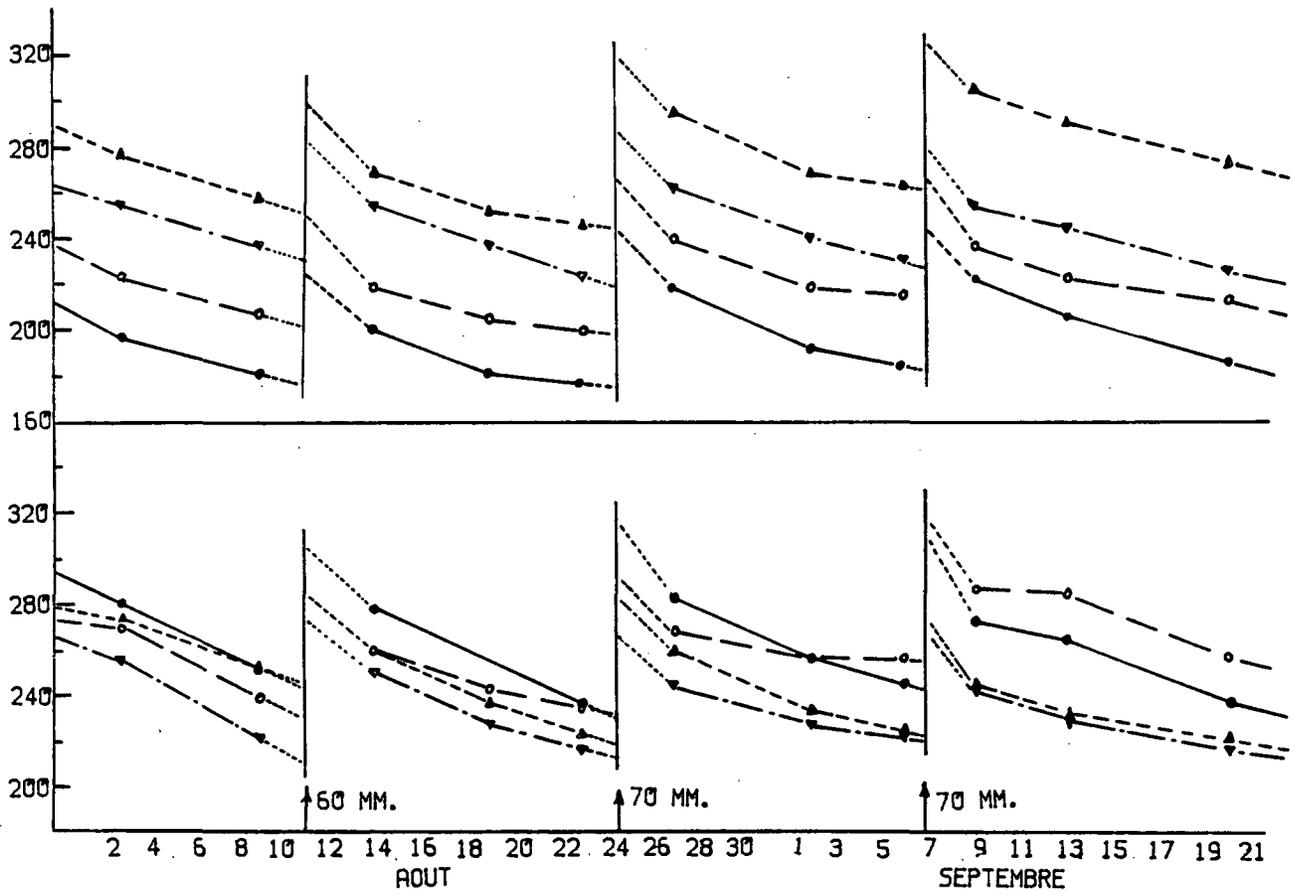


Fig. 4.9 : Suite.

sections. Dans la plupart des cas où l'intervalle entre deux irrigations ou deux pluies est d'une semaine ou plus, il n'y a plus d'évaporation rapide de la surface du sol mouillé, et la vitesse d'évapotranspiration est également plus faible que dans la première partie du cycle d'assèchement. De plus, l'intervalle de temps entre l'échantillonnage et l'irrigation est généralement court, comme on peut le voir d'après l'enregistrement des échantillons de la figure 4.9. Ainsi, une simple extrapolation en avant de l'utilisation de l'eau du sol avec le temps peut raisonnablement être considérée comme sûre, tant que les erreurs des valeurs estimée et réelle des stocks d'eau du sol ne sont pas trop élevées.

Cependant, ce n'est pas le cas pour l'intervalle entre l'arrêt de l'irrigation et l'échantillonnage d'après l'irrigation. Premièrement, l'intervalle de temps est généralement plus long, ce qui rend l'extrapolation plus risquée. Deuxièmement, immédiatement après irrigation, le profil du sol se trouve quelque part entre le niveau de saturation et la capacité au champ, espace dans lequel la conductivité hydraulique est la plus élevée, et donc le drainage vers le bas est le plus rapide. De plus, pendant cette période, la vitesse d'évapotranspiration a certainement presque atteint sa vitesse potentielle, ce qui n'est pas nécessairement le cas pendant le reste du cycle d'assèchement. Par conséquent, l'assèchement du sol pendant les premiers jours après l'humidification se fait sans aucun doute à une vitesse plus grande que pendant la dernière partie du cycle d'assèchement, et donc il ne serait pas justifié d'évaluer le stockage de l'eau du sol immédiatement après l'irrigation, par le moyen d'une extrapolation linéaire en arrière. La figure 4.10 donne une illustration schématique du problème. Une simple extrapolation linéaire peut donner une sous-estimation de la déperdition, et donc une efficacité d'application indésirablement basse. Dans ce cas

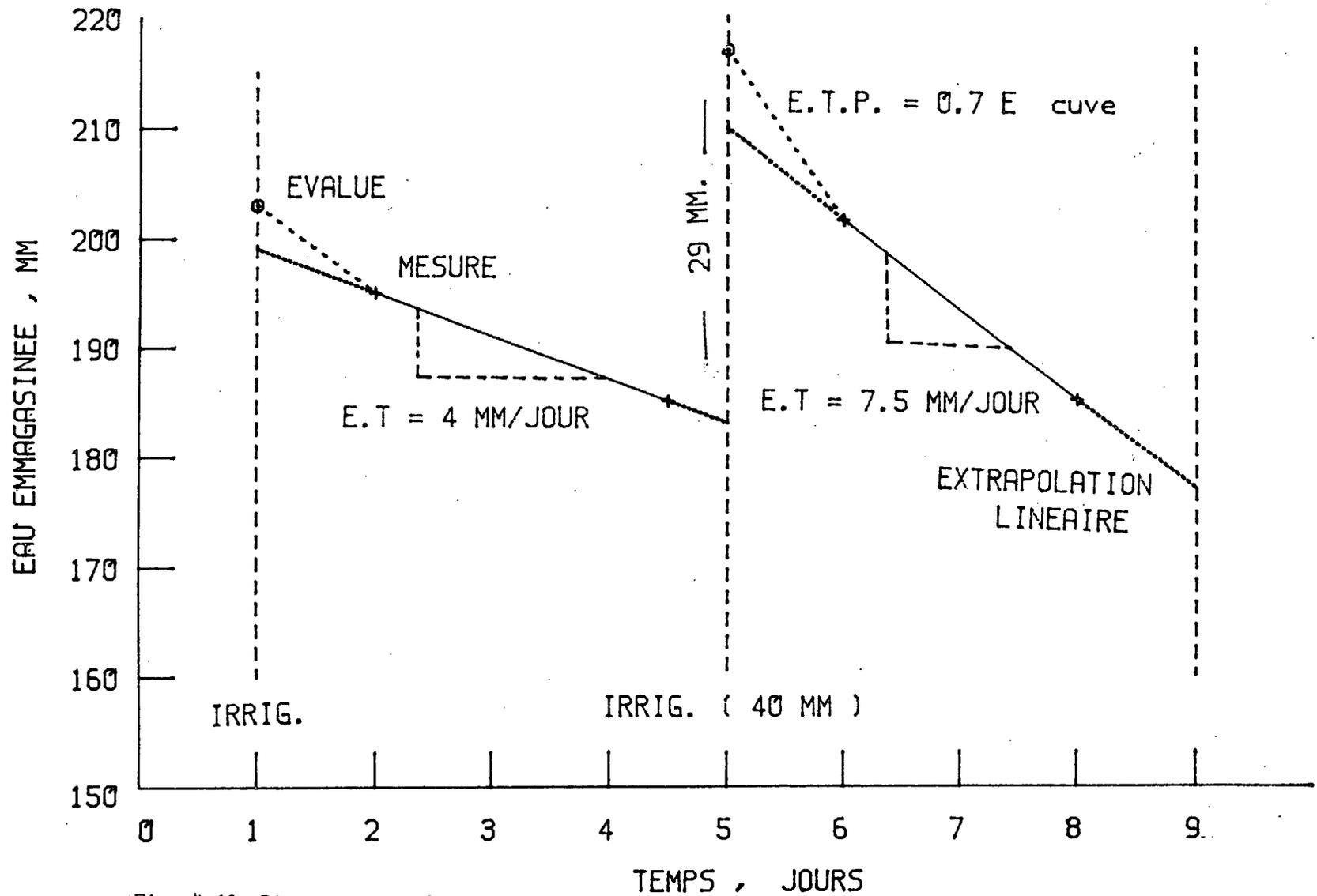


Fig. 4.10: Diagramme schématique montrant la méthode d'extrapolation des données de l'eau emmagasinée, pour le calcul du bilan hydrique.

particulièrement, le stockage de l'eau a été calculé pour la couche 0-150cm, alors que les irrigations n'ont pas été prévues pour atteindre une profondeur plus grande que 120cm, et les données de la figure 4.8 montrent que cette condition est effectivement remplie. Par conséquent, il est raisonnable de supposer toute l'eau non incluse dans le calcul du bilan hydrique ne peut pas être expliqué par un drainage en profondeur, en dessous de la profondeur d'échantillonnage, à l'endroit de l'échantillonnage. La conductivité hydraulique du sol et la teneur hydrique trouvée à 200cm de profondeur indiquent également que le flux vers le bas au travers de ce plan est négligeable. Dans cette expérience, on a donc décidé de supposer que la perte d'eau, dans la période qui suit immédiatement l'irrigation, est due principalement à l'évapotranspiration à un taux potentiel, et que la fonction du stockage de l'eau serait extrapolée vers le bas, à partir de la date de l'échantillonnage d'après l'irrigation jusqu'au moment de l'irrigation avec une perte égale à l'E.T.P évaluée, c'est-à-dire 70% du taux d'évaporation en cuve (cf. figures 4.9 et 4.10). D'après les graphes rectifiés, on a construit la table du bilan hydrique (table 4.12) qui est un exemple du processus détaillé du traitement d'irrigation I. Les résultats saisonniers résumés des quatre traitements d'irrigation sont donnés dans la table 4.13. D'après la table 4.12, on peut voir qu'à la première irrigation (18/6), le réapprovisionnement du sol en eau mesuré est en général plus élevé que la quantité fournie mesurée, ce qui résulterait en une efficacité d'approvisionnement par irrigation supérieure à 100%, chose qui est physiquement impossible. On voit aussi que l'efficacité de l'apport (en eau) tend à décroître avec le temps. Etant donné qu'aucun ruissellement de surface dans le champ n'a été observé, et que la profondeur de pénétration de l'eau fut supérieure à celle de l'humidification (ainsi tout effet possible

Table 4.12: Bilan hydrique détaillé de la couche 0-150cm. Traitement d'irrigation N°I.

DATE	TERME	QUANTITE (MM)	TRAITEMENT DE LABOURAGE								MOY.	
			SS	LP	D	LL	C	L	L	L1		
18/6	Irrig.	46										
	Gain*		56	52	45	49	49	52	57	45	50+5	
	Eff.,%		121	113	98	98	106	113	124	98	109+10	
	Déperd.**		16	46	7	19	20	45	47	38	30+16	
1/7	Irrig.	46										
	Gain		14	45	43	47	51	44	40	38	40+11	
	Eff.,%		30	98	93	102	111	96	87	83	88+25	
	Déperd.		55	45	37	37	30	70	46	57	50+11	
13/7	Irrig.	46										
	Gain		37	41	44	38	39	47	39	32	39,6+4	
	Eff.,%		80	89	96	83	85	102	85	70	86+10	
	Déperd.		58	64	66	65	78	75	65	80	67+6	
27/7	Irrig.	60										
	Gain		64	48	63	49	63	47	50	48	54+8	
	Eff.,%		107	80	105	82	105	78	83	80	90+13	
	Déperd.		60	60	64	51	76	63	51	78	63+10	
11/8	Irrig.	58										
	Gain		42	35	38	40	55	48	33	58	44+9	
	Eff.,%		72	60	66	69	95	83	57	100	75+16	
	Déperd.		43	38	45	54	66	48	63	55	52+10	
25/8	Irrig.	78										
	Gain		57	55	64	56	66	51	56	44	57+7	
	Eff.,%		73	71	82	72	85	65	72	56	72+9	
	Déperd.		49	38	46	47	54	24	51	37	43+10	
7/9	Irrig.	70										
	Gain		50	33	54	37	41	40	33	32	40+8	
	Eff.,%		71	47	77	53	54	57	47	44	57+12	
27/9	Déperd.		68	50	58	53	62	57	47	44	55+8	
Irrig. totale = 404mm												
	Gain total		320	309	351	312	364	329	308	297	323+23	
	Eff. saisonnière, %		79	76	87	77	90	81	76	74	80+6	
	Déperdition totale		349	341	323	326	406	382	370	389	361+30	

* Gain dû à l'irrigation de la veille, d'après une extrapolation du graphe 4.9.

** Déperdition depuis la date de la dernière irrigation, d'après ce même graphe.

Table 4.13: Résumé saisonnier du bilan hydrique de la couche 0-150cm pour les traitements des périodes 17/6 - 27/9.

COMPOSANTS DU BILAN HYDRIQUE	TRAITEMENT DE LABOURAGE								
	SS	LP	D	LL	C	L	L	L1	MOY.
	<u>Traitement d'irrigation I</u>								
Irrigation, mm	404	404	404	404	404	404	404	404	404
Gain cumulé du profil, mm*	320	309	351	312	364	329	308	297	323+23
Déperdition cumulée, mm*	349	341	323	326	406	382	370	389	361+30
Efficienc e d' approvisionnement, %	79	76	87	77	90	81	76	74	90+6
Changement saisonnal du stock. du sol, mm	-29	-32	+30	-14	-42	-53	-62	-92	
Drainage (basé sur gain), mm	0	0	2	0	0	0	0	0	
Drainage (basé sur irrigation), mm	84	95	51	92	40	75	96	107	
	<u>Traitement d'irrigation II</u>								
Irrigation, mm	324	324	324	324	324	324	324	324	324
Gain, mm	277	270	257	267	301	222	289	280	270+24
Déperdition, mm	304	286	279	288	361	301	333	284	305+28
Efficienc e, %	85	83	79	82	93	69	89	71	81+8
Changnt stock., mm	-27	-16	-22	-31	-60	-79	-44	-68	
Drainage (gain), mm	0	0	0	10	0	0	0	64	
Drainage (irr.), mm	47	54	67	67	23	102	35	108	

Table 4.13: Suite

COMPOSANTS DU BILAN HYDRIQUE	TRAITEMENT DE LABOURAGE								
	SS	LP	D	LL	C	L	L	L1	MOY.
	<u>Traitement d'irrigation III</u>								
Irrigation, mm	280	280	280	280	280	280	280	280	280
Gain, mm	294	354	275	324	212	219	238	234	269+52
Déperdition, mm	339	401	326	387	293	293	319	292	331+42
Efficience, %	105	126	98	116	76	78	85	84	96+18
Changnt stock., mm	-35	-47	-51	-63	-81	-74	-81	-58	
Drainage (gain), mm	-10	0	0	0	0	0	0	0	
Drainage (irr.), mm	-24	-74	+5	-44	+68	+61	+42	+46	
	<u>Traitement d'irrigation IV</u>								
Irrigation, mm	262	262	262	262	262	262	262	262	262
Gain, mm	244	213	201	181	251	189	157	204	205+31
Déperdition, mm	305	251	245	240	325	291	252	303	276+33
Efficience, %	93	81	77	69	96	72	60	78	78+12
Changnt stock., mm	-61	-38	-48	-59	-74	-102	-95	-99	
Drainage (gain), mm	0	0	4	0	0	0	0	0	
Drainage (irr.), mm	18	49	65	81	11	73	105	58	

* Mesures effectuées par humidimètre à neutron.

des travaux de préparation sur la profondeur de pénétration de l'eau est éliminé), on peut considérer les huit graphes de préparation du sol comme plusieurs répétitions pour le calcul du bilan hydrique. L'écart-type de l'efficience de l'approvisionnement d'irrigation calculée est indiqué pour chaque date d'irrigation, et l'écart-type saisonnier moyen est de 14%, ce qui équivaut à un coefficient de variabilité de 17%. L'efficience de l'approvisionnement en eau a été définie comme:

$$(\text{gain mesuré} / \text{approvisionnement mesuré}) \times 100$$

Les conséquences de la variabilité mentionnée ainsi que celles de l'efficience décroissante de l'approvisionnement seront discutées plus tard. Pour le moment, il suffit de dire que les divergences dues aux erreurs de mesure ont tendance à s'annuler les unes les autres au long de la saison, alors qu'elle peuvent être très grandes pour un approvisionnement individuel en eau, en particulier pour les faibles approvisionnements. Les résultats résumés de la table 4.13 sont basés sur la formule suivante de l'équation du bilan hydrique:

$$\Delta s = I - D - F$$

quand:

Δs = Changement en mm dans le stockage de l'eau au long de la saison.

I = Apport d'eau (input) en mm.

D = Déperdition cumulée du profil hydrique sur tous les cycles d'irrigation en mm.

F = Drainage en profondeur calculé en dessous de la profondeur d'échantillonnage.

Comme l'efficience de l'approvisionnement saisonnier n'est en aucun cas supérieure à 100%, la quantité d'eau gagnée par la zone radriculaire en

conséquence de l'irrigation, ainsi qu'elle a été déterminée par les mesures d'humidité du sol, est plus faible que la quantité totale fournie. Du fait qu'on ne peut pas mesurer indépendamment le drainage en profondeur, il est impossible d'évaluer avec précision la quantité d'eau non expliquée représentant la différence entre les pertes par évaporation et le drainage en profondeur. Ces deux explications sont les seules possibles en l'absence de tout ruissellement de surface observé. Sans avoir de valeur mesurée de drainage, on peut l'évaluer uniquement par soustraction en se servant de l'équation du bilan hydrique, auquel cas ce terme comprendra non seulement tout le drainage réel, mais aussi l'erreur totale de mesure.

En évaluant la composante de drainage de l'équation du bilan hydrique, il faut choisir quelle valeur utiliser comme paramètre de base. Si on utilise la quantité d'approvisionnement réel, celle-ci suppose implicitement que l'efficacité technique d'approvisionnement en eau est de 100%, c'est-à-dire qu'exactement toute la quantité d'eau approvisionnée par irrigation s'est infiltrée dans le sol, et aussi que l'eau a été répartie de façon parfaitement uniforme sur toute la surface de la parcelle. Le fait que l'irrigation se fait la nuit, alors que le taux d'évaporation est bas et que la vitesse du vent est proche de zéro, ce qui élimine les pertes d'eau dues au vent, joue en faveur de cette approche. Par contre, s'opposent à ce choix, le fait que l'on sache que le coefficient d'uniformité des asperseurs, d'après Christiansen, doit atteindre un minimum de 84% sous conditions standard, et que ce coefficient d'uniformité est sans aucun doute plus bas à cause des interférences dues au feuillage des plantes et aux fluctuations de la pression d'eau au point de dégagement. Lorsque l'on confond l'apport en eau avec l'approvisionnement total en eau, on obtient des valeurs anormalement élevées pour la composante du drainage, environ 25% de l'eau fournie. Ceci n'est pas

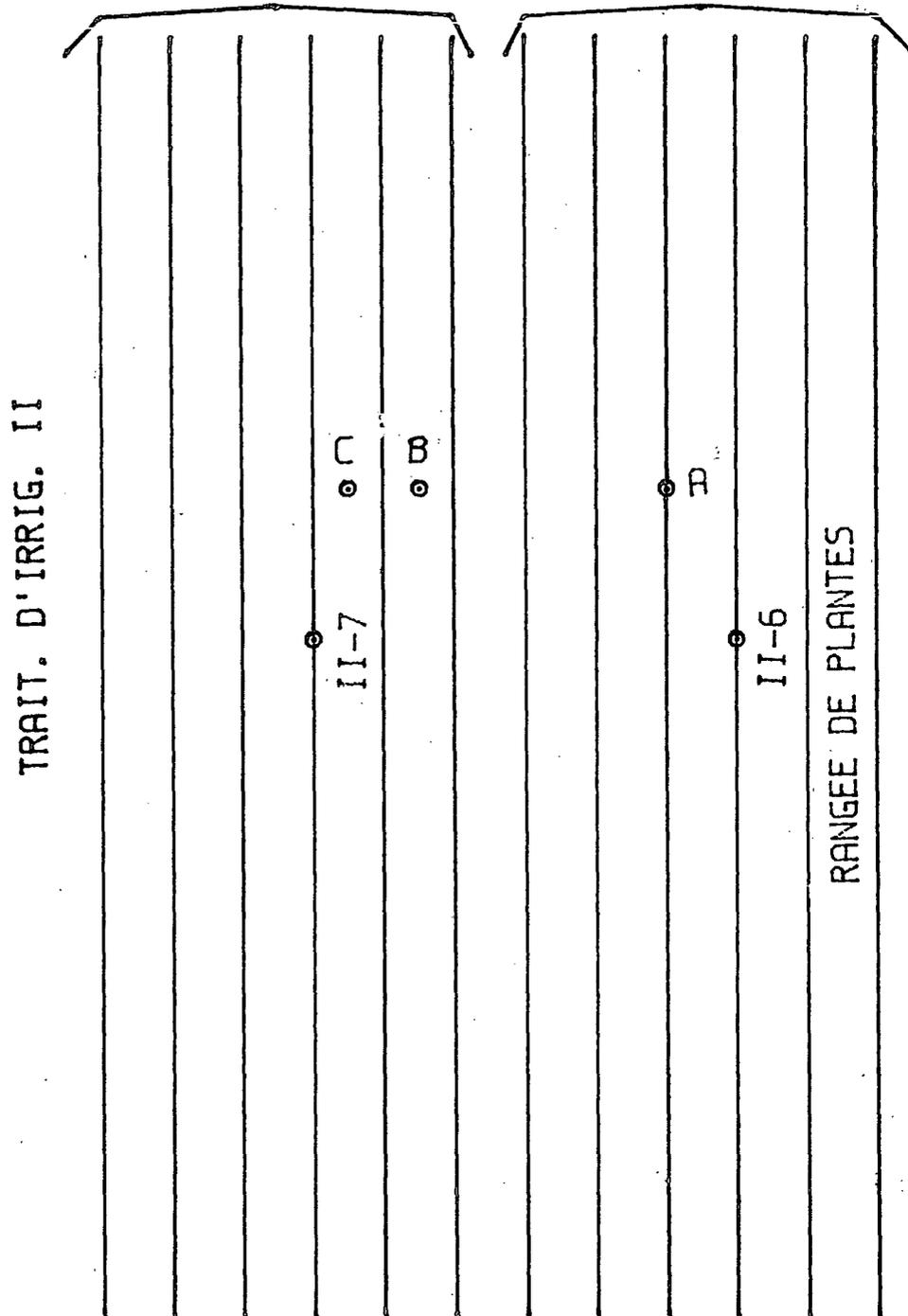
valable, tout du moins pour les trois traitements d'irrigation où les déficits en eau du sol ont délibérément été créés pour simuler la sécheresse, et aussi en considérant que les quantités ont été prévues pour ne pas pénétrer à une plus grande profondeur que 120cm. Le fait que ce but a été atteint est confirmé par les données de la figure 4.8. Comme un flux vers le bas en équilibre stable est possible, même sans changement de la teneur hydrique du sol à une profondeur donnée, les profils de la figure 4.8 montrent que la teneur en humidité change lorsque le front d'humidification avance vers le bas, et montrent aussi, en se référant à la conductivité hydraulique précédemment déterminée, une faible conductivité aux teneurs hydriques trouvée à la limite du profil le plus bas. Si de telles quantités se perdaient par drainage, comme le calcul le montre, ceci demanderait à la fois un changement dans la teneur hydrique au niveau du front d'humidification, ainsi qu'une teneur hydrique et une conductivité plus élevées.

Par contre, on peut choisir comme paramètre de base, le gain mesuré de profil d'eau dû à l'irrigation. Ce choix n'implique pas la supposition que la perte apparente en eau est due à un seul mécanisme. Dans la table 4.13 les colonnes dénomées "Drainage" (basé sur le gain), montrent la perte due au drainage calculée en utilisant le gain mesuré comme apport et effectivement, dans la plupart des cas, le calcul indique un drainage nul. Les rares cas où il n'en est pas ainsi peuvent être dus à des erreurs dans la transcription des données, en particulier dans le cas du traitement de labourage 8 avec le traitement d'irrigation II. Cependant, si les résultats indiquent que le drainage est négligeable, on est contraint à conclure que c'est la différence entre la quantité d'eau fournie et le gain mesuré qui représente la perte par évaporation, ou de façon alternative, que l'évaluation de l'évapotranspiration entre l'irrigation et la mesure de l'humidité du sol qui lui a succédé est de

loin trop faible. A notre avis, aucune alternative ne peut expliquer de façon satisfaisante une différence de 20 à 25% dans la quantité totale fournie. La discussion précédente ne tient pas compte de la possibilité d'une erreur systématique dans les mesures, bien qu'une erreur systématique d'extrapolation se soit révélée comme possible. Lorsque pendant l'expérience, une efficience d'irrigation apparemment faible a été notée, on a décidé d'obtenir des informations supplémentaires sur l'uniformité de la distribution de l'humidité du sol. Dans les traitements d'irrigation II on installa trois tubes d'accès supplémentaires entre les traitements de labourage 6 et 7, comme le montre schématiquement la figure 4.11. Le tube A fut placé au même endroit que tous les autres de l'expérience, aussi près que possible de la rangée de la plante, pratiquement dans la rangée. Le tube B fut placé sur la ligne centrale au milieu de deux rangées tandis que le tube C fut placé à mi-chemin entre la ligne centrale et la rangée de plante entre deux rangées. Les résultats d'humidité furent enregistrés en tout à quatre dates, comme l'indique la table 4.14, avant et après l'irrigation de 60mm du 25 Août. Les résultats montrent que de façon constante l'emplacement B est le plus humide et l'emplacement A le plus sec, l'emplacement C étant intermédiaire. L'emplacement B montre, de plus, le réapprovisionnement le plus élevé à la suite de l'irrigation, avec une efficience d'approvisionnement de 97%, contre 60 et 36% respectivement pour les emplacements A et C. De même les taux de déperdition avant et après irrigation sont les plus élevés pour l'emplacement B, les plus bas pour l'emplacement C, intermédiaires pour A. A partir de ces données limitées, on ne peut pas généraliser sur l'erreur qui a pu être faite sur la même parcelle à d'autres moments ou à d'autres endroits. Cependant ces données indiquent une très grande variabilité dans tous les paramètres évalués, et indiquent aussi que la région située entre deux rangées

TRAIT. DE PREP. 7

TRAIT. DE PREP. 6



⊙ TUBE D'ACCES DE LA SONDE A NEUTRONS

Fig. 4.11: Diagramme schématique montrant l'emplacement des points de mesure supplémentaires de la sonde à neutrons, pour la mise en valeur de la distribution uniforme de l'eau.

de plantes reçoit apparemment beaucoup plus d'eau que la rangée de plantes elle-même, et que l'extraction de l'eau par les racines et/ou le drainage y est plus élevée. Ainsi en tenant compte de la plus grande fluctuation dans le stockage de l'eau au centre entre deux rangées, de la grande variabilité trouvée dans l'efficacité d'approvisionnement d'une répétition à l'autre pendant la même irrigation et de la tendance d'une diminution de l'efficacité d'approvisionnement avec le temps, nous présentons l'explication suivante comme possible. En plus d'une imperfection inhérente dans l'uniformité de distribution d'eau des asperseurs sous conditions expérimentales, le feuillage des plantes a, de façon systématique, dérangé le mode naturel de distribution. Plus les plantes ont grandi, plus le sol s'est recouvert et les feuilles se sont allongées avec une plus grande tendance à se pencher vers le bas. Ainsi, le pourcentage d'eau d'irrigation intercepté par le feuillage augmente avec l'âge de la plante, et c'est cette interception qui fausse l'uniformité d'application, en faisant glisser l'eau le long des feuilles et s'égoutter dans l'espace entre deux rangées. C'est pour cela que l'espace entre deux rangées est plus approvisionné à chaque irrigation et que sa plus grande humidité n'est pas exclusivement due à une densité racinaire peut-être plus faible dans cette région.

Comme tous les tubes d'accès de l'humidimètre à neutrons se trouvaient dans la rangée de la plante, la valeur d'humidité a eu tendance à être inférieure aux quantités moyennes d'approvisionnement, ceci donnant une sous-estimation de l'efficacité d'approvisionnement. Comme la géométrie de la culture n'est pas uniforme sur tout le champ, certains emplacements de tubes d'accès reçurent de plus grandes quantités d'eau, ce qui explique la grande variabilité à une même date. Cette condition ne fut pas constante toute la saison puisque l'interception changea durant la croissance de la plante de

façon apparemment non uniforme.

Table 4.14: Bilan hydrique détaillé à des points d'échantillonnage dans la rangée des plantes, près de la rangée et entre deux rangées (voir Fig. 11). (Une irrigation de 60mm a été faite le 25/8).

Prof, CM	DATE											
	19/8			23/8			27/8			30/8		
	EMPLACEMENT DE L'ECHANTILLON											
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	VOLUME D'EAU CONTENU, %											
15 - 30	16,1	21,6	17,1	13,2	18,3	14,7	23,3	25,7	21,9	19,1	23,1	18,9
30 - 60	16,1	21,7	19,9	14,3	19,7	18,8	16,0	25,9	19,6	16,8	23,0	19,8
60 - 90	14,3	22,7	19,4	14,5	21,7	19,5	14,7	25,5	18,9	14,0	23,9	18,9
90 - 120	18,3	24,7	19,1	17,0	23,9	18,8	17,2	25,9	19,1	16,9	25,6	18,9
120 - 150	20,5	25,0	18,2	20,3	24,4	18,7	20,0	24,7	18,2	16,8	25,0	18,4
Changnt tot. de stock., mm				-19,2	-32,1	-9,6	35,7	57,9	22,5	-22,8	-20,4	-7,8
Eff. de l'applic. d'eau., %							60	97	36			

Ainsi il semble que le réapprovisionnement et la déperdition réels furent quelque peu plus élevés que les quantités relevées, ce qui accroît donc aussi l'efficacité d'application. D'autre part, comme on croit que la région entre deux rangées a reçu en fait une quantité d'eau n'ayant pas été relevée comme plus importante que la quantité donnée, une part de cet excédent a effectivement pu être perdu par drainage. Les données limitées de la table 4.14 ne donnent pas d'indication sur le drainage, puisqu'à l'emplacement B toute l'eau d'irrigation est en théorie comptée. Cependant ceci n'exclut pas la possibilité de perte par drainage en d'autre temps et lieux. Comme

l'irrigation a été relativement importante à un moment où le traitement particulier ne souffrait pas d'un manque d'eau, on pense néanmoins que la perte totale par drainage a été faible dans le champ tout entier, à l'exception peut-être du traitement d'irrigation I.

Il est logique de conclure que l'on peut améliorer la qualité des informations obtenues, en déterminant la teneur hydrique du sol en des points d'échantillonnage plus nombreux, répartis de façon systématique le long de la rangée de la plante. Dans ce contexte, il faut noter que l'échantillonnage doit être effectué en un seul jour, et que chaque échantillonnage représente une journée entière de travail. Donc dans le but d'augmenter le nombre de points d'échantillonnage, il faut multiplier en proportion la main-d'oeuvre et l'équipement, ce qui est difficile dans la majorité des cas.

4.1.1.3.5.2 - Propriétés d'infiltration du sol.

Des essais d'infiltromètre ont été effectués en deux réplifications après que les plantes ont été récoltées et les chaumes enlevées à la main. Un infiltromètre à asperseur décrit par Morin et autres (1967) a été utilisé à un taux constant d'approvisionnement de 34mm/h. On a choisi ce taux comme représentatif de la précipitation au Sahel tout en sachant qu'un taux d'approvisionnement unique et constant ne peut pas réellement représenter un modèle de précipitation saisonnière naturelle. Hoogmoed (1980) rapporte que pour six emplacements proches de Niono, au Mali, 43% des précipitations saisonnières en 1979 eurent lieu à des taux supérieurs à 34mm/h; en divisant les pluies en deux catégories selon leur importance, il y est rapporté que seulement 6% du volume total est tombé à un taux égal ou supérieur à 34mm/h pour les pluies de moins de 10mm (qui ne peuvent pas être considérées comme précipitation efficace si elles ont lieu une seule fois), contre les pluies de

plus de 20mm, dont 65% du volume total est tombé à un taux égal ou supérieur à 34mm/h.

A l'exception de la différence dans le taux d'approvisionnement, la description générale des procédés et de l'analyse est la même que celle faite par Morin et autres (1967). La taille de la construction du plan de réception de l'eau était telle qu'il était impossible d'isoler complètement les zones de labourage, du fait que l'espace entre deux rangées était de 96cm et que la dimension de la construction est 150cm. La construction a été placée dans chaque cas de façon à inclure deux rangées de plantes et leur espace intermédiaire, plus une partie de l'espace intermédiaire des rangées voisines. Pour chaque cas, deux conditions ont été étudiées, la première lorsque l'espace entre deux rangées porte la trace des roues de tracteur, la deuxième lorsque les roues ne sont pas passées dans cet espace (respectivement appelés espace portant les traces de roues, et espace intermédiaire).

Il faut mentionner que, du fait que les essais ont été faits à la fin de la période de croissance, bien qu'une croûte de surface se soit formée à cause de l'impact des gouttes des asperseurs ait été à son maximum, et comme la préparation du lit de semences consistait en un disquage léger, dans toutes les parcelles sauf les levées et les lits larges, il n'y eut pas de différences perceptibles à l'oeil entre la condition de la surface du sol dans les différentes parcelles, sauf, bien entendu, celles des levées et des lits larges où les différences furent assez évidentes.

Les résultats sont montrés dans les figures 4.12 à 4.18 et dans la table 4.15; deux importants paramètres y sont donnés, l'infiltrabilité finale et l'infiltration cumulée entrée dans le sol avant le début du ruissellement de surface au taux particulier d'approvisionnement. L'interprétation de ces résultats n'est pas aisée à cause d'un certain nombre d'inconsistances dans

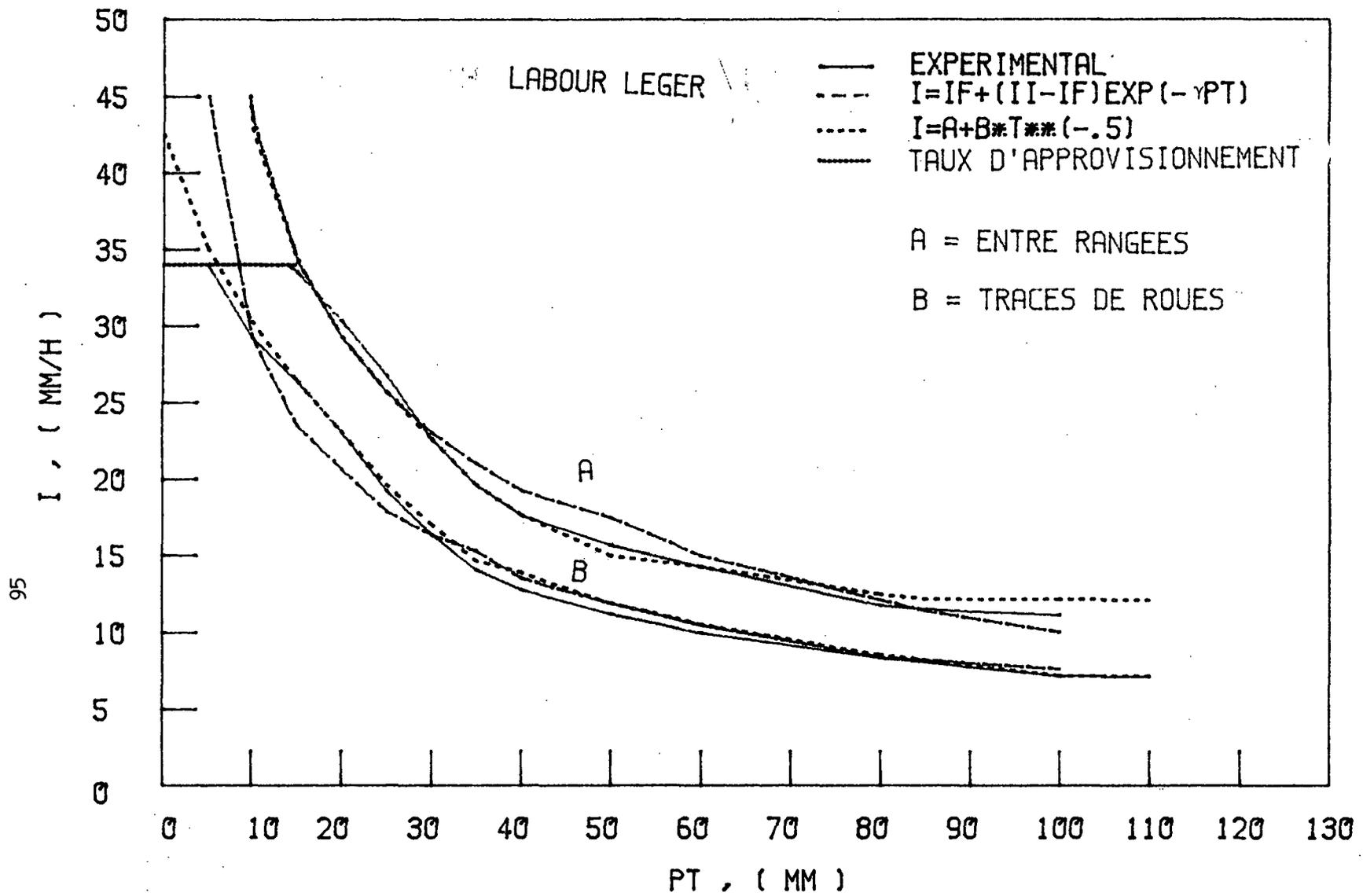


Fig. 4.12: Infiltrabilité en fonction de l'approvisionnement total en eau du traitement de labour léger.

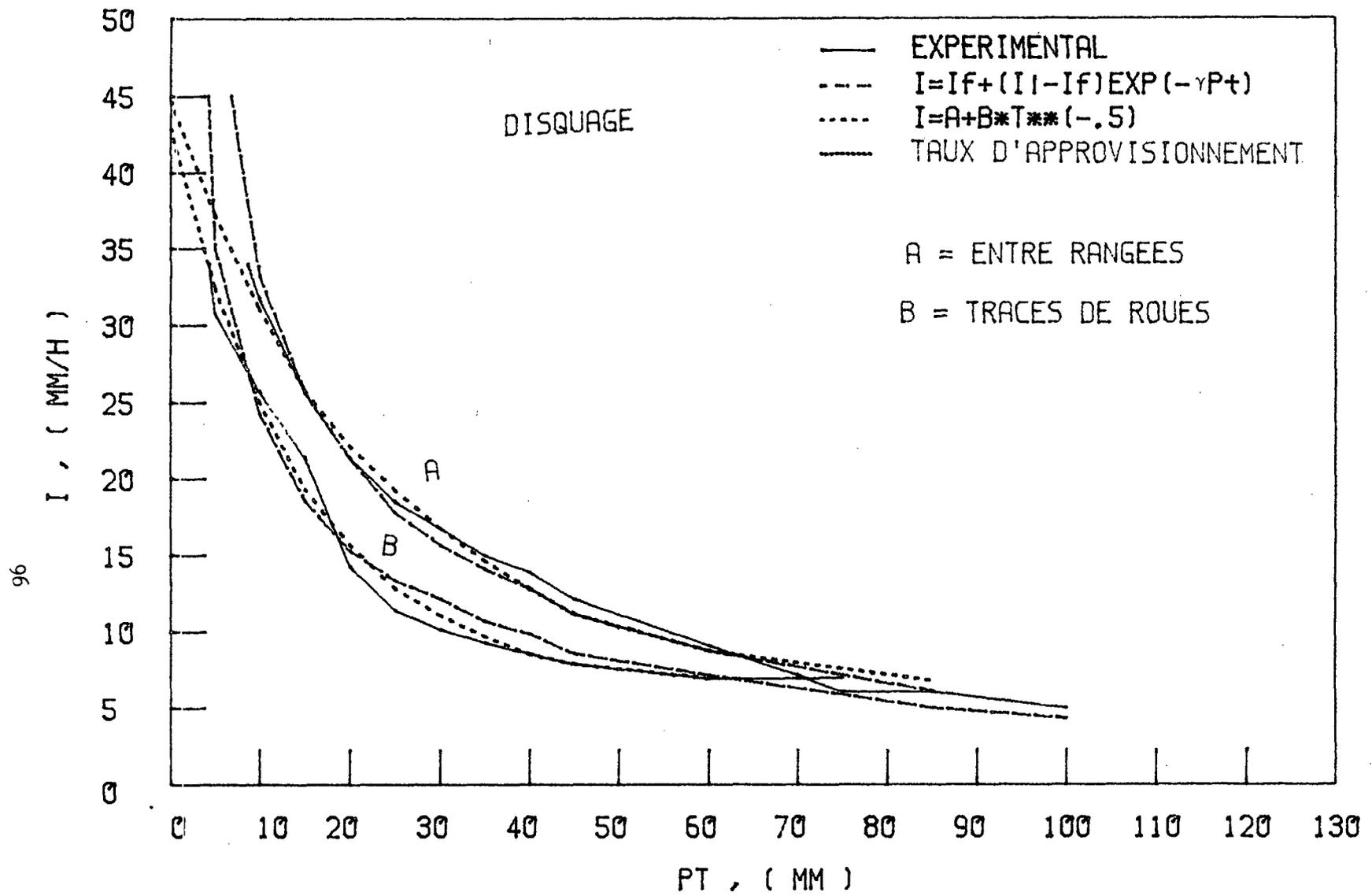
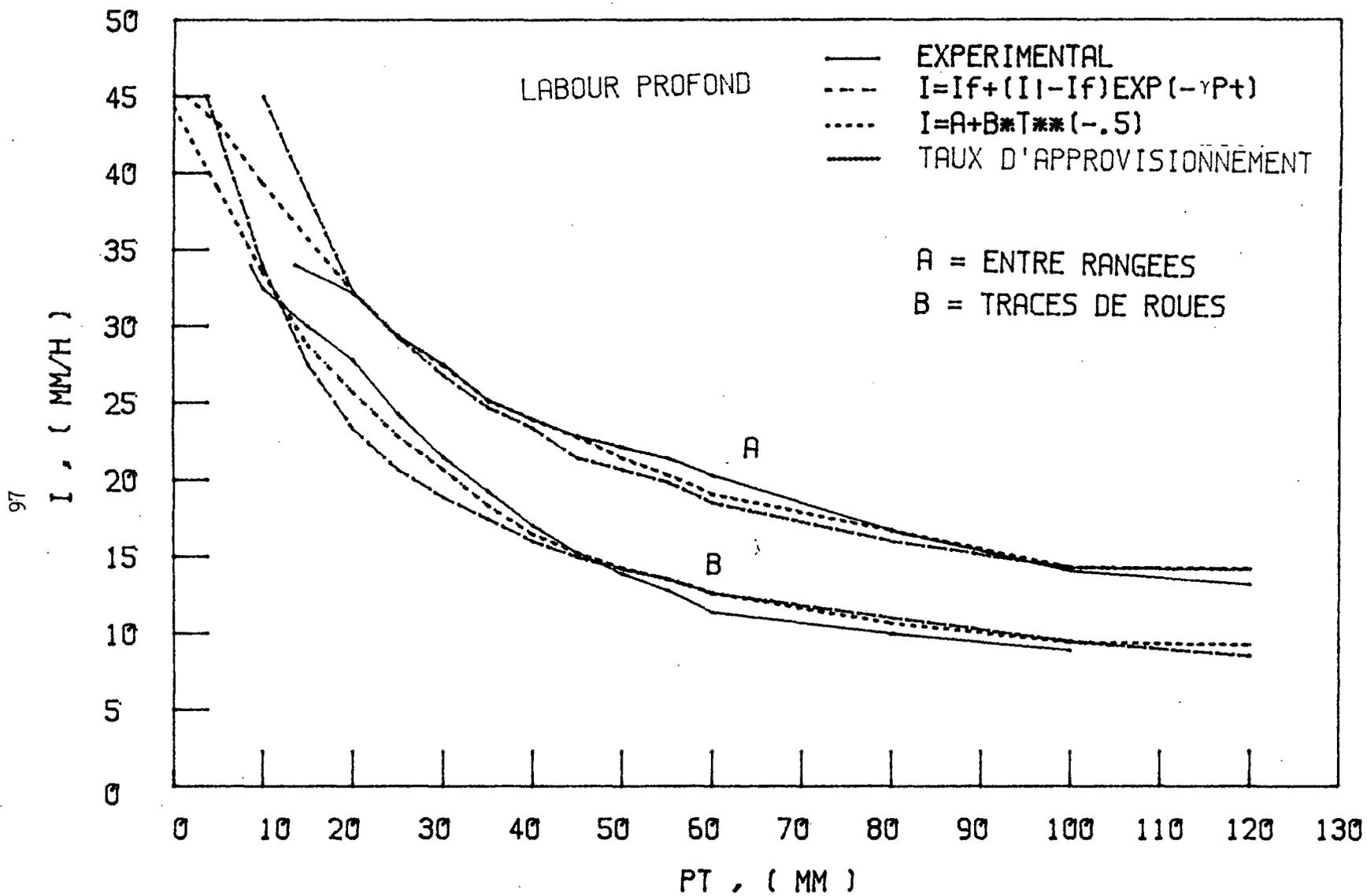


Fig. 4.13: Infiltrabilité en fonction de l'approvisionnement total en eau du traitement de disquage.

Fig. 4.14: Infiltrabilité en fonction de l'approvisionnement total en eau, pour le traitement de labour profond.



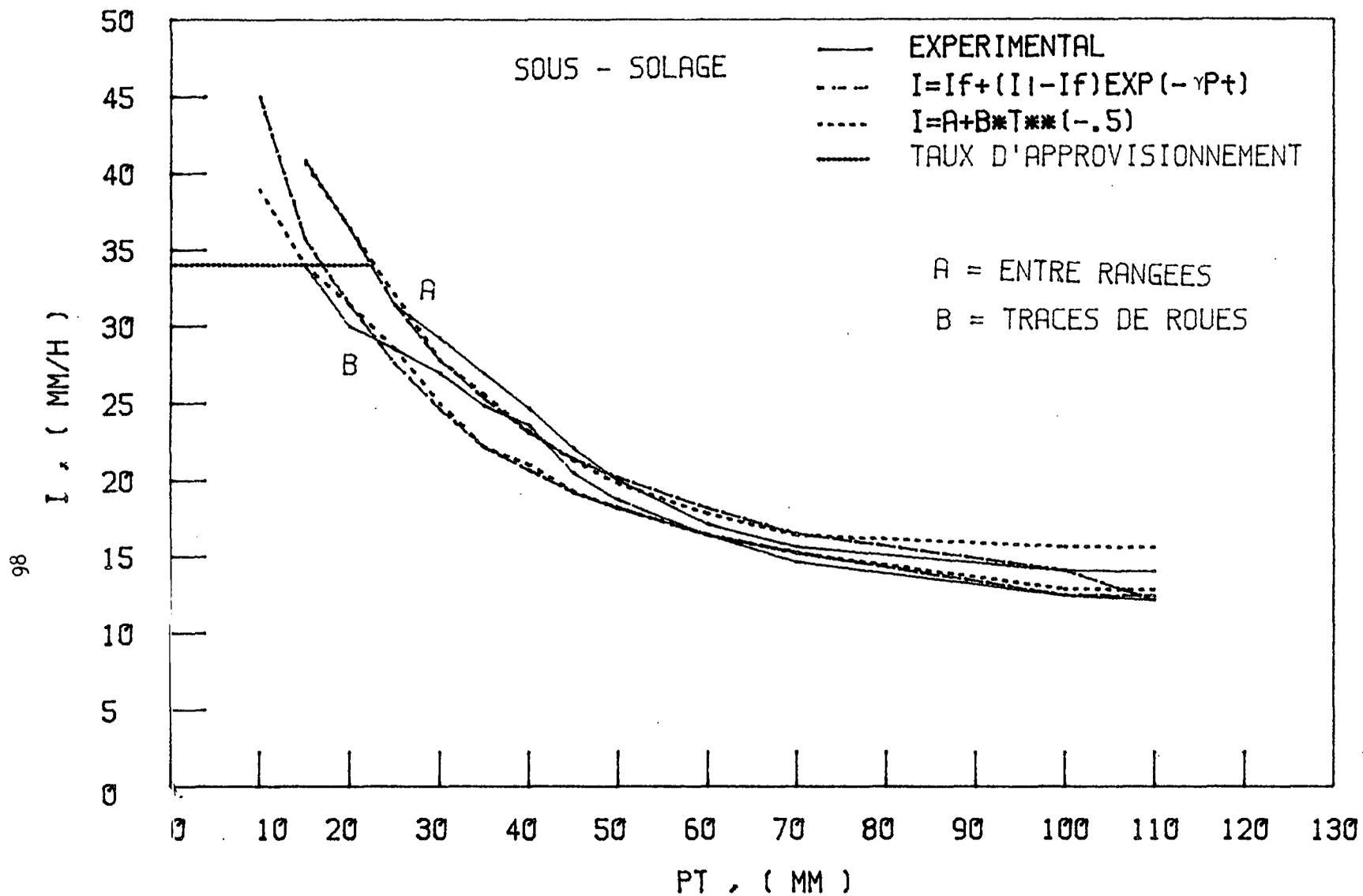
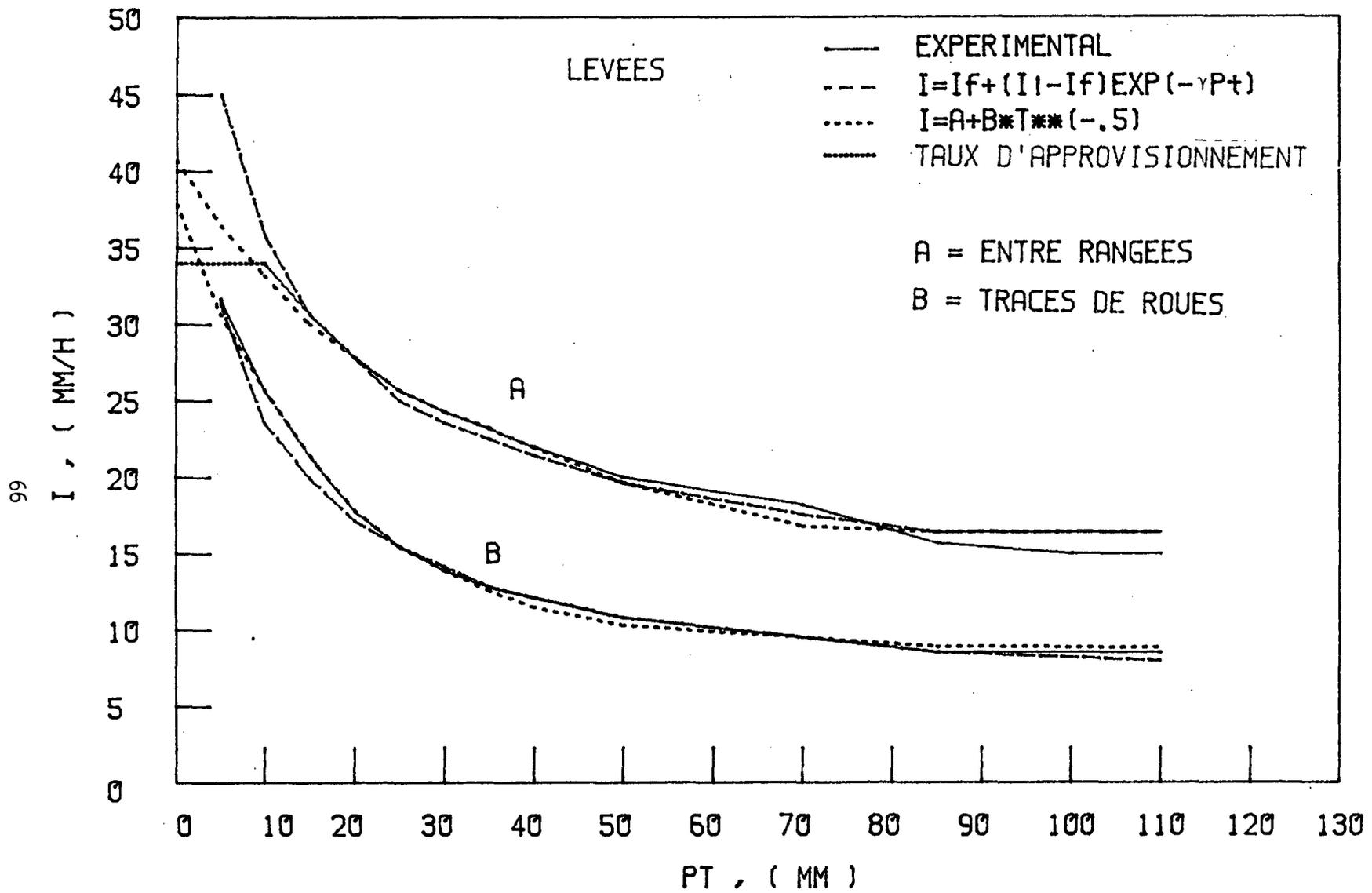


Fig. 4.15: Infiltrabilité en fonction de l'approvisionnement total en eau, pour le traitement de sous-solage.

Fig. 4.16: Infiltrabilité en fonction de l'approvisionnement total en eau, pour le traitement de levées.



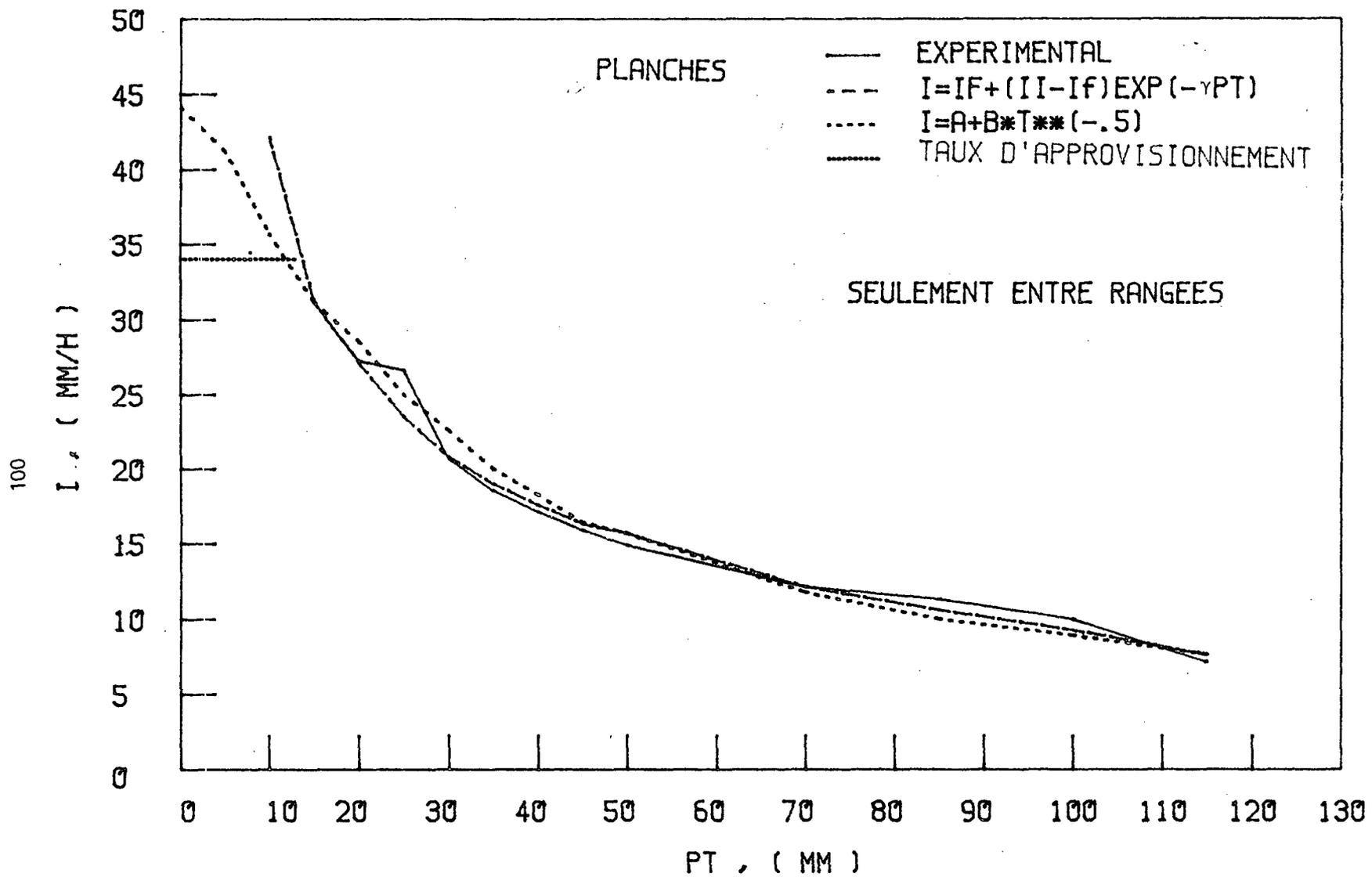


Fig. 4.17: Infiltrabilité en fonction de l'approvisionnement total en eau, pour le traitement en planches.

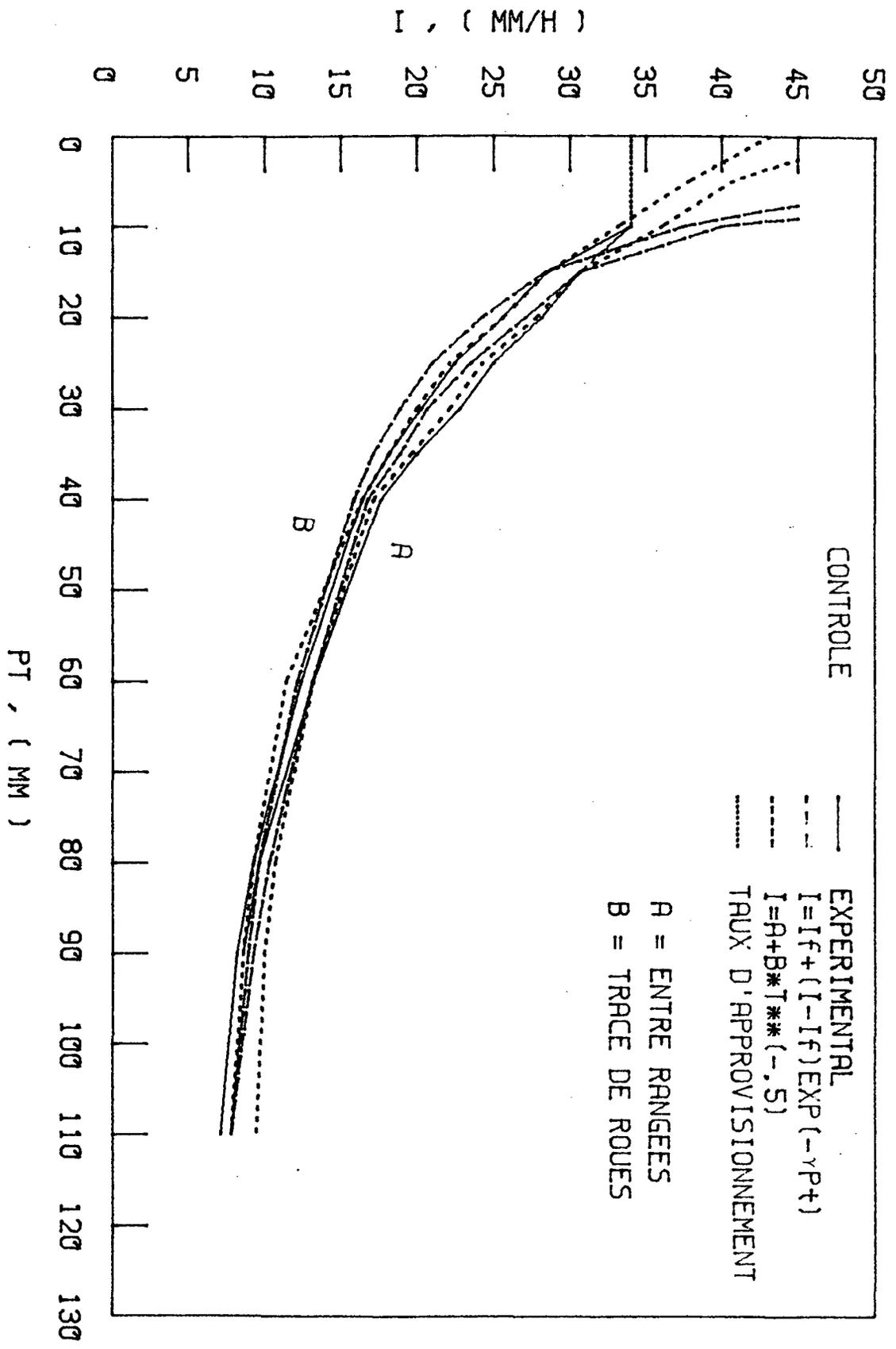


Fig. 4.18: Infiltrabilité en fonction de l'approvisionnement total en eau, pour le traitement de contrôle.

les données. De ce fait on ne peut pas bien expliquer pourquoi l'infiltration cumulée avant le ruissellement de surface devrait être plus élevée dans l'espace contenant les traces de roues, que dans l'espace intermédiaire non abimé par les traitements de disquage et de sous-solage, non plus pourquoi l'infiltrabilité finale devrait être plus élevée dans les traces de roues pour le traitement de sous-solage. Enfin quelques divergences semblent être attribuables à l'erreur expérimentale. Pour ce qui est de l'infiltrabilité finale, les traitements de sous-solage, de levées et de labour léger se classent plus haut que les traitements de contrôle et de disquage, le traitement de labour profond étant intermédiaire. On voit aussi qu'en moyenne une pluie inférieure à 10mm ne peut pas être absorbée sans qu'il y ait de ruissellement de surface à un taux d'approvisionnement de 34mm/h ni, dans le meilleur des cas, une pluie de plus de 20mm. Le fait qu'en 1979, 65% du volume de pluies supérieures à 20mm ont eu lieu à des taux de plus de 34mm/h donne une idée de l'importance du problème du ruissellement de surface dans de telles conditions.

Table 4.15: Résultats d'expériences de simulation de pluie en champ de sorgho en fin de saison. Moyenne de deux expériences.

TRAITEMENT DE LABOURAGE	INFILTRATION CUMULEE AU DEBUT DU RUISSELLEMENT, MM			INFILTRABILITE FINALE, MM		
	TRACE DE ROUES	ESPACE ENTRE RANGÉES	MOY.	TRACE DE ROUES	ESPACE ENTRE RANGÉES	MOY.
C	10,5	11,5	11,0	7,1	8,3	7,7
D	9,0	3,0	6,0	5,4	6,4	5,9
LP	5,5	14,5	10,0	7,0	11,2	9,1
LL	6,0	17,0	11,2	8,4	12,0	10,2
SS	20,0	14,0	17,0	13,7	11,8	12,8
L	3,0	11,5	7,2	8,5	15,0	12,0
L1	-	11,5	11,5	-	7,0	7,0

Dans les figures 4.12 à 4.18 sont montrées les données originales du champ ainsi que les fonctions des équations des deux types d'infiltration. L'une est l'équation développée par Morin et Benyamini (1977) pour décrire l'infiltration dans les sols recouverts d'une croûte, équation qui est essentiellement du même type mathématique que celle d'Horton. La deuxième équation est du type "sorptivité" (Stroosnijder, 1976) qui est basée sur le fait que l'infiltration cumulée est une fonction de la racine carrée du temps, comme l'ont développé Philip, ou Green et Ampt. En général, les remarques faites par Hoogmoed (1980) conviennent ici aussi bien. Les deux types d'équation donnent une assez bonne concordance sur presque toute l'étendue du processus, mais l'équation du type "sorptivité" n'atteint pas une infiltrabilité finale stable, alors que les données d'origine le font. D'autre part, l'équation du type Morin a tendance à sous-estimer l'infiltrabilité initiale. Comme au début du processus le taux de pluie est généralement plus bas que l'infiltrabilité, comme on le voit sur les graphes, cette divergence ne représente pas un problème sérieux. En pratique, il n'y a pas de grande différence entre les deux équations pour les quantités de pluies en termes d'utilité des prévisions.

L'infiltrabilité finale des traitements de contrôle, de disquage et de lits larges est typique des valeurs finales du sol à loess commun dans la zone Nord du Néguev (Rawitz et autres, 1964). Les traitements de labour profond, de labour léger, de sous-solage et de levées ont un taux d'infiltration finale d'environ 50% supérieur à celui des autres traitements. Il semble y avoir une bonne corrélation entre le rendement et l'infiltrabilité (figure 4.19), bien qu'il ne semble pas que les traitements de labour aient affecté le régime hydrique du sol. Dans ce cas l'infiltrabilité devrait être considérée comme une autre caractéristique de la structure du sol n'ayant pas d'influence sur

le régime hydrique. Il faut insister sur le fait que ceci ne peut pas être juste si la pluie simulée dans le champ en culture a provoqué des pertes par ruissellement de surface. Il y a également une légère évidence d'une corrélation négative entre l'infiltrabilité et la résistance de pénétration (figure 4.20), comme on pouvait s'y attendre. Cependant il y a également une bonne (ou mauvaise) évidence d'une corrélation négative entre le gain total du sol en eau ou l'épuisement et l'infiltrabilité, ce qui est complètement contraire aux principes de base, et en fait ceci n'a pas d'importance, du fait qu'il n'y a pas de ruissellement de surface dans cette expérience. A nouveau, s'il y avait eu un ruissellement de surface provoqué par la simulation de pluie, on aurait trouvé une corrélation positive entre l'infiltrabilité et le réapprovisionnement du sol en eau. D'après le point de vue de Morin et Benyamini (1977) sur le rôle des croûtes sur l'infiltration, il n'y a pas de raison de s'attendre à une corrélation entre l'infiltrabilité et le rendement du champ, ou toute autre caractéristique structurale en absence de ruissellement de surface. Les résultats de l'infiltromètre montrent des traces de l'effet du labourage primaire malgré la préparation du lit de semences qui l'a suivi, les traitements qui ont à l'origine une structure de surface grossière conservant généralement une meilleure infiltrabilité. Ceci concorde bien avec le pourcentage initial des agrégats supérieurs à 12,7mm mais pas avec l'état final d'agrégation. Ceci peut indiquer que les propriétés du profil du dessous de la croûte jouent également un rôle dans la détermination de l'infiltrabilité finale.

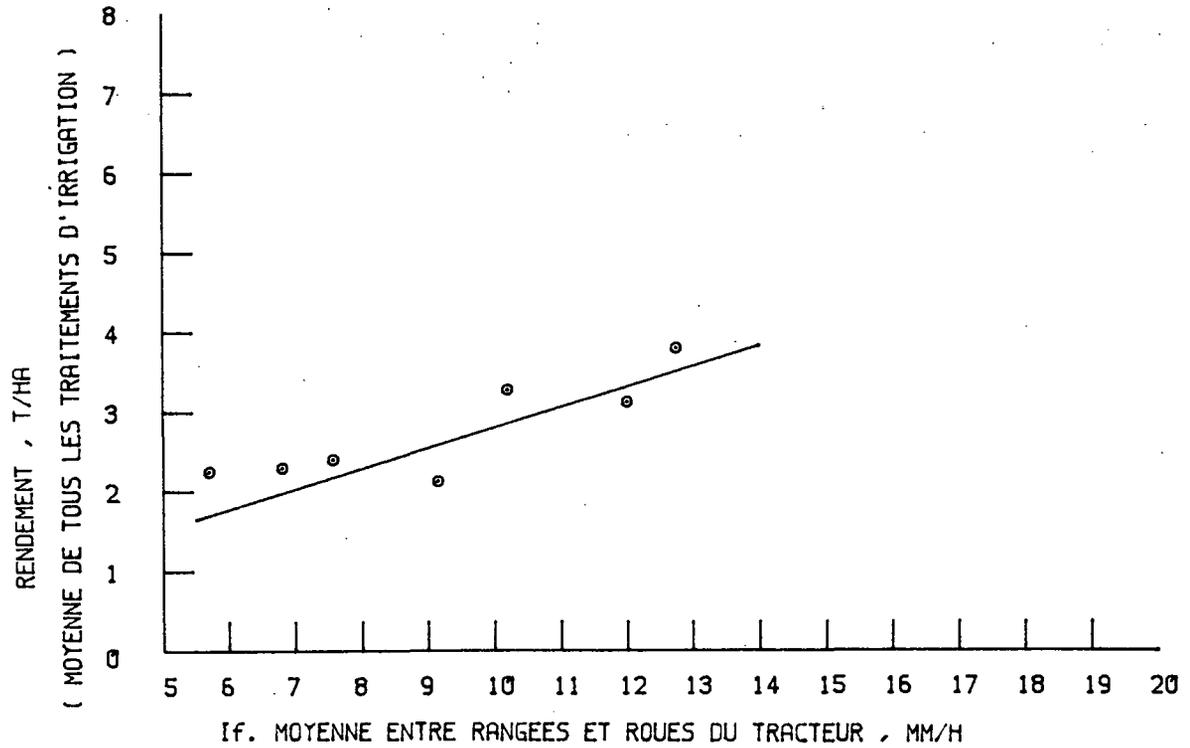


Fig. 4.19: Rendement en matière sèche de grain en fonction de l'infiltrabilité finale.

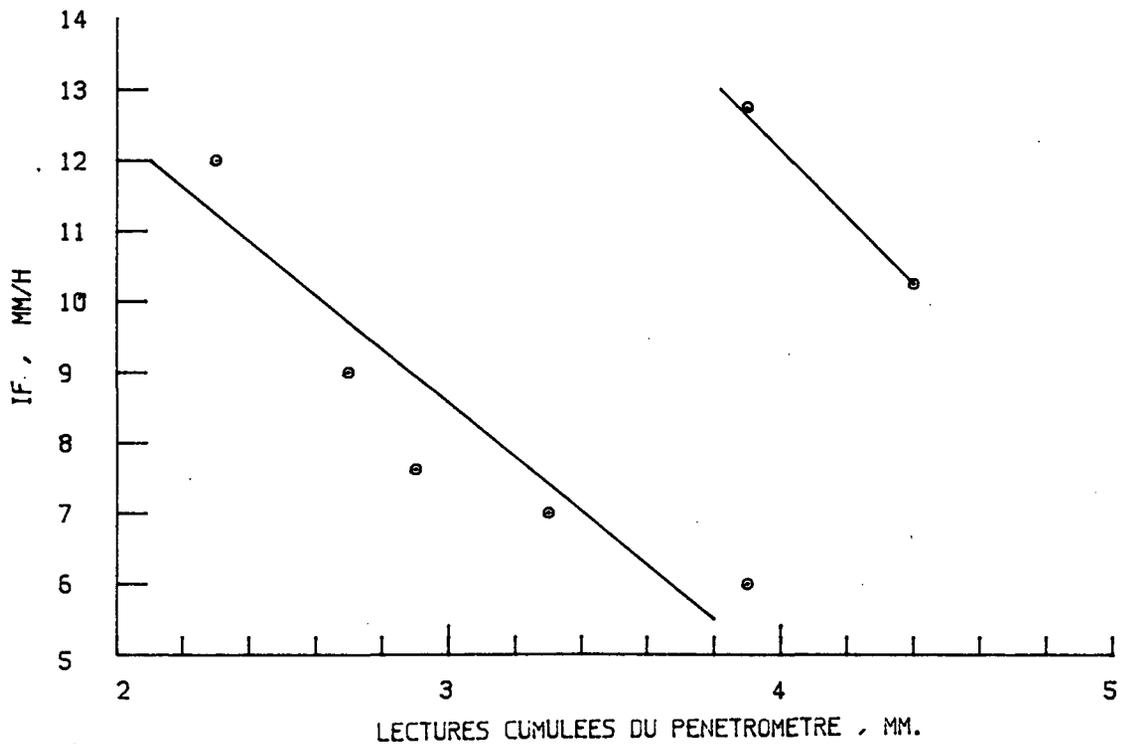


Fig. 4.20: Infiltrabilité finale en fonction du travail cumulé de pénétration à une profondeur maximale.

4.1.2 - L'effet des travaux de préparation du sol sur le régime hydrique du sol et sur le rendement d'arachide.

4.1.2.1 - Introduction

Le but de cette expérience était d'étudier l'effet des traitements de préparation d'une deuxième année sur le régime hydrique du sol et sur le rendement sous un régime d'irrigation uniforme. L'effet du labourage per se était donc le sujet de notre intérêt.

4.1.2.2 - Méthodes et procédés

L'arachide (Arachis hypogaea) a été semée en grande partie dans un but commercial à la ferme expérimentale de Gilat dans le Nord du Néguev, sur des parcelles où du sorgho fut cultivé en 1978. Après la récolte du sorgho en automne 1978, les tiges furent coupées à une hauteur de 10cm, le reste demeurant dans le champ. Ensuite un labourage d'automne fut effectué, le traitement de labourage de l'année précédente étant refait sur chaque parcelle (cf. figure 4.21). Au printemps 1979 toutes les parcelles sauf le traitement de levées furent hersées comme préparation du lit de semences, et furent ensemencées à plat. Ceci ne concorde pas avec la pratique commerciale où la terre labourée en automne est disquée et hersée au printemps, et des lits plats de 1,6m de large sont construits à la sillonneuse et à la fraiseuse (rototiller), ce qui résulte en un lit très fin à surface plane, avec un sillon bordant le lit de chaque côté. Les parcelles expérimentales furent ensemencées avec la même planteuse utilisée sur la zone commerciale, avec trois rangées ensemencées à chaque lit, à intervalle de 60cm. Dans la parcelle de levées, les levées se trouvaient à 100cm des plantes de sorgho de

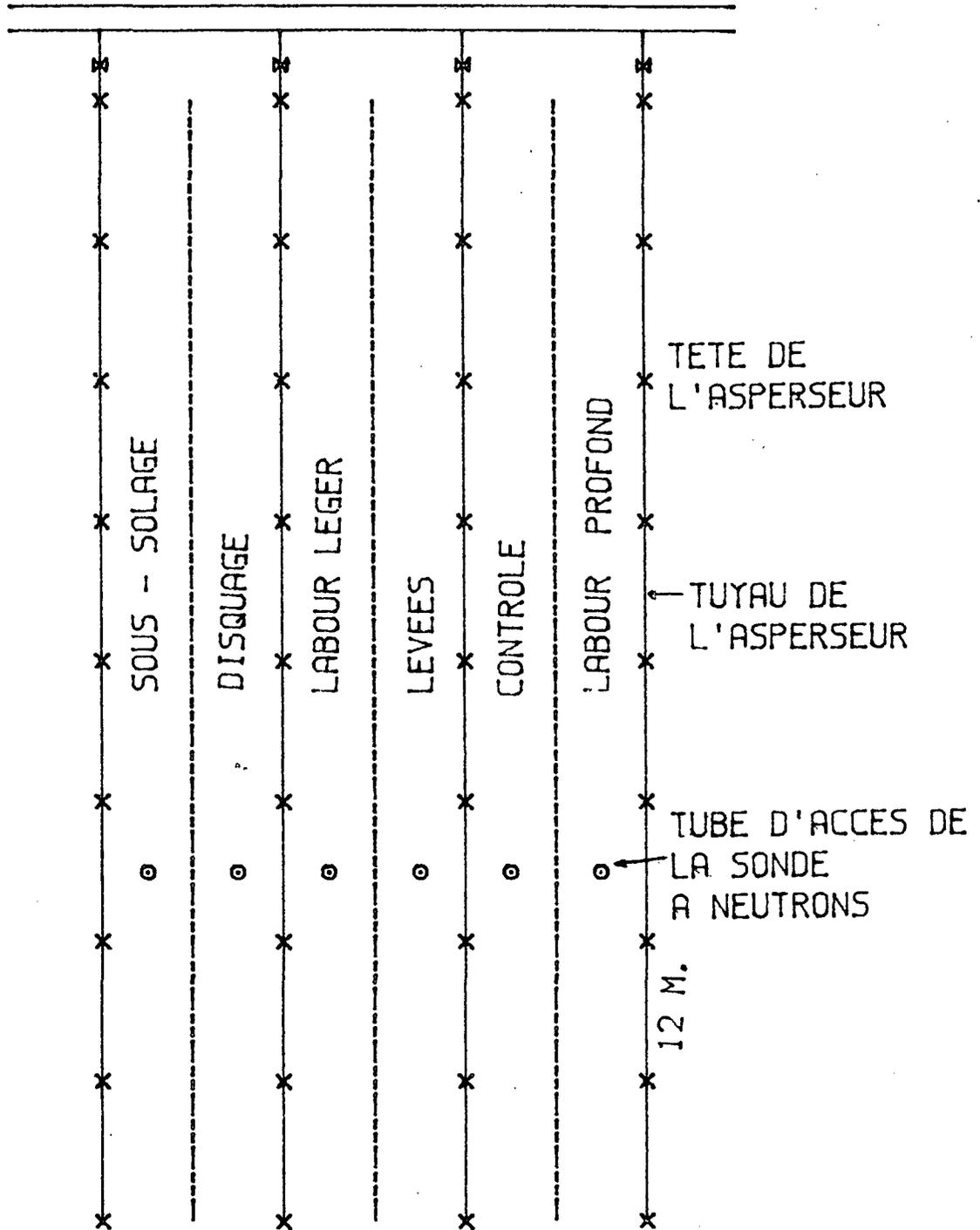


Fig. 4.21: Trace schématique des traitements de préparation d'arachide, et emplacement des points d'échantillonnage.

la culture précédente, et comme le sol n'avait pas été retourné, il restait de nombreuses tiges mortes au milieu des mottes. Ces parcelles ne furent pas hersées, mais les mottes furent renouvelées au printemps avec une sillonneuse. A cause des tiges mortes et aussi à cause des différents espaces, ces parcelles durent être ensemencées à la main. L'espace entre les graines dans la rangée fut calculé de façon à compenser l'espace plus large entre rangées. Contrairement aux champs commerciaux, ce champ n'a pas été inoculé avec des bactéries à nodules et a reçu une application de 600kg/ha de superphosphate en granules, et 800kg/ha de sulfate d'ammonium. Le champ fut ensemencé le 10 Mai, et reçut une irrigation de germination de 30mm le 12 Mai.

Pendant la période de croissance, les champs de l'expérience furent irrigués en même temps que les champs commerciaux par la direction de l'exploitation, et reçurent le même régime d'irrigation au point de vue dates et quantités. L'irrigation fut effectuée par asperseurs à impact élevés par des tuyaux d'aluminium de 2 pouces avec un espace de 12x12m, à un taux d'approvisionnement de 8mm/h. Ce régime d'irrigation est résumé dans la table 4.16.

Ce modèle est semblable à celui décrit par Bielorai et autres (1976), pour 1969, à l'exception du fait que la quantité totale d'eau fournie dans l'expérience ci-dessus fut de 573mm. Les tubes d'accès furent installés à raison d'un par traitement de labour, le long du champ et les résultats de la sonde à neutrons furent enregistrés jusqu'à une profondeur de 150cm à des intervalles de 30cm avant et après chaque irrigation en commençant avec l'irrigation du 27 Juillet.

Table 4.16: Régime d'irrigation du champ d'arachide, été 1979.

DATE	NOMBRE DE JOURS APRES SEMIS	EAU FOURNIE, MM
12/5/79	2	30
17/6/79	36	60
3/7/79	52	60
15/7/79	64	60
27/7/79	76	70
9/8/79	89	70
19/8/79	99	70
5/9/79	116	70
Total*		460

* Sans l'irrigation de germination.

La récolte fut faite le 10 Octobre, 150 jours après le semis, mise à sécher pendant dix jours en andains, et ensuite battue. Des rangées entières furent récoltées et pesées, des échantillons furent pris pour déterminer la quantité de matière sèche.

4.1.2.3 - Résultats et discussion

L'arrangement dans l'espace des traitements dans le champ et leur rapport avec les lignes d'irrigation sont montrés dans la figure 4.21. La question de l'emplacement est importante pour l'interprétation des données, et dans le contexte on se réfèrera à cette figure.

Les données de rendement et du régime hydrique figurent dans la table 4.17. Comme il l'a déjà été mentionné les données de l'humidité du sol

ne couvrent pas toute la saison. Cependant pour la période où il y a des données, il existe une grande divergence entre la quantité d'eau trouvée dans la zone des racines après irrigation, basée sur des déterminations de l'humidité du sol. La question se pose si ces différences sont dues aux traitements de labour, à des mesures défectueuses, à une pratique d'irrigation systématiquement trop faible ou à une erreur expérimentale due au hasard.

Table 4.17: Rendement d'arachide et résumé du régime d'eau.

TRAITEMENT DE LABOURAGE	LABOUR PROFOND	SANS LABOUR PRIMAIRE	LEVEES	LABOUR LEGER	LABOUR A DISQUE	SOUS- SOLAGE
Rendement* tonnes/ha	2.19	1.32	3.51	2.65	2.54	1.98
Perte en eau du 26/7 au 26/9, dans la couche 0-150cm, mm	206	274	198	338	114	182
Accroissement d'eau, (comme ci-dessus)	194	290	178	332	92	154
Eau fournie pendant la même période, mm	302	302	302	302	302	302
Evaporation de cuve période 26/7-26/9, mm**	506	506	506	506	506	506
ETP estimée = 0.7 Ep***, mm	354	354	354	354	354	354

* Rendement sec d'arachides non décortiquées.

** Mesurés individuellement. L'approvisionnement de l'exploitation fut 280mm.

*** Bielorai et autres (1976) ont trouvé un coefficient d'évaporation de cuve moyen de 0.8 pour le mois d'Août, et de 0.6 pour le mois de Septembre.

Il est tout à fait évident que les quantités observées d'augmentation en eau et de perte en eau sont constantes pour chaque traitement, et qu'en général, la perte en eau a été un peu plus forte que l'augmentation. Toute la différence est due à la perte après la dernière irrigation, et ceci concorde avec la pratique habituelle. De ceci on peut tout d'abord conclure que les mesures d'humidité du sol ont été correctement effectuées, et qu'il n'y a pas eu d'instruments défectueux. La deuxième particularité évidente de ces données est que les quantités d'eau fournies et la perte mesurée sont dans tous les traitements considérablement plus faibles que l'E.T.P évaluée. De cela, on conclut que le régime d'irrigation a été inférieur au niveau optimal et que les plantes ont été soumises à un certain manque d'humidité. De plus, sous un tel régime d'irrigation, il semble qu'il n'y ait pas de drainage en profondeur en dessous de la zone radiculaire, fait qui est également confirmé par l'enregistrement des profils hydriques (figure 4.22). Il faut mentionner que dans les traitements de labour léger et de contrôle, où le bilan hydrique se rapprochait plus de la quantité fournie, les changements d'humidité ont également été observés à plus grande profondeur. Si l'on peut assumer que, d'une part, les mesures d'humidité ont été correctes et que, d'autre part, le drainage en profondeur a été négligeable, on peut alors conclure que la perte en eau du sol à tout emplacement est égale à l'évapotranspiration réelle.

Dans des expériences précédentes, on a trouvé que le régime hydrique d'une culture irriguée était le facteur dominant dans la détermination des rendements, et que le labourage primaire per se n'avait pas d'effet sur le régime d'humidité du sol si il n'y avait pas eu de ruissellement de surface. Le seul effet de labourage sur le rendement était dû à la

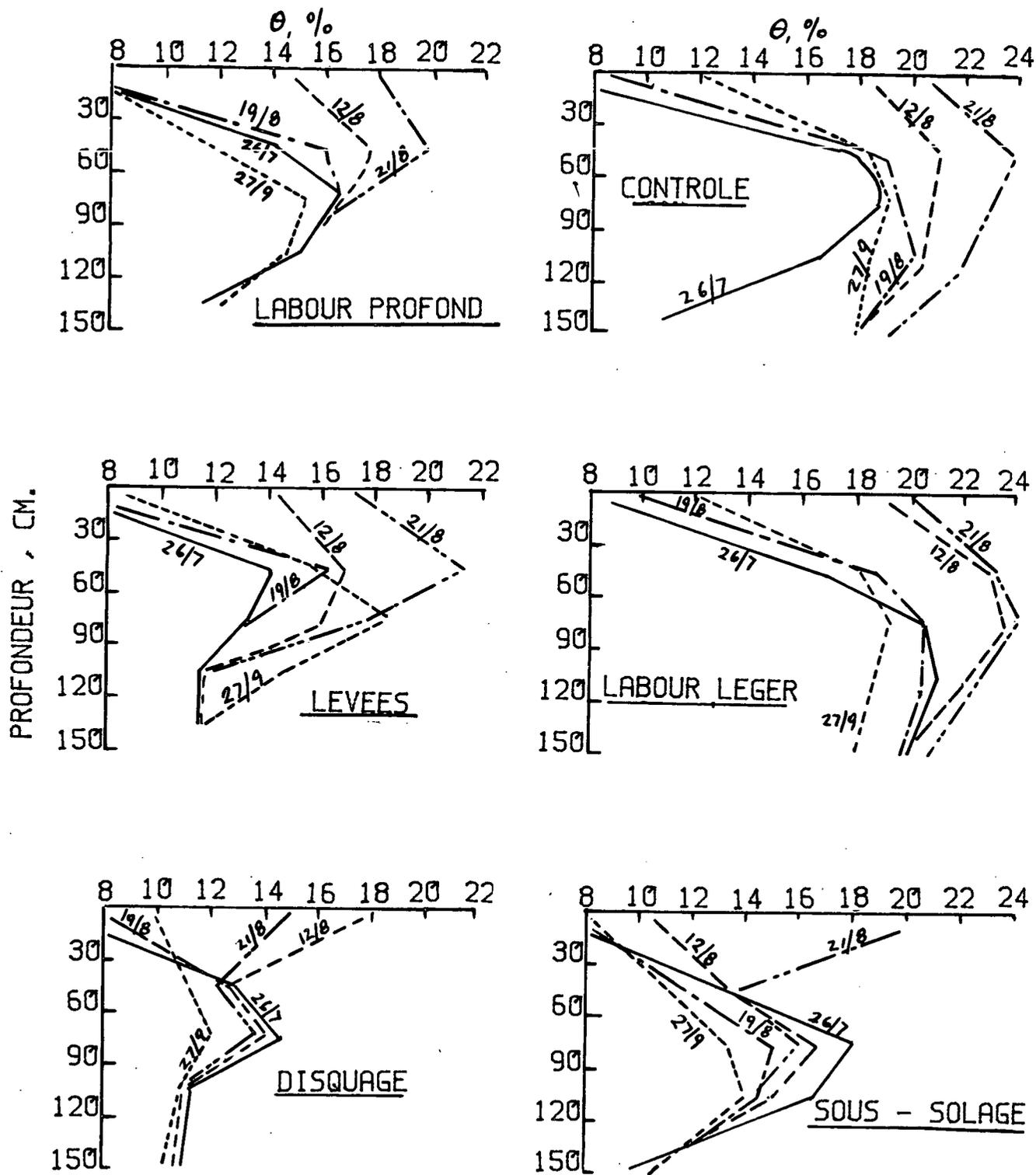


Fig. 4.22: Profils hydriques verticaux à des dates précises dans la dernière partie de la période de croissance de l'arachide.

grossièreté du lit de semence en affectant la qualité de l'ensemencement, la pousse initiale et donc le rendement. Cependant, dans l'expérience présente, aucune relation quelle qu'elle soit n'a été trouvée entre la perte en eau du sol (ou l'E.T réelle) et le rendement (figure 4.23). En fait, on ne s'attendait pas à ce qu'il y en ait une, du fait que le champ avait été soumis à un régime d'irrigation apparemment uniforme. Toutefois, à cause des très grandes différences existant entre les traitements du point de vue perte, il faut examiner la possibilité de régimes hydriques systématiquement différents. En mentionnant que des rendements élevés identiques ont été obtenus dans les traitements de disquage et de labour léger (dont le sol a la même structure) alors que ces deux parcelles représentent les quantités d'eau perdue la plus élevée et la plus basse, il s'ensuit que la perte observée n'a pas été un facteur affectant le rendement. Il s'ensuit également que les différences en perte ne reflètent pas des différences systématiques dans la quantité d'eau que les plantes ont reçu dans les différentes parcelles de labour. Dans ce cas on peut conclure que les différences en perte sont dues à une variabilité due au hasard, et que le rendement moyen de chaque traitement est le résultat d'un approvisionnement moyen en eau de 302mm pendant la période d'observation.

On doit rappeler qu'une seule rangée de tubes d'accès de sonde à neutrons a été installée sur les traitements de labour (figure 4.21). Si les traitements de labour n'ont effectivement pas d'influence sur la profondeur de pénétration de l'eau, une fois dépassée la profondeur de mesure ou le taux d'évaporation d'un sol nu exposé, et si l'approvisionnement total en eau a été inférieur à l'optimum, alors les six stations d'observation de l'humidité du sol peuvent être considérées

comme six réplifications de mesure et d'échantillonnage d'une population variable normale. Dans ce cas toutefois, la variabilité fut vraiment très grande. Pendant la période de croissance, on a noté dans le champ un certain nombre d'endroits où la croissance de la plante se faisait faible et montrait des signes de manque d'eau quelque temps avant l'irrigation. Comme le sol à loess lui-même est assez uniforme, et en se basant sur la taille des points de sécheresse, ceci fut attribué au manque d'uniformité dans la distribution de l'eau. Ce fait n'existait pas dans notre précédente expérience, et il semble clair que l'irrigation faite cette fois en même temps que celle des champs commerciaux par le personnel de la ferme a été effectuée de façon moins attentive que dans les expériences où l'irrigation est faite et surveillée par l'équipe de recherche. Comme les zones ayant reçu moins d'eau étaient relativement petites et réparties au hasard, et comme dans chaque cas le rendement fut déterminé en pesant le rendement d'une parcelle entière de 6 x 96m, l'effet de ces points de sécheresse fut d'une importance relativement mineure sur le rendement des différentes parcelles. D'autre part, si un seul tuyau d'accès était situé à l'intérieur d'une zone sèche, les quantités de perte et d'augmentation mesurées ne seraient pas représentatives des quantités moyennes fournies. D'après les données, on conclut que les données de régime hydrique des parcelles sans labour et de labour léger furent elles - seules représentatives du régime moyen d'irrigation.

Après avoir éliminé les différences systématiques dans le régime d'humidité comme explication possible des différences de rendement entre les traitements de labour, il reste à présent à examiner les données pour trouver les relations de cause à effet entre la structure du sol et le rendement. Dans l'expérience avec le sorgho en 1978, on a trouvé que la

distribution de la taille des agrégats affecte le rendement final en influençant la qualité du semis et la pousse initiale, et que plus le lit de semence est fin, plus le rendement final est élevé (figure 4.24). Un examen des mêmes relations pour la culture éventuelle d'arachide montre un mode de réaction exactement inverse (figure 4.25). On doit en rechercher l'explication dans les mécanismes détaillés affectant le rendement. Dans le cas du sorgho, on a trouvé une bonne corrélation entre la densité de pousse et le rendement final, et la pousse est à son tour une fonction inverse de la taille des agrégats du lit de semence. On a trouvé que l'utilisation combinée de graines relativement petites et de machines pour les semis était sensible aux mottes du lit de semence, ce qui résulta en un mauvais recouvrement des graines et en l'absence de germination. Quelques graines qui furent recouvertes par de plus larges mottes ne germèrent pas, ou n'émergèrent pas après la germination. Les graines d'arachide sont beaucoup plus grosses que celles de sorgho, et en condition d'humidité voulue, elles germent et émergent de la terre, même à une profondeur de semis de 15cm. C'est ce qu'on a observé lors de l'émergence de graines d'arachide venant d'un champ où poussait de l'arachide l'année précédente. Ces graines laissées à cette profondeur dans le champ après le labour émergèrent toutes seules. Ce n'est évidemment pas une pratique normale de semer de l'arachide à 15cm de profondeur, mais elle est toutefois semée plus profondément que le sorgho, et donc le risque qu'une graine reste à l'intérieur d'un lit de semence motteux est bien moindre, de même l'émergence de dessous les mottes ne semble pas être un problème. La densité de pousse du champ d'arachide sembla être très uniforme, et on n'effectua pas de comptes. L'intervalle des semis dans le traitement de levées planté à la main fut

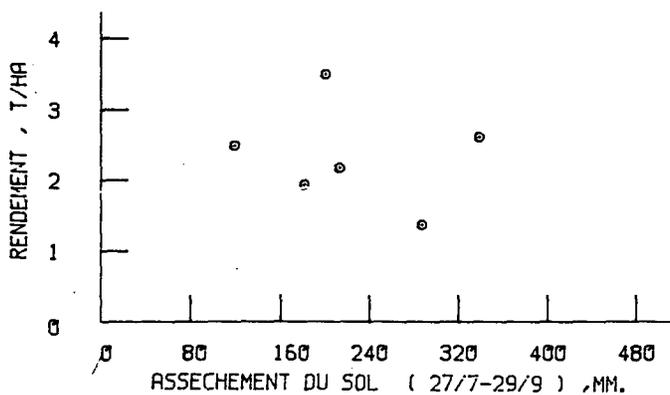


Fig. 4.23: Relation entre le rendement d'arachide et l'assèchement de la couche 0-150cm du sol.

fig4.24: Relation entre le rendement de sorgho et la taille des agrégats de la couche superficielle du sol.

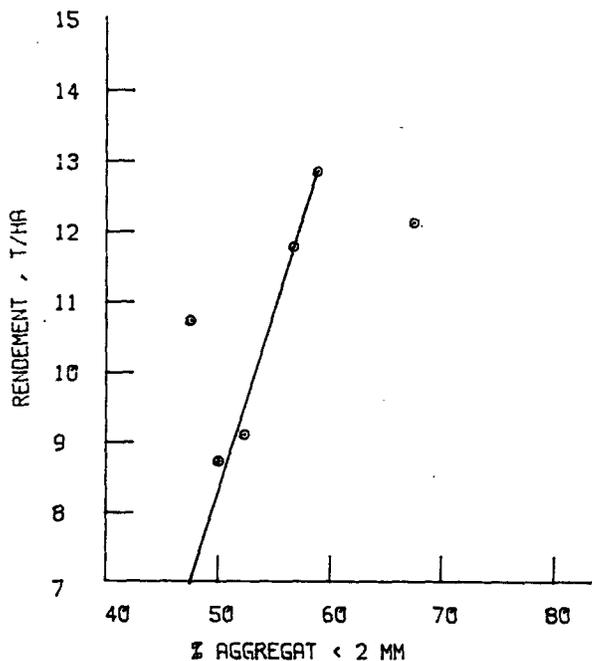
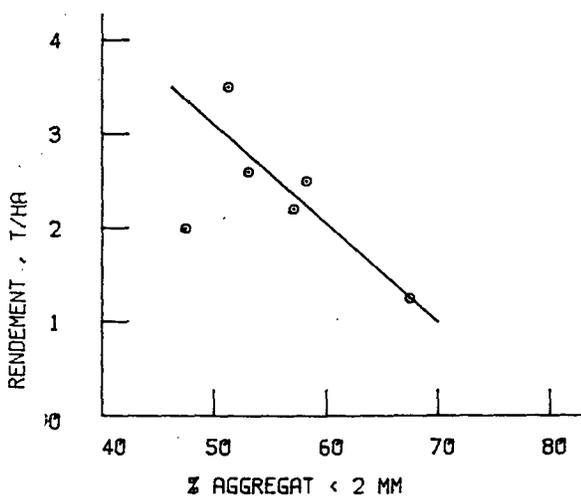


Fig. 4.25: Relation entre le rendement d'arachide en 1978 et la taille des agrégats de la couche superficielle du sol.

diminué de façon à compenser le plus large espacement des rangées.

La réaction du rendement à la taille de l'agrégat peut s'expliquer en se basant sur la pénétration de génophore dans le sol. Le rôle des gouttes d'eau dans la formation de la croûte a été montré par Morin et Benyamini (1977), et la tendance d'un sol loessique du Nord du Néguev à former une croûte est bien connue, et a été étudiée à l'origine par Hillel (1960). Le sol est exposé à l'impact des gouttes de l'asperseur pendant une grande partie de la période entre la mise en culture et le développement du génophore, et plus la structure du sol est fine, plus celui-ci est prédisposé à l'encroûtement. Tandis que les champs commerciaux sont normalement cultivés quelque temps avant la formation du génophore, cette opération n'a pas été effectuée dans ce champ, en accord avec la décision d'adopter le régime de labour le plus simple possible. En conséquence de cela, il y eut moins d'encroûtement dans les traitements avec un lit de semence à l'origine plus grossier, et les génophores eurent plus l'occasion de pénétrer le sol entre les mottes.

Le fait que les traitements de sous-solage et de contrôle obtinrent les rendements les plus bas suggère que le fait de retourner et d'ameublir un champ en travaillant la couche du sol immédiatement sous-jacente à la surface du sol est bénéfique pour la culture. Comme les gousses se forment à quelques cm de la surface du sol, une pénétration plus aisée de cette couche peut bien être la raison des rendements plus élevés obtenus dans les traitements avec labour.

Une évidence supplémentaire que c'est ce mécanisme qui est responsable des différents rendements est donnée par la comparaison des résultats de la table 4.17 avec ceux de la table 4.23. S'il y avait une différence systématique dans l'approvisionnement en eau due à

l'emplacement des parcelles par rapport aux lignes d'irrigation, alors le traitement de labour léger où il y eut une perte de 338mm pendant la période d'observation à l'endroit de la mesure aurait dû donner le rendement le plus haut, et le traitement de disquage, avec une perte observée de 114mm seulement, aurait dû donner le rendement le plus bas. En fait les deux traitements ont donné des rendements pratiquement identiques, et c'est le traitement de levées, avec une perte apparente de 198mm qui a donné le rendement le plus élevé.

Si le labourage primaire a une influence sur le régime hydrique du sol ou sur le développement des racines, ceci devrait être mis en évidence soit par la profondeur de l'activité des racines sur la base d'un modèle d'extraction de l'humidité, soit sur la base du rendement de son rapport qualitatif avec l'influence des différents traitements de labour. En accord avec Bielorai et autres (1976), la zone des racines de l'arachide s'étend en potentiel à 150cm, et il est d'usage d'assurer l'humidité du sol jusqu'à cette profondeur avant la mise en culture. Cependant les irrigations suivantes à 60 et 90cm n'affectèrent ni l'approvisionnement saisonnier en eau demandé, ni les rendements dans les cinq expériences décrites. D'après la figure 4.22, on voit que l'humidité du sol reste toujours supérieure à 16% en volume à 90cm dans tous les traitements sauf le traitement de disquage, dont le rendement n'indique pas de manque d'eau. A 16%, le sol est encore bien au dessus du pourcentage permanent de flétrissement, et l'activité des racines est tout à fait possible.

Néanmoins, il y eut une tendance à une activité moins profonde des racines, précisément dans les traitements où l'on s'attendait à ce qu'un labour en profondeur favorise une activité profonde des racines.

L'activité des racines dans les parcelles de labour profond, de levées et de sous-solage s'étendait à 70, 60 et 30cm respectivement, contre 105cm pour les traitements sans labour et de labour léger. Les deux traitements de labour le plus profond ne donnèrent également qu'un rendement modéré, les traitements de labour léger et de disquage leur étant supérieurs. Il est donc tout à fait évident que la structure du sol à la surface au moment de la formation du gémophore est un facteur déterminant pour le rendement.

Enfin, dans le but de fournir une base de comparaison dans les séries d'expériences rapportées par Bieloral et autres (1976) faites aux mêmes endroits, les rendements des expériences minutieusement effectuées sur petites parcelles, se rangeaient entre 4,1 et 6,4 tonnes/ha avec des approvisionnements saisonniers en eau de 460 et 630mm. Les rendements de cette année des champs commerciaux de Gilat ayant été soumis aux pratiques habituelles de la ferme, y compris l'inoculation, se rangèrent entre 4,0 et 4,5 tonnes/ha, après un approvisionnement d'eau de 525mm. Le rendement le plus élevé de cette expérience (3,5 t/ha) avec 460mm d'eau et sans inoculation peut donc être considéré comme modérément bon. Ceci peut être comparé aux données de Kassam et autres (1976) du Nord du Nigéria, dans la zone de précipitation de 600 à 900mm. Ils rapportent un rendement local de 0,6 t/ha sous pratiques normales d'exploitation, qu'ils décrivent comme inadéquates en terme de fertilité et de quantité de plante. Ils rapportent aussi des meilleurs rendements de 3-4t/ha en parcelles expérimentales, et, à leur avis, les rendements sur de larges surfaces peuvent être augmentés jusqu'à 2,5-3,0t/ha par des pratiques améliorées d'aménagement, principalement le contrôle des maladies, le fait de planter à temps, le fait de veiller à une fertilité adéquate et à une

pousse complète. On sait qu'une précipitation naturelle de 600 à 900mm est moins efficace que la même quantité d'eau donnée par une irrigation bien programmée, de ce fait, les conditions climatiques sont à peu près comparables à celles de cette expérience, et les rendements plus élevés rapportés par Kassam et autres sont effectivement du même ordre que ceux de cette expérience. Il est donc douteux que le labour sophistiqué pratiqué en Israël sous des conditions d'irrigation sûres et intensives donne de moins bons résultats que les pratiques de "dryland farming" du Sahel. Lorsque les semis sont effectués à la main, on ne s'attend pas à ce qu'un lit de semence grossier gêne l'établissement de la plante, et même lorsqu'on utilise une simple machine à semer, un lit de semence très fin n'est pas nécessaire. Un lit de semence relativement grossier permettrait une meilleure maintenance de la structure, bien que sous les conditions de plus haute énergie d'une précipitation naturelle le bénéfice soit moindre que sous irrigation par aspersion. Une culture faite à temps au début de la formation du génophore devrait être effectuée en plus des autres pratiques d'aménagement améliorées recommandées par Kassam et autres.

4.1.3 - Effet des travaux de préparation du sol sur le début de la croissance et le développement du millet.

4.1.3.1 - Introduction

La première période du développement d'une plante (germination et émergence) est très importante dans les régions semi-arides car elle influence en général directement les rendements finaux de la plante. La densité de pousse sera le résultat du nombre de plantules survivant à la germination et à l'émergence (voir également les résultats d'Israël). L'influence est encore plus importante dans les cas où il est indispensable d'améliorer les conditions de culture (par exemple épandage supplémentaire d'engrais, irrigation, etc...). Ici l'approvisionnement d'humidité à la graine germant et émergeant jouera un rôle crucial. A l'aide de travaux de labour appropriés, avant et pendant le semis et la croissance, on peut influencer et améliorer l'approvisionnement d'humidité (le contact graine-sol). C'est dans ce but que les expériences ont été effectuées pendant la saison des pluies de 1979 sur le champ Nord-S1 à Niono. L'effet des travaux de préparation du sol sur l'émergence et le début de la croissance d'une culture locale (le millet) a été observé.

4.1.3.2 - Méthodes et procédés

Cinq différentes méthodes de labour furent effectuées:

1. Labour profond à la houe (environ 10cm)
2. Labour léger à la houe (environ 3-5cm)
3. Levées faites à la houe; semis en haut des levées
4. Levées faites à la houe; semis entre les levées
5. Pas de préparation; ouverture du sol juste au moment de planter la graine

Les parcelles étaient de 4m sur 4m, séparées par une petite levée de 0,5m de large. On essaya de créer deux conditions pendant le labour: sec (S) et humide (H) afin d'observer des différences éventuelles dans l'influence sur l'émergence. Chaque traitement a été fait en deux répliques, choisies au hasard dans la zone expérimentale.

Les semis du millet ont été effectués immédiatement après le labour, en creusant un petit sillon et en plaçant les graines à la main à une profondeur de 2 à 3cm. Il y avait six rangées par parcelle, espacées de 60cm. La largeur des levées était de 60cm, leur hauteur après construction d'environ 20cm. Les graines utilisées furent "petit mil" (*Pennisetum typh.*), de type "tardif", qui demande une longue période de croissance. Ce type de graine est communément utilisé par les agriculteurs de cette région.

Le taux d'ensemencement fut approximativement de 13 grammes par parcelle. Le poids de mille graines étant de 9,5g, 1350 graines furent semées dans chaque parcelle, c'est-à-dire environ 56 graines par mètre de rangée.

4.1.3.3 - Résultats et discussion

a. Le labourage à sec; labour et semis en sol sec au début Juin. Le compte des plantes fut fait après 10 et 25 jours, ainsi qu'une évaluation visuelle après 25 et 30 jours. La précipitation dans la première semaine après les semis fut de 38,2mm. Dix-huit jours après le semis une précipitation supplémentaire de 18mm fut enregistrée, et à partir de ce moment jusqu'à la fin de la période d'observation il n'y eut pas de pluie.

Les résultats des observations sont résumés dans la table 4.18.

Table 4.18: L'influence du labourage sur le début du développement du millet après ensemencement en sol sec.

TRAITEMENT		%	%	EVALUATION	LONGUEUR	EVALUATION	CLASSEMENT (1=MEILLEUR)
		EMERGENCE APRES 10 JOURS	EMERGENCE APRES 25 JOURS	VISUELLE APRES 25 JOURS	APPROXI. DES PLANTES (CM)	VISUELLE APRES 30 JOURS	
		MOYENNE	MOYENNE				
S 1	a	31,7	22,2	bon	10-15	rais/faible	1
	b	36,9 42,0	24,7 27,1	bon	10-15	raisonnable	
S 2	a	32,9	16,2	très faible	<5	mort	4
	b	38,9 44,9	25,3 34,4	raisonnable	8-15	très sec	
S 3	a	37,1	31,6	bon	10-12	faible	3
	b	34,2 31,4	26,9 22,2	rais/faible	10	faible	
S 4	a	49,6	35,8	rais/faible	6-12	moy/bon	2
	b	45,8 42,0	34,3 32,8	pousse fine	6-10	moy/bon	
S 5	a	44,2	14,5	très faible	<3	mort	5
	b	49,7 55,1	20,4 26,2	très faible	<4	mort	

L'observation la plus frappante ici est la très bonne émergence des graines de la parcelle sans préparation (S5) et le rapide déclin par la suite. A cause du sol dur et encroûté le manque d'humidité a été la raison principale de cet échec.

Les parcelles de labour profond (S1) ont en général montré la meilleure croissance, le développement des plantes fut rapide et les plantes furent capables de survivre à une longue période de sécheresse. Dans les parcelles de labour léger (S2), la croissance et le développement furent carrément mauvais; dans ce traitement, il y eut une différence considérable entre les replications. Ceci est peut-être dû au fait que

les deux parcelles ont été travaillées par deux personnes différentes. Dans les parcelles de levées (S3 et S4) le développement et la vigueur des plantes sur le haut des levées sont restés supérieurs à ceux des plantes dans le sillon entre les levées. Après la période sèche (fin Juin), les plantes montrèrent qu'il y avait encore de l'eau disponible dans le sillon.

- b. Le labour humide; labour et semis en sol humide à la mi-Juillet. Le compte des plantes fut fait onze jours après le semis; un approvisionnement en humidité par précipitation, plus l'humidité disponible dans le sol furent suffisants pour considérer ce compte comme le pourcentage final d'émergence. Une évaluation visuelle fut effectuée vingt jours plus tard, un jour après une grosse averse de 86mm. Les résultats sont donnés dans la table 4.19.

Table 4.19: Influence du labourage sur le début du développement du millet après ensemencement en sol humide.

TRAITEMENT	% EMERGENCE APRES 11 JOURS		EVALUATION VISUELLE APRES 20 JOURS
	MOYENNE		
H 1	a	28,4	Petites plantes mais bonne pousse
	b	26,9	
H 2	a	5,1	Pousse très faible, surface de parcelle devenue lisse
	b	11,8	
H 3	a	16,9	Le sol est débarrassé des racines (les plantes se sont écroulés)
	b	17,3	
H 4	a	29,5	Plantes très petites, presque recouvertes par la terre des levées
	b	30,8	
H 5	a	20,4	Pousse faible à très faible
	b	23,6	

c. Une expérience supplémentaire fut réalisée avec les mêmes traitements en appliquant la pratique locale: semis de millet (ici millet "hâtif") en faisant un trou pour la graine, en déposant 12 à 15 graines dans ce trou et en les recouvrant de terre (en appuyant avec le pied). Une évaluation visuelle de la culture après quatre semaines (avec une précipitation suffisante) a montré que le labour profond et le semis au sommet des levées donnèrent de nouveau les meilleurs résultats. Un labour léger ici fut meilleur que le fait de semer dans le sillon entre les levées, peut-être à cause d'un meilleur état général de l'humidité. A nouveau le traitement sans préparation donna les plus mauvais résultats.

4.1.4 - Influence de la profondeur du semis sur la germination et l'émergence du millet.

4.1.4.1 - Introduction

La profondeur du semis peut-être d'une extrême importance pour la période du début de la saison pluvieuse, dans les climats semi-arides, en particulier en Afrique de l'Ouest où les averses alternent avec des périodes d'évaporation très élevée (chaudes et ensoleillées). En conséquence de cela, la teneur en humidité de la couche arable change également très rapidement. En quelques heures, les 5cm supérieurs peuvent passer de la capacité de rétention en eau au point de flétrissement. Les risques d'échecs peuvent être minimisés en adaptant la profondeur du semis. Le problème majeur est cependant l'imprévisibilité du temps: dans certains cas il vaudra mieux semer en profondeur, et dans d'autres superficiellement. Les avantages et les inconvénients des semis profonds et superficiels sont les suivants:

Avantages du semis en profondeur: les températures ne sont pas extrêmement hautes, il y a généralement moins de problèmes avec les insectes. Quand l'humidité a atteint la profondeur du semis, le stock d'eau dans la couche doit être suffisant.

Inconvénients: Les plantules demandent plus de temps et d'énergie pour sortir de terre. Les petites pluies ne peuvent pas être utilisées.

Avantages du semis superficiel: ils peuvent utiliser les petites pluies (si elles sont régulières) et donc peuvent donner un meilleur départ. Une émergence rapide permet aussi un début rapide de la photosynthèse.

Inconvénients: le manque d'eau se fait sentir rapidement, ce qui peut-être

être désastreux si la graine a juste commencé à germer. Les températures sont plus élevées, il y a des problèmes d'insectes (fourmis).

Il y a bien sûr une profondeur de semis maximale pour chaque culture: la jeune pousse doit atteindre la surface avant que l'énergie emmagasinée dans la graine soit épuisée. Pour une petite graine comme le millet, cette profondeur maximale est d'environ 7 à 8cm.

4.1.4.2 - Méthodes et procédés

Sur le site Nord S1, quelques expériences furent réalisées pour étudier l'influence de la profondeur des semis sur l'émergence. Deux variétés de millet furent utilisées: "tardif" (A) et "hâtif" (B). Le tardif est une variété qui exige une longue période de croissance, et le hâtif exige une plus courte période (utilisé principalement pour une culture plus tardive). Les traitements suivants furent choisis:

2 graines par trou à planter: profondeur de 1, 3, 5 et 7cm

6 graines par trou à planter: profondeur de 1, 3 et 7cm

2 graines par trou à planter: profondeur de 3cm, tassant la terre au-dessus des graines

6 graines par trou à planter: profondeur de 3cm, tassant la terre au-dessus des graines.

Tous les traitements furent faits en trois replications (I, II et III). La taille d'une parcelle fut de 2m sur 2m, avec 5 rangées espacées de 30cm. Trente trous à planter par rangée furent faits. Les semis furent faits en creusant un trou d'environ 1cm de diamètre à l'aide d'un instrument permettant au travailleur d'obtenir avec précision la profondeur requise.

4.1.4.3 - Résultats et discussion

On a trouvé une différence dans l'émergence dans les parcelles AIII, BII et BIII. Ceci est dû au fait qu'il est impossible d'ensemencer toutes les parcelles le même jour.

Influence de la profondeur des semis

Comme on peut le voir sur la figure 4.26, la meilleure émergence fut obtenue avec une profondeur de semis de 3cm. On peut observer que dans de nombreux cas, les graines plantées superficiellement (1cm) ont été déplacées par les fourmis, et de jeunes pousses furent même mangées et détruites. En particulier sur la parcelle AII.5, les graines (6 graines à 1cm) furent complètement déplacées par les fourmis.

Influence du nombre de graines

D'après la figure 4.27 on peut voir clairement que la différence dans l'émergence est une fonction du nombre de graines par trou. Pour toutes les profondeurs de semis, six graines par trou eurent une meilleure émergence que deux graines par trou. Il faut mentionner que seuls furent comptés les trous desquels se fit l'émergence, sans tenir compte du nombre de plantes par trou. En d'autres termes cela signifie que l'émergence de même une seule plante d'un trou où furent semées six graines fut considérée comme réussie. Pour savoir également combien de graines exactement sont sorties de terre à un moment donné (30/7), toutes les plantes furent comptées une à une. Dans les replications I et II où l'émergence était terminée à cette date, le nombre moyen de plantes d'un trou à deux graines fut 1,6 (80%). Dans les parcelles à six graines seulement 3,3 plantes par trou émergèrent (55%). La figure 4.27

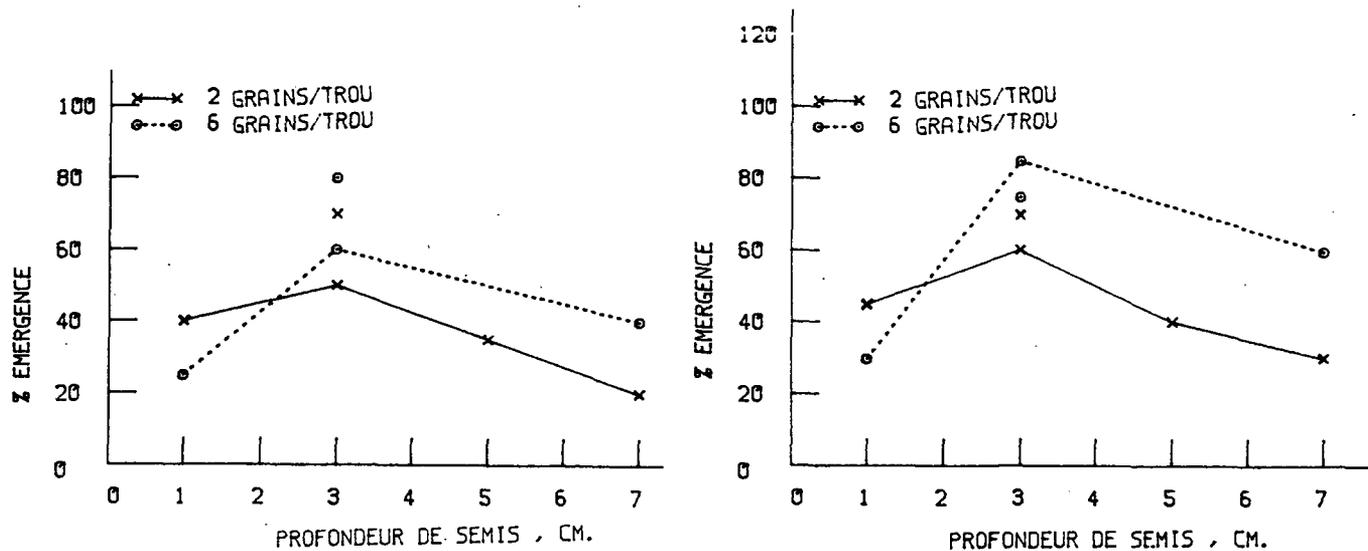


Fig. 4.26: Pourcentage d'émergence en fonction de la profondeur de semis (Millet).

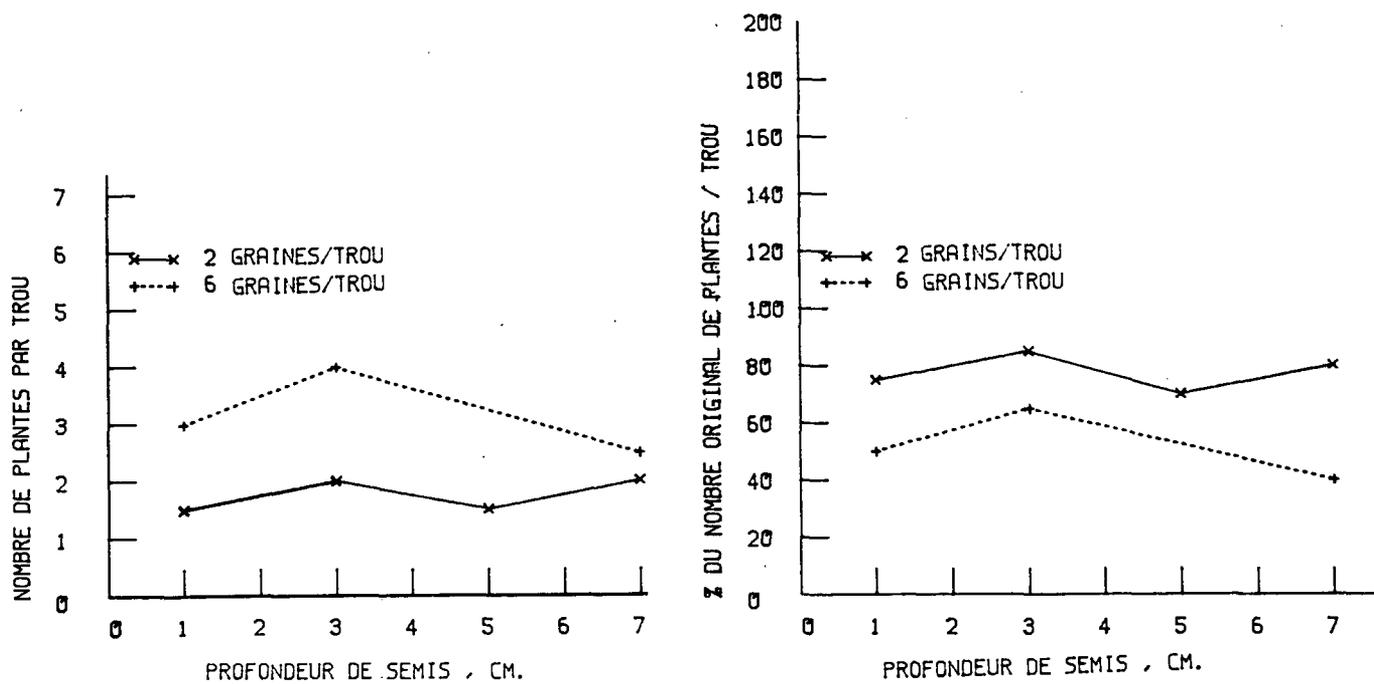


Fig. 4.27: Pourcentage du nombre de plantes en fonction de la profondeur de semis (Millet).

montre ici aussi une faible influence de la profondeur du semis. Les parcelles de la replication III furent également comptés, mais comme l'émergence n'était pas encore terminée à ce moment, les résultats sont dépourvus de signification, et l'émergence ne fut pas comptée. Dans certaines parcelles, le nombre moyen de plantes par trou fut plus élevé que le nombre de graines semées. Ceci est probablement dû à des irrégularités pendant les semis.

Influence du compactage pendant la croissance

Avec les graines de la variété tardive, le compactage eut clairement une influence positive. Avec la variété hâtive, les résultats ne sont pas clairs, le compactage ayant une influence négative dans trois cas sur six. L'influence positive semble être plus grande avec deux graines qu'avec six graines par trou.

4.1.4.4 - Conclusions

En considérant les limitations de cette expérience en sols et en graines utilisées, de très claires différences furent observées entre les traitements de labour:

- L'absence de préparation donne les résultats les plus faibles; ceci est dû principalement aux problèmes d'approvisionnement des plantes en humidité. L'eau de pluie ne peut s'infiltrer dans le sol à cause de la croûte, le développement des racines est faible à cause de la densité du sol. Notons toutefois que ce sol a été mis en jachère plus d'un an.
- Le labour profond donne les meilleurs résultats; quand la surface est suffisamment rugueuse, l'eau de pluie peut pénétrer facilement et pendant

- une longue période (avant que la croûte ne se forme). Dans les cas observés, l'émergence n'a pas été influencée de façon négative par la rugosité du lit de semence. A cause de la topographie plate des parcelles, les plantes restèrent bien droites même après une grosse averse.
- Un labour léger ne semble pas être très avantageux. Il semblerait que les conditions n'y sont pas optimales pour le développement initial des plantes. Bien que la croûte soit brisée par le travail de préparation, la surface devient bientôt plate et la croûte se reforme après quelques pluies.
 - La culture sur le haut des levées montre de bon résultats malgré le désavantage qu'est le dessèchement rapide du sommet de la levée, ce qui est dangereux dans les premières étapes du développement de la plante. Les racines peuvent être arrachées après de longues averses.
 - Les semis entre les levées peuvent créer des problèmes à cause de l'exploitation de l'eau. En conséquence de la méthode utilisée pour faire les levées, soit avec le soc soit à la houe, le bas du sol situé entre deux mottes sera généralement dur et pas ameublé.
 - Pour le millet, il est probablement préférable de planter plusieurs graines ensemble plutôt que une à une le long de la rangée. Un groupement sera plus stable sous de grosses averses et augmentera les chances d'émergence et de survie de la jeune plante.

4.1.4.5 - Résumé

Les résultats de ces expériences où l'on a étudié les relations entre la performance de la plante et le travail de la terre montrent clairement que, dans tous les cas, le facteur le plus important qui détermine le rendement sous conditions expérimentales fut l'approvisionnement de la plante en eau. Alors que les traitements de labour ont influencé la structure du sol, lorsque

l'approvisionnement en eau était suffisant, le labour per se n'a pas eu d'influence directe sur le régime hydrique du sol ni sur le rendement. Dans les cas où la précipitation fut accompagnée d'un ruissellement de surface, le travail de la terre eut toutefois une influence très prononcée sur la plante, en améliorant les propriétés d'infiltration du sol et donc l'approvisionnement de la plante en eau.

Les traitements de labour eurent également une influence secondaire sur le rendement dans les expériences faites en Israël, lorsque l'approvisionnement en eau fut suffisant, mais seulement lorsque la structure du sol eut une influence tout à fait spécifique sur une fonction particulière de la plante. Ainsi dans le cas du sorgho, la structure du sol a influencé la densité de pousse par l'intermédiaire de son effet sur la performance du planteur, et le rendement fut une fonction de la quantité de plantes. Dans le cas de l'arachide, les propriétés de la croûte de surface influencent la facilité de pénétration des génophores, ce qui à son tour influence le rendement.

Malgré les autres effets bénéfiques du travail de préparation primaire et malgré le fait qu'il soit nécessaire dans la production pour d'autres raisons, il n'a pas d'influence directe sur le rendement de la plante qui est de toute façon en très grand rapport avec l'approvisionnement de la plante en eau. Là où les pluies sont "agressives" et provoquent la formation d'une croûte, une structure de surface grossière résistera à l'impact des gouttes de pluie pendant une plus longue période avant que la croûte de surface ne se forme, et permettra ainsi l'infiltration de plus d'eau avant que le ruissellement de surface ne commence. Morin et Benyamini (1977) ont montré que la croûte de surface jouait un rôle majeur dans la quantité du ruissellement de surface.

4.2 - Quelques aspects de la formation des croûtes de surface du sol dans les climats semi-arides

4.2.1 - Introduction

De grandes régions de la zone climatique semi-aride ont des sols sableux ou loessiques. A la surface de ces sols, dont la structure est assez instable, se forment des croûtes qui causent de sérieux problèmes à l'agriculture. Deux aspects de la formation de la croûte seront distingués ici:

- a - L'influence de la croûte en tant que barrière au mouvement de l'eau, provoquant le ruissellement de surface sur les champs en pente après une précipitation ou une irrigation.
- b - L'influence de la croûte en tant que barrière à l'émergence des jeunes pousses.

Les recherches sur les aspects hydrologiques de la croûte sont rapportées dans d'autres chapitres de ce présent rapport. Ici l'attention sera portée sur la résistance physique des croûtes de surface à l'émergence, y compris une brève revue bibliographique et les résultats de quelques expériences au champ et au laboratoire.

4.2.2 - Revue bibliographique

Une revue détaillée sur la nature des croûtes, les facteurs influençant leur formation et leurs propriétés, leur influence sur le rendement de la plante et les méthodes de mesure se trouve dans l'appendice n°2.

En considérant le rapport entre les pratiques agricoles et la formation de la croûte, il faut noter que les travaux de préparation du sol effectués

trop fréquemment ou dans de mauvaises conditions, peuvent eux-même être responsables de la formation de la croûte. Il existe deux options pour une solution possible des problèmes de croûte:

1. Essayer de prévenir ou d'empêcher la formation d'une croûte:
 - a - en appliquant du gypse dans les cas où la formation de croûte est due à l'instabilité des agrégats,
 - b - en utilisant des agents de conditionnement de sol, qui peuvent être efficaces sur sols salins et alcalins, bien qu'une influence positive ne soit pas toujours garantie; ce traitement est cher et n'est pas réalisable dans les pays en voie de développement,
 - c - en augmentant la teneur en matière organique,
 - d - en semant ou en plantant au sommet des levées dans le cas d'irrigation de surface,
 - e - en utilisant une couche de paillage sur la surface du sol (film plastique, déchets végétaux).
2. Après que la croûte s'est formée, essayer de la détruire ou de diminuer la résistance qu'elle oppose à l'émergence:
 - a - en la brisant par des moyens mécaniques; des fissures sont formées au travers desquelles la jeune pousse peut sortir
 - b - en humidifiant et en ramollissant la croûte (irrigation)
 - c - en influençant le mode de fissuration par des moyens chimiques.

Les mesures mentionnées en 1.a ont été rapportées par Tim et autres (1971) sur la culture de la pomme de terre. L'utilisation d'agents de conditionnement du sol (1.b) a été étudiée par de nombreux chercheurs (cf. Cary et Evans, 1974) concernant plusieurs sortes de produits chimiques. Cependant, en pratique, ce conditionnement du sol ne semble pas être économiquement réalisable, certainement pas pour presque toutes les cultures

marginales comme les petites graines (cf. les rapports précédents). L'option 1.c a été rapportée par Nuttall (1970), lequel a trouvé des valeurs M.O.R. plus basses, et une meilleure émergence des graines mûres après l'application de matière organique, comme le firent Chaudri, Brown et Holder (1976) qui utilisèrent des engrais pour améliorer les terres grasses.

Cary et Evans (1974) mentionnèrent des méthodes pour l'option 2.a; un rouleau de type Cambridge donne de bons résultats, des hersees (fines et rigides ou rotatives P.T.O.) peuvent être utilisées mais risquent d'endommager les jeunes pousses (cf. également les rapports précédents). Des modèles appropriés de roues à presse sur une planteuse peut donner un meilleur support à l'émergence des jeunes pousses (Morton et Buchele, 1960). L'option 2.b est fréquemment utilisée pour des cultures à haute valeur économique (légumes, etc...), où des systèmes d'irrigation par aspersion sont disponibles. Les inconvénients sont l'investissement très élevé en travail et en matériel, ainsi que le gaspillage d'eau.

Hemwall et Scott (1962) utilisèrent un produit chimique pour l'option 2.c, et ont pu provoquer la formation de fissures, ce qui a augmenté le taux d'émergence. Cette option cependant a à nouveau les désavantages habituels de l'usage des produits chimiques.

Des systèmes de semis spéciaux visant à minimiser les problèmes de croûte ont été rapportés par Smith (1966), lequel a mis en oeuvre un système de "semis souterrain", afin d'obtenir un meilleur établissement de pâturage après une culture de maïs. Les grains d'herbage furent semés avant que le maïs ne soit récolté et ce sont les plantes de maïs qui ont protégé le sol contre la formation de la croûte. Heinemann et autres (1973) décrivent une machine expérimentale pour planter par enfoncement. Ici les graines sont déposées dans des trous enfoncés dans le sol sans que la croûte ne dérange.

Une rangée de graines de forme convexe a donné de meilleurs résultats qu'un enfoncement à plat, ou qu'un semis conventionnel, car la matière érodée du sol n'a pas été refluvée dans les trous par l'eau de pluie. Les désavantages de ce système sont que le sol doit être stable, et qu'il faut une machine complexe pour les travaux de semis.

4.2.3 - Expériences

4.2.3.1 - Introduction

Des expériences faisant partie de ce projet furent effectuées au laboratoire à Wageningen, et au champ en Israël et au Mali. Les résultats des expériences au champ sont rapportés dans l'appendice 2, et de ce fait, la principale attention sera portée sur les expériences faites au laboratoire; si besoin est, les résultats des expériences au champ seront mentionnés.

4.2.3.2 - Matériel et méthodes

4.2.3.2.1 - Les sols:

Les sols utilisés dans cette expérience sont des sols loessiques, l'un de la région Nord du Néguev, à la ferme expérimentale de Gilat, l'autre un sol loessique hollandais. Quelques données et caractéristiques de ces sols sont mentionnés ci-dessous:

Sol israélien (Gilat)

- Composition mécanique (classification USDA)

sable épais (>105 micromètres) 5% (contenant 8,4% de CaCO₃)

sable fin (50-105 micromètres) 47% (contenant 12,3 de CaCO₃)

limon (2-50 micromètres) 30% (contenant 29,5% de CaCO₃)

argile (<2 micromètres) 18% (contenant 14,3% de CaCO₃)

- Densité apparente du champ (valeurs moyennes pour une profondeur de 0 à 50cm)

Par échantillonnage: 1,41g/cm³ (porosité de 47%)

Par sonde à rayons gamma: 1,43g/cm³

Capacité de rétention d'eau du champ et point permanent de flétrissement (approximation)

18% en poids 7-8,5% en poids

25% en volume 10-12% en volume

pH de pâte saturée (38% d'eau en poids)

7,5-8,2

Capacité de cations échangeables (milliéquivalents par 100g)

26-30

Pour d'autres propriétés du sol, consulter Hillel (1967), Appendice D page 132.

Sol hollandais

- Composition mécanique

<2 micromètres 17% argile pH (KCl) 7,2

2-16 micromètres 14% limon matière organique 2,1%

16-50 micromètres 57% limon, CaCO₃ 2,9%

50-105 micromètres 8% sable

105-150 micromètres 1,5% sable

>150 micromètres 4,5% sable

4.2.3.2.2 - Expériences au laboratoire

Le sol a été préparé en tamisant le sol sec pour obtenir des fractions de taille d'agrégats de moins de 2mm (S), de 2 à 6,8mm (M) et de 6,8 à 12mm (L), qui furent mélangés dans des combinaisons différentes pour obtenir des lits de semences ayant des caractéristiques différentes (table 4.20)

Table 4.20: Composition des lits de semences utilisés dans les expériences de laboratoire.

TRAITEMENT N°	COMPOSITION			DIAMETRE DU POIDS MOYEN RESULTANT (MM)	
				LOESS HOLLANDAIS	LOESS ISRAELIEN
I	100% S	-	-	0,90	0,88
II	43% S	43% M	14% L	3,31	3,26
III	29% S	57% M	14% L	3,70	3,71
IV	10% S	76% M	14% L	4,26	4,57
V	5% S	81% M	20% L	4,51	4,65
VI	-	80% M	20% L	5,86	4,67
VII	-	-	100% L	9,24	8,24

Le sol fut placé dans des boîtes en bois de dimensions 46x36x10cm. Leur fond était constitué d'une plaque d'acier perforée de trous circulaires de 6cm de diamètre. Ceci rend possible un drainage libre de l'eau et la sortie d'air en cas d'approvisionnement de pluie, et permet aussi de mesurer la résistance de la croûte du bas vers le haut. Les boîtes furent remplies d'une couche de terre de 4cm (mixture de 50% de 0-2mm et 50% de 2 à 6,8mm), et le lit de semence avait une épaisseur de 3cm.

Le lit de semence dans les boîtes fut soumis à des quantités de pluie

différentes, appliquées par un simulateur de pluie fonctionnant avec un disque à jet rotatif (comme l'ont décrit Morin, Goldberg et Seginer, 1967). Pour toutes les expériences, on utilisa une intensité de pluie de 40mm/h. Après la pluie, les boîtes des sols furent placées dans une pièce sous des lampes électriques pour permettre l'assèchement du sol. La distance entre les lumières (4 ampoules de 400W chacune) et la surface du sol était de 80cm. Pour obtenir un assèchement rapide (comme sous climat semi-aride), les lampes fonctionnèrent de façon continue. La température moyenne (de l'air) dans la pièce fut de 26°C. L'humidité relative variait de 45 à 70%, avec une moyenne de 55%. L'Ep (évaporation de cuve, "pan evaporation") fut d'environ 7mm par jour.

La résistance de la croûte fut mesurée de deux façons différentes:

- a. en poussant un pénétromètre avec un microcône (2,0mm de diamètre) à un angle de 90° par rapport à la croûte par la plaque inférieure perforée.
- b. en tirant vers le haut une petite bille (2,0mm de diamètre) rattachée à un fil de très fin diamètre (0,4mm). Les billes furent placées dans le sol avant l'application de la pluie à 1,5-2,0cm environ de la surface du sol.

Des mesures furent prises sur un petit pénétromètre à pression modifiée de laboratoire. Les forces furent enregistrées continuellement sur un enregistreur de Sanborn, de façon à ce que l'augmentation des forces et leurs valeurs maximales puissent être facilement identifiées. La vitesse relative pour tirer et pousser fut de 1mm/s. Pour obtenir la force de la croûte sans soulever entièrement la "plaque" de croûte on a utilisé un bloc de bois placé avec un trou en son centre, placé au dessus de la "plaque" pour lui faire contre-poids. Des échantillons de ce sol (croûte) furent prélevés de la surface pour déterminer la teneur en humidité pendant l'expérience. Dans quelques boîtes, des graines de sorgho furent plantées à 3cm de profondeur.

(de la même variété que celle utilisée en Israël); la germination et l'émergence furent relevées pendant les expériences.

4.2.3.2.3 - Expériences au champ:

Deux expériences furent réalisées, toutes deux à la ferme expérimentale de Gilat:

a. Les travaux de de Boer en été 1978, où fut essayé le système de tirer une bille (ou un autre objet) placée dans le lit de semence. Sur de petites parcelles, on confectionna des lits de semences de différentes tailles d'agrégats, et on fit "pleuvoir" à l'aide d'un simulateur de pluie.

Comme ceci était la première expérience où l'on essayait de mesurer la force de la croûte en tirant vers le haut un objet, on utilisa une punaise ordinaire rattachée à une agraffe métallique. Le diamètre de la punaise était de 10mm. La force requise pour tirer cette punaise au travers de la croûte fut mesurée à l'aide d'un pénétromètre inverse, faisant fonctionner un système de cadran et d'aiguille. Comme il n'y avait pas d'appareil enregistreur, seules les valeurs maximales purent être mesurées.

Deux lits de semences furent ici utilisés: une couche de fins agrégats (1-4,5mm), et une couche de gros agrégats (4,5-12,7mm). La pluie fut appliquée à deux intensités différentes, 35 et 80mm/h, respectivement.

b. En été 1979, Unver et Rawitz réalisèrent quelques expériences dans lesquelles ils utilisèrent des billes de 1,2mm de diamètre (soudées à un fil très fin). Les mesures de la résistance de la croûte furent identiques à celles de 1978. Dans cette expérience, les croûtes furent formées à l'aide d'asperseurs élevés, ce qui donne une plus faible énergie cinétique que le simulateur de pluie. Dans cette expérience, furent

comparés les influences des agents de conditionnement du sol, et d'autres traitements prévenant la formation de la croûte, ainsi que les différents systèmes d'approvisionnement en eau par irrigation.

4.2.3.3 - Résultats

4.2.3.3.1 - Expériences au laboratoire

La résistance de la croûte, résultant des actions d'irrigation et d'assèchement décrites plus haut, fut mesurée à des intervalles de temps fixes après l'application de la pluie. Un résumé des résultats de la première expérience avec 8mm d'eau est donné dans les figures 4.28 (loess israélien) et 4.29 (loess hollandais). Bien que les diamètres du pénétromètre et des billes soient les mêmes, il y a une très nette différence dans les résultats obtenus.

Ceci peut être expliqué de la façon la plus probable comme suit:

- a. Le pénétromètre doit être poussé au travers de toute la couche du lit de semence (7cm) tandis que les billes sont tirées d'une profondeur de seulement 2cm. De plus, le fil attaché à la bille a pu créer un point faible dans la croûte.
- b. On a observé (et ce fait sera discuté plus tard) que, particulièrement dans les lits de semence, une couche d'agréats soudés les uns aux autres s'est formée sous la croûte de surface. La bille se trouvait généralement dans la partie supérieure de cette couche.

L'écart-type des tables 4.21 et 4.22 montre que pour les deux méthodes de mesure, il y a une variation considérable dans les valeurs de résistance. Les coefficients de corrélation entre les résultats de ces deux méthodes ont également été calculés. Les coefficients furent de 0,84 pour le loess

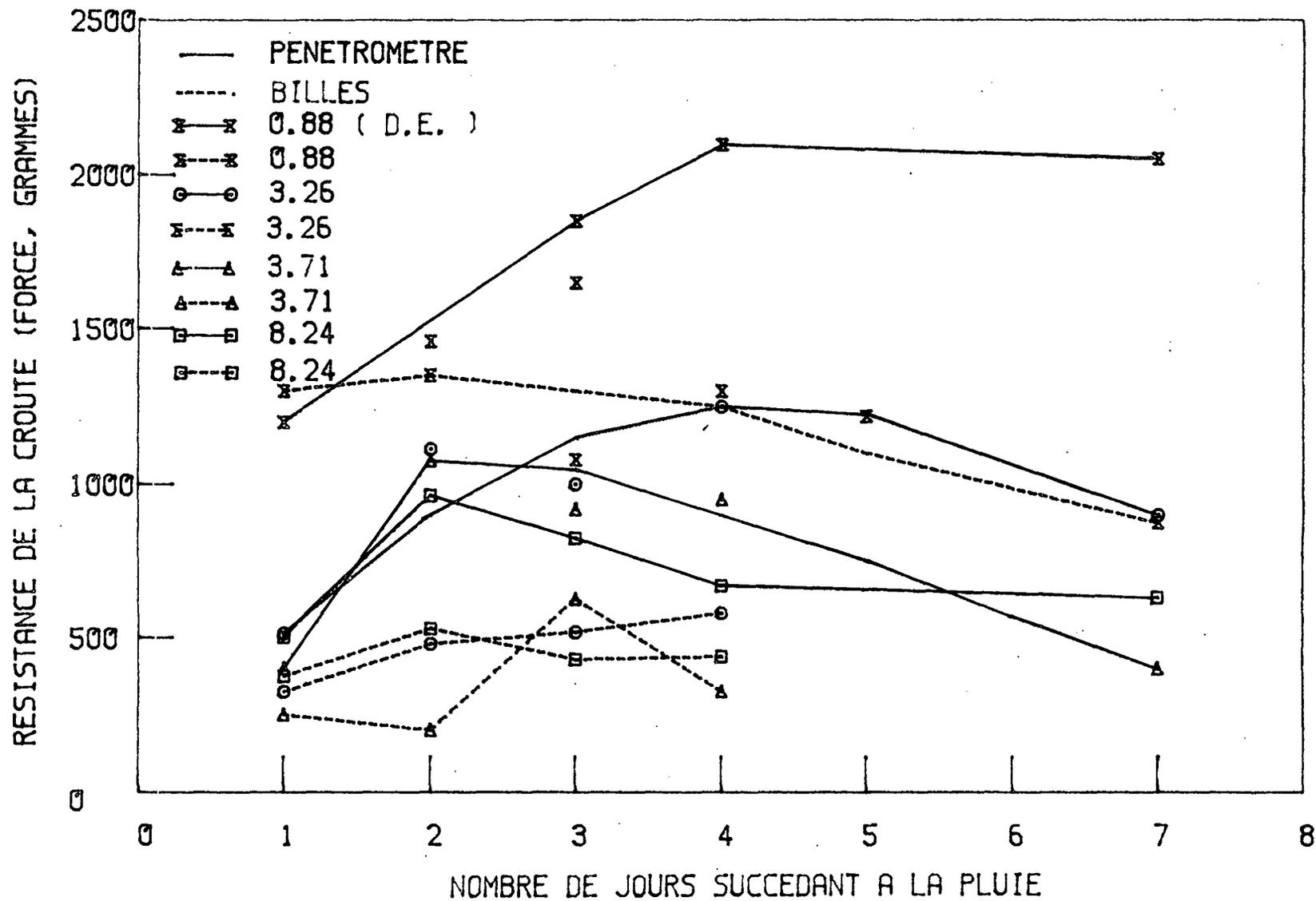
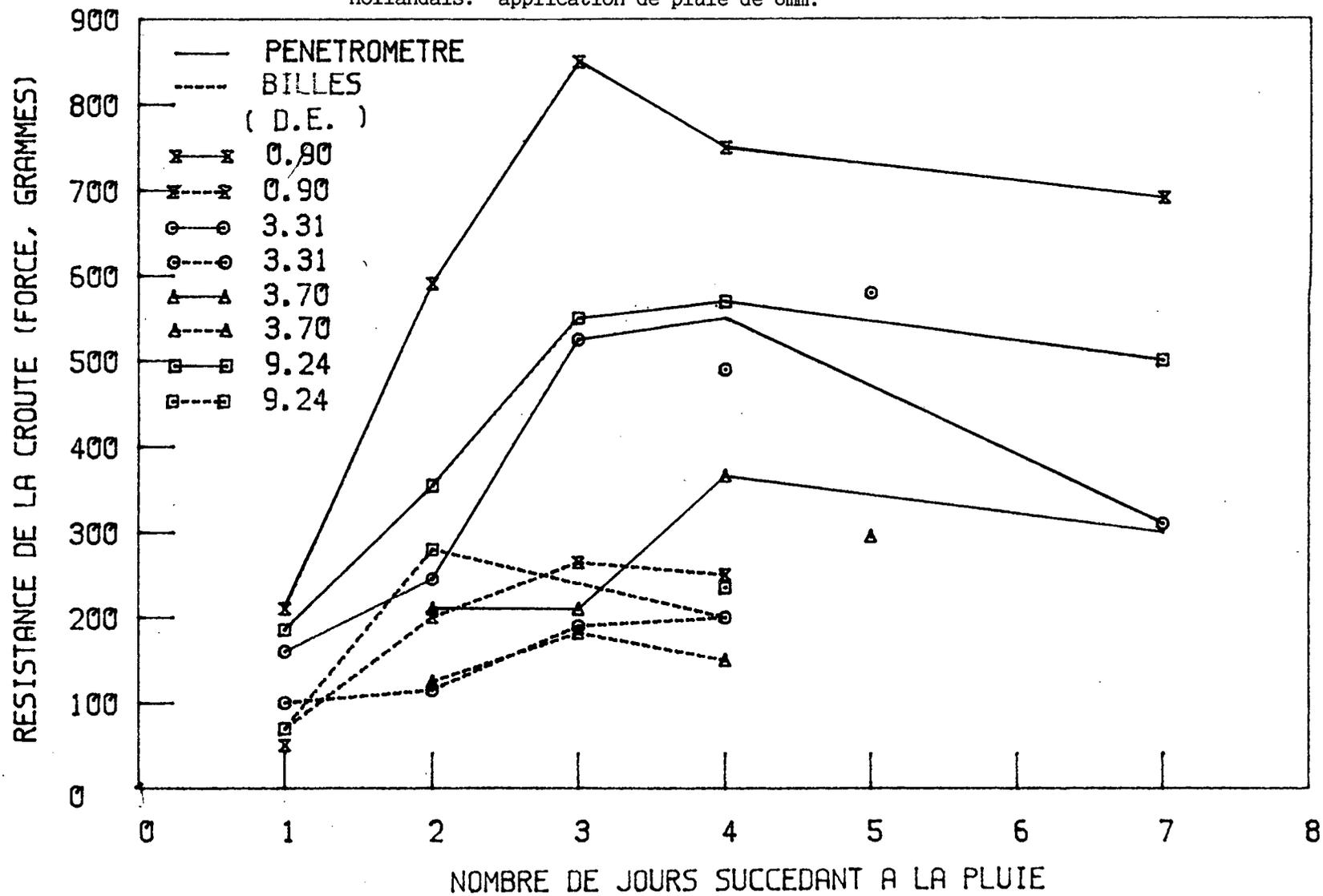


Fig. 4.28: Résistance de la croûte en fonction du temps, sur loess israélien. application de pluie de 8mm.

Fig. 4.29: Résistance de la croûte en fonction du temps, sur loess hollandais. application de pluie de 8mm.

143



hollandais, et de 0,71 pour le loess israëlien; ceci pour toutes les mesures. En prenant seulement les mesures des troisième et quatrième jours (comme étant la période la plus critique) le coefficient de corrélation fut plus bas pour le loess hollandais (0,79), mais meilleur pour le loess israëlien.

En valeurs (maximales) absolues, la résistance de la croûte du loess israëlien est deux à trois fois supérieure à celle du loess hollandais, dans les lits de semence ayant les mêmes diamètres équivalents.

Ici un facteur important est la stabilité des agrégats, et bien que la teneur en argile des deux sols soit presque identique (17 et 18%), la teneur en matière organique est différente, 2,1% et 0,8% pour les sols hollandais et israëlien, respectivement. De plus, les minéraux argileux du sol hollandais sont principalement l'illite et la kaolinite, tandis que l'argile du sol israëlien contient de la montmorillonite.

Des tests de laboratoire montrent clairement que le sol hollandais est moins sensible à la décomposition des agrégats en particules très fines ressemblant à de la "farine". Le sol de la région de Kiriat Gat, de type "terra rossa", montre une bien meilleure stabilité que les sols loessiques.

La tendance d'un sol à former des agrégats très fins ou "farine" pendant le labour d'un sol sec a une grande influence sur la formation de la croûte. Lors de ces expériences, on a remarqué qu'après une précipitation sur un lit de semence sec, immédiatement en dessous de la croûte de surface, se forme une couche d'épaisseur variable, dont les agrégats ne se détruisent pas, mais se soudent les uns aux autres, formant ainsi une couche dense et rigide après l'assèchement. Il était prévu que la quantité de matière très fine serait ici importante.

Dans une des expériences, un lit de semence sur loess israëlien,

constitué d'agrégats de taille inférieure à 2mm fut soumis à une précipitation. Les traitements consistaient en différents pourcentages de particules de taille inférieure à 0,3mm (ce qui peut être considéré comme de la "farine").

Le pourcentage de ce matériau se révèle avoir une influence très nette (cf. table 4.21).

Table 4.21: Influence des précipitations sur une couche d'agrégats plus petits que 2mm et contenant un pourcentage variable d'agrégats plus petits que 0,3mm.

TRAITEMENT	TAILLES DES AGREGATS		EPAISSEUR RESULTANTE	
	< 0,3MM	0,3-2,0MM	CROUTE	COUCHE CIMENTEE
1	5%	95%	2,5mm	8mm
2	10%	90%	2,5mm	15-20mm
3	15%	85%	2,5mm	25-30mm

Ceci peut en partie expliquer les différences dans la résistance de la croûte entre les loess hollandais et israélien, lorsque la fraction de taille inférieure à 2mm est analysée (cf. table 4.22).

Table 4.22: Composition de la classe des agrégats plus petits que 2mm (% en poids).

	< 0,3MM	0,3-0,6MM	0,6-2,0MM
Loess israélien	50%	13%	37%
Loess hollandais	35%	19%	46%

L'expérience sur la résistance de la croûte fut faite de nouveau, en

fournissant cette fois des pluies de 8, 16 et 24mm, car les résultats des expériences précédentes montrèrent que 8mm de pluie ne suffisaient pas à l'émergence.

La résistance de la croûte de surface fut la plus élevée dans tous les cas où 24mm d'eau furent fournis, la croûte fut plus épaisse (environ 5mm), et le lit de semence fut complètement "cimenté".

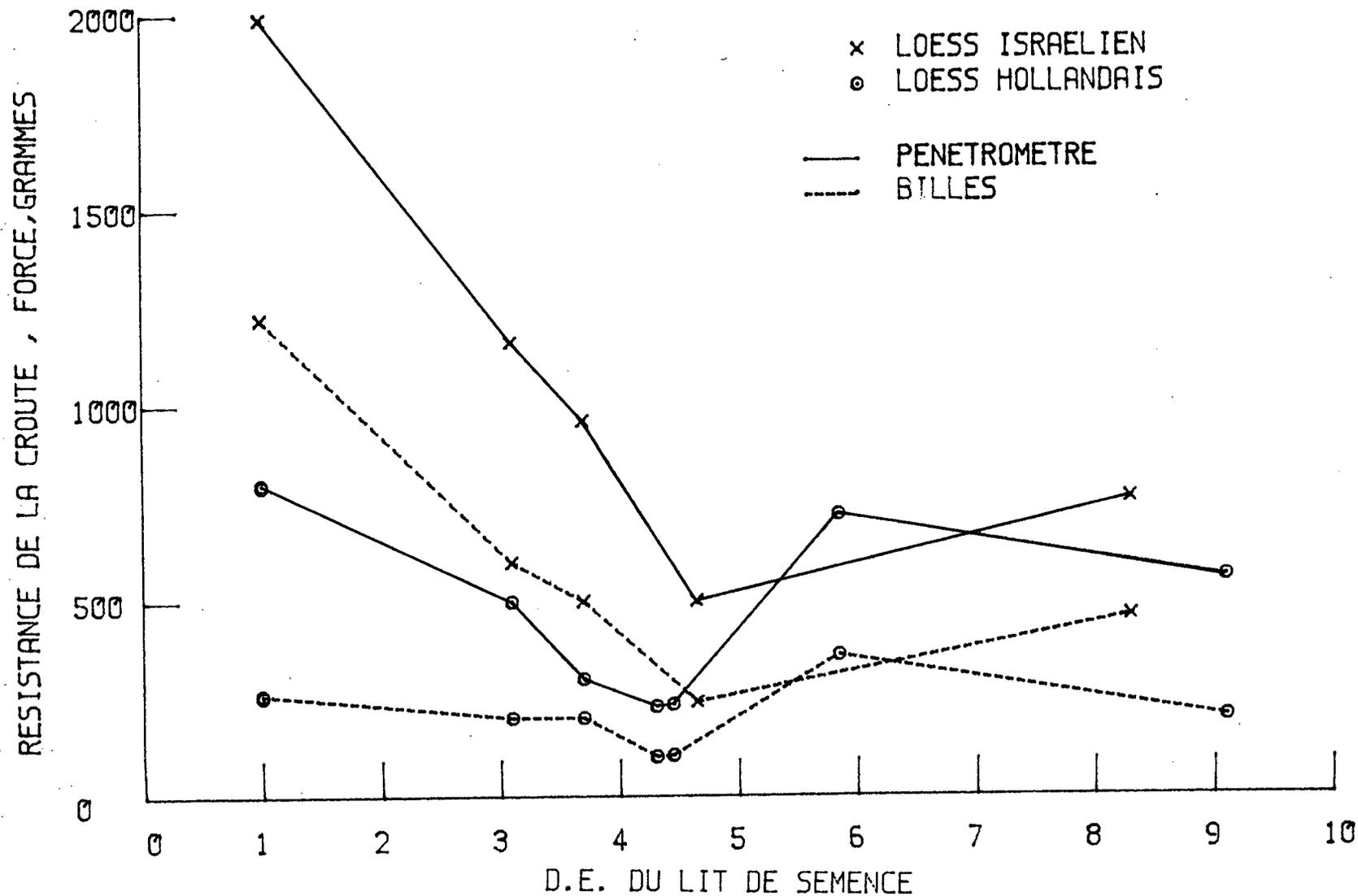
L'influence de la distribution de la taille des agrégats (exprimée en diamètre équivalent) sur la dureté de la croûte est montrée dans les figures 4.30 et 4.31; pour les deux types de sol, la résistance de la croûte diminue lorsque le diamètre équivalent augmente, cette diminution étant la plus prononcée pour le loess israélien, probablement à cause du fait que la fraction $<2\text{mm}$ y est différente, et que les agrégats du loess hollandais sont plus stables.

Dans une expérience supplémentaire, on a étudié l'influence des roues à presse (comme celles qu'on peut utiliser derrière la planteuse), sur la formation de la croûte de surface: dans les boîtes de terre, trois types de roues à presse, plates, concaves et convexes, furent utilisées. Toutes les roues exercèrent la même pression sur le sol. Après le passage des roues sur le sol hollandais initialement sec, une pluie de 24mm fut simulée.

Le fait le plus frappant est que, dans tous les cas, la résistance de la croûte fut plus élevée à proximité de la rangée de graines que dans la région tassée. Bien qu'un sol tassé soit en général plus sensible à la formation d'une croûte, ici le compactage fut très faible à cause de la sécheresse du sol. On a trouvé que l'épaisseur de la croûte, ainsi que celle de la couche "cimentée" sous-jacente, fut plus petite sur la région tassée. Les roues de forme convexe donnèrent les plus faibles valeurs de résistance de la croûte.

Fig. 4.30: Relation entre le diamètre équivalent (D.E.) et la résistance de la croûte, pour une pluie de 8mm.

147



Germination et émergence

L'émergence des jeunes pousses de sorgho fut enregistrée pendant les expériences et, à la fin des expériences, on détermina le nombre de pousses qui germèrent, mais qui n'émergèrent pas. On a trouvé qu'après 8mm de pluie, il y eut une faible émergence sur le sol hollandais et pas d'émergence du tout sur le sol israélien, même après une pluie supplémentaire de 10mm après 5 jours. Néanmoins, dans les deux cas, la germination varia entre 75 et 80%. La croûte fut ici très dure, et l'émergence se fit par les fissures.

Après 16mm de pluie sur sol israélien, le pourcentage de germination fut élevé, mais l'émergence fut bloquée par la croûte, donnant ainsi un faible taux d'émergence. Après une pluie de 24mm, l'émergence fut améliorée dans les deux sols, et ne se fit pas seulement par les fissures. Malgré cela, un grand nombre de jeunes pousses ne put toujours pas traverser la croûte. La destruction superficielle de la croûte eut un effet bénéfique, mais pas dans tous les cas.

4.2.3.3.2 - Les expériences au champ:

a. 1978. Dans les expériences effectuées en été 1978, la résistance de la croûte de surface fut mesurée à l'aide de punaises, au moment où la résistance de la croûte était supposée être à son maximum, c'est-à-dire après l'assèchement.

Les valeurs de la résistance de la croûte, sous forme de moyennes par type de lit de semence et par intensité de précipitation, sont rapportées dans la figure 4.32.

Il est clair que pour les deux lits de semence, c'est la haute intensité de précipitation qui a donné la croûte la plus dure. D'autre part, la croûte fut moins dure dans les lits de semence fins (A) que dans les plus

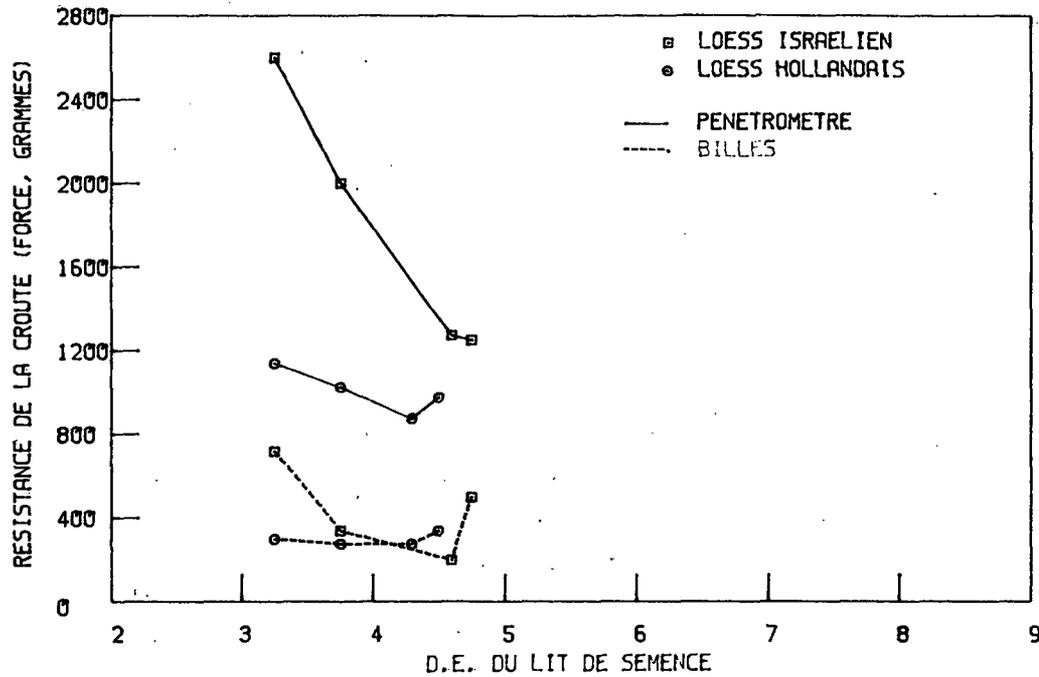


Fig. 4.31: Relation entre le D.E. et la résistance de la croûte, pour une pluie de 24mm.

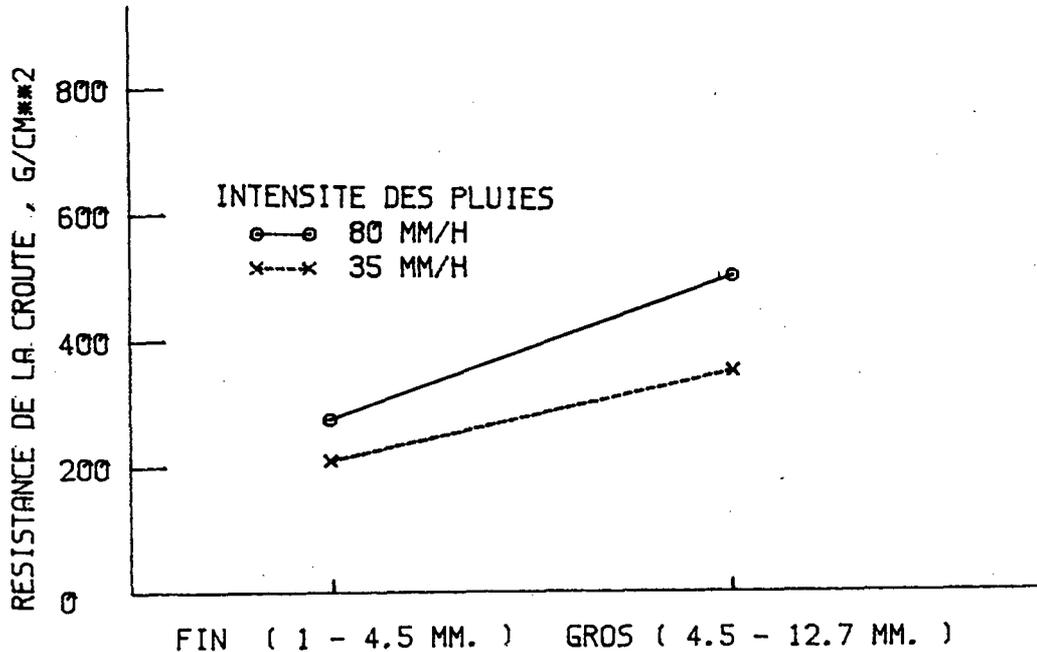


Fig. 4.32: Interaction entre l'intensité de la pluie et la taille des agrégats du lit de semence.
Expérience au champ, 1978.

grossiers (B). Ce résultat, qui est inattendu, peut également être dû au système de mesure; à cause de la large surface de la punaise, il faut soulever un plus grand volume de sol, et il faut briser une surface plus large dans le cas de gros agrégats.

b. 1979. Dans cette expérience, les mesures furent effectuées avec un pénétromètre de poche (enfoncé vers le bas) et avec des billes. Les résultats de la résistance de pénétration mesurée par ce pénétromètre sont donnés dans la figure 4.33. Les traitements chimiques (agents de conditionnement du sol) donnèrent, en comparaison avec le traitement de contrôle, de plus hautes valeurs de résistance (figure 4.34). Seul le paillage plastique donna de plus faibles valeurs. Des irrigations plus fréquentes donnent apparemment une croûte plus dure qu'une seule grande irrigation.

4.2.3.4 - Conclusions

4.2.3.4.1 - Expériences au laboratoire:

- Les mesures effectuées à l'aide du pénétromètre donnèrent des valeurs plus élevées qu'avec le système de billes; ceci est probablement dû à la distance à traverser qui est différente dans les deux méthodes, ou peut-être dû au fil traversant la croûte dans le système de billes.
- Il existe une grande variation dans les valeurs de résistance de la croûte. Ceci est peut-être dû à l'hétérogénéité du lit de semence et à d'éventuelles différences dans la teneur hydrique de la croûte.
- Les coefficients de corrélation entre les résultats du pénétromètre et ceux de la méthode des billes aux endroits où les valeurs maximales furent atteintes, furent raisonnables.
- La résistance de la croûte a augmenté pendant l'assèchement; dans les

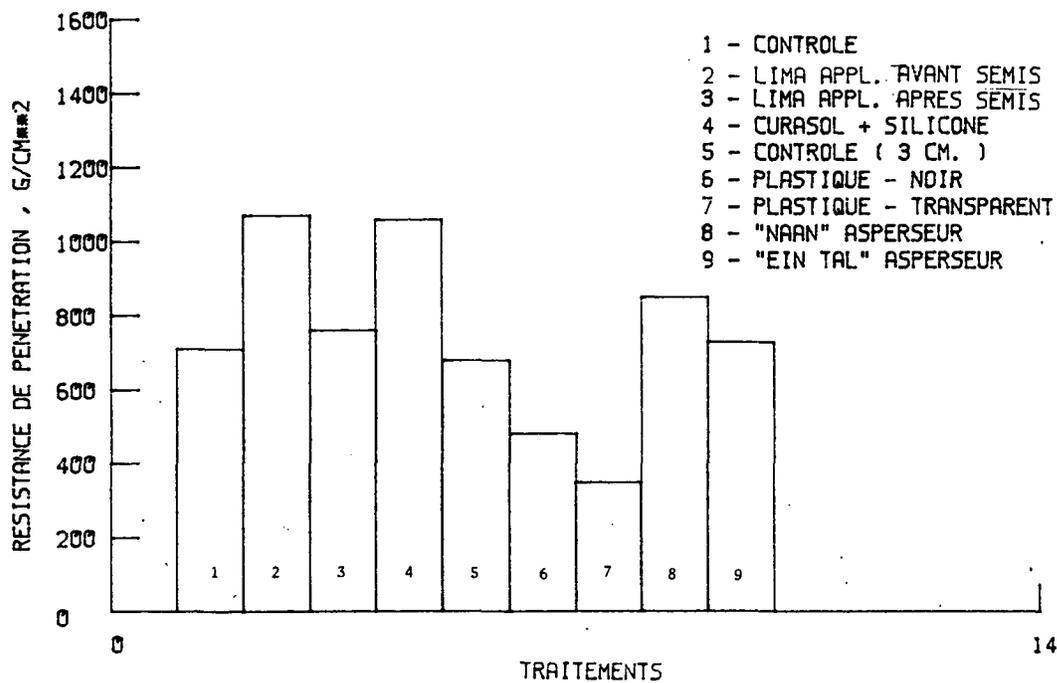


Fig. 4.33: Résistance de pénétration avec un pénétromètre de poche.
Expérience au champ, 1979.

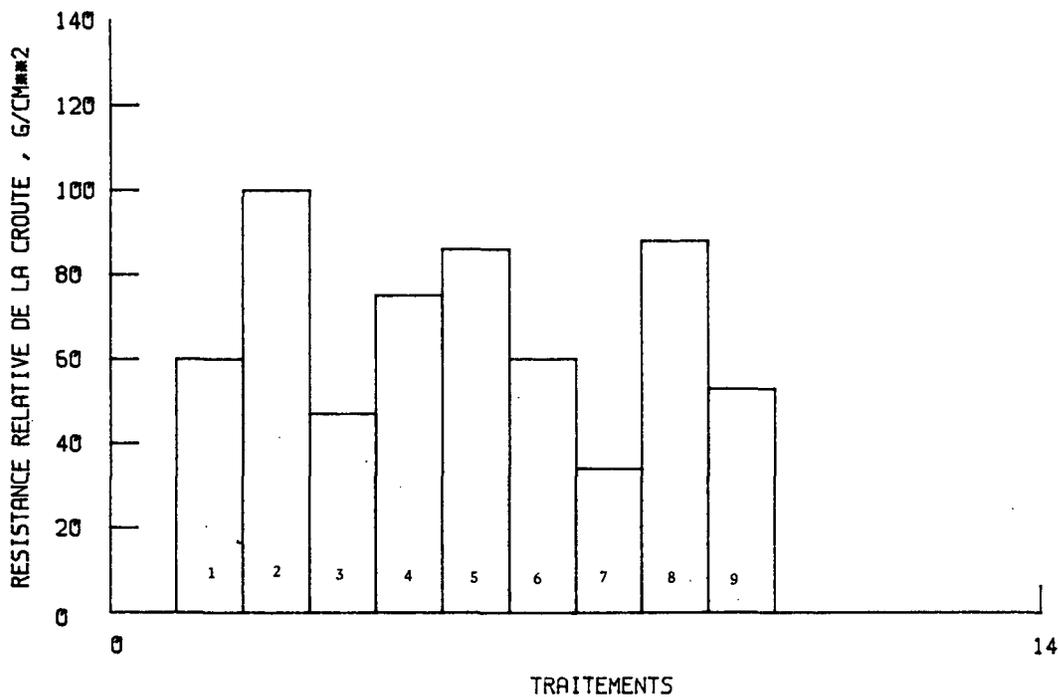


Fig. 4.34: Résistance relative de la croûte avec les billes.
Expérience au champ, 1979.

conditions du laboratoire, les valeurs maximales furent atteintes après trois à sept jours, suivant la quantité d'eau fournie. La teneur hydrique de la croûte à ce point fut de 2 à 3% (en poids).

- Les agrégats du loess hollandais sont plus stables que ceux du loess israëlien. Ceci est dû à une teneur supérieure en matière organique et en limon, ainsi qu'à la présence d'illite et de kaolonite, plutôt que de montmorillonite.
- La résistance de la croûte du loess israëlien est environ deux à trois fois plus élevée que celle du loess hollandais, à cause de la plus faible stabilité des agrégats, de la présence de montmorillonite comme minéral argileux, et du pourcentage relativement élevé de petites particules (poussières) inférieures à 0,3mm dans le sol.
- Une augmentation du diamètre équivalent résultera en une faible résistance de la croûte. De même, l'intensité de fissuration augmentera, car un lit de semence avec un diamètre équivalent élevé devient plus hétérogène. La densité apparente et la teneur hydrique sont des facteurs importants dans la formation des fissures.

4.2.3.4.2 - Expériences au champ:

- Bien que la méthode des billes n'ait pas donné entière satisfaction, à cause de ses limitations techniques, le système semble aussi bien être utile en champ.
- Une haute intensité de précipitation rend la croûte plus dure; des irrigations faibles et répétées rendent la croûte plus dure qu'une seule grande irrigation.

4.3 - Mesures de préparation et d'aménagement du sol pour la conservation de l'eau.

4.3.1 - Introduction

Après la saison de 1978, et d'après les informations obtenues en Afrique de l'Ouest, il devint évident que les pertes par ruissellement de surface étaient le principal problème pour la conservation de l'eau, et qu'il fallait traiter ce problème afin d'améliorer, de façon significative, le régime hydrique du sol. Simultanément, les exploitants du Nord du Néguev en Israël reconnurent que les pluies d'hiver et les irrigations d'été étaient un problème.

Dans le but de mener une expérience sur la conservation de l'eau dans des conditions naturelles, on choisit un emplacement où le ruissellement dû aux pluies d'hiver représentait un problème, où la formation de la croûte était assez importante et les précipitations suffisamment grandes en intensité et en quantité pour produire un ruissellement de surface, sans qu'il y ait à prendre des mesures spéciales. On trouva le champ qui convint dans le kibboutz Alumim, à 20km environ au Nord-Ouest de Gilat. Le sol y est également d'origine loessique, mais contient un peu plus d'argiles. La précipitation annuelle moyenne est d'environ 400mm, ce qui reflète à la fois la situation plus au Nord de cet emplacement, et surtout sa proximité de la Mer Méditerranée, à 12km au Nord-Ouest.

Les principales cultures de cette région (qui sont en rapport avec notre problème) sont le coton (le plus important) et le blé. Le coton est ici une culture d'été, plantée en Avril, et récoltée entre Septembre et le début-Novembre. La préparation du sol pour le coton commence en automne, et première opération est en général un labour profond (35 à 45cm), si la culture

précédente était également du coton, et ceci pour des raisons d'assainissement du champ. Si le coton fait suite à d'autres cultures, on peut ne pas faire de labour. Une des exigences des agriculteurs, pratiquement intransigeante, est que, au moment de planter, le sol ait stocké suffisamment d'eau jusqu'à une profondeur de 120 à 150cm ou que le cas échéant, le déficit soit comblé par une irrigation avant de planter; de ce fait, il est d'une importance évidente que le champ en jachère d'hiver ait absorbé une quantité de pluie suffisante pour que ces agriculteurs puissent répondre à cette exigence. Comme les fluctuations annuelles des précipitations de part et d'autre de la moyenne sont considérables, et que le temps entre les averses est généralement chaud et clair, ce qui permet ainsi une perte considérable par évapotranspiration, il n'y a aucune garantie que cette exigence soit remplie, si le ruissellement de surface se produit.

A première vue, il semble que laisser un champ cultivé rugueux et motteux comme jachère d'hiver peut être un bon moyen pour la conservation de l'eau et qui convient aux méthodes générales de culture. Cette méthode s'accompagne pourtant de deux problèmes qui la rendent moins idéale. Premièrement, le temps disponible au printemps peut ne pas être suffisant pour préparer toute la terre à la culture, tant que la surface du sol est encore suffisamment humide pour assurer un bon établissement à la plante, et ceci peut obliger l'exploitant à commencer le travail préparatoire avant la fin de la saison pluvieuse. Le second problème est que même les mottes formées par le labour ne résistent pas à l'eau, et pendant l'hiver, se produit une destruction progressive de ces mottes en un système de buttes et de rigoles, accompagnée de la formation d'une croûte, d'un ruissellement de surface et d'érosion. C'est pourquoi les agriculteurs cultivent généralement des champs labourés pendant les arrêts entre les pluies d'hiver, autant pour finir la

préparation de la terre et briser la croûte qui a pu se former, que pour arracher les mauvaises herbes. Cependant, ceci implique le risque de compactage par les machines, et une diminution de la taille moyenne des agrégats exposés aux pluies suivantes. Le fait de briser la croûte n'offre ainsi qu'un relief provisoire et produit une structure de surface inférieure à la surface motteuse d'origine.

La méthode préférée des agriculteurs est le labour d'automne, comme ci-dessus, suivi d'un disquage et d'un hersage, puis la terre est mise en levées par une bineuse sarcleuse ou par une adosseuse à disque, le tout sur sol sec en automne. Les levées sont généralement renouvelées une ou deux fois pendant l'hiver, dans la mesure où le climat le permet. On attribue plusieurs avantages à ce système de culture. Premièrement, lorsque les levées sont faites sur sol sec, le matériau se trouvant dans les levées n'a pas été tassé par les roues de tracteur, ce qui aurait été le cas si les levées avaient été formées sur sol humide au printemps. Deuxièmement, au printemps, juste avant de planter, le sommet des levées est élimé, exposant ainsi la terre humide sous-jacente, ce qui permet de déposer les graines en sol humide, sans avoir à les planter dans un trou, et sans avoir besoin d'une irrigation pour la germination. Troisièmement, le système des levées rend la rangée des graines (le sommet des levées) plus accessible à la fraiseuse pour la formation du lit de semence à la finesse voulue seulement sur la rangée des plantes, laissant une surface plus grossière entre les rangées, ce qui augmente l'infiltrabilité pendant la saison d'irrigation à venir. Enfin, on dit que le système de levées pour la culture du coton rend la cueillette mécanisée plus efficace. Si les levées étaient faites le long des lignes de contour, ce système semblerait être également une bonne méthode de conservation de l'eau. Dans les tropiques semi-arides, où il peut arriver que l'humidité soit excessive

pendant la saison pluvieuse, le système des levées permet un drainage plus rapide et une meilleure aération du sol, et convient aussi bien aux pratiques de culture à outillage simple qu'à une agriculture mécanisée. Ce système pose cependant un certain nombre de problèmes.

L'un des problèmes en Israël est que, lorsque la terre doit être mise en jachère d'hiver, il peut arriver qu'elle ne soit mise entièrement en levées avant le début des pluies d'hiver. Le pire des cas possibles se produit lorsqu'il pleut juste avant sa mise en levées, après le disquage et le hersage, au moment où le sol est le plus sensible à la formation d'une croûte de surface. La situation serait meilleure si un tel champ pouvait être grossièrement labouré. Le principal problème avec le système de levées, comme d'ailleurs avec le labour profond, est que les agriculteurs, dans différents pays et pour différentes raisons, trouvent la culture en contour inacceptable, mais sans elle, le système des levées ne vaut pas grand chose pour la conservation de l'eau. En pratique, toutes ou presque toutes les rangées ont une pente appréciable, ce qui encourage le ruissellement de surface et l'érosion. En Israël, ni un labour profond, ni les levées ne sont très efficaces pour empêcher le ruissellement de surface.

4.3.2 - Plan et méthodes expérimentales- Israël

Les agriculteurs de cette région ont mis au point une machine à construire des barrages de rigoles ou des butées transversales, afin de produire ce qu'on appelle des rigoles barrées, des rigoles bloquées, des bassins, etc...

Il existe une ancienne méthode (Smith, 1948) qui a été abandonnée par les Etats-Unis parce que non rentable, et qui à présent, dans des conditions différentes, regagne de la popularité (Clark et Hudspeth, 1977; Clark, 1979).

Des premières observations indiquèrent que la méthode semblait être prometteuse, mais on n'a pu obtenir aucune information quantitative; du fait que la machine elle-même et les problèmes que soulevait la présence des barrages transversaux dans le champ exigeaient des frais supplémentaires, il parut indispensable d'effectuer une comparaison quantitative entre les différents systèmes de labour, comparaison dont les résultats seraient applicables aux conditions rencontrées dans les pays en voie de développement, et dans ceux où l'agriculture est mécanisée.

Le champ choisi fut labouré en été 1979, à une profondeur de 35cm, et fut préparé de façon à ce que les opérations de culture soient faites parallèlement à la pente de 3% de la terre. Les quatre traitements suivants furent réalisés en trois répétitions:

- 1) Labour profond, jachère tout l'hiver.
- 2) Labour profond, disquage et roulage, la préparation habituelle pour le blé d'hiver.
- 3) Labour profond, disquage et levées par une sillonneuse à disque.
- 4) Comme ci-dessus, mais construction de barrages transversaux après la mise en levées.

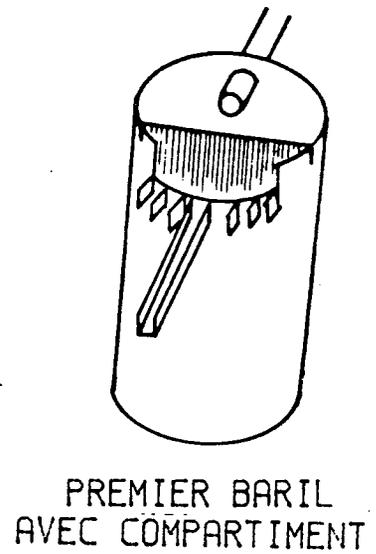
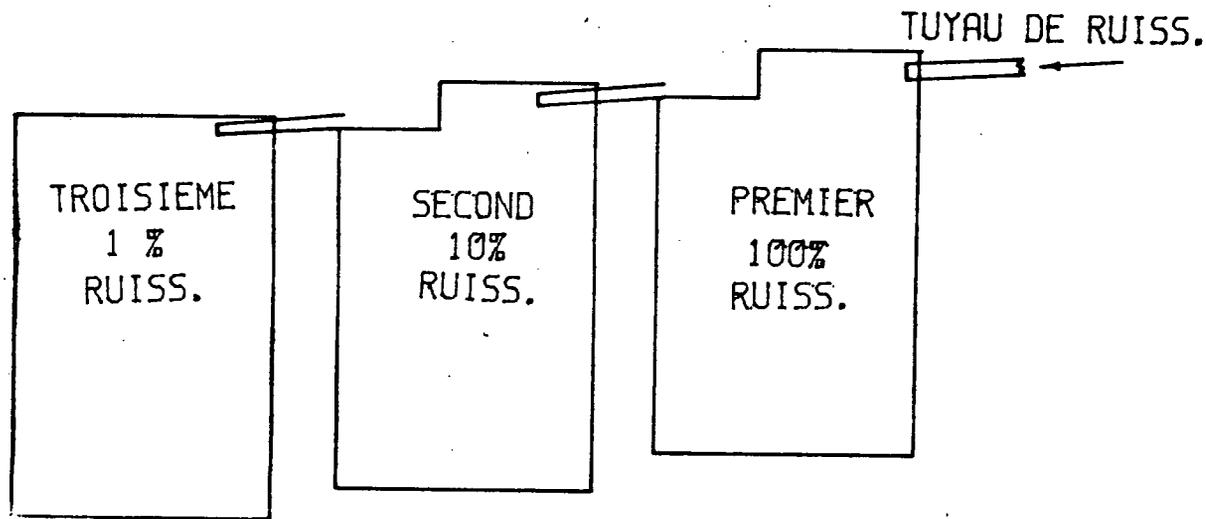
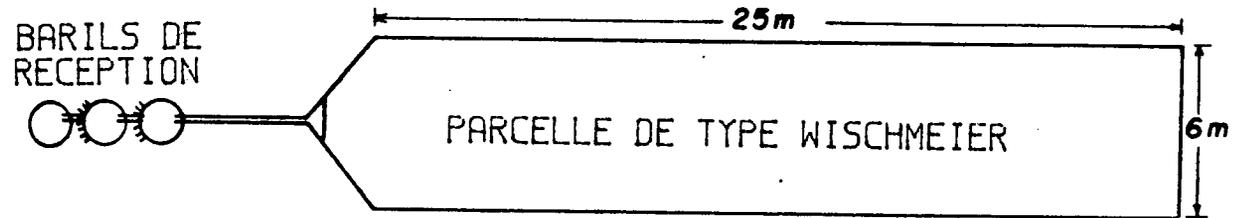
Après que les traitements de labourage furent terminés, des parcelles de type "Wishmeier" furent construites. Chaque parcelle mesurait 24m de longueur et 5,8m de largeur, elle était limitée par une basse levée, avec un triangle dont la pointe se trouvait au point le plus bas du côté étroit de la parcelle, là où s'écoulait le ruissellement. On ne put pas équiper toutes les parcelles pour la réception des eaux du ruissellement des premières pluies, ce qui rendit impossible tout travail ultérieur dans cette région. Dans les parcelles équipées, on installa un fin bassin fixe en métal au niveau du point d'écoulement, on le relia à un tuyau d'irrigation en aluminium de 12m de long

et de 3" de diamètre, conduisant à des barils de réception enfouis dans la terre. Trois barils en acier de 220 litres furent utilisés en tandem, avec une boîte de séparation à la sortie des deux premiers barils avec un rapport d'environ 1:10. Ainsi le premier baril récupère tout l'écoulement provenant d'une parcelle, mais sa capacité dépasse à peine un millimètre de ruissellement; le deuxième baril peut emmagasiner 10 fois plus et le troisième 100 fois plus (voir figure 4.35). Chaque boîte de séparation fut ajustée individuellement. La hauteur de l'eau dans les barils fut mesurée à l'aide d'un bâton, après chaque averse. Un tube d'accès d'humidimètre à neutrons fut installé au centre de chaque parcelle, à une profondeur de 240cm dans la répétition I, et de 150cm dans les répétitions II et III. Les résultats furent lus dans la mesure du possible après chaque pluie, ou dans un délai d'une semaine, en cas de sécheresse.

En automne 1980, l'expérience fut agrandie de façon à inclure des parcelles de blé d'hiver, l'analyse des résultats à long-terme des précipitations et des propriétés d'infiltration du sol ayant montré que la méthode pouvait être efficace même pour des terres ensemencées de petites graines.

L'hiver 1980-1981 fut particulièrement sec, avec une précipitation totale de 217mm, ce qui représente 54% de 400mm, qui est la moyenne à long-terme. A l'exception du mois de Décembre qui reçut 50% de la précipitation totale, les pluies de cette saison tombèrent en petites averses, avec une précipitation mensuelle ne dépassant pas 40mm pour les autres mois d'hiver. Ce mode de précipitation ne nous permet de tirer que des conclusions limitées, comme l'efficacité des différents traitements, mais il permet de confirmer les prévisions faites après l'hiver 1979-1980, à savoir que les levées à barrages peuvent particulièrement efficaces dans les années de sécheresse.

Fig. 4.35: Parcelle expérimentale et barils de réception du ruissellement de surface.



Les parcelles expérimentales furent divisées en deux groupes distincts:

- A. Préparation de la terre pour le semis du coton au printemps (jachère d'hiver).
- B. Terreensemencée de blé d'hiver (semé à la fin de l'automne, récolté en Mai).

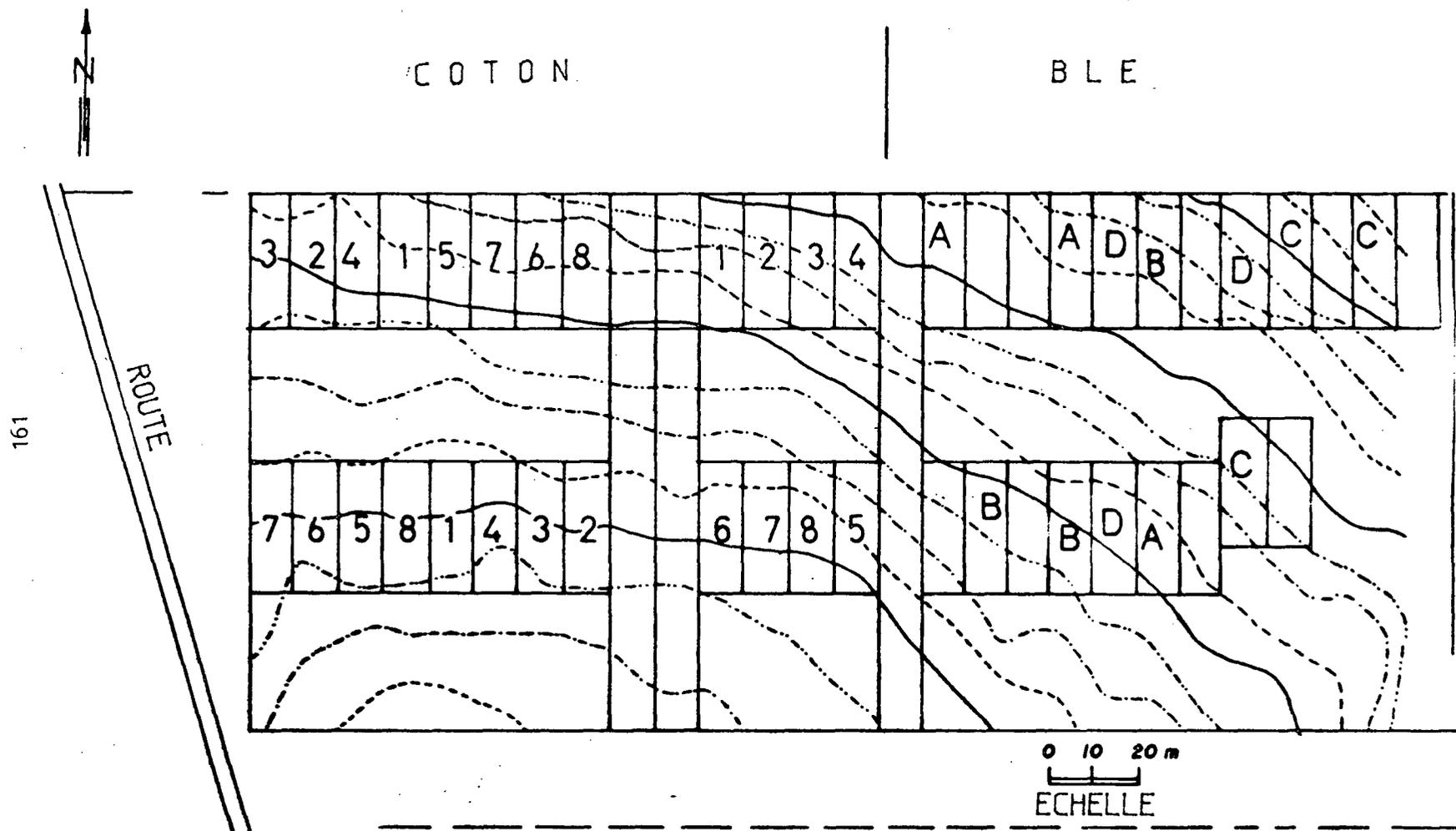
La figure 4.36 donne une carte des champs expérimentaux, et la liste des traitements effectués en automne 1980 est donnée ci-dessous. Chaque traitement fut réalisé en trois répétitions.

Des tubes d'accès d'humidimètre à neutrons furent installés dans une répétition sur trois, avec trois tubes par parcelle. Dans les traitements où une profonde pénétration d'eau était prévue (labour profond et levées à barrages), la lecture des résultats fut faite à 210mm de profondeur, et dans les autres parcelles des tubes plus courts furent installés, donnant des résultats jusqu'à une profondeur de 150cm. A cause des difficultés à les installer dans un sol dur et sec, on installa les tubes d'accès après la deuxième pluie (26.12.80), ou après 84mm de précipitation totale, sans qu'il n'y ait eu de ruissellement de surface.

A. Traitements sur jachère précédant le coton:

- 1) Labour profond (40cm) suivant une pente de 4%.
- 2) Labour profond sur contour.
- 3) Labour comme précédemment, égalisation, disquage, mise en levées sur pentes, un mètre entre deux levées.
- 4) Comme le traitement 3, avec des barrages de rigoles entre les levées.
- 5) Sous-solage à 50cm, disquage, construction de levées à barrages.
- 6) Labour minimal avec une adosseuse de sous-sol (une seule opération).
- 7) Comme le traitement 6, barrages de rigoles entre les levées.
- 8) Mise en levées directement sur tiges de légumineuses, sans aucune

Fig. 4.36: Carte du champ expérimental, Alumim 1980/81.



préparation succédant à la première pluie.

Ces traitements combinés offrent une comparaison entre la préparation conventionnelle du sol par levées et le système de levées à barrages sur trois méthodes de préparation primaire: labour profond, sous-solage et labour minimal par adosseuse de sous-sol. La distance entre les barrages de rigoles fut ajustée à 100cm approximativement, de façon à fournir un volume de stockage de surface de 40mm environ. Il faut mentionner que l'édification des barrages de rigoles sur sol sec avant le début de la saison pluvieuse donna des résultats moins que satisfaisants, particulièrement dans les traitements 4 et 5, car la surface du sol était trop motteuse. C'est pourquoi les traitements 3, 4 et 5 furent labourés de nouveau après la première pluie, afin de renouveler, aux endroits où il le fallait, les levées et les barrages de rigoles.

B. Traitements sur blé d'hiver*

A. Lourd disquage à 10cm de profondeur, passage de cultipacker et semis.

B. Comme précédemment, ouverture de micro-bassins à plat pour créer de larges lits de 160cm de largeur, et semis (bassins sur des centres de 200cm).

C. Comme précédemment, pour créer des lits de 60cm de largeur, et semis (bassins sur des centres de 100cm).

D. Préparation du lit de semence comme dans le traitement 1, mais pas de semis.

* Les expériences sur le blé incluent un certain nombre de traitements ne faisant pas vraiment partie intégrante de ce projet, et qui furent réalisés en coopération avec le Département de chimie physique du sol de l'Institut Volcani des Sciences Agricoles, à Beit Dagan. Leur but fut d'étudier l'influence de l'apport en gypse sur le ruissellement de surface et l'érosion.

Les traitements décrits ci-dessus comprennent un traitement de contrôle (Tr. A) qui représente la méthode la plus courante, et des micro-bassins à deux endroits différents, ajustés de façon à donner un emmagasinement de surface de 8mm. Les bassins furent ensemencés en même temps que les autres terres avec une perforatrice à grains courante "John Deere".

4.3.3 - Plan expérimental et méthodes, Mali

Une expérience de taille limitée fut menée au Mali pendant l'été 1979. Quelques parcelles furent construites pour mesurer le ruissellement de surface de parcelles cultivées, semées de millet. Les parcelles de ruissellement furent placées au même endroit que les parcelles à simulation de pluie, et avaient les mêmes dimensions (1,5m x 1,5m). L'eau du ruissellement fut collectée dans un accumulateur au bas de la parcelle en pente jusque dans un baril. Huit parcelles au total furent construites, représentant quatre traitements en deux répétitions chacun:

Parcelles H1 et H3: la surface de la terre plate fut ouverte juste pour les semis; pendant la période de culture, les mauvaises herbes furent précautionneusement enlevées.

Parcelles H2 et H4: surface plate, semée de millet, souvent hersée, si possible après chaque pluie.

Parcelles R1 et R3: levées (dirigées le long de la pente) avec du millet, suppression des mauvaises herbes seulement.

Parcelles R2 et R4: comme en R1 et R3, mais avec hersage fréquent.

Les pentes des parcelles variaient entre 0,9 et 2,2%. Le ruissellement de surface fut mesuré après chaque pluie, dans la mesure du possible. Les résultats figurent dans la table 4.23.

Table 4.23: Ruissellement de surface de parcelles sous pluie naturelle.

DATE:	23/7		25/7		30/7		31/7		17/8		20/9	
RUIS.:	MM	%	MM	%	MM	%	MM	%	MM	%	MM	%
R 1					3,9	11,6	2,7	9,5	6,7	47,9	-	-
R 2					3,4	10,1	0,5	1,8	+	+	0,3	4,3
R 3					6,8	20,4	3,5	12,3	12,1	86,4	0,4	5,8
R 4	1,1	15,3			14,5*	43,3*	3,4	11,9	2,6	18,6	-	-
Moy. 1 & 3						16,0		10,9		67,2		2,9
Moy. 2 & 4						10,1*		6,9		18,6+		2,1
H 1	3,2	44,4	0,3	3,8	5,6	16,7	4,8°	16,8°	6,3	45,0	2,6	37,7
H 2	6,0	83,3	0,5	6,3	2,7	8,1	1,4	4,9	1,6	11,4	0,5	7,2
H 3	3,4	47,2	0,4	5,0	19,8	59,1	13,1	46,0	7,0	50,0	3,2	46,4
H 4	2,8	38,9	0,1	1,3	9,2	27,5	5,4	18,9	0,9	6,4	-	-
Moy. 1 & 3		45,8		4,4		37,9		46,0°		47,5		42,1
Moy. 2 & 4		61,6		3,8		17,8		11,9		8,9		3,6
Pluie (mm)	7,2		8,0		33,5		28,5		14,0		6,9	

*,° et + indiquent des mesures non valables et par conséquent non utilisées dans la moyenne.

4.3.4 - Résultats et discussion, Mali et Inde.

Le ruissellement de surface des parcelles où la croûte fut brisée après chaque pluie fut toujours plus faible que dans les parcelles laissées intactes. Malheureusement, l'effet d'une très forte pluie sur le ruissellement de surface ne peut pas être mesuré à cause du volume limité des barils de réception. Cependant, pour les deux traitements, le ruissellement de surface ne dépassa pas 40%.

Pour l'analyse des précipitations, on dut se servir des données fournies par un pluviomètre enregistreur. A partir de ces résultats, on put calculer sur ordinateur l'intensité des précipitations ainsi que d'autres caractéristiques en rapport.

Le programme d'ordinateur pour l'analyse des données fut développé par Morin et autres (1977). L'"output" de base de ce programme (écrit en FORTRAN) est une division des précipitations individuelles en plusieurs segments d'intensité de précipitation uniforme. Les précipitations espacées de moins de 12 heures furent considérées comme une seule pluie. Lorsque les caractéristiques du sol en termes de taux d'infiltration en fonction de la précipitation furent connues, c'est-à-dire d'après les expériences faites avec un simulateur de pluie (Morin et Benyamini, 1977), on put calculer l'infiltration et le ruissellement de surface pour différents stockages de surface, ainsi que les valeurs de rétention.

Le programme d'origine fut agrandi de façon à faciliter le calcul des énergies cinétiques et des différents index en usage dans les recherches sur la conservation de l'eau dans le sol. De plus, on put tenir compte des changements dans les caractéristiques d'infiltration induits par la préparation du sol pendant la période pluvieuse en question. Pour le calcul de l'énergie cinétique, on se servit de la relation entre l'intensité et l'énergie cinétique proposée par Wischmeier et Smith (1958), avec la conversion en unités S.I. par Dexter (1977):

$$Ec = 13,3 + 9,8 \log I \quad (\text{J.m}^{-2}.\text{mm}^{-1})$$

où l'intensité (I) de la précipitation est exprimée en mm/h. Cette conversion donne des valeurs de E_c légèrement plus élevées (d'environ 7%), en comparaison avec la conversion suivante donnée par Wischmeier et Smith (1978):

$$Ec = 210 + 89 \log I \quad (\text{tonnes.ha}^{-1}.\text{cm}^{-1})$$

où l'intensité (I) est exprimée en cm/h. Cette différence n'est pas essentielle ici, du fait que la relation entre E_c et I n'est pas de nature unique (Hudson, 1971), et les résultats serviront seulement à titre indicatif. Il s'agit toutefois d'une relation empirique qui convient aux conditions climatiques de l'Amérique du Nord. Lorsque cette relation est appliquée aux conditions tropicales ou sub-tropicales, il faut se rappeler que la taille des gouttes de pluie et la vitesse du vent pendant une précipitation y sont considérablement plus grandes. Dans certains cas, le calcul de l'énergie cinétique d'après l'équation ci-dessus donnera une sous-estimation des valeurs.

Des index d'érosivité sont proposés par de nombreux auteurs. Dans le programme d'ordinateur, sont calculés les index suivants:

a. L'index EI30, développé par Wischmeier et autres (1958). Cet index est le produit de l'énergie cinétique totale de l'averse par le taux des 30mm de pluie le plus élevé de cette averse. En unités S.I., cet index a pour dimension $J.m^{-1}.h^{-1}$. Cet index est également utilisé dans l'équation de perte (d'eau) du sol proposée par Wischmeier.

b. L'index EC25. Cet index fut proposé par Hudson (1971). Hudson prétend que, à cause la différence dans les caractéristiques de précipitation des USA et de l'Afrique, l'index EI30 n'est pas représentatif dans l'évaluation de l'érosivité pour des conditions de précipitation de haute intensité. L'index EC25 est défini comme l'énergie cinétique totale de pluie lors d'une averse dont l'intensité dépasse 25mm (1 inch) par heure. Cet index est exprimé en $J.m^{-2}$.

c. L'index AIm, proposé par Lal (1976). L'avantage de cet index est sa facilité de calcul; en effet, pour chaque précipitation, il représente la somme des produits de l'intensité et de la quantité de pluie, pour chaque

classe d'intensité. De plus, cet index surmonte les limitations imposées par la base empirique du calcul de l'énergie cinétique. Ses dimensions sont $\text{mm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$. Les résultats de l'Afrique de l'Ouest et de l'Inde sont donnés dans les tables 4.27 à 4.29.

Il existe peu de données détaillées sur le Sahel ouest-africain. Cochème et Franquin (1967), qui ont fait une revue agroclimatologique sur la région Sud du Sahara, n'ont rapporté que 35 stations météorologiques donnant des informations sur une surface de plus de deux millions de km^2 . L'intensité des précipitations (enregistrée sur pluviomètre) n'est mesurée que dans quelques stations, de sorte que ces données sont encore plus rares. Des informations sur les intensités maximales sont données par Delorme (1963), Charreau et Nicou (1971), Kowal et Kassam (1976) et Delwaulle (1973). Ils rapportent des intensités maximales de plus de 150mm/h, pour des périodes de moins de 10 minutes.

Pour notre étude, nous disposons des données suivantes:

- Pour le Mali, les données collectées pendant trois années, en tant que partie des activités de recherche du projet "PPS" (Penning de Vries et Djiteye, 1980), à proximité de Niono. Les données comprennent les années 1977 (sur un emplacement), 1978 et 1979 (sur 6 emplacements). Pour cette région, on dispose de quelques informations sur les sols (S1) et sur leurs caractéristiques d'infiltration.
- Pour le Niger, on a des données de 1963 (emplacement Niamey-ville) et de 1970, 1971 et 1972 (emplacement Niamey-aéroport).
- Données de la station de l'ICRISAT dans la région d'Hyderabad de Andhra Pradesh, en Inde pour les années 1974 à 1977.

4.3.4.1 - Volumes et répartition des précipitations journalières

Les précipitations totales de chacune des trois stations sont données dans les tables 4.24, 4.25 et 4.26. A Niono, les années 1977 et 1979 furent des années "sèches", et 1978 fut une année "normale à sèche". Les données disponibles pour Niamey furent des données d'années sèches ou très sèches (pour ces stations, les moyennes à long-terme sont de 550mm et 640mm, respectivement). Pour l'ICRISAT, la moyenne à long-terme est de 670mm, l'année 1975 étant plus élevée, et 1977 plus basse que cette moyenne.

La répartition des précipitations journalières est donnée pour Niono (un seul emplacement par an) dans les figures 4.37 à 4.39, pour Niamey dans les figures 4.40 à 4.43, et pour l'ICRISAT, dans les figures 4.44 à 4.47. Il est évident que c'est la précipitation journalière de l'ICRISAT qui est la plus élevée.

4.3.4.2 - Intensités

Chaque averse fut divisée en segments d'intensité égale. La figure 4.48 montre un résultat typique. En Afrique de l'Ouest, l'averse commence d'habitude avec de hautes intensités, puis se termine avec une intensité plus faible. Un petit nombre d'averses montre des intensités maximales à peu près au milieu de l'averse. Lal (1976) rapporte le même phénomène à l'Ouest du Nigéria. Pour l'ICRISAT, on n'observa pas un tel phénomène.

Pour toute la saison pluvieuse, la répartition des intensités (ou des classes d'intensité) peut être donnée en tant que fonction du pourcentage de précipitation totale. Ces résultats sont donnés dans les figures 4.49 à 4.51 pour Niono, 4.52 à 4.55 pour Niamey, et 4.56 à 4.59 pour l'ICRISAT.

Dans l'analyse, les averses furent divisées en trois catégories, selon

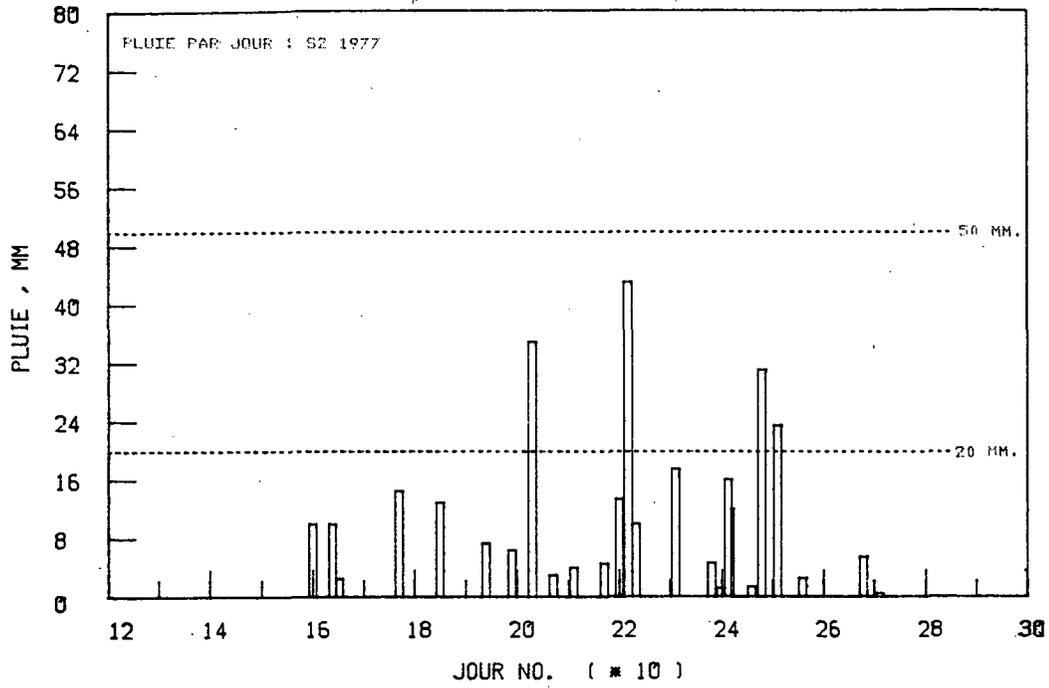


Fig. 4.37: Répartition des précipitations journalières, Niono, Mali, 1977.

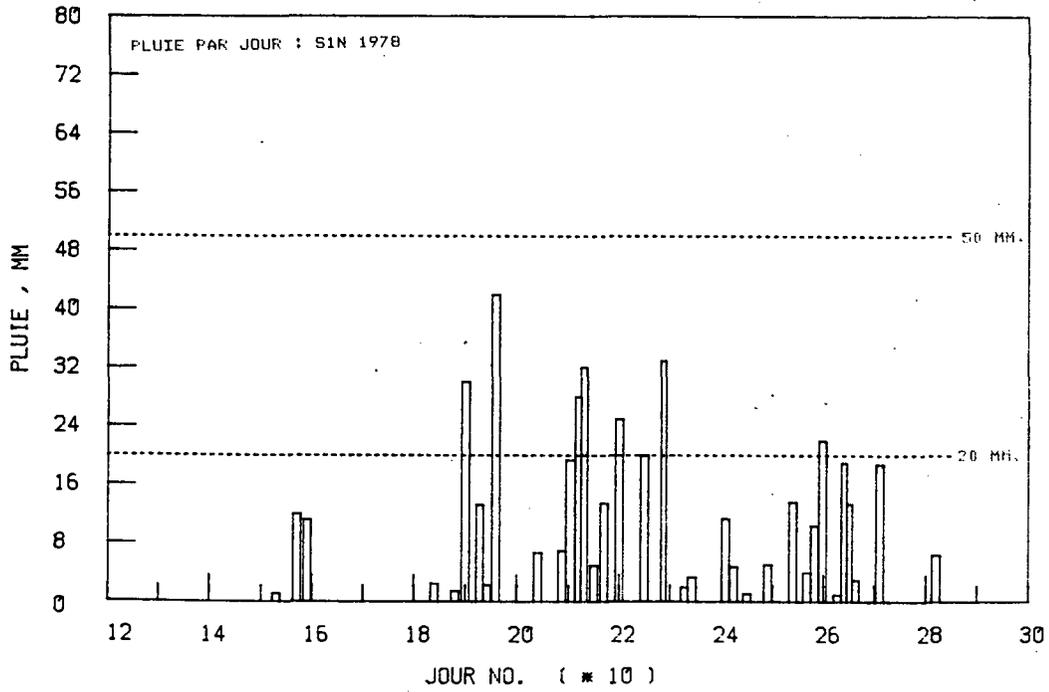


Fig. 4.38: Répartition des précipitations journalières, Niono, Mali, 1978.

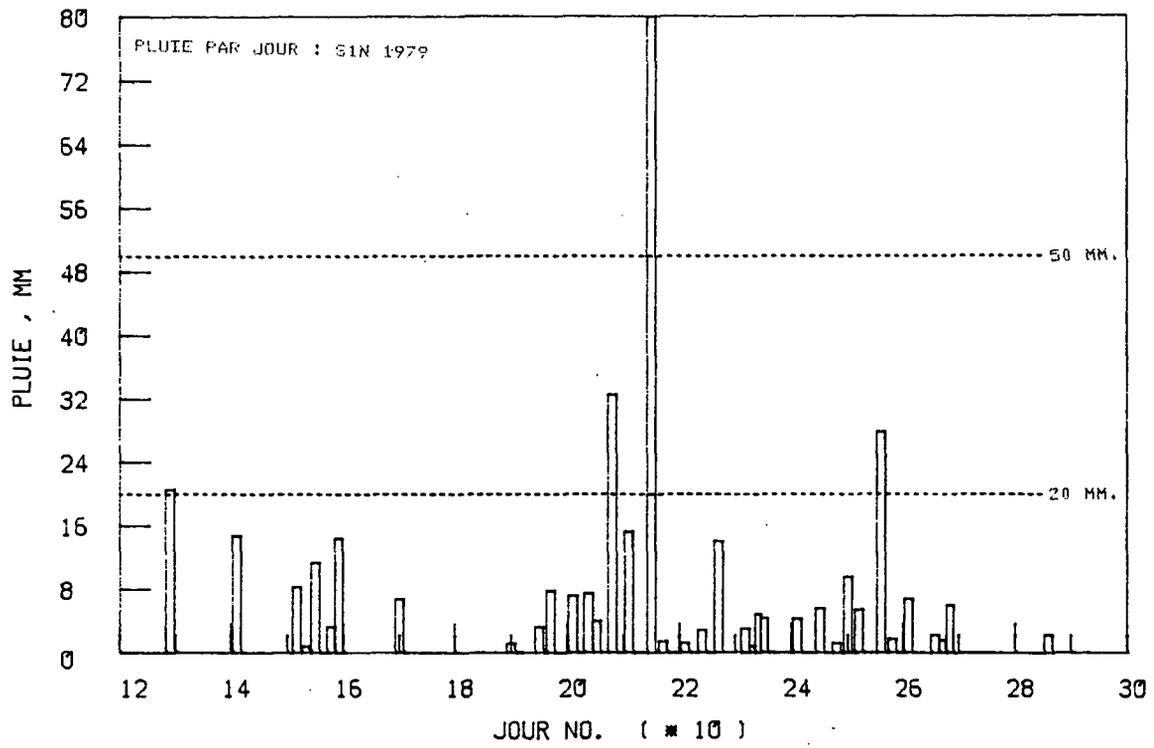


Fig. 4.39: Répartition des précipitations journalières, Niono, Mali, 1979.

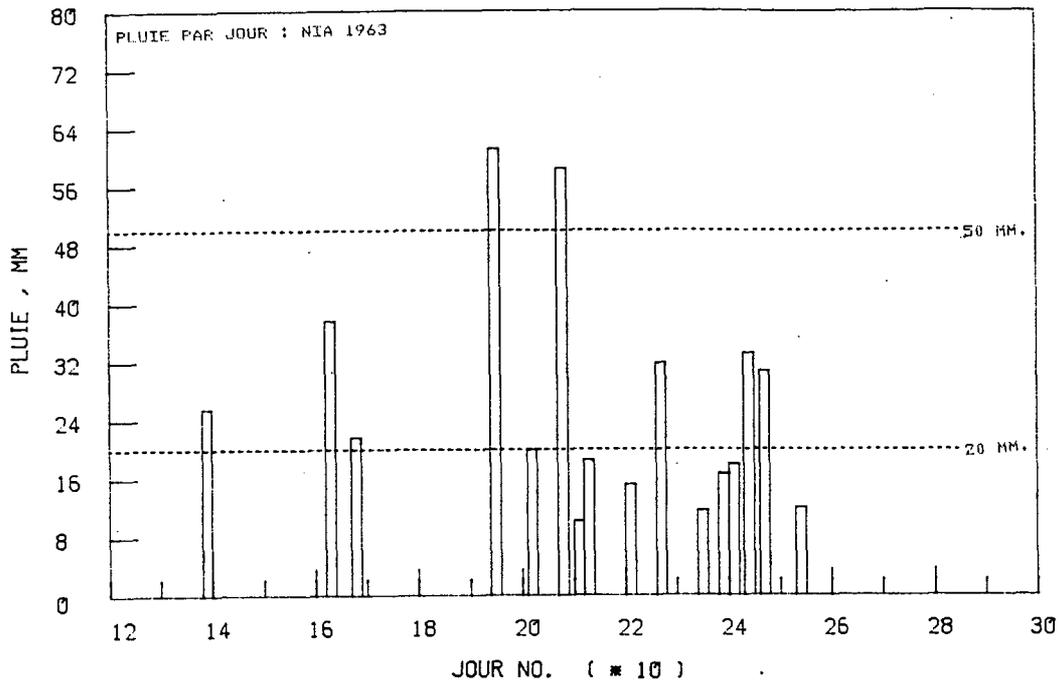


Fig. 4.40: Répartition des précipitations journalières, Niamey, 1963.

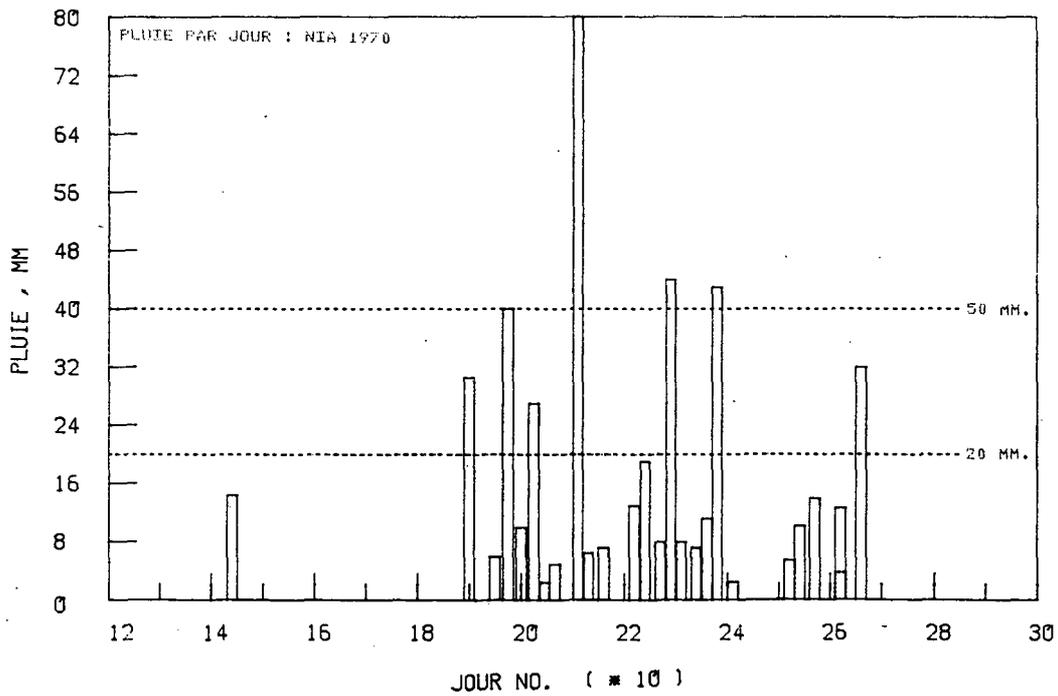


Fig. 4.41: Répartition des précipitations journalières, Niamey, 1970.

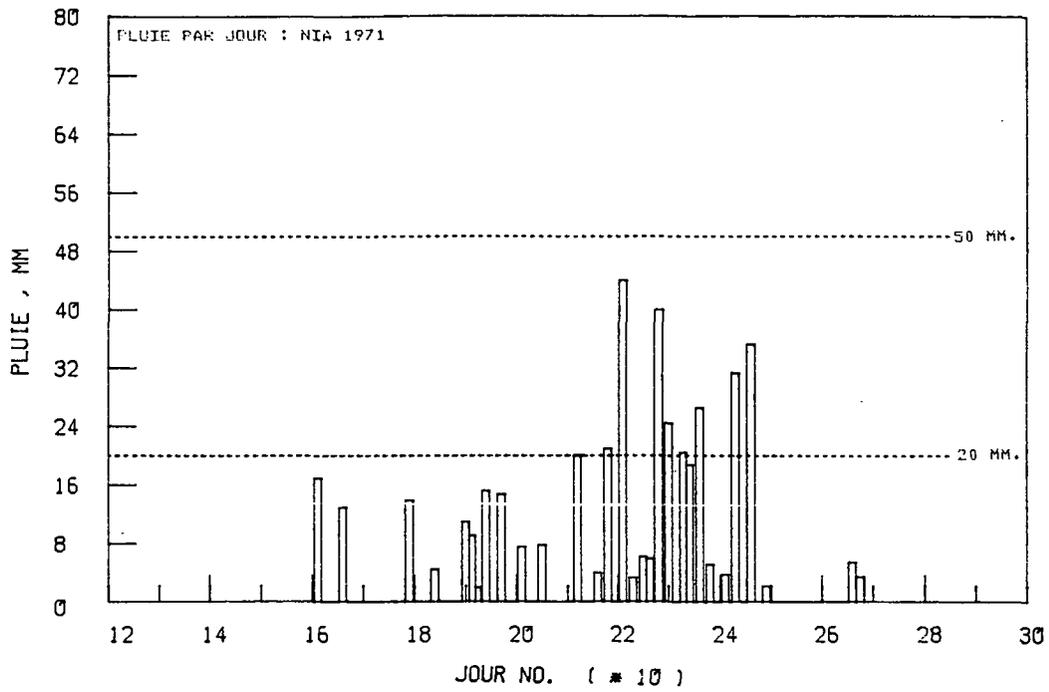


Fig. 4.42: Répartition des précipitations journalières, Niamey, 1971.

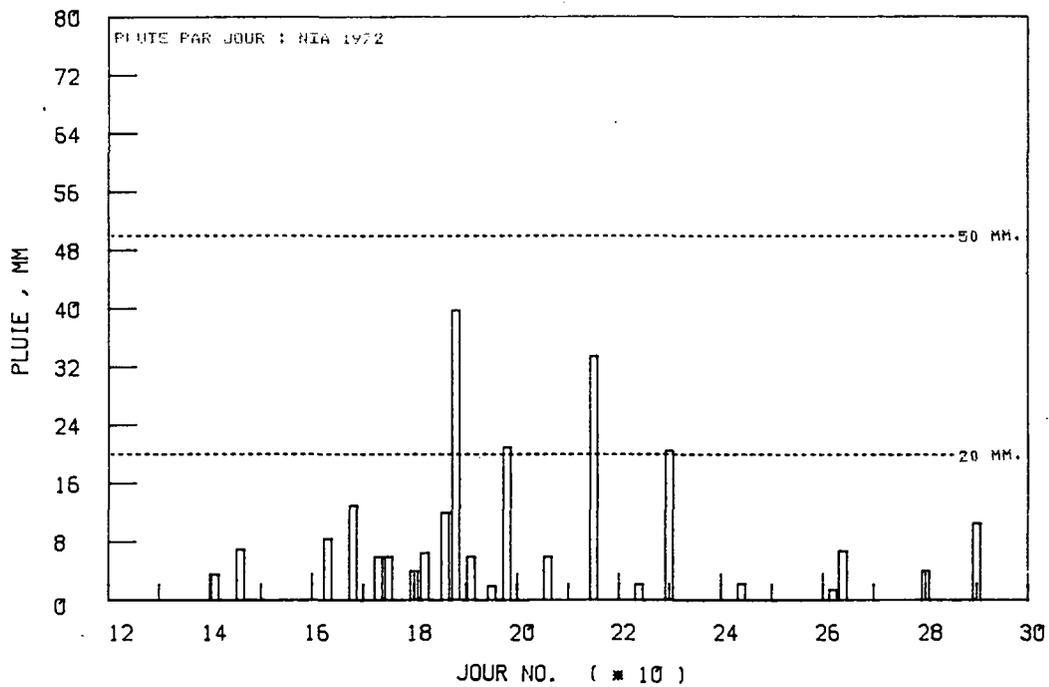


Fig. 4.43: Répartition des précipitations journalières, Niamey, 1972.

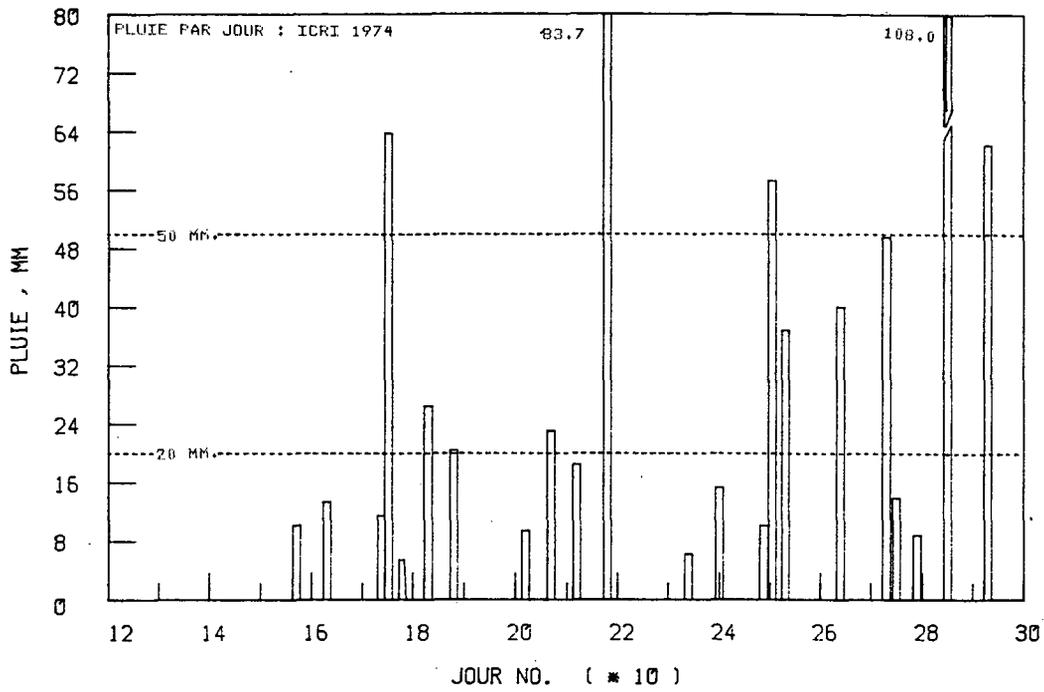


Fig. 4.44: Répartition des précipitations journalières, ICRISAT, Inde, 1974.

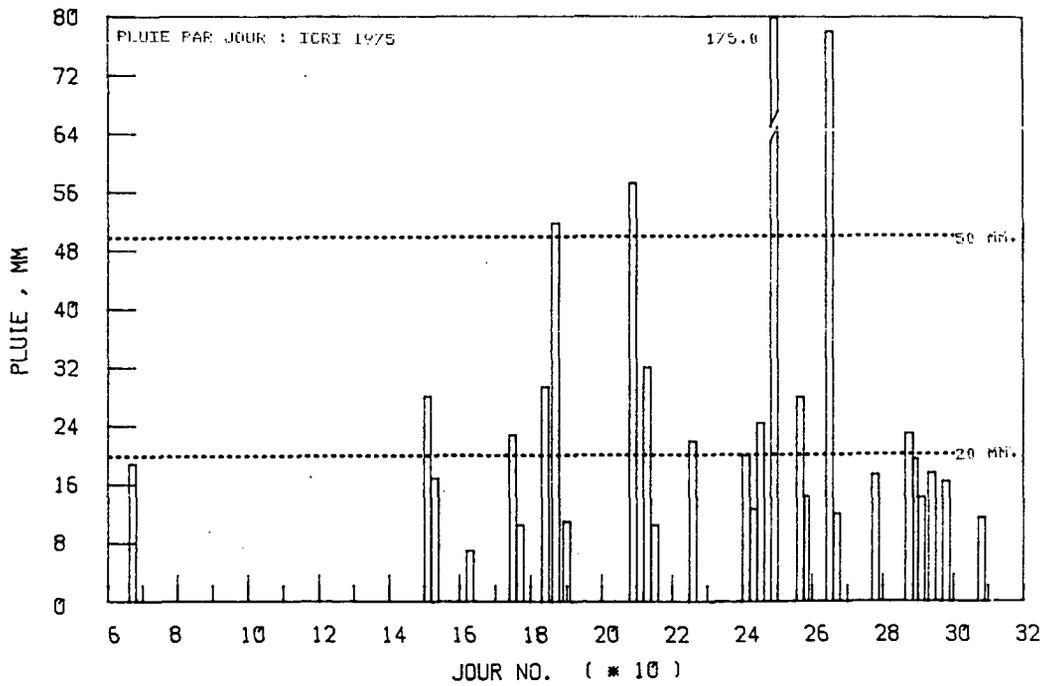


Fig. 4.45: Répartition des précipitations journalières, ICRISAT, Inde, 1975.

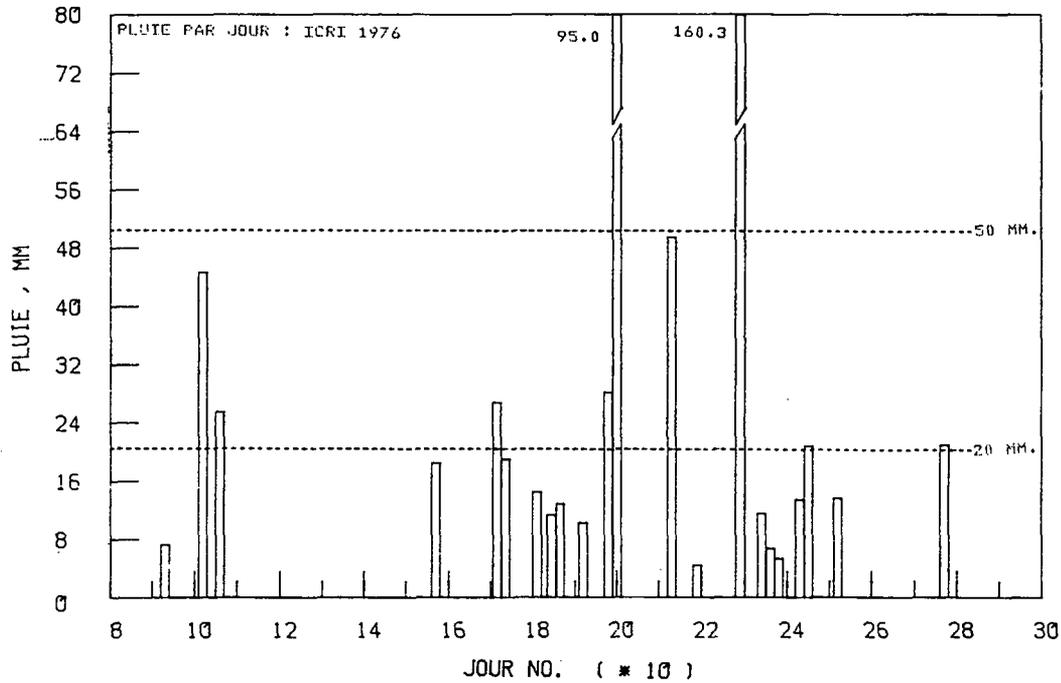


Fig. 4.46: Répartition des précipitations journalières, ICRISAT, Inde, 1976.

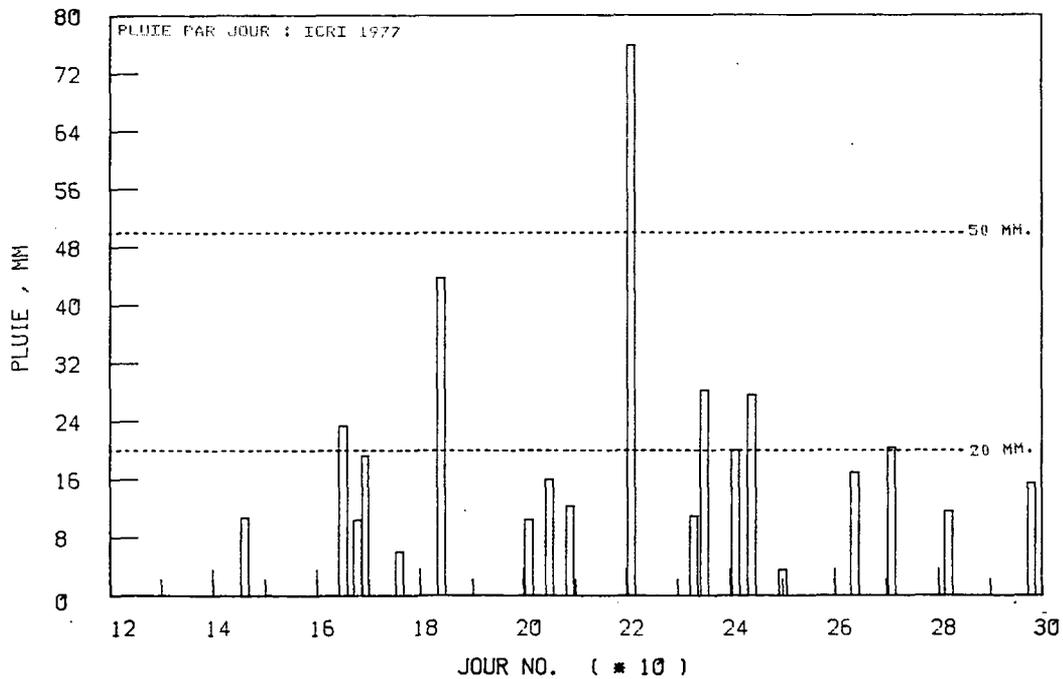


Fig. 4.47: Répartition des précipitations journalières, ICRISAT, Inde, 1977.

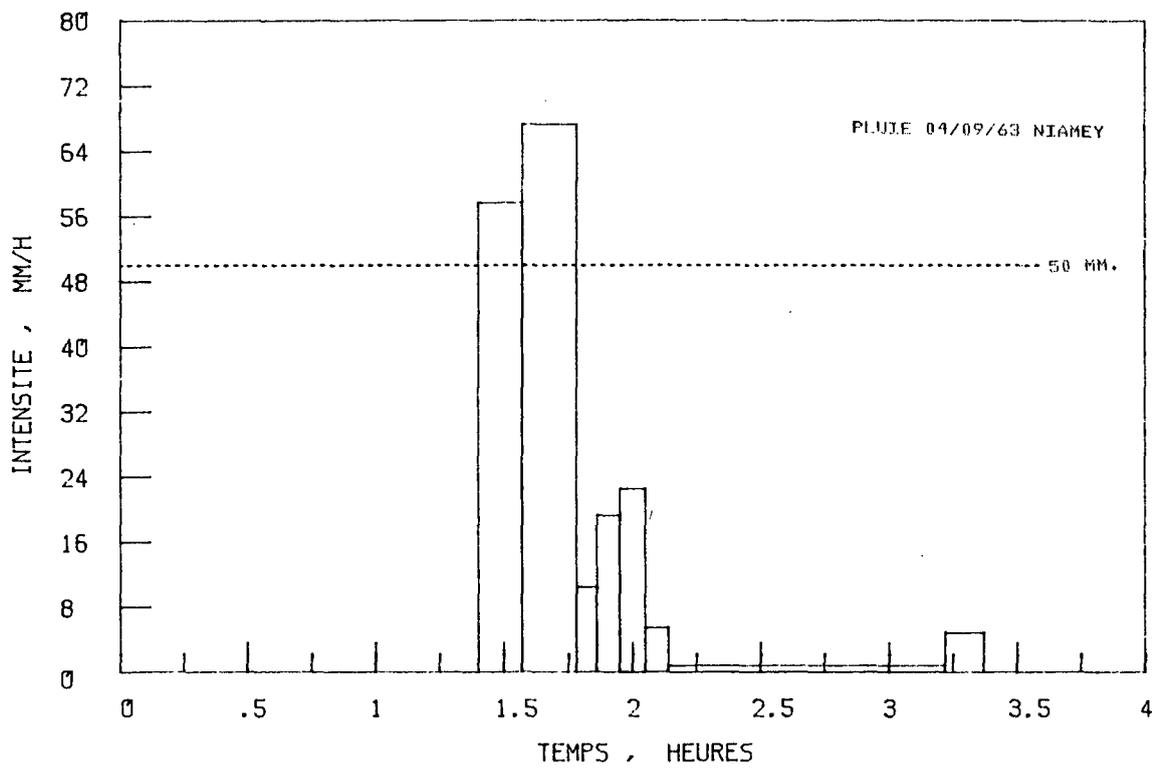


Fig. 4.48: Analyse de l'échantillonnage d'une averse suivant les classes d'intensité.

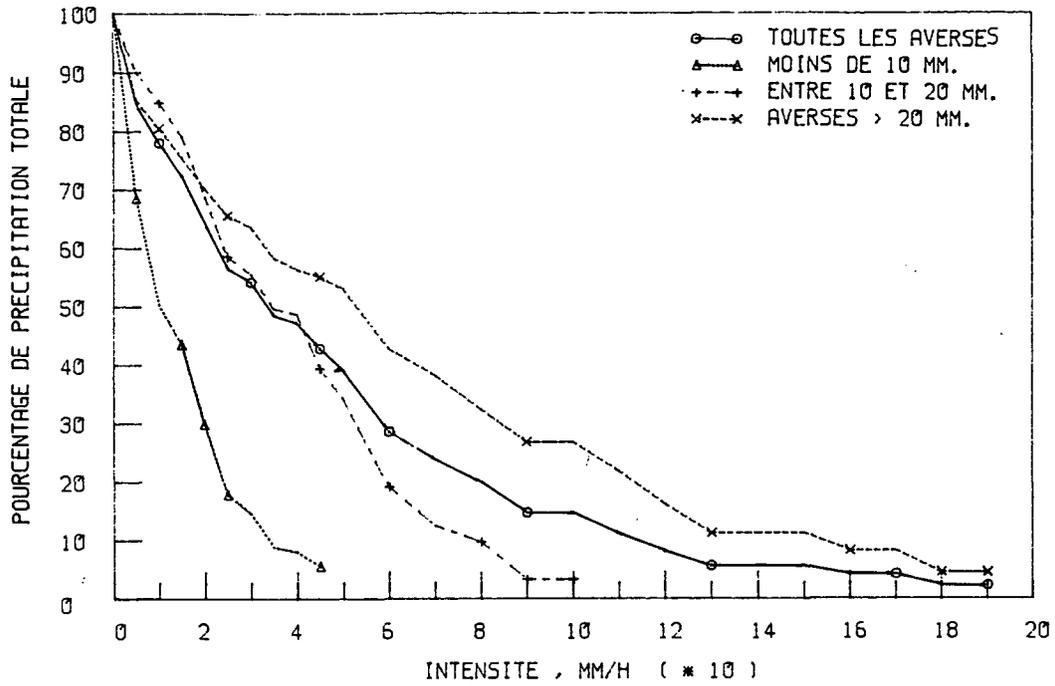


Fig. 4.49: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, Niono, 1978.

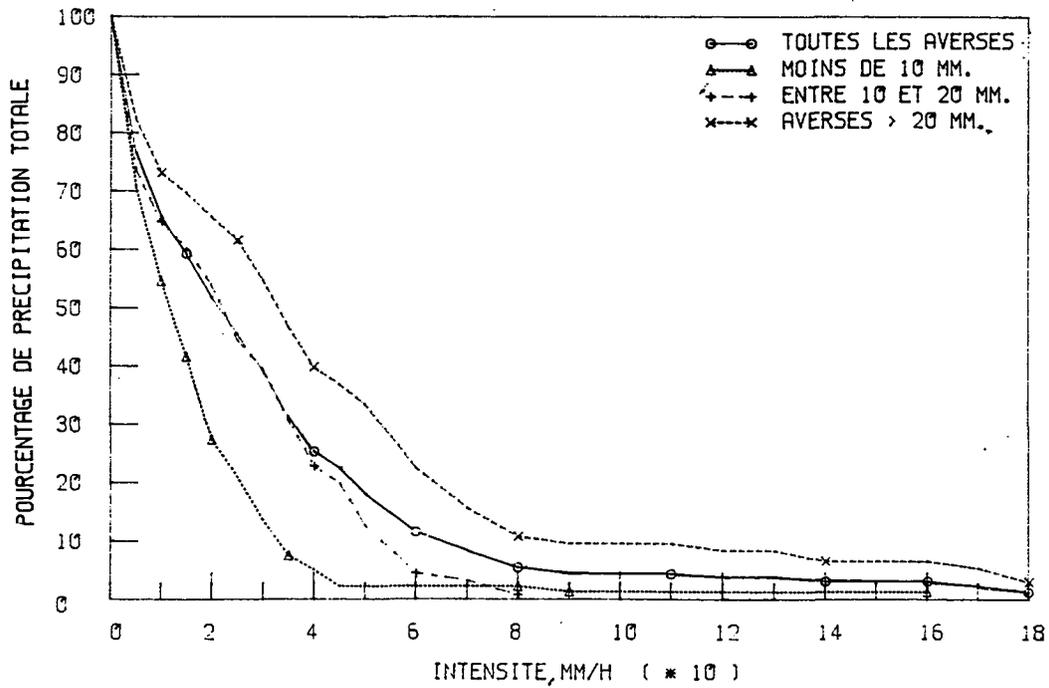


Fig. 4.50: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, Niono, 1977.

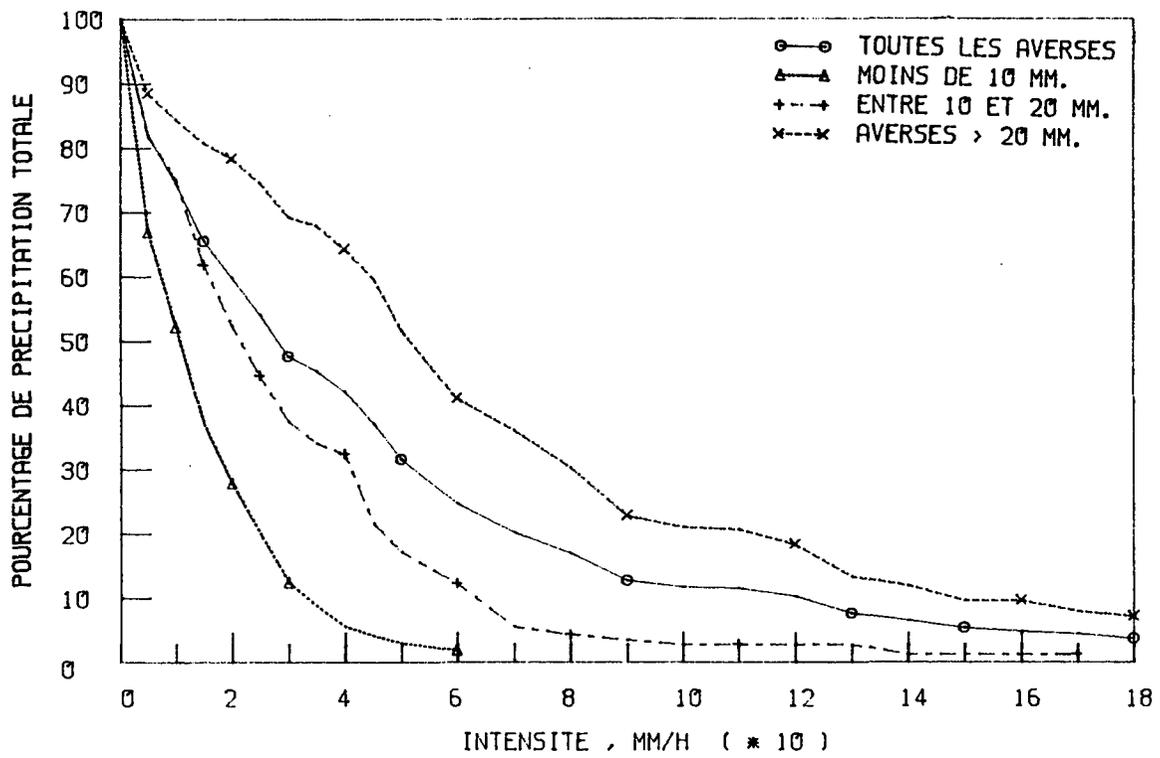


Fig. 4.51: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, Niono, 1979.

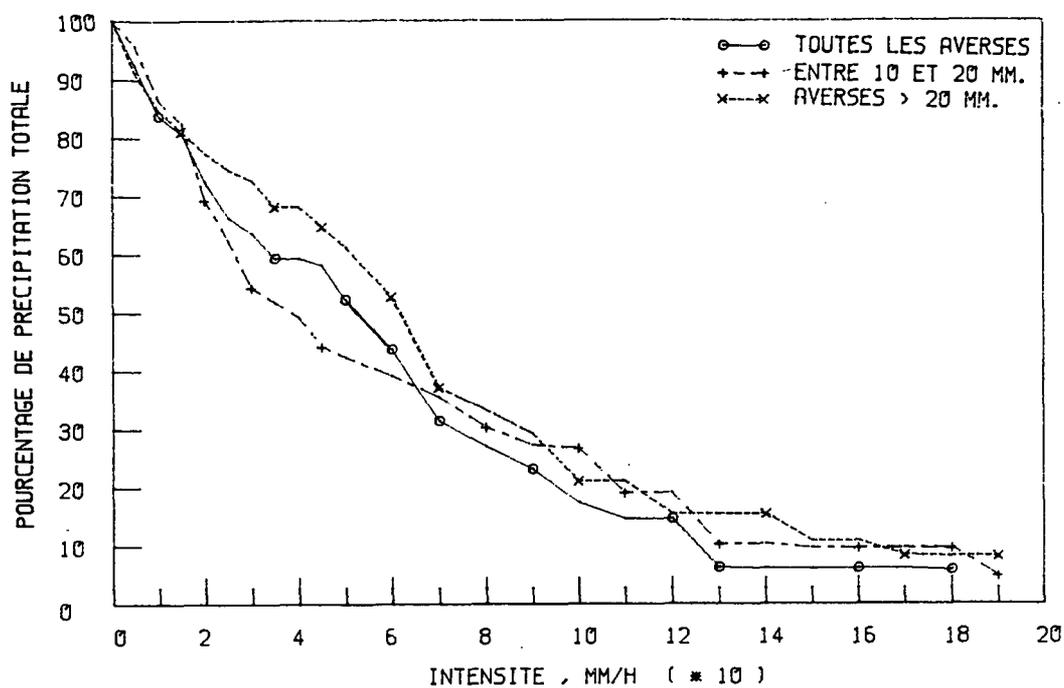


Fig. 4.52: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, Niamey, 1963.

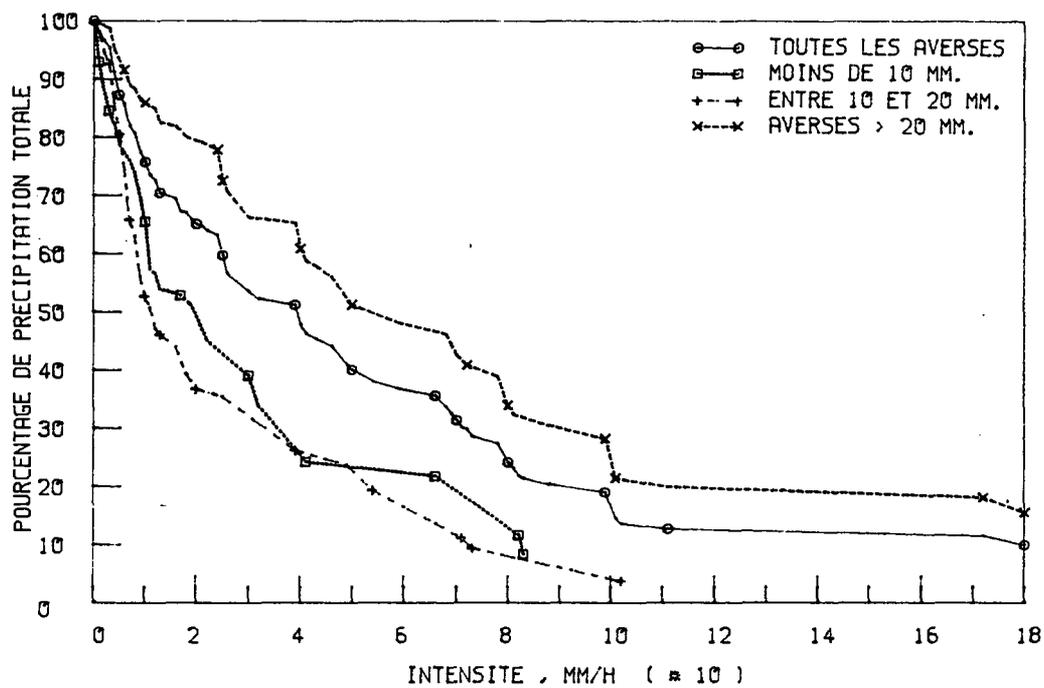


Fig. 4.53: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, Niamey, 1970.

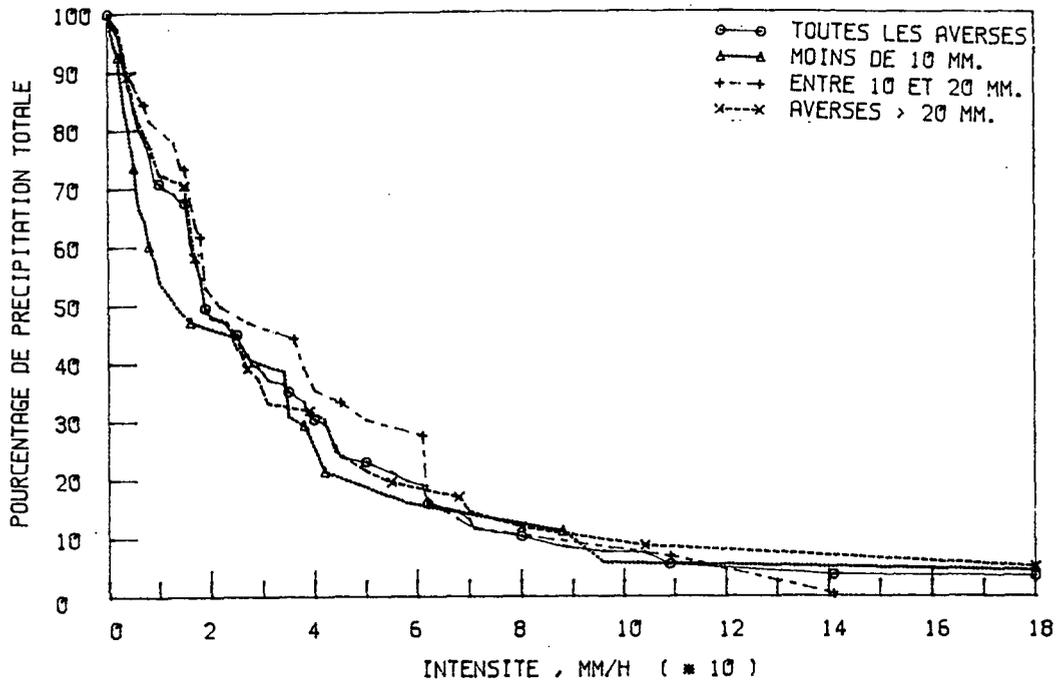


Fig. 4.54: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, Niamey, 1971.

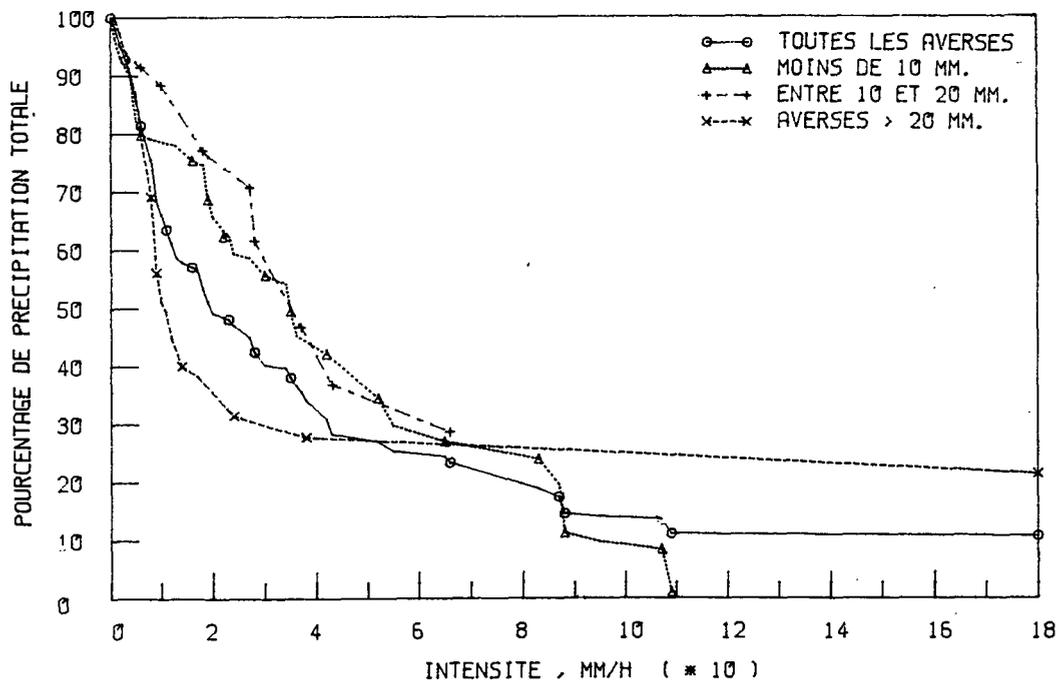


Fig. 4.55: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, Niamey, 1972.

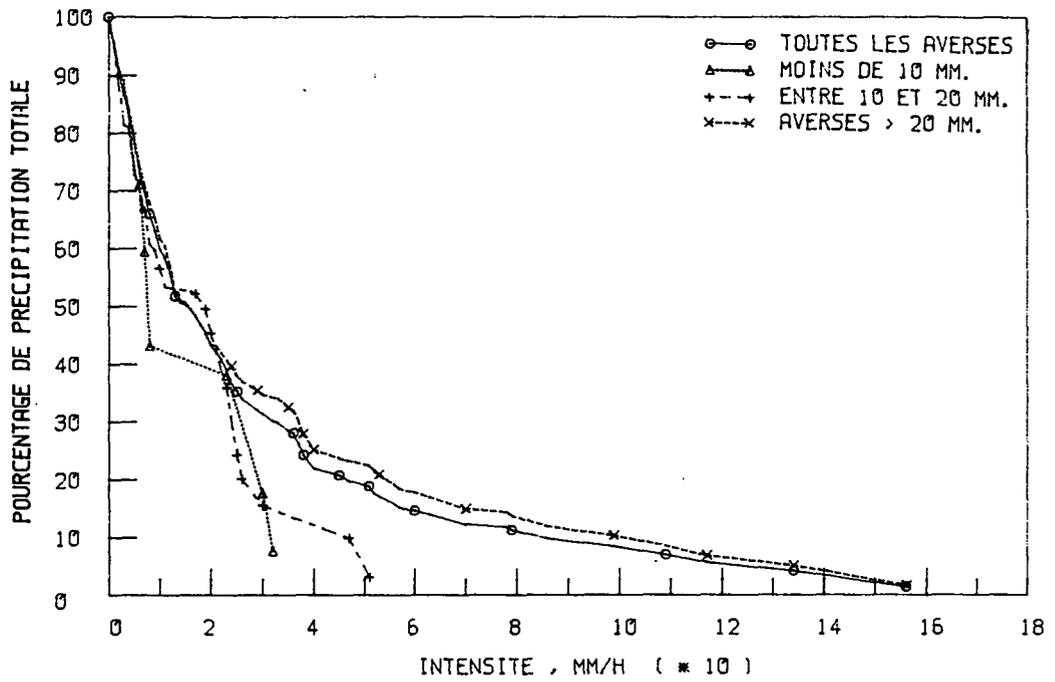


Fig. 4.56: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, ICRISAT, 1974.

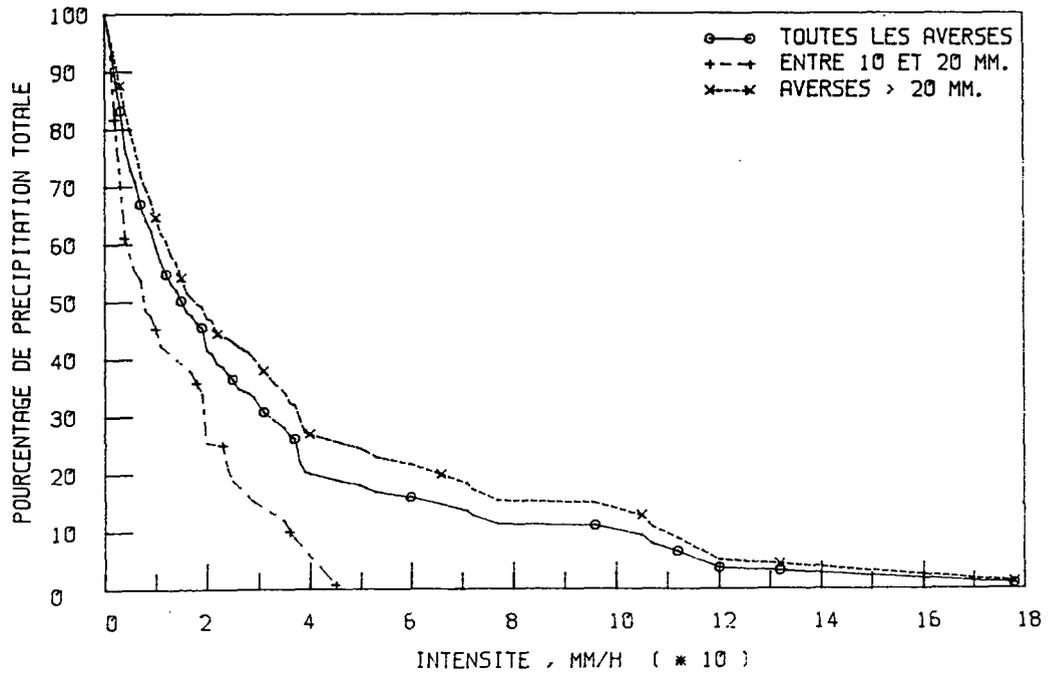


Fig. 4.57: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, ICRISAT, 1975.

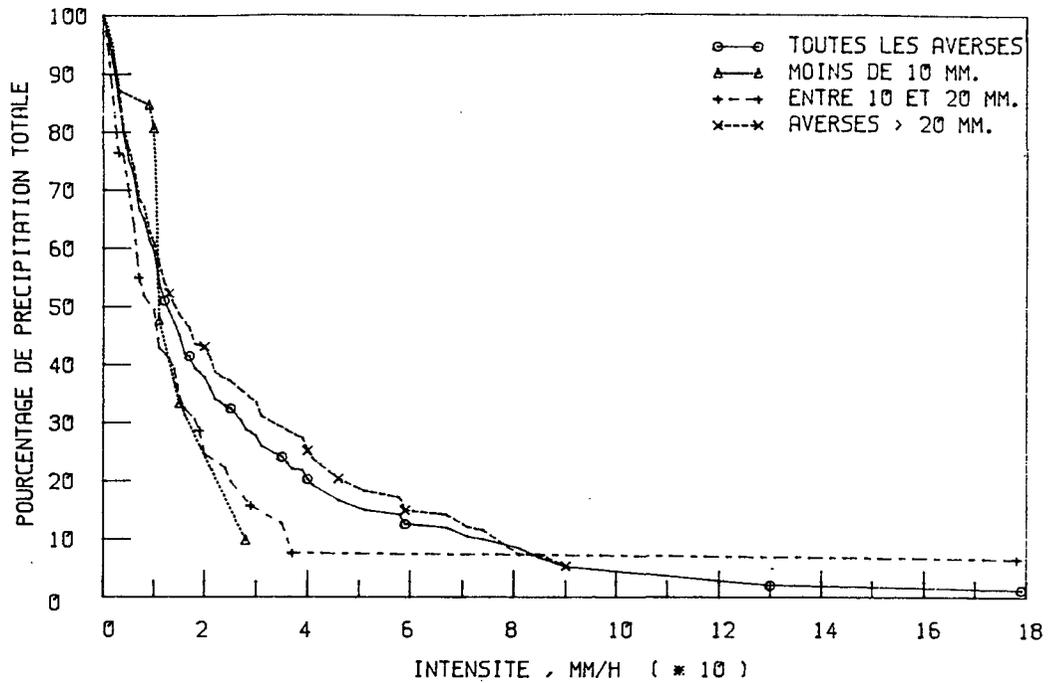


Fig. 4.58: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, ICRISAT, 1976.

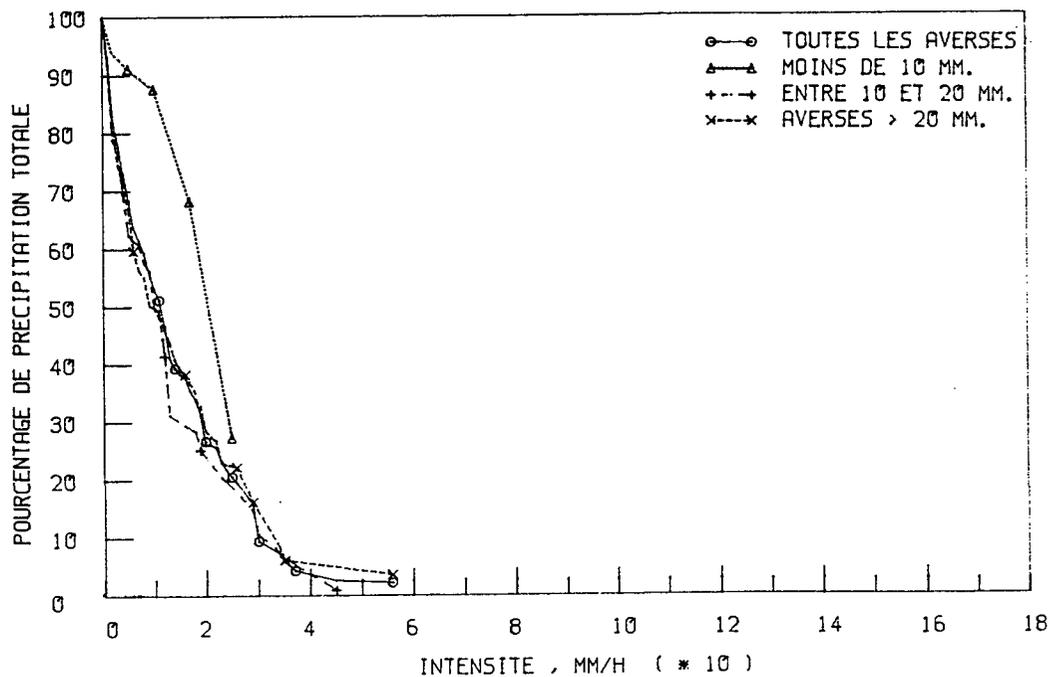


Fig. 4.59: Distribution des intensités des pluies en fonction de la quantité totale de précipitation, ICRISAT, 1977.

leur volume: inférieur à 10mm, de 10 à 20mm et supérieur à 20mm. On a fait cette division dans le but de découvrir une corrélation éventuelle entre la contribution de l'averse au ruissellement de surface et la taille de l'averse. La différence dans la répartition de l'intensité entre les tailles d'averses est claire pour toutes les stations; les plus grandes averses ont en général des pluies d'intensité plus élevée que les averses plus petites. Les intensités maximales en Afrique de l'Ouest varièrent de 150 à 300mm/h pour des périodes de 6 minutes ou moins; pour l'ICRISAT, les intensités maximales furent plus basses, de 57 à 134mm/h pour de courtes périodes.

4.3.4.3 - Energies et index

L'énergie cinétique, les index et les intensités maximales furent calculés pour chaque pluie. Dans les tables 4.27 à 4.29, sont données les valeurs cumulées pour chaque années, pour chaque emplacement. Les plus hautes intensités des plus grandes averses sont également montrées dans les énergies et les index calculés, non seulement sous forme de total, mais aussi exprimées en mm de pluie. L'index de Lal peut être ici considéré comme une intensité moyenne pondérée. La contribution des grandes averses (20mm) à la quantité totale de pluie, ainsi qu'à l'énergie totale, est évidente pour toutes les stations, bien que moins prononcée pour l'Afrique de l'Ouest. Cependant, on n'a pas trouvé de corrélation entre l'intensité moyenne et la taille de l'averse.

4.3.4.4 - Une comparaison des caractéristiques de précipitation

Les informations sur les intensités de pluie et leur distribution à l'intérieur de l'averse sont d'une grande importance pour les recherches sur

l'agronomie et les travaux du sol. Sous une pluie de haute intensité, le taux d'infiltration de la surface du sol peut être dépassé par la précipitation, et il peut se produire des pertes par ruissellement de surface. Une pluie de haute intensité peut également être plus agressive (une érosivité plus élevée) et provoquer de sérieux dégâts de glissement et de formation de croûte. Les informations obtenues à partir de données de trois ou quatre années seulement sont beaucoup trop limitées pour permettre des conclusions statistiquement fondées, en particulier pour la grande variabilité d'un climat semi-aride. De nettes différences entre les emplacements sont néanmoins observables.

D'après ces expériences, il semble que les précipitations de Niamey sont les plus agressives. Les précipitations de l'ICRISAT sont moins agressives, quand on considère l'énergie cinétique et les intensités moyennes. L'énergie cinétique (comme fonction de l'intensité) est plus faible d'environ 10% (par mm de pluie) dans la région d'Hyderabad en Inde que dans les emplacements d'Afrique de l'Ouest. Les intensités maximales, généralement enregistrées dans les plus grandes averses, sont considérablement plus basses en Inde.

Il faut donc réaliser que, lorsque l'on développe des méthodes de travaux ou d'aménagement de la terre dans une région donnée, il faut considérer avec attention les différences dans les caractéristiques de précipitation. En particulier, sur les sols dont la structure n'est pas très stable, l'agressivité des précipitations influencera fortement les exigences d'un stockage de surface ayant pour but d'empêcher le ruissellement de surface. La présente comparaison a été basée sur l'étude des caractéristiques de précipitation d'averses individuelles uniquement; pour des informations supplémentaires sur la répartition des pluies et l'analyse statistique de l'occurrence des périodes sèches, en Inde et en Afrique de l'Ouest, il faudra

se référer aux travaux effectués à l'ICRISAT (Virmani et autres, 1978; Sivakumar et autres, 1979).

4.3.4.5 - Calcul de l'infiltration et du ruissellement de surface

Le ruissellement de surface résulte à la fois des caractéristiques du sol et des précipitations. Le ruissellement de surface a été calculé pour deux conditions de sol: la première, un sol nu, non travaillé, et la deuxième, un sol nu cultivé. On s'est servi des résultats des recherches sur les sols S1.

Deux méthodes furent utilisées:

- a. l'application des résultats du simulateur combinée à l'analyse des précipitations (Morin, 1977).
- b. l'estimation de la sorptivité S (Stroosnijder, 1980), combinée aux données de précipitation.

Pour obtenir des détails techniques concernant ces deux méthodes, il faut se référer à l'appendice 5.

Table 4.24: Précipitations près de Niono, Mali, 1976-1979.

ANNEE	SITE	NOMBRE DE JOURS PLUVIEUX	VOLUME TOTAL (MM)	NOMBRE D'AVERSES ANALYSE	VOLUME TOTAL (MM)
1976	S1S	46	564	-	-
	D1	46	590	-	-
1977	S2	29	376	29	376
	D1	33	363	-	-
1978	S1N	36	437	30	271
	S1S	36	400	30	338
	D1	39	371	36	332
	TD	40	393	30	304
	L1M	35	448	28	341
	S2	36	429	32	398
1979	S1N	42	362	41	361
	D1	37	401	37	401
	TD	35	397	35	397
	L1M	34	398	34	398
	S2	34	431	34	430
	M1L	34	449	31	421

Répartition des tailles d'averse; moyenne de tous les sites (volume en mm).

ANNEE	VOLUME TOTAL	< 10MM		10-20MM		> 20MM	
		VOLUME	%	VOLUME	%	VOLUME	%
1976	577	100	17,4	113	19,6	365	63,3
1977	370	57	15,5	124	33,5	189	51,1
1978	412	97	23,5	138	33,5	177	43,0
1979	403	111	27,4	74	18,3	217	54,0

Table 4.25: Précipitations à Niamey, Niger.

ANNEE	SITE	NOMBRE		VOLUME	
		DE JOURS PLUVIEUX	TOTAL (MM)	D'AVERSSES ANALYSE	TOTAL (MM)
1963	Ville	32	512,0	17	437,1
1970	Aéroport	26	465,8	toutes	465,8
1971	Aéroport	30	437,8	toutes	437,8
1972	Aéroport	23	228,8	toutes	228,8

Répartition des tailles d'averse: volume en mm.

ANNEE	VOLUME TOTAL	< 10MM			10-20MM			> 20MM		
		NO	VOLUME	%	NO	VOLUME	%	NO	VOLUME	%
1963	512,0	15	74,9	14,6	9	136,7	26,7	8	300,4	58,7
1970	465,8	11	62,2	13,3	8	104,5	22,4	7	299,1	64,2
1971	437,8	14	70,8	16,2	8	123,7	28,2	8	243,3	55,6
1972	228,8	16	78,4	34,3	3	35,6	15,6	4	114,8	50,2

Table 4.26: Précipitation à la station météorologique de l'ICRISAT, Hyderabad, Inde.

ANNEE	NOMBRE		< 10MM			10-20MM			> 20MM			VOLUME TOTAL
	DE JOURS PLUVIEUX	NO	VOLUME	%	NO	VOLUME	%	NO	VOLUME	%		
1974	22	4	30,2	4,3	7	93,2	13,4	11	571,7	82,2	695,1	
1975	28	1	7,0	0,9	14	203,6	25,4	13	592,0	73,8	802,6	
1976	23	5	29,0	4,6	9	125,4	20,0	9	471,8	75,3	626,2	
1977	20	3	13,9	3,6	10	134,6	34,7	7	239,5	61,7	388,0	

Toutes les averses ont été analysées

Table 4.27: Energies et index des précipitations, Niono, Mali.

Unités: pluies = mm

énergie cinétique = $J.m^{-2}$ index de Wischmeyer = $J.m^{-1}.hr^{-1}$ index de Hudson = $J.m^{-2}$ index de Lal = $mm^2.hr^{-1}$

	1977				1978			
	GROUPE DE TAILLE D'AVERSE				GROUPE DE TAILLE D'AVERSE			
	> 20MM	10-20MM	< 10MM	TOTAL	> 20MM	10-20MM	< 10MM	TOTAL
<u>Précipitation totale:</u>	191	135	50	376	141	102	86	330
Energie cinétique	5383	3658	1105	10146	3763	2476	1932	8195
Index de Wischmeyer	245	90	9	346	156	51	18	226
Index de Hudson	4002	2383	259	6645	2647	1324	527	4499
Index de Lal	12080	5167	741	17988	6312	2505	1416	10246
<u>Index par mm de pluie:</u>								
Energie cinétique	28,1	27,1	21,9	26,9	26,7	24,3	22,3	24,8
Index de Wischmeyer	1,28	0,67	0,20	0,92	1,12	0,49	0,21	0,68
Index de Hudson	20,9	17,7	5,1	17,6	21,4	12,8	5,9	13,6
Index de Lal	63,1	38,3	14,7	47,8	46,1	24,2	16,4	31,4
	1979							
	GROUPE DE TAILLE D'AVERSE							
	> 20MM	10-20MM	< 10MM	TOTAL				
<u>Précipitation totale:</u>	210	80	111	397				
Energie cinétique	6050	2031	2459	10539				
Index de Wischmeyer	402	44	24	471				
Index de Hudson	4941	1069	634	6645				
<u>Index par mm de pluie:</u>								
Energie cinétique	28,9	25,5	22,2	26,6				
Index de Wischmeyer	1,94	0,55	0,22	1,19				
Index de Hudson	23,7	13,0	5,8	16,8				
Index de Lal	70,0	31,7	14,5	46,9				

Table 4.29: Energies et index des précipitations, ICRISAT, Hyderabad, India.

Unités voir table 4.27.

	1974				1975			
	GROUPE DE TAILLE D'AVERSE				GROUPE DE TAILLE D'AVERSE			
	> 20MM	10-20MM	< 10MM	TOTAL	> 20MM	10-20MM	< 10MM	TOTAL
<u>Précipitation totale:</u>	572	93	30	695	592	204	7	803
Energie cinétique	14142	2164	678	16983	14878	4394	141	19414
Index de Wischmeyer	706	36	7	749	630	71	0.9	702
Index de Hudson	6749	646	150	7544	7873	1079	0	8951
Index de Lal	18526	1614	411	20552	20973	2679	55	23708
<u>Index par mm de pluie:</u>								
Energie cinétique	24,7	23,2	22,4	24,4	25,1	21,6	20,2	24,2
Index de Wischmeyer	1,23	0,38	0,23	1,07	1,06	0,35	0,13	0,87
Index de Hudson	11,8	6,9	5,0	10,9	13,3	5,3	0,0	11,2
Index de Lal	32,4	17,3	13,6	29,6	35,4	13,2	7,9	29,5
	1976				1977			
	GROUPE DE TAILLE D'AVERSE				GROUPE DE TAILLE D'AVERSE			
	> 20MM	10-20MM	< 10MM	TOTAL	> 20MM	10-20MM	< 10MM	TOTAL
<u>Précipitation totale:</u>	472	125	29	626	239	135	14	388
Energie cinétique	11529	2811	675	15015	5245	2998	338	8581
Index de Wischmeyer	448	38	7	494	120	42	3	168
Index de Hudson	5316	767	82	6165	1507	646	103	2256
Index de Lal	12656	2965	368	15989	3400	1851	225	5476
<u>Index par mm de pluie:</u>								
Energie cinétique	24,4	22,4	23,3	24,0	21,9	22,3	24,3	22,1
Index de Wischmeyer	0,95	0,31	0,25	0,79	0,50	0,32	0,27	0,43
Index de Hudson	11,3	6,1	2,8	9,8	6,3	4,8	7,4	5,8
Index de Lal	26,8	23,6	12,7	25,5	14,2	13,8	16,2	14,1

4.3.5 - Résultats et discussion - Israël 1979-1980

4.3.5.1 - Ruissellement de surface

La précipitation cumulée et le ruissellement de surface pour la saison d'hiver 1979-1980 sont représentés graphiquement sur la figure 4.60. La précipitation cumulée et le ruissellement de surface en tant que pourcentage total saisonnier sont donnés sur la figure 4.61. Les résultats les plus évidents sont que les parcelles de levées et de disquage ont un coefficient de ruissellement de surface plus ou moins constant au long de la saison, comme le montre la figure 4.61. La parcelle en levées eut un coefficient de ruissellement de presque 60% toute la saison, et la parcelle à disquage de seulement 5,6%. La parcelle labourée eut d'abord un coefficient de ruissellement bas (10%) qui a augmenté de façon soudaine vers la fin-Décembre, et fut ensuite de 30%; le comportement de la fonction cumulée fut essentiellement parallèle à la fonction de précipitation, comme cela fut le cas pour les autres traitements.

Le traitement de barrages de rigoles fut de façon évidente le plus efficace pour empêcher le ruissellement de surface et pour augmenter l'infiltration de l'eau de pluie. Bien qu'on ait pu constater quelque détérioration des barrages à mesure que la saison avançait, et parfois un recouvrement de quelques barrages, les bassins créés par les barrages eurent une capacité de stockage de surface suffisante pour que chaque bassin puisse stocker sa propre quantité d'eau et celle du bassin voisin supérieur, en cas d'effondrement des barrages. La conservation de l'efficacité des barrages de rigoles est démontrée par leur bonne performance, même pendant la dernière averse de la saison, vers le premier Mars, où il tomba une quantité de pluie

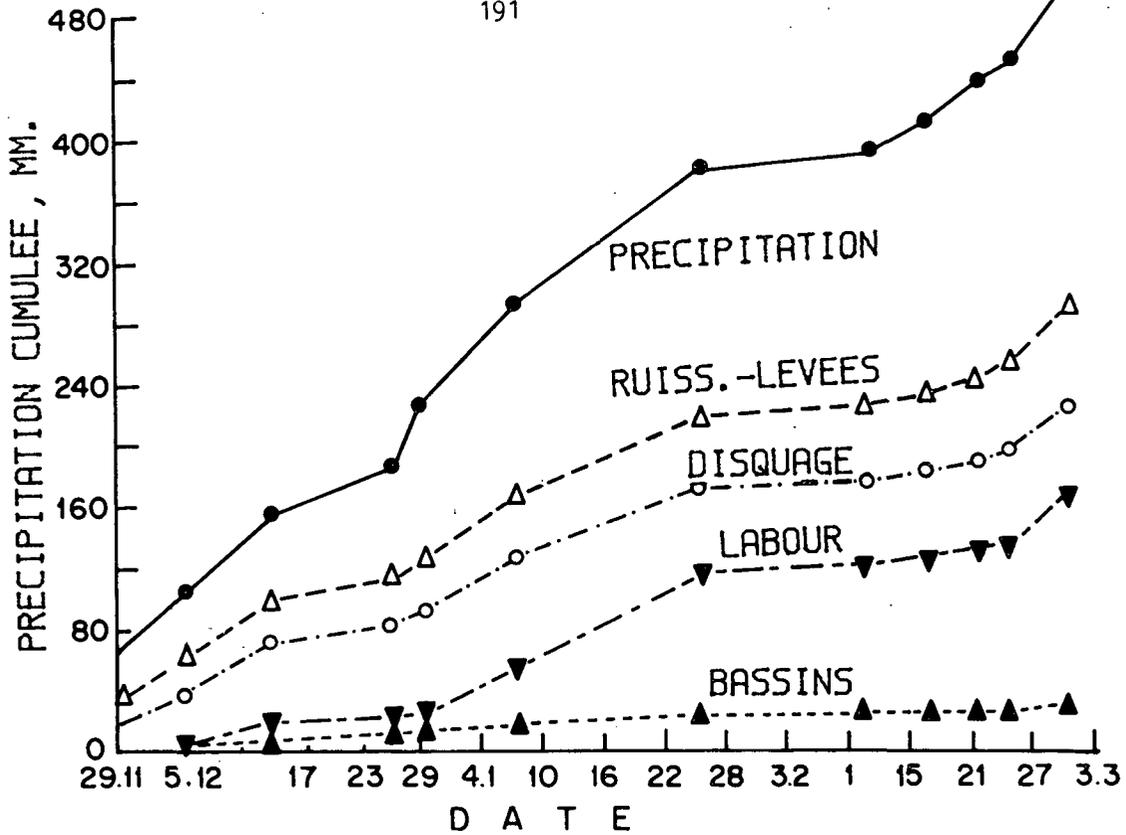


Fig. 4.60: Précipitation cumulée et quantités de ruissellement de surface pendant la saison pluvieuse.

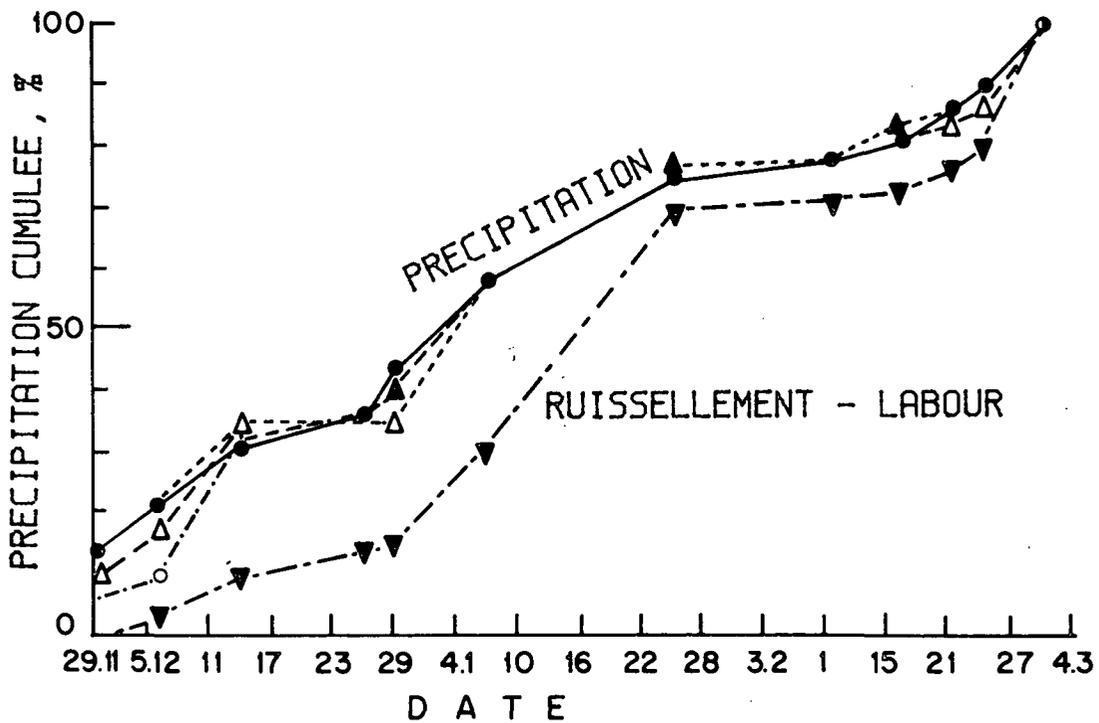


Fig. 4.61: Pourcentage cumulé de précipitation et ruissellement de surface pendant la saison pluvieuse.

totale de 55mm. Les parcelles labourées eurent une bonne performance, presque aussi bonne que les barrages de rigoles au début de la saison, mais subirent un changement soudain à la fin-Décembre. On associe ce changement à deux grandes averses (66mm et 67mm) entre les 26-28 Décembre et les 6-7 Janvier. Par la suite, le coefficient de ruissellement du traitement labouré fut similaire à celui du traitement de disquage, et à peine plus bas que celui des levées. Une observation visuelle des parcelles labourées, juste après le labour, donna l'impression que les grosses mottes (le diamètre dominant fut d'environ 15 à 20cm) ont été réparties au hasard à la surface du sol, sans rigoles apparentes. Ceci est en contraste avec ce qu'on peut voir dans les champs labourés en zone tempérée, où les rigoles sont clairement visibles. La raison en est que la préparation du sol fut faite ici au moment où le sol était dur et sec, après une culture qui épuisa l'humidité du sol, et qu'elle a brisé le sol en mottes qui ont tendance à causer l'effondrement des levées après le passage de la charrue. Cependant, en avançant dans la saison, et surtout après les deux averses mentionnées ci-dessus, un mode systématique de structure s'est révélé. Les levées d'origine, faites lors de la préparation du sol, se montrèrent comme des rangées de mottes, et entre elles, apparurent des rigoles formées par l'écoulement de l'eau. Dans les parties supérieures des rigoles, l'érosion fut évidente, et dans les parties inférieures, il y eut quelques dégâts dus à l'érosion ainsi qu'un dépôt de sédiments. On pense que dans les rigoles d'origine faites lors de la préparation du sol, les mottes étaient en fait moins élevées. Lorsqu'avec les pluies, les mottes formèrent une croûte, un ruissellement de surface localisé de faible quantité atteignit les petites dépressions où les mottes devinrent saturées et, n'étant pas stables à l'eau, elles s'écroulèrent par glissement. Le matériau qui a glissé fut ôté par l'averse suivante, et par la suite, les

parcelles labourées se conduisirent comme les autres parcelles, excepté celle des barrages de rigoles. Le comportement différent des parcelles labourées devient évident lorsque l'on met sur graphe la précipitation relative cumulée et le ruissellement de surface (figure 4.61). Pour chaque série de données le total saisonnier est considéré comme 100%. On voit que tous les autres traitements atteignirent un ruissellement de surface relatif au même taux que la précipitation cumulée. Le fait que la courbe de la parcelle labourée se trouve en dessous des autres ne signifie pas que ce traitement fut le meilleur, mais seulement qu'un grand pourcentage du ruissellement de surface final fut produit dans la dernière partie de la saison. Pendant le mois de Janvier, la pente de cette courbe fut plus raide que celle des autres parcelles, ce qui indique que le coefficient de ruissellement augmente, et donc que ce traitement se comporta comme les autres.

Notre explication des résultats précédents est que, pendant les premières pluies, un matériau facilement érosible a immédiatement été ôté par les eaux de ruissellement, et qu'à la surface du sol restante, une croûte s'est formée jusqu'à son état plus ou moins final, donc aussi jusqu'à son infiltrabilité finale. Cette dernière peut encore changer avec le temps lors de l'assèchement du sol, mais la fonction finale a probablement été atteinte à la mi-Décembre. Ceci s'applique à tous les traitements sauf à celui de labour. Après que la surface du sol s'est stabilisée, un coefficient de ruissellement plus ou moins constant s'est maintenu pour le reste de l'hiver, ce qui explique le parallélisme, dans la figure 4.61, entre les fonctions de ruissellement relatif et celles de précipitation. Seulement dans les parcelles labourées, il faut plus de précipitation cumulée pour atteindre un état stable, après quoi la parcelle ressemble physiquement à une parcelle de rigoles.

4.3.5.2 - Erosion

L'accumulation de sédiments érodés est représentée dans les figures 4.62 et 4.63, et le taux d'accumulation est comparé à la précipitation cumulée. Cette méthode de représentation, ainsi que celle de la production de ruissellement sont trop simplifiées, car, dans aucun des deux cas, l'intensité de précipitation n'a été considérée. Comme on peut le voir par la comparaison des figures 4.61 et 4.63, le comportement du ruissellement de surface et celui de la production de sédiments diffèrent quelque peu l'un de l'autre. La très forte érosion des parcelles de levées est tout à fait au dessus du niveau standart acceptable, et le taux d'érosion de la parcelle labourée est un cas-limite. Il est intéressant de constater que la parcelle de disquage a formé moins de sédiment que la parcelle labourée, et ceci est également explicable par le mécanisme de la détérioration de la structure due à l'impact des gouttes de pluie. La fine surface du sol de la parcelle de disquage a donné une production de sédiment initiale élevée, avec la formation d'une croûte à la surface du sol pendant la première ou les deux premières averses, puis par la suite, cette production s'est stabilisée. La parcelle labourée, par contre, s'est détériorée plus lentement à cause du glissement des grosses mottes, et le taux d'érosion a dépassé celui de l'accumulation de pluie seulement après qu'une certaine quantité de matériel glissé fut rendue disponible pour le transport.

Dans le but d'évaluer la signification de cette sur-simplification, on a fait une analyse de toutes les averses dépassant 12mm, concernant l'énergie cinétique (E.C.) et l'érosivité selon l'index de Wischmeier (R) de chaque averse et de chaque saison. Les résultats figurent dans la table 4.30.

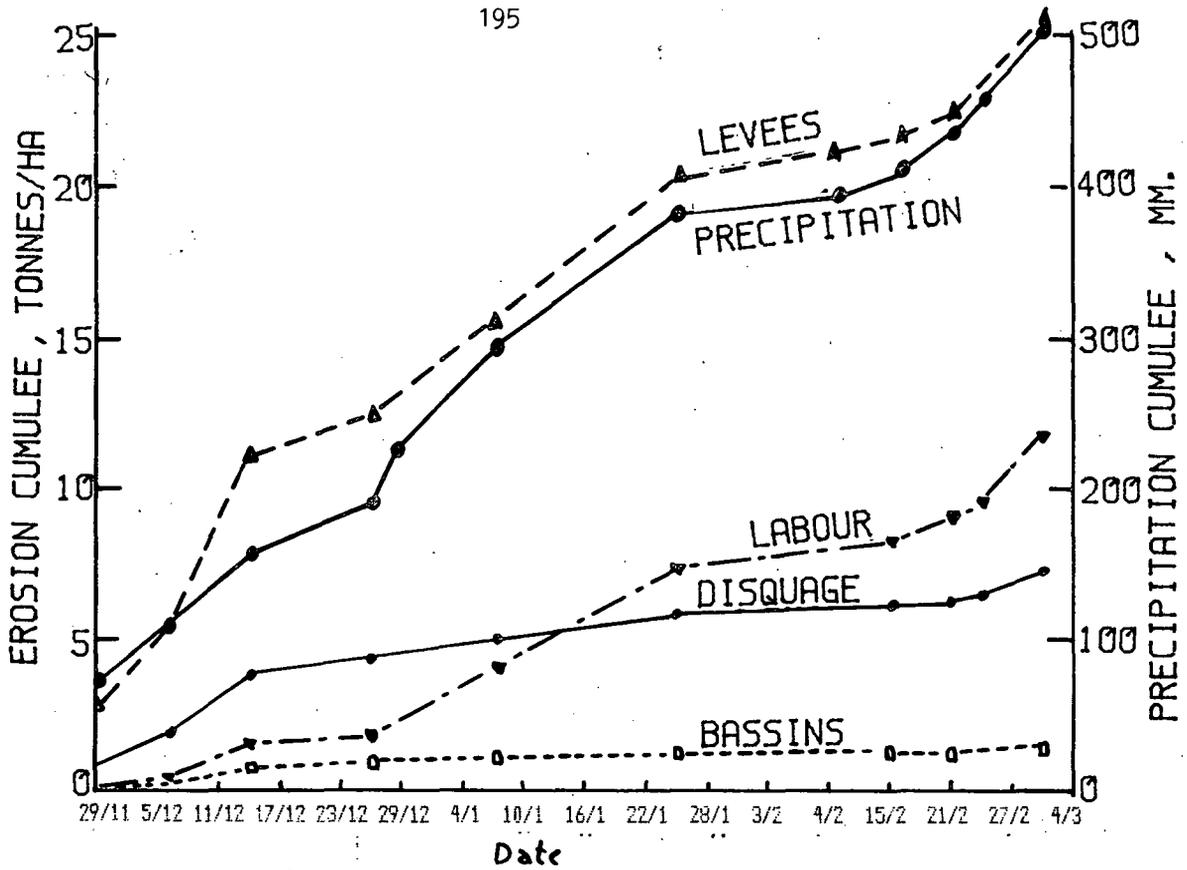


Fig. 4.62: Précipitation cumulée et quantités de sédiments érodés pendant la saison pluvieuse.

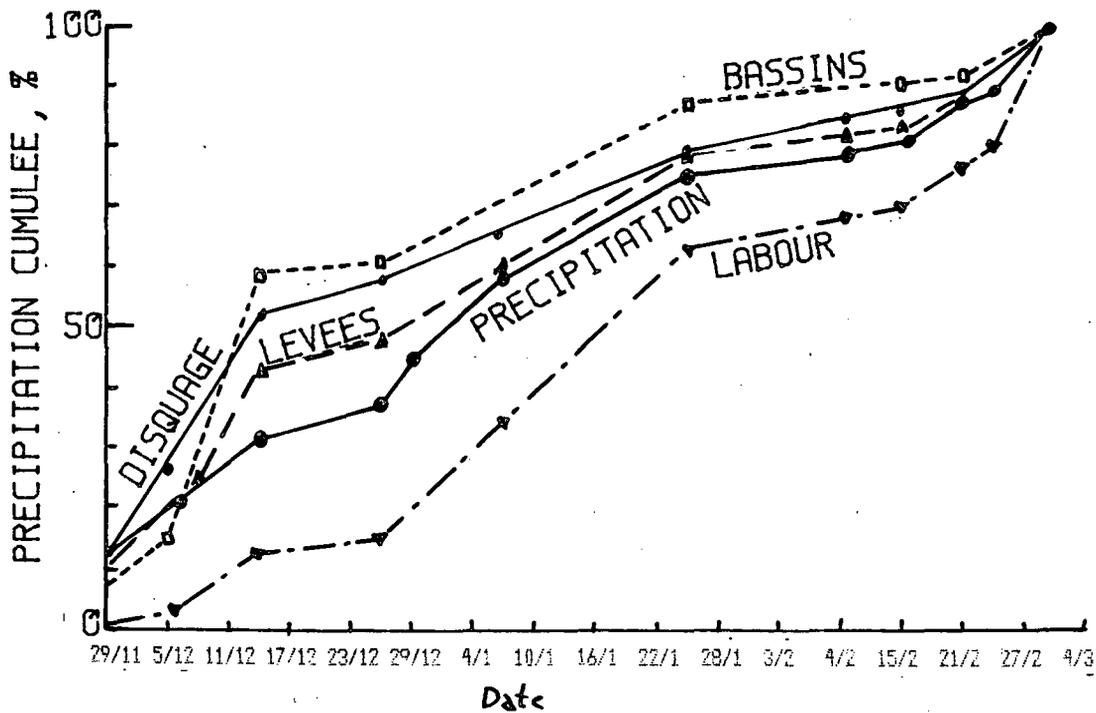


Fig. 4.63: précipitation cumulée relative et quantités de sédiment pendant la saison pluvieuse.

Table 4.30: Relation entre précipitation, intensité maximale de 30 minutes et érosivité des averses de l'hiver 1979-80 à Alumim (averses de plus de 12 minutes de précipitation).

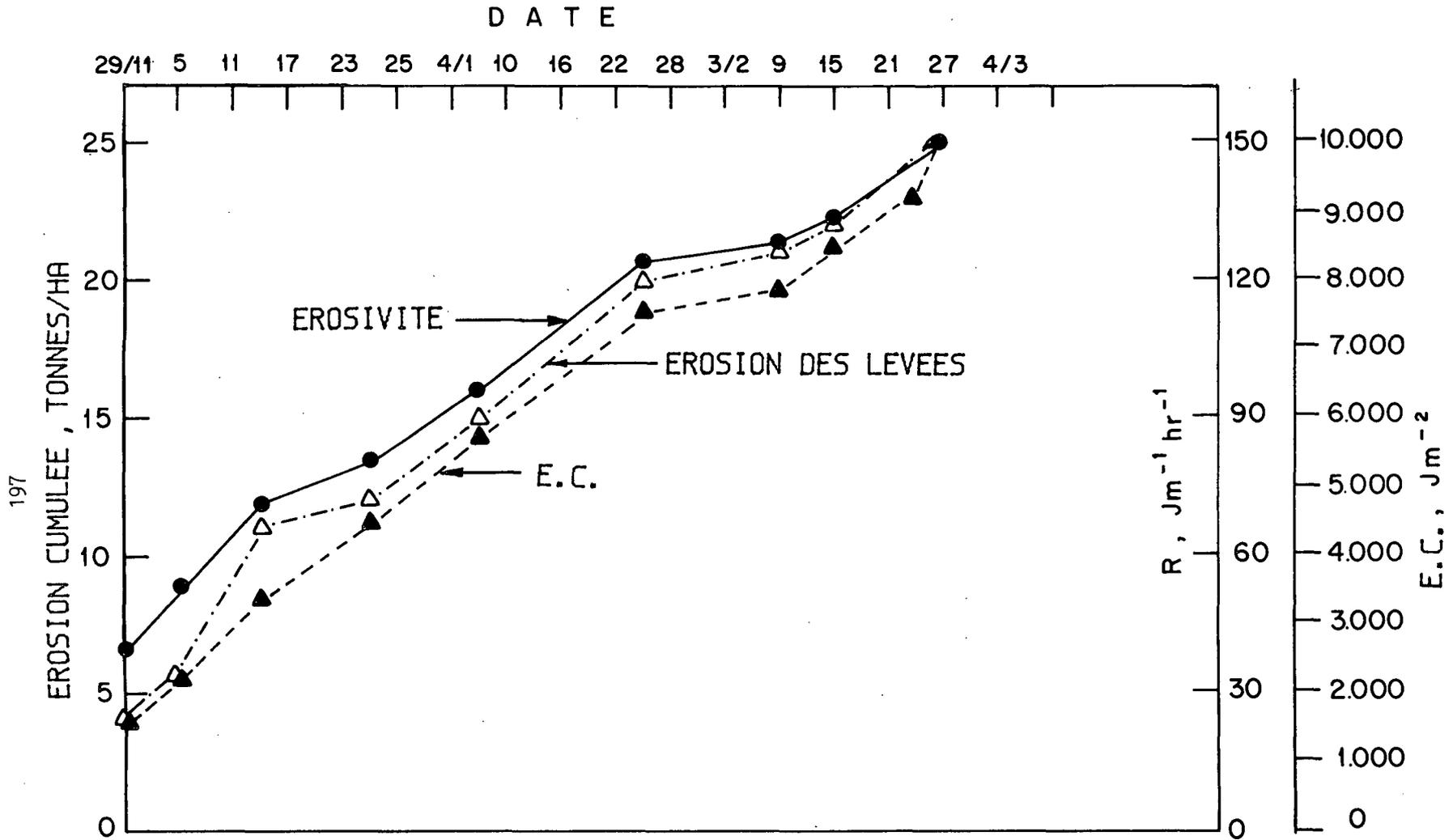
DATE DE L'AVERSE	PRECIPITATION MM	I30 MM/HR	ENERGIE CINETIQUE J.M-2	R EROSIVITE J.M-1.HR-1
29/11/79	63	29,6	1395	41,3
06/12/79	42	14,1	844	11,9
14/12/79	52	15,9	1116	17,7
27/12/79	66	7,9	1172	9,3
07/01/80	67	12,4	1265	15,7
23/01/80	89	15,3	1845	28,2
10/02/80	12	4,1	233	1,4
15/02/80	45	9,5	783	7,3
25/02/80	28	10,3	511	4,7
29/02/80	55	11,9	976	10,0
Total:	519		10140	147,4

Lorsque les index de l'énergie cinétique et de l'érosivité sont mis en graphe, à la même échelle que l'érosion des parcelles de levées (figure 4.64), on voit que les deux index ont une corrélation élevée avec la précipitation et l'érosion réelle mesurée. La comparaison des figures 4.62 et 4.63. qui représente l'érosion cumulée relative, indique que tous les traitements, sauf le traitement de labour, se comportent de la même manière, à part le fait qu'ils ont des "coefficients d'érosion" différents ou une vulnérabilité différente, et c'est pourquoi, la corrélation entre les index d'érosion et l'érosion observée est aussi élevée que pour le traitement de levées, de nouveau à l'exception du traitement de labour. Les raisons de ce comportement différent ont déjà été expliquées.

4.3.5.3 - Régime hydrique du sol

La figure 4.65 représente les profils hydriques verticaux du sol, à des moments choisis, pour la répétition I, celle qui possédait les tubes d'accès

Fig. 4.64: Relation entre l'érosion mesurée du traitement de levées et les index d'énergie cinétique et d'érosivité mesurés à partir des caractéristiques de précipitation.
Alunim, 1979-80.



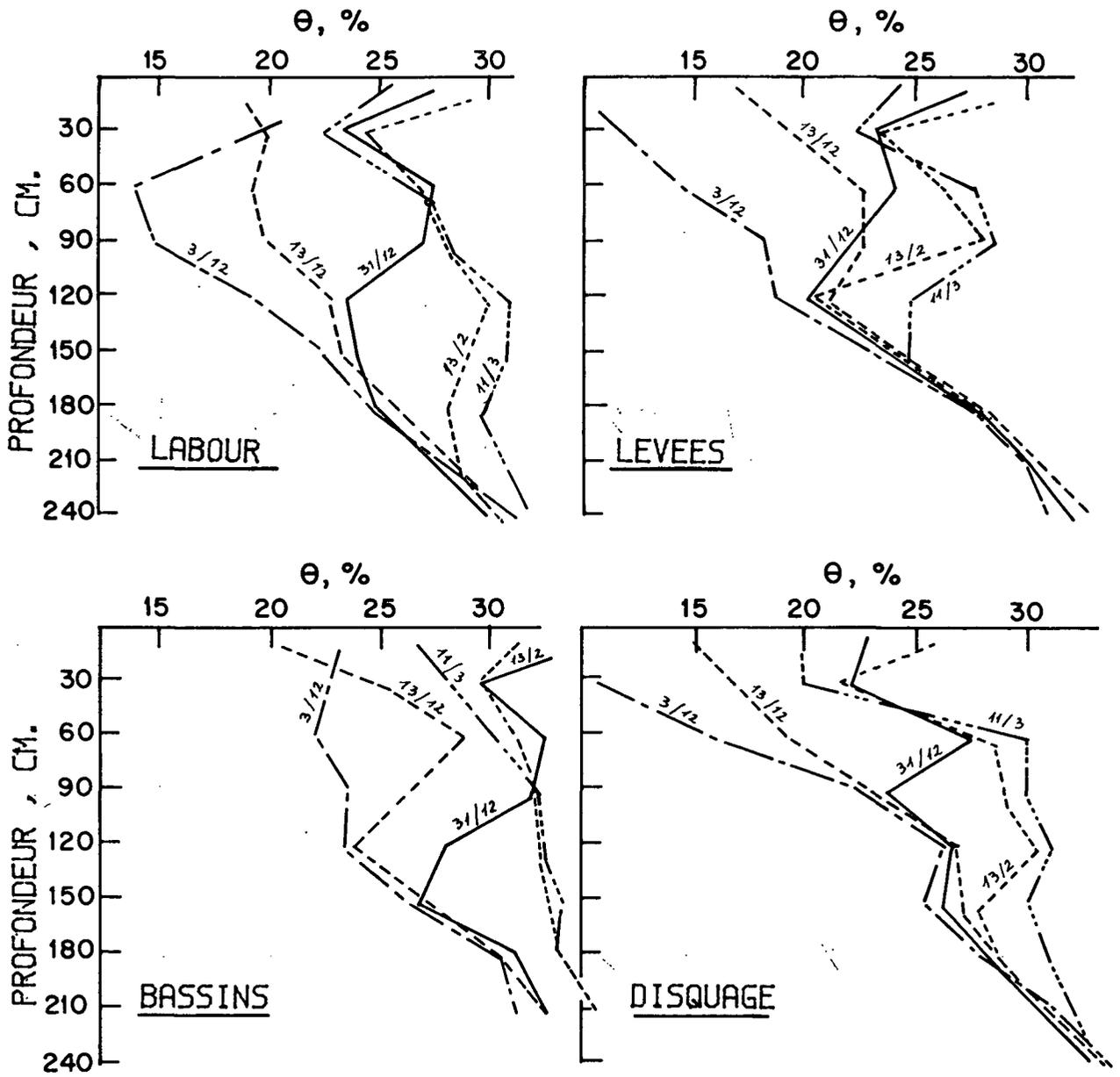


Fig. 4.65: Profils hydriques verticaux à des dates précises pendant la saison pluvieuse. Alumim, 1979-80.

les plus profonds. Les autres répétitions eurent une distribution hydrique très similaire. Il faut noter qu'au début de l'enregistrement des résultats (le 3 Décembre), il y avait déjà eu une averse de 63mm le 29 Novembre qui ne fut pas mesurée, à cause de l'impossibilité d'installer les tubes d'accès dans le sol sec avant cette averse. Ainsi les premiers profils reflètent déjà une infiltration différentielle due aux traitements de surface. Les données montrent que pendant la première averse, les rigoles à barrages, et dans une moindre mesure, la parcelle labourée absorbèrent beaucoup plus d'eau que les deux autres parcelles. La réaction des parcelles de levées et de disquage à la deuxième averse (le 13 Décembre) qui fut de 52mm, indique une stabilisation de la croûte de surface, et donc une infiltration beaucoup plus faible que dans les parcelles de labour et de barrages de rigoles, comme le montrent la teneur hydrique moyenne et la profondeur de pénétration. Le changement beaucoup plus grand qui a eu lieu dans le stockage de la parcelle de barrages de rigoles, dans la couche 0-90cm, est particulièrement frappant. Dans les parcelles de levées, la profondeur de pénétration n'atteignit 60-90cm que tard dans la saison, sans jamais atteindre les 120cm. A la fin-Décembre, la profondeur de pénétration fut d'environ 90cm dans les parcelles de labour et de rigoles, de 120cm dans les rigoles à barrages, et seulement de 60cm dans le traitement de disquage. A ce moment, le total des pluies fut d'environ 225mm. A la mi-Février, l'humidité pénétra au dessous de la profondeur de la zone radriculaire, dans les traitements de labour et de rigoles à barrages, après un total de pluie de 400mm, ce qui est la moyenne annuelle de long-terme. Dans la parcelle de disquage, la pénétration a tout juste atteint 120cm, et dans la parcelle de levées, seulement 90cm, ce qui est tout à fait insuffisant. Grâce à la quantité et à la répartition des précipitations, qui furent inhabituellement favorables cette année-là, les parcelles de disquage se

réapprovisionnèrent de façon suffisante en fin de saison, mais ceci n'aurait pas été le cas, si les quantités de pluie avaient été normales ou inférieures à la normale.

Les données de l'humidité du sol ont également été représentées graphiquement comme le stockage total dans la couche 0-150cm en fonction du temps, dans le but d'évaluer le taux d'évapotranspiration entre les précipitations. Comme il fallait faire quelques estimations à cause de l'irrégularité de l'échantillonnage dictée par le mode de précipitation, les résultats d'E.T. reflètent bien les différents régimes hydriques du sol dus aux traitements (Table 4.31). Comme l'eau a été stockée en surface dans les bassins créés par les barrages de rigoles, c'est ce traitement qui a eut la plus haute perte par évapotranspiration, suivi par les autres traitements, selon leur efficacité pour empêcher le ruissellement de surface. Dans les levées, en particulier, on a remarqué que le côté qui était le plus exposé au soleil a séché plus tôt après chaque pluie. Les données de précipitation mesurée et du ruissellement de surface furent combinées à celles du stockage de l'humidité dans le sol et à l'E.T. évaluée, pour calculer la composante manquante dans l'équation du bilan hydrique; la quantité drainée en dessous de 150cm de profondeur, ainsi que ces résultats, sont concentrés dans la table 4.31. Les quantités de drainage doivent être considérées comme un réapprovisionnement des eaux souterraines, ou comme une perte de stockage.

Table 4.31: Bilan hydrique saisonnier de la couche du sol 0-150cm. La précipitation totale pendant la période d'observation fut de 503mm, pendant 98 jours.

REPETITION	TRAITEMENT	E.T. ESTIMEE MM	CHANGEMENT DANS LE STOCKAGE D'EAU DU SOL MM	RUISSELLEMENT DE SURFACE MM	DRAINAGE MM
I.	Bassins	167	154	28	154
	Levées	58	155	290	0
	Disquées	88	150	224	41
	Labourées	98	151	166	88
II.	Bassins	167	157	28*	151
	Levées	58	155	290	0
	Disquées	88	100	224	91
	Labourées	98	160	79	
III.	Bassins	167	145	28	163
	Levées	58	147	290	8
	Disquées	88	191	224	0
	Labourées	98	212	166	27
Moyenne	Bassins		152		156
	Levées		152		3
	Disquées		147		44
	Labourées		174		65

* Dans les répétitions II et III, le ruissellement de surface n'a pas été mesuré, et les valeurs utilisées sont celles de la répétition I. Le seul paramètre mesuré séparément dans les répétitions II et III est le stockage d'eau du sol.

4.3.6 - Résultats et discussion - Israël 1980-81

4.3.6.1 - Précipitation

Pendant l'hiver 1980-81, la précipitation totale de 217mm fut répartie mensuellement de la façon suivante:

Octobre	9mm
Novembre	0mm
Décembre	99mm
Janvier	40mm
Février	27mm
Mars	33mm
Avril	9mm

Une analyse détaillée des cinq averses de la saison qui dépassèrent la quantité de 12mm est donnée dans la table 4.32.

Table 4.32: Quantités de précipitation, taux, énergie cinétique et érosivité des plus grosses averses de la saison 1980-81 à Alumim.

DATE DU DEBUT DE L'AVERSE	QUANTITE MM	I30-MAXI. TAUX DE 30 MINUTES	ENERGIE CINETIQUE J.M-2	EROSIVITE J.M-1.HR-1
10/12/80	64,0	34,1	1392	47,6
26/12/80	17,2	4,9	317	1,5
11/01/81	34,6	16,2	746	12,1
01/02/81	15,8	5,7	285	1,6
01/03/81	19,7	6,3	389	2,5
Total:	151,3	-	3129	65,3

On voit que les différents index de pluie représentent environ un tiers de ceux de l'hiver 1979-80. Les valeurs moyennes de IB30A sont identiques et les index d'érosion cumulée sont, en gros, proportionnels à la précipitation totale analysée.

C'est la première averse importante de Décembre qui a contribué pour la plus grande partie à l'érosivité saisonnière (73%), alors qu'elle ne représente que 42% de la précipitation totale. Comme cette averse est tombée sur un sol fraîchement préparé, elle a provoqué des dégâts d'érosion particulièrement faibles.

4.3.6.2 - Ruissellement de surface et Erosion

Les résultats de cette saison sont incomplets, car, d'une part, les barils de réception à peine installés se mirent à flotter dans leur fosse à cause de la première grande averse, et, d'autre part, car les averses suivantes ne produisirent pas ou peu de ruissellement. Les résultats obtenus figurent dans les tables 4.33 et 4.34. A cause des faibles quantités de précipitation, la différence entre les parcelles de contrôle et celles des traitements optimaux est de l'ordre de 10mm de ruissellement, quelques traitements de conservation ayant une bonne absorption (ruissellement nul). Ceci est fortement en contraste avec la saison 1979-80, où la différence de ruissellement fut de 260mm en faveur des levées à barrages sur terre en jachère.

Table 4.33: Ruissellement de surface et matériau érodé des parcelles de blé, 1980-81.

TRAITEMENT	AVERSE DU 10/12/80 P = 64MM		AVERSE DU 11/01/81 P = 34,6MM		TOTAL POUR TOUTE LA SAISON DE CULTURE	
	RUISSÈLEMENT MM	EROSION KG/HA	RUISSÈLEMENT MM	EROSION KG/HA	RUISSÈLEMENT MM	EROSION KG/HA
Contrôle	14,2+0,8	228+30	3,5+0,03*	65+9*	17,7	293
Lit de semence nu, nonensem.	14,2+0,8	301+52	6,6+0,1	96+32	20,8	397
Planches et levées à barrages	6,7+0,8	120+15	1,2+0,3	36+11	7,9	156
Lits étroits et levées à barrages	6,5+0,9	145+25	0,9+0,4	27+20	7,4	172

* Les parcelles de contrôle furent légèrement hersées après la première averse afin de briser la croûte, ce qui explique les faibles valeurs obtenues dans la parcelle de contrôle non-ensemencée.

Table 4.34: Ruissellement de surface et matériau érodé de la jachère d'hiver précédant la culture du coton, 1980-81.

TRAITEMENT	AVERSE DU 10/12/80		AVERSE DU 11/01/81		TOTAL POUR LA CULTURE	
	RUISSÈLEMENT MM	EROSION KG/HA	RUISSÈLEMENT MM	EROSION KG/HA	RUISSÈLEMENT MM	EROSION KG/HA
Labour profond suivant la pente	0	0	0	0	0	0
Labour profond sur le contour	0	0	0	0	0	0
Levées après labour	>12*	130+33	0,1+0,09	0	12,1	131
Billons après labour	10,6+1,1	68+42	0	0	10,6	68
Billons après sous-solage	0	0	2,9+0,2	0	0,2	traces
Labour minimal Levées	9,0+2,7	238+24	3,8+1,5	29+5	12,8	267
Labour minimal Levées à barrages	0,8+0,8	4+2	0	0	0,8	4

* Quantité mesurée avant que les barils ne flottent. La quantité réelle devait certainement être trop élevée.

** Le traitement 8 (mise en levées directe) n'est pas représenté dans cette table vu que le travail de la terre fut effectué après l'averse du 10/12/80, et qu'aucun ruissellement de surface ne fut enregistré après cette opération.

4.3.6.3 - Régime hydrique du sol

Après l'installation des tubes d'accès, et pendant tout le reste de la saison, il n'y eut qu'une seule averse importante (le 11.1.81). L'humidité du sol fut déterminée après cette averse, un mois plus tard, le 19.2.81, après une faible averse de 16mm au début de Février, et de nouveau le 29.3.81, après une autre averse de 20mm du 1.3.81, et la pré-irrigation de 120mm donnée par l'agriculteur pour préparer le champ à la culture du coton. Les profils hydriques obtenus sont donnés dans la figure 4.66.

Un examen des changements d'humidité entre les deux premières dates d'échantillonnage (14.1.81 et 19.2.81) montre qu'après l'averse du 11.1.81, les parcelles labourées furent les plus humides, et la profondeur de leur front d'humidification fut la plus grande. Lors du deuxième échantillonnage, ces mêmes parcelles furent à nouveau les plus humides. Les parcelles de levées à barrages reçurent également une quantité relativement importante d'eau d'infiltration. Cependant, leur front d'humidification ne fut pas aussi profond que celui des parcelles labourées, et la perte d'eau par évaporation y fut aussi plus grande durant la période entre les deux échantillonnages. On peut considérer comme évident que, lorsque le mode de précipitation ne provoque pas la détérioration de l'état rugueux et du stockage de la surface d'un sol cultivé en profondeur, comme ce fut le cas pendant cette période, une couche rugueuse à la surface, et lâche en dessous est meilleure pour la conservation de l'eau, même par rapport aux levées à barrages avec leur surface lisse et leur fine couche sous-jacente.

Toutes les parcelles montrèrent une augmentation significative du stockage d'humidité à la suite de la pré-irrigation de 120mm. Le changement dans le stockage d'humidité et la profondeur de pénétration furent plus variables que sous précipitation, mais il est clair que les parcelles de

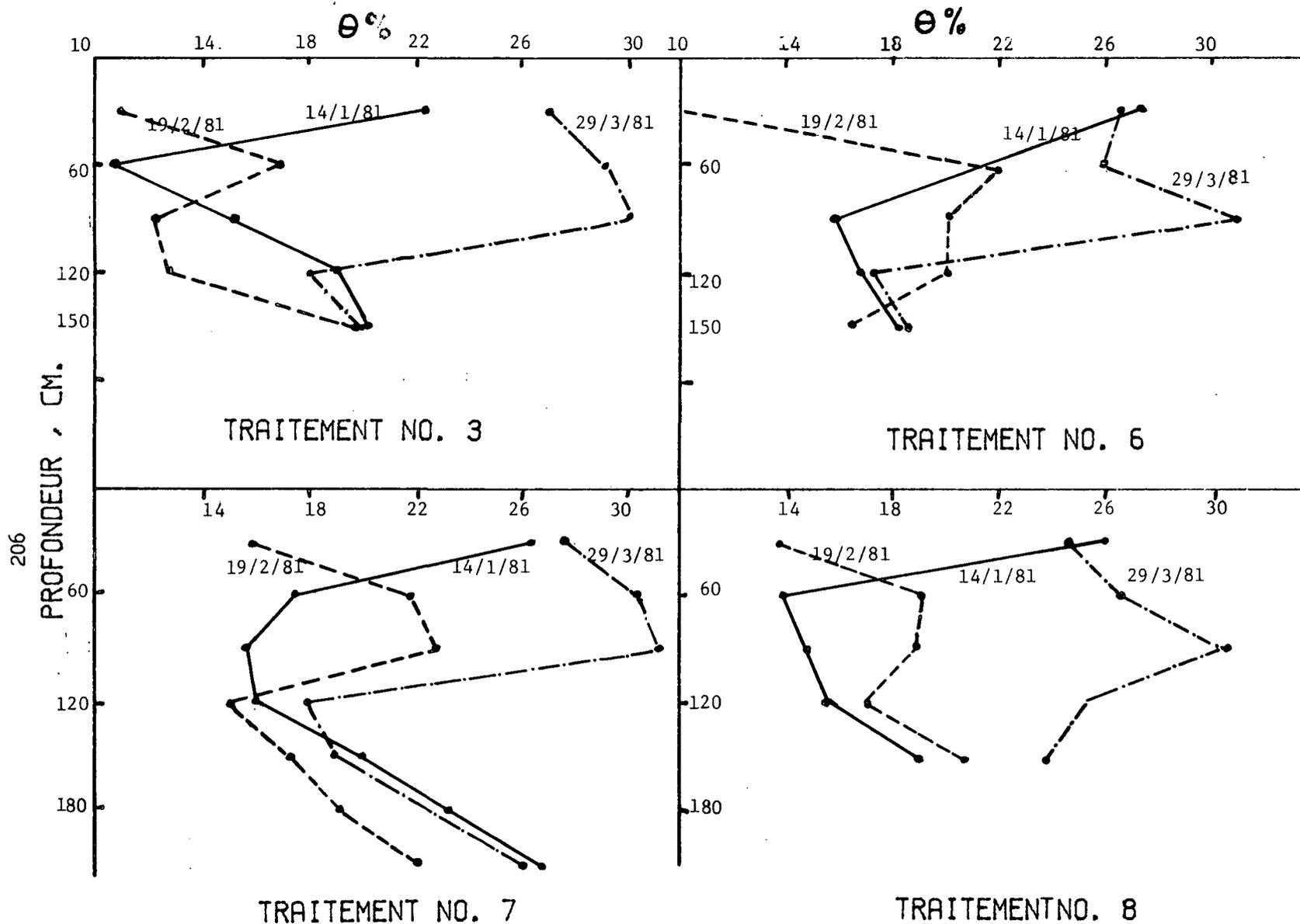
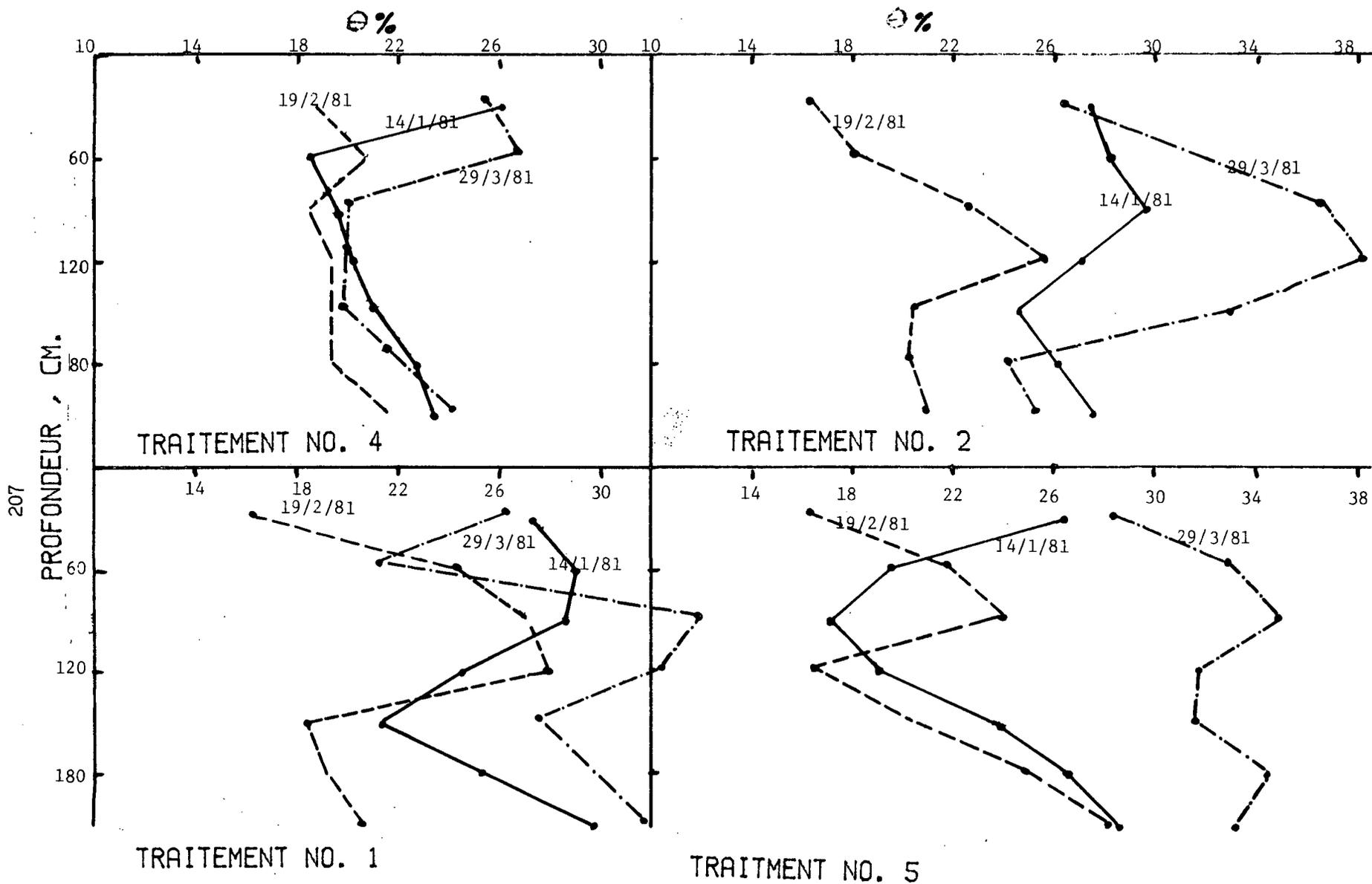


Fig. 4.66: Profils hydriques verticaux pendant la saison pluvieuse de 1980-81. (pour les traitements, voir page 160).

FIG. NO. 4.66 (SUITE)



labour profond et de levées à barrages , qui ont absorbé les plus grandes quantités d'eau, furent les plus humides après l'irrigation et eurent le front d'humidification le plus profond (figure 4.66). Dans l'une des parcelles de levées à barrages, il n'y eut qu'un faible changement dans le stockage, apparemment dû à un mauvais fonctionnement de l'un des asperseurs irriguant cet endroit.

Malgré la saison anormalement sèche, en rassemblant ces résultats avec ceux de l'hiver précédent, on peut conclure que, lorsque de grandes quantités de pluie sont fournies sous forme de grosses averses, comme c'est généralement le cas en Afrique de l'Ouest, et pour les grandes averses d'un hiver normal en Israël, les levées à barrages sont actuellement le moyen le plus efficace pour l'augmentation de l'infiltration et la conservation de l'eau. Les conséquences de ceci sont discutées en détail dans les sections traitant de l'analyse des modes de précipitation à long-terme en rapport avec les propriétés du sol.

4.3.6.4 - Rendements de blé

A cause de la saison inhabituellement sèche, les rendements de blé de cette région furent généralement très bas, avec des cultures qui échouèrent dans quelques champs. On a observé que dans les parcelles expérimentales, dans les premières étapes de la croissance, les graines germèrent assez bien dans les micro-bassins, malgré le fait qu'elles ne furent pas toutes suffisamment recouvertes de terre, et c'est pourquoi la pousse dans les bassins fut de plus faible densité et moins uniforme. Cependant, ces jeunes pousses donnèrent des plantes toutes rabougries, la plupart n'ayant pas de tête ni de grains. Si la saison avait été plus humide, on aurait pu attribuer ces faits à une mauvaise aération. Dans notre cas, l'eau a stagné

dans les bassins pendant un bon moment seulement à la suite de la première averse, et même si les plantes ont été soumises à une mauvaise aération pour une courte période, ceci ne peut pas, en toute logique, être la cause du rabougrissement. Par contre les bassins furent bordés par des plantes plus vigoureuses, qui compensèrent apparemment, au moins de façon partielle, la perte de rendement à l'intérieur des bassins. Les résultats du rendement sont donnés dans la table 4.35.

Table 4.35: Rendement de graines récolté en machine sur 120m² des parcelles de 150m², le 18/05/81.

TRAITEMENT	RENDEMENT KG/HA				SIGNIFICATION STATISTIQUE (F)
	REP. 1	REP. 2	REP. 3	MOYENNE	
Contrôle	892	1017	1017	975	
Lits larges (160cm)	1242	1483	1483	1403	22,3**
Levées étroites (60cm)	808	792	1292	964	0,004 NS

Il est évident que les micro-bassins, étant peu espacés, ne furent pas meilleurs que le traitement de contrôle. Quelque soit le gain obtenu par un meilleur approvisionnement en eau aux plantes entourant le bassin, il a été annulé par la perte de rendement à l'intérieur des bassins. D'autre part, le traitement à planches fut, dans ces conditions, nettement supérieur aux autres traitements. Après cette saison 1979-80, on a remarqué que l'efficacité d'un traitement particulier variait en fonction de la quantité des précipitations et de leur répartition dans la saison. On avait prévu que le système de levées à barrages serait particulièrement efficace avec des quantités de pluie

inférieures à la normale, dans la mesure, évidemment, où la sécheresse n'est pas trop sévère pour causer l'échec total de la culture. Cette saison fut un cas extrêmement limite d'échec des cultures, et même la surface de stockage limitée dans le traitement en planches fut utilisée surtout pendant la première averse. D'autre part, si cette saison avait été plus humide, le volume de stockage aurait été insuffisant pour empêcher le ruissellement de surface, mais l'infiltration des pluies aurait pu être suffisante dans le traitement de contrôle, comme l'hiver précédent. En saison modérément humide, l'efficacité du système de levées à barrages aurait été fortement influencée par le mode de répartition des pluies. Alors que les données de précipitations à long-terme peuvent être analysées en connaissant les fonctions d'infiltration (voir plus bas), le rendement de la culture, sous différents traitements, ne peut être déterminé que de façon empirique pour des saisons supplémentaires, dans le but d'évaluer l'efficacité d'un traitement, pour un éventail de conditions suffisamment large.

4.3.6.5 - Caractéristiques des précipitations à long-terme

Dans la table 4.36, sont rapportées les données des années 1964-65 à 1979-80, pour la station de Sa'ad, située à 3km au Nord-Est du site expérimental d'Alumim, et qui fait partie du réseau des stations du Service Météorologique Israëlien.

Table 4.36: Précipitations dans la région de Sa'ad - quantités, taux et érosivité.

SAISON COMMENCANT A LA FIN DE L'ANNEE	PRECIPITATION ANNUELLE TOTALE MM	EROSIVITE CUMULEE J.M-1HR-1	AVERSE LA PLUS GRANDE MM	I30-MAXI. TAUX DE 30 MIN.	EROSIVITE DE LA PLUS GRANDE AVERSE J.M-1HR-1	NOMBRE D'AVERSSES >50MM
1964	622	129,7	149	6,8	18,4	3
1965	247	104,6	173	19,7	69,3	1
1966	517	130,9	149	27,1	97,6	3
1967	457	143,6	102	22,8	46,3	3
1968	339	86,5	57	26,7	34,7	2
1969	216	51,3	46	10,3	9,2	0
1970	385	84,8	65	6,6	8,2	5
1971	476	109,0	43	18,8	17,4	0
1972	354	65,8	137	14,7	36,2	1
1973	519	129,2	102	17,4	33,8	6
1974	459	148,9	58	15,0	17,7	1
1975	248	26,0	41	7,9	6,0	0
1976	370	78,8	96	21,3	40,3	3
1977	320	118,6	44	19,8	17,9	0
1978	310	49,6	64	11,2	13,0	1
1979	570	128,0	84	20,6	35,0	3
\bar{x}	400	99,09	88,1	16,6	31,3	2
Sx	121	37,07	43,54	7,7	24,4	1,83

4.3.7 - Conclusions

4.3.7.1 - Saison d'hiver 1980-81

En terme de contrôle du ruissellement de surface et de l'érosion, les levées à barrages n'ont pas montré tout leur potentiel pendant cet hiver-là, à cause de la faible quantité totale de pluie et des caractéristiques des averses, en ce qui concerne leur apparition dans le temps et leur intensité. Deux averses seulement produisirent un ruissellement de surface, et juste en petite quantité. Environ 10mm de ruissellement ont quitté les parcelles de contrôle, et c'est pourquoi une quantité supérieure à celle-ci n'a pu être

recupérée. Il faut rappeler que, pendant l'hiver 1979-80, où à peine plus que 500mm de pluie sont tombés pendant la période d'observation, le ruissellement de surface des terres en jachère conventionnellement préparées (levées en préparation à la culture du coton) s'élevait à 60% des précipitations, alors que le ruissellement de surface du traitement de levées à barrages n'a pas dépassé 5%.

En contraste avec ces résultats de ruissellement et d'érosion, on voit que la combinaison de planches et de barrages de rigoles pour le blé produit une différence de rendement de 430 kg/ha, c'est-à-dire 145% du rendement du traitement de contrôle. Comme on n'a pas cultivé de blé l'année précédente, on a trouvé que, dans les parcelles en jachère, il n'y avait pas, dans la zone radriculaire, de grandes différences dans le stockage de l'humidité, au moment où le coton fut planté, car la pénétration des pluies fut suffisante pour humidifier toute ou presque toute la zone radriculaire, même sans aucune mesure spéciale de conservation. Dans ce cas, les différences entre les traitements s'exprimèrent uniquement en termes de différentes quantités de ruissellement et d'érosion, d'une part, et de percolation en profondeur d'autre part. En conséquence, on ne nota pas, pour le coton de "dryland farming" de l'été 1980, de grandes différences de rendement dues à l'efficience de la conservation de l'eau.

4.3.7.2 - Probabilités des précipitations à long-terme

Grâce aux données que l'on possède sur 16 années de précipitation, on peut calculer les probabilités de plusieurs caractéristiques d'averse; celles-ci sont présentées dans la table 4.37. Ceci nous permet de placer les résultats d'une saison particulière dans leur propre perspective, et d'évaluer leur importance. Ainsi, on voit que la saison 1980-81 a été particulièrement

sèche, et que la probabilité que la précipitation totale d'une année lui soit égale ou inférieure est seulement de 2% (une fois tous les 50 ans). Seule la première averse de la saison, le 10.12.80, a dépassé 50mm, avec une probabilité de 32% que ce nombre (le nombre d'averses de plus de 50mm) soit un ou nul. La taille de cette averse (64mm) fut environ la moyenne des averses les plus importantes (celles de plus de 50mm), avec une probabilité de 45%. Le taux maximal sur 30 minutes de cette averse (34.4mm/h) fut inhabituellement élevé, avec une probabilité de 5%. L'averse de Décembre a contribué pour la plus grande partie (73%) à l'érosivité de la précipitation saisonnière totale, bien que la quantité de pluie de cette averse ne représente que 30% du total saisonnier. Les autres averses de cette saison furent faibles en quantité et en énergie, ce qui représente un modèle saisonnier peu fréquent dans cette région.

Au contraire, la précipitation totale de l'hiver 1979-80, qui fut plus humide que d'habitude, a une probabilité de 10%, ou en d'autres termes, 90% des années sont susceptibles de recevoir une quantité de pluie inférieure à celle-ci. Six averses dépassèrent 50mm, ce qui a une probabilité de 1%. De même que la saison 1980-81 cependant, la probabilité d'une averse de 89mm (la plus importante) est de 7%. Les probabilités de l'érosivité cumulée et de l'érosivité de l'averse la plus grande furent respectivement de 15% et de 22%. Pendant les deux années d'observation, nous avons eu donc deux années consécutives inhabituelles, l'une étant l'extrême de l'autre. Pendant la plus humide des deux saisons, où un ruissellement et une érosion importants furent mesurés, les index d'énergie cinétique et d'érosivité concordèrent très bien avec les données mesurées. Le fait qu'il ait fallu apporter une correction par un facteur différent pour chaque traitement de préparation du sol, afin d'être en accord avec tout essai de prévision basé sur ces index,

démontre et confirme ce qui a déjà été dit dans une section précédente, à savoir que les caractéristiques des précipitations et les propriétés du sol sont impliquées. Bien entendu, ces dernières ne comprennent pas seulement les propriétés intrinsèques du sol, mais aussi les conditions provisoires, comme la teneur hydrique initiale et l'état de la structure de surface, qui dépend, entre autres facteurs, des opérations de préparation effectuées, et de l'historique des pluies précédant une pluie particulière.

Table 4.37: Les probabilités de différentes caractéristiques de précipitation saisonnière pour la région de Sa'ad-Alumim.

PARAMETRE	TYPE DE DISTRIBUTION	PROBABILITE, %							
		1	10	20	50	80	90	99	X2
Total annuel mm	Chow	767	559	420	382	299	263	197	0.758
	Normale	681	555	502	400	298	245	119	0.633
Quantité totale des averses >12mm	Chow	671	453	386	287	217	189	139	0.583
	Normale	568	451	402	308	213	164	47	0.633
Erosivité cumulée J.m-1hr-1	Normale	185	160	147	130	99	67	52	0.34
Nombre d'averses >50mm	Normale	6.2	4.2	3.5	1.9	0.4	*	*	0.63
Quantité maximale par averse, mm	Log-Normale	253	148	119	79	52	42	24	0.64
	Normale	192	144	125	88	51	32	*	0.94
Taux maximal sur 30 minute, mm/hr	Log-Normale	46	28	22	15	10	8	5	0.13
	Normale	32	25	22	17	11	8	1	0.84
Erosivité de l' averse la plus grande, J.m-1hr-1	Log-Normale	151	65	46	24	12	9	4	0.81
	Normale	89	63	32	31	11	0.04	*	0.44

* Le calcul a donné une valeur négative.

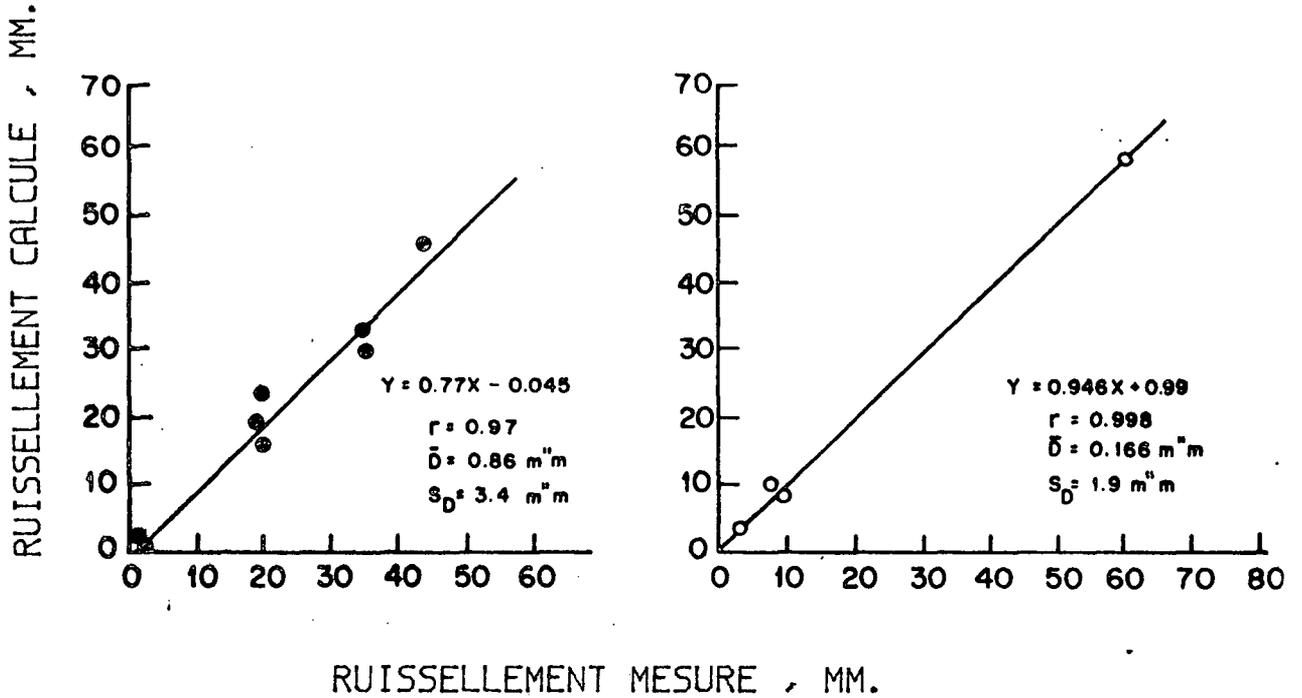
4.3.7.3 - Analyse à long-terme des probabilités de ruissellement de surface

Les caractéristiques d'infiltration du sol au site expérimental d'Alumim ont été déterminées en hiver 1979-80, à l'aide du simulateur de pluie, et ont été présentées dans le rapport précédent (Rawitz et autres, 1980). En appliquant ces données à l'équation décrite par Morin et Benyamini (1977), on a calculé les quantités prévues du ruissellement de surface des parcelles expérimentales, avec des données de pluie de la saison 1979-80, d'après la méthode de Morin et Jarosh (1977).

Les résultats sont représentés dans la figure 4.67a, ainsi que les données mesurées de sept averses. Comme les caractéristiques d'infiltration du sol furent déterminées sur la surface totale du champ expérimental, et non sur les parcelles-mêmes, en utilisant un simulateur de pluie à un taux d'approvisionnement constant et arbitraire, contrairement aux averses produisant le ruissellement mesuré, les valeurs prévues furent indépendantes des quantités de ruissellement mesurées. L'analyse statistique a donné une corrélation très élevée entre les valeurs de ruissellement observées et celles calculées, ce qui indique que la méthode est fiable. Les caractéristiques d'infiltration d'un sol loessique de Ruhama ont été déterminées par Morin et autres (1979), et les résultats des expériences au champ effectuées en hiver 1966-67, dans la région de Sa'ad, sur des parcelles de type Wischmeier, ont été publiés par Tamir et autres (1968). L'analyse des résultats de la station de Sa'ad, ainsi que les fonctions d'infiltration du sol loessique de Ruhama, sont donnés dans la figure 4.67b. La corrélation entre les valeurs de ruissellement prévues et observées est également très élevée dans ce cas. La comparaison des fonctions d'infiltrabilité des sols loessiques d'Alumim et de Ruhama montre que le taux de déclinaison de la fonction, ainsi que le taux final du sol d'Alumim sont plus faibles, et on peut donc conclure qu'une bonne

A) ALUMIM , 1979-80
CHAMP DE BLE

B) SA'AD , 1966-67
CHAMP DE BLE



Alumim

Sa'ad

DATE	AVERSE MM	RUISSELLEMENT DE SURFACE MESURE	RUISSELLEMENT DE SURFACE CALCULE	DATE	AVERSE MM	RUISSELLEMENT DE SURFACE MESURE	RUISSELLEMENT DE SURFACE CALCULE
29/11/79	63	20,0	23,9	17/12/66	157,0	60,5	58,0
06/12/79	42	19,0	19,7	27/01/67	63,3	8,9	9,2
14/12/79	52	35,0	29,1	03/02/67	23,3	3,4	3,8
27/12/79	66	20,0	16,2	15/02/67	51,3	7,7	10,5
07/01/80	67	35,0	32,6	19/02/67	12,8	0,4	0
23/01/80	89	44,0	46,0		308,0	81,0	81,5
10/02/80	12	2,2	1,5				
	39,1	175,0	169,0				

Fig. 4.67: Ruissellement de surface calculé et mesuré pour les sols loessiques.

prévision pour les deux sols différents de type loessique a été obtenue. L'analyse de probabilité du ruissellement de surface du début de la saison à Février, et celle de tout l'hiver sont représentées pour les deux sols dans la table 4.37 et la figure 4.68. Les valeurs du ruissellement de surface sont prévues pour une surface de stockage de 0,5mm, typique d'un sol préparé pour de petites graines, et de 15mm, ce qui représente un stockage pouvant être obtenu dans des champs à petites graines, avec de larges lits et des barrages de rigoles.

L'analyse indique que les quantités de ruissellement prévisibles sur le loess d'Alumim sont le double de celles du loess de Ruhama. En moyenne, un ruissellement de surface de 110mm est prévu pour Alumim, ce qui représente 25% de la précipitation moyenne. A un niveau de probabilité de 10%, cette quantité atteint 175mm. De telles quantités de pluie en excès peuvent être entièrement absorbées dans une terre en levées à barrages en jachère, préparé pour la culture du coton, terre qui a une capacité de stockage de surface d'environ 40mm, comme l'ont montré les expériences au champ de 1979-80.

Les calculs ont été faits séparément jusqu'au début Février (table 4.38 et figure 4.68), car, lorsqu'une terre est ensemencée de blé, la végétation est suffisamment développée à cette date pour protéger la surface contre la reformation d'une croûte par la pluie, et donc les coefficients de ruissellement sont plus bas. D'après une probabilité de 50%, le ruissellement saisonnier prévu sur champs de blé, avec une capacité de stockage de 15mm, est de 25 à 30mm, par comparaison avec 80 à 90mm pour une terre préparée de façon conventionnelle, avec une capacité de stockage de 0,5mm. En d'autres termes, en moyenne 50mm supplémentaires pourraient s'infiltrer. A un niveau de probabilité de 10%, 70 à 80mm supplémentaires pourraient s'infiltrer. L'approvisionnement supplémentaire en eau est d'une importance appréciable

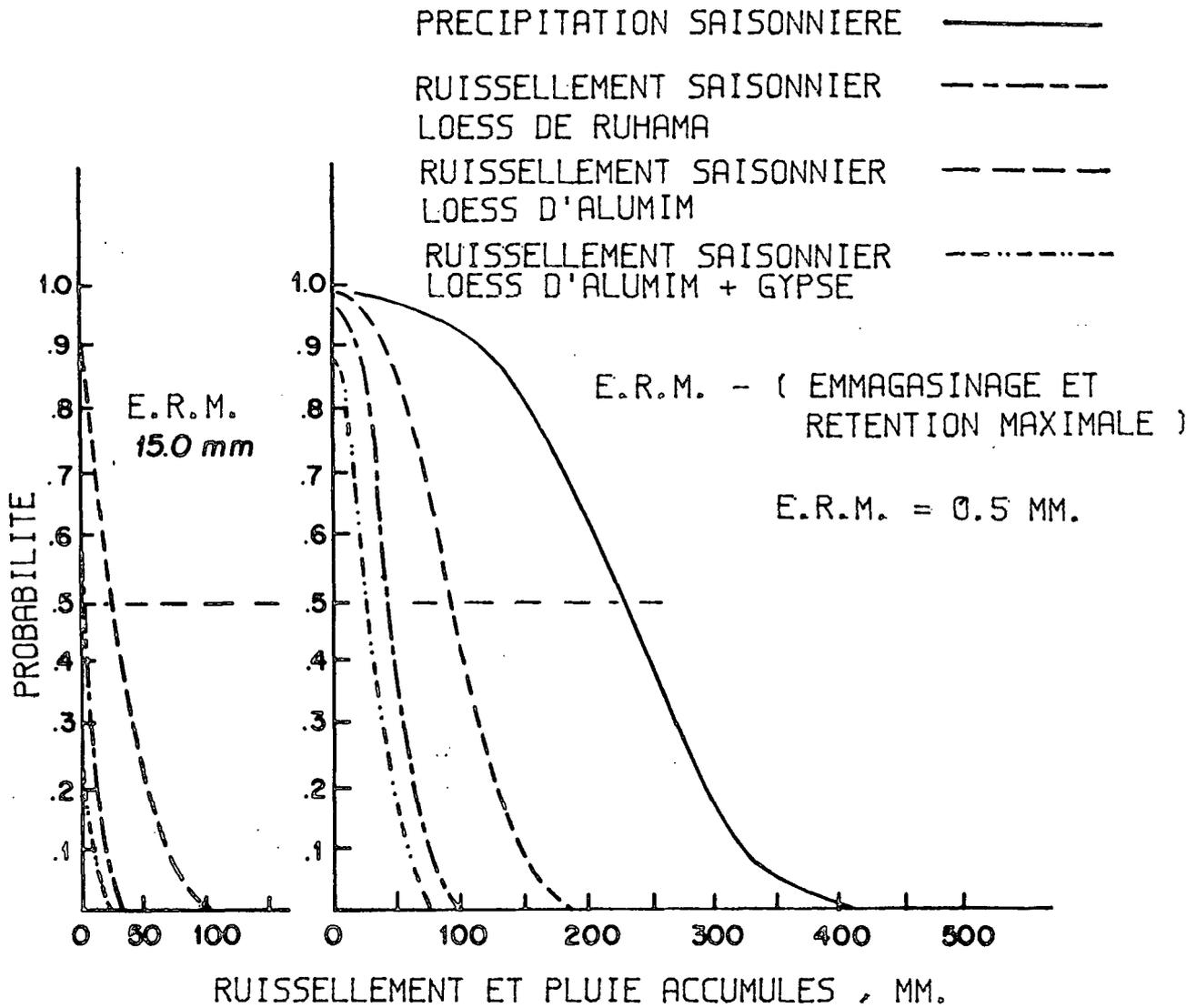


Fig. 4.68: Analyse de probabilité du ruissellement de surface, du début de la saison jusqu'à Février. Station de Sa'ad.

pour le rendement de blé dans cette région, en plus de l'avantage créé par la diminution des dégâts d'érosion. L'infiltration supplémentaire d'eau, à un niveau de probabilité de 50%, est inférieure dans le cas de Ruhama, environ 30 à 40mm.

Comme les dégâts d'érosion sont une fonction des caractéristiques des averses, il doit être intéressant d'évaluer, sur une base mensuelle, le ruissellement provoquant l'érosion pour les averses importantes. Le ruissellement de surface prévu pour différents sols, d'après le mode de précipitation de Sa'ad, est donné dans la figure 4.69, pour un niveau de probabilité de 50%, et ainsi que dans la figure 4.70 pour un niveau de probabilité de 10%. Les types de sol et les capacités de stockage de surface sont traités comme précédemment. Les résultats montrent qu'à un niveau de probabilité de 50%, le ruissellement mensuel maximal d'une seule averse peut atteindre 25 à 30mm en Décembre et Janvier, pour une préparation conventionnelle du lit de semence, contre 5 à 8mm pour le système en planches et de barrages de rigoles, sur le sol d'Alumim. A un niveau de probabilité de 10%, les valeurs respectives sont de 50 à 60mm, contre 30mm. D'après ces résultats, il est donc possible de diminuer de façon appréciable, mais pas d'éliminer complètement, les dégâts d'érosion dus au ruissellement d'une terre à petites graines.

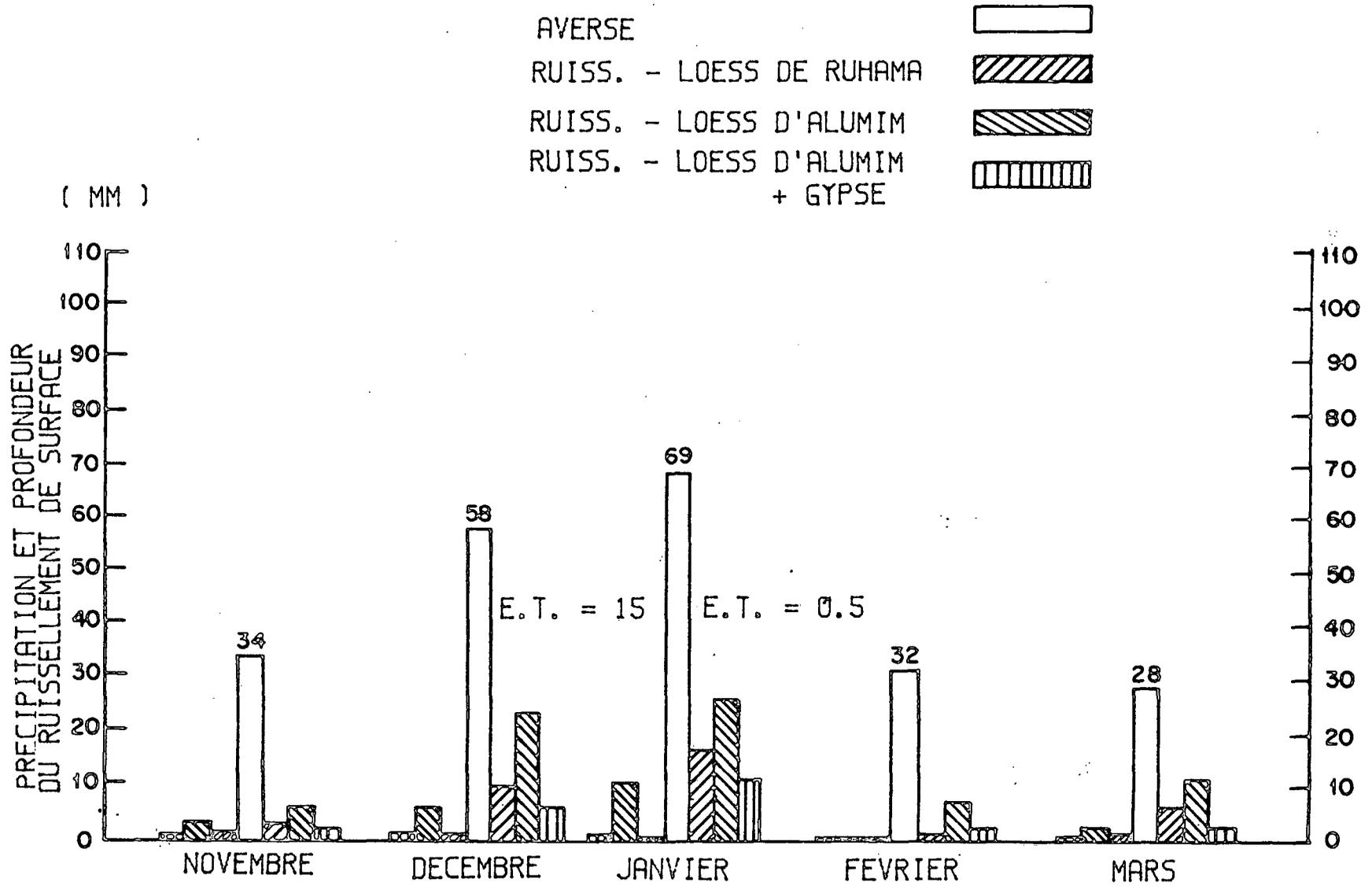


Fig. 4.69: Précipitation et ruissellement de surface des averses.
Valeurs calculées pour une probabilité de 50%.

PRECIPITATION ET PROFONDEUR
DU RUISSELLEMENT DE SURFACE

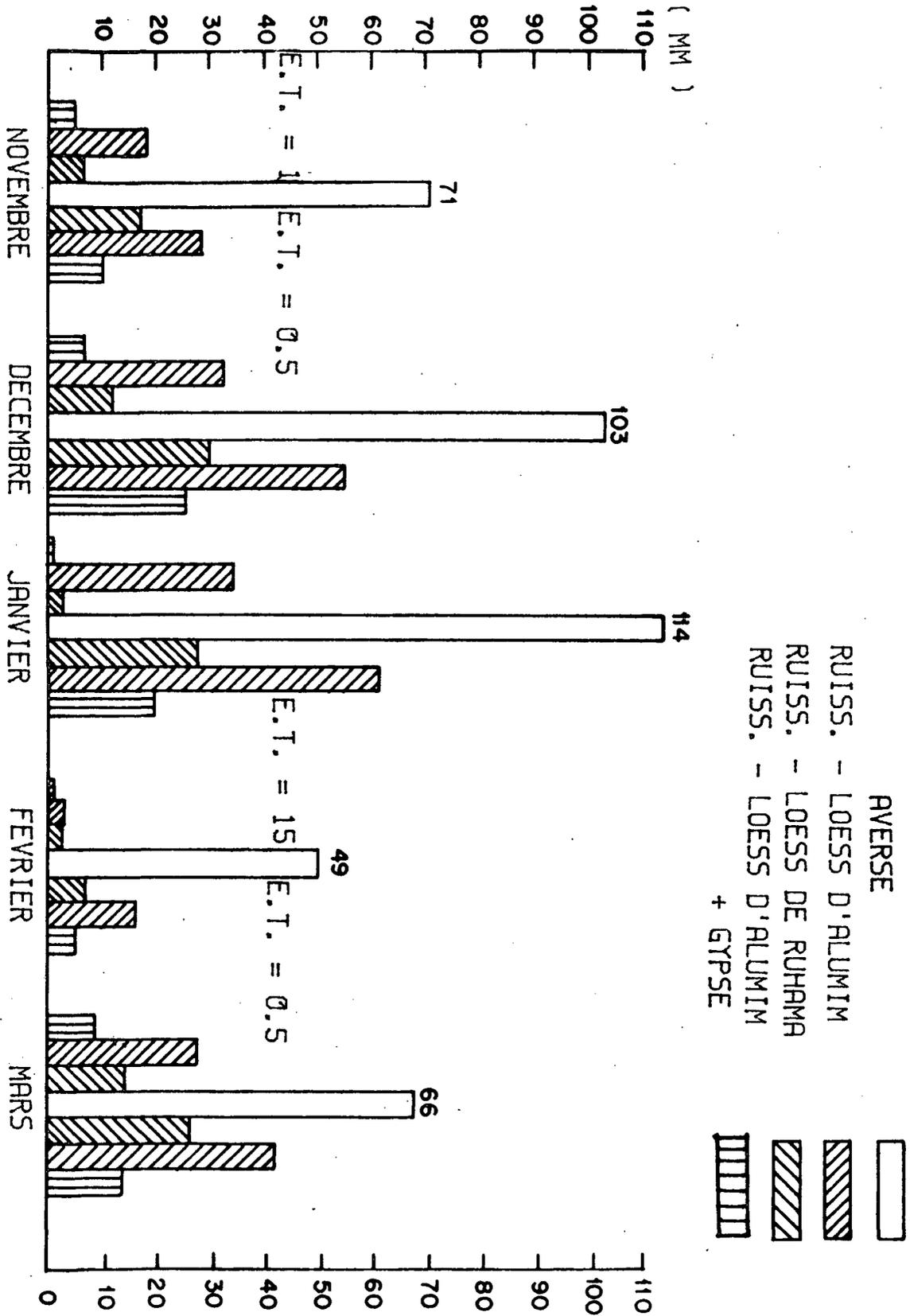


Fig. 4.70: Précipitation et ruissellement de surface des averses.
Valeurs calculées pour une probabilité de 10%.

Table 4.38: Analyse de probabilité du ruissellement de surface basée sur les précipitations de Sa'ad.

DONNEES CALCULEES	TYPE DE DISTRIBUTION	VALEUR DU RUISELLEMENT DE SURFACE POUR UNE PROBABILITE DONNEE							
		1%	10%	20%	50%	80%	90%	99%	X2
Ruissel. de surface total annuel	Chow	306	194	161	116	87	76	58	0,00
Stockage de surface du loess d'Alumim (0,5mm)	Normale	249	195	172	128	84	61	7	0,571
Ruissel. de surface total annuel	Chow	154	93	76	52	38	33	25	0,665
Stockage de surface du loess de Ruhama (0,5mm)	Normale	122	94	82	59	36	24	0	0,970
Ruissel. de surface saisonnier après le 1 Février	Log-Normale	283	165	131	85	55	44	25	0,41
Stockage de surface du loess d'Alumim (0,5mm)	Normale	187	145	128	94	61	43	2	0,44
Ruissel. de surface saisonnier après le 1 Février	gumbl	109	63	48	26	9	2	0	0,92
Stockage de surface du loess d'Alumim (15mm)	Normale	89	62	51	30	9	0	0	0,78
Ruissel. de surface saisonnier après le 1 Février	gumbl	88	55	44	28	16	11	2	0,35
Stockage de surface loess - gypse d'Alumim (0,5mm)	Normale	74	55	47	31	16	8	0	0,40
Ruissel. de surface saisonnier après le 1 Février	gumbl	19	10	7	2	0	0	0	0,37
Stockage de surface loess - gypse d'Alumim (15mm)	Normale	15	10	7	3	0	0	0	0,06
Ruissel. de surface saisonnier après le 1 Février	gumbl	108	79	59	41	28	22	11	0,60
Stockage de surface du loess de Ruhama (0,5mm)	Normale	92	92	61	44	27	18	3	0,76
Ruissel. de surface saisonnier après le 1 Février	gumbl	34	18	13	5	0	0	0	0,36
Stockage de surface du loess de Ruhama (15mm)	Normale	27	18	14	6	0	0	0	0,15

4.3.8 - Résumé

Les pluies de l'hiver 1980-81 n'ont atteint que 54% de la précipitation annuelle moyenne, et ont été également caractérisées par une faible intensité. Ainsi, seul un faible ruissellement de surface a été produit dans la région d'Alumim, et le système de levées à barrages n'a pu donner qu'un avantage limité du point de vue du contrôle du ruissellement de surface et de l'érosion. L'analyse à long-terme des modes de précipitation et de l'infiltrabilité du sol indique que le système des levées à barrages est supérieur à la préparation conventionnelle de la terre pour des cultures de petites graines ou en rangées, du point de vue de la conservation de l'eau et de l'érosion.

Sur une terre en jachère d'hiver, les levées à barrages peuvent éliminer entièrement le ruissellement de surface et l'érosion, et conserver en moyenne plus de 110mm d'eau par saison. Il faut poursuivre les recherches afin de déterminer les méthodes optimales, au point de vue technique et économique, pour la construction des barrages de rigoles, et d'étudier le rendement de chaque méthode sous des conditions différentes de sol et de climat.

Sur une terre à petites graines, la construction de barrages de rigoles entre les lits larges peut résulter dans l'absorption d'une moyenne de 50mm supplémentaires d'eau dans la région de Sa'ad. Ce système, en lui-même, ne peut pas éliminer complètement les dégâts d'érosion provoqués par des averses lourdes et peu fréquentes. L'amélioration du rendement peut être obtenue par une application de gypse, et ceci demande des recherches supplémentaires. Il reste d'autres questions à résoudre, comme des méthodes agrotechniques et l'espace optimal entre deux rangées, afin de tirer profit de tous les avantages potentiels de ce système.

4.4 - Infiltration de l'eau dans les sols à croûte.

L'eau joue évidemment un rôle important dans la production agricole de la région semi-aride de la Savanne et du Sahel en Afrique de l'Ouest: Uniquement d'après les données météorologiques, la quantité totale de précipitation pendant une saison pluvieuse donnée devrait être suffisante pour obtenir un rendement raisonnable dans les cultures de plusieurs années. Cependant, en pratique, le manque d'eau est encore souvent assez important pour obtenir une production optimale pendant ces années. D'après les observations faites par les chercheurs du projet "PPS", on a trouvé que, sur les sites expérimentaux proches de Niono (au Mali), certains types de sol montraient la formation d'une croûte de surface, (Stroosnijder, 1977). Ce phénomène n'est pas inconnu, et il a déjà été rapporté par d'autres chercheurs, également en Afrique de l'Ouest, (voir revue bibliographique). On a trouvé qu'un pourcentage élevé d'eau de pluie ne pénètre pas dans le sol à l'endroit où elle tombait, mais que cette eau de pluie était transportée, sous forme de ruissellement, le long de la surface. En conséquence de cela, il y a généralement une végétation riche dans les dépressions des sols sableux formant une croûte, alors que sur les pentes et sur les niveaux plus élevés, il y a souvent un manque d'eau et une végétation moins importante.

Sur les champs de culture, les agriculteurs locaux doivent également se mesurer avec les problèmes de croûte; le sol doit être cultivé de nombreuses fois pendant la période de culture, afin d'améliorer l'infiltration et d'empêcher ainsi la perte d'eau par ruissellement de surface. L'occurrence et le processus de formation de la croûte sont décrits en détail dans l'appendice 2. Cependant, il est important de mentionner qu'il faut distinguer deux types de croûte: une croûte agissant comme une barrière à l'émergence des jeunes pousses et au mouvement de l'eau, et une croûte plus

fine, agissant comme une barrière uniquement au mouvement de l'eau. La première, la plus facile à observer, est généralement créée par la désintégration des agrégats à la surface du sol, à cause de l'impact des gouttes de pluie, ou même à cause de l'immersion dans l'eau. Après le dessèchement, se forme une croûte de matériau dense et sans structure, souvent combinée à une "cimentation" de la couche inférieure, constituée d'agrégats mouillés mais intacts. On peut rencontrer ce type de croûte sur de nombreux sols formant des agrégats instables. Le deuxième type de croûte, qui est beaucoup moins évident, se rencontre principalement sur sols sableux ou sur sables de terre rouge à structure monogranulaire.

Le mécanisme physique de la formation de la croûte, tel qu'il a été expliqué dans les travaux de Morin (1981), est à peu près le suivant: sous l'impact des gouttes de pluie qui tombent, des particules limoneuses et argileuses se détachent des plus gros grains de sable se trouvant à la surface du sol. Les petites particules forment une suspension colloïdale dans l'eau de pluie; à cause de la succion des couches sèches sous-jacentes, ce matériel en suspension est attiré vers le bas avec l'eau, à travers les espaces vides se trouvant entre les grains. Ces espaces se bouchent alors avec ces particules orientées, et ainsi, une très fine couche argileuse se forme. Cette couche (souvent bien plus fine qu'un millimètre) a une très faible conductivité hydraulique. Ce phénomène peut aussi se produire sur des sols sableux avec un faible pourcentage d'argiles.

La croûte à la surface d'un sol perméable (sols sableux) peut sérieusement diminuer l'infiltrabilité du sol. Il est presque impossible, cependant, de mesurer la conductivité de la croûte elle-même, d'autant plus que sur les sols sableux l'épaisseur de la croûte peut être inférieure à 1mm. Pour les cultures en champ, il est important de connaître

les propriétés d'infiltration (conductivité) pendant la formation de la croûte, c'est-à-dire pendant l'averse et la période de dessèchement qui lui succède. Les mesures de l'infiltration prises par un infiltromètre standart à double anneau, en utilisant une tête hydraulique constante à la surface du sol, ne conviennent pas aux sols à croûte. Ici, en plus de la présence d'une couche d'eau d'environ 50mm à la surface, l'impact des gouttes de pluie, qui désintègre les agrégats de surface et provoque la formation de la croûte, n'est pas pris en compte. Le meilleur moyen d'étudier ce processus pour comprendre son influence sur le bilan hydrique d'un champ est d'utiliser, par exemple, un simulateur de pluie. (Pour obtenir des détails techniques concernant les études sur l'infiltration, se rapporter à l'appendice 3 et à Stroosnijder, 1980).

4.4.1 - Simulateurs de pluie

Le principal avantage de l'utilisation des simulateurs de pluie sur les pluies naturelles, pour des travaux de recherche, est que l'on peut effectuer des expériences (presque) en tout temps et en tout lieu; les études sous pluies naturelles doivent durer beaucoup longtemps de façon à couvrir un éventail d'évènements suffisamment important pour que les résultats soient fiables. D'autre part, le simulateur de pluie peut couvrir seulement une petite surface, et la précipitation produite est tout à fait équivalente à une précipitation naturelle (cf. Anon., 1979), en particulier en ce qui concerne les caractéristiques suivantes:

- a. la taille des gouttes et leur distribution,
- b. la vitesse des gouttes sur l'impact,
- c. l'intensité de l'averse.

On peut distinguer deux différents types de simulateurs: le type à

goutte-à-goutte, et le type à aspersion (buse). Les expériences au Mali de 1978 furent réalisées avec un simple simulateur à goutte-à-goutte. En 1979, on utilisa le type à aspersion, comme celui développé par Morin (Morin, Goldberg et Seginer, 1967). L'unité fut construite par l'atelier du TFDL de Wageningen, avec la structure de support décrite par Rawitz et autres (1972). Des détails sur les simulateurs de pluie et leur utilisation, ainsi que les résultats de ces expériences, sont donnés dans l'appendice 3.

4.4.2 - Procédé (Mali)

La taille d'une parcelle dans les expériences de 1979 fut de 1.5m x 1.5m. L'intensité de la pluie fournie fut maintenue à un taux constant de 49mm/h. Les raisons de l'utilisation d'une seule intensité furent les suivantes:

- a. la courte durée du temps disponible,
- b. les résultats des travaux de Morin, indiquant que c'est le volume cumulé de pluie fournie qui détermine le taux d'infiltration, presque indépendamment de l'intensité.

De ce fait, dans la plupart des cas, le ruissellement de surface ne débutera qu'un certain temps après le début des expériences (lorsque le taux d'infiltration I tombera à une valeur inférieure à l'intensité des précipitations P). Ceci explique les taux d'infiltration initiale très élevés qu'on obtient quelquefois lors du tracé de la courbe. Cependant, pour l'usage pratique (dans les calculs ultérieurs), ceci ne représente pas un problème, car cela signifie que la surface du sol supportera une pluie de n'importe quelle intensité tout au début d'une averse.

Plusieurs expériences de simulateur ont été réalisées sur sol S1, sur onze parcelles proches les unes des autres:

Parcelles 1 et 2: sol nu, non remué, plat, n'ayant pas été cultivé pendant

de longues années.

Parcelles NON1 et NON2: comme 1 et 2, mais pulvérisées par un détergent (Shell NONIDET).

Parcelles 01: comme 1 et 2, mais la croûte a été ôtée superficiellement.

Parcelles P1 et P2: labourées.

Parcelles P3-P6: labourées, levées (le long de la pente) faites à la houe.

Les conditions des différentes expériences sont présentées dans la table suivante:

PARC. N°	EXP. N°	CONDITION DE LA PARCELLE	TEMPS ECOULE		PARC. N°	EXP. N°	CONDITION DE LA PARCELLE	TEMPS ECOULE	
			DEPUIS L' EXPERIENCE PRECEDENTE					DEPUIS L' EXPERIENCE PRECEDENTE	
1	1	sec			P1	5	sec		
	2		1 jour	6		1 jour			
	11		14 jours	10		11 jours			
	34		38 jours	17		4 jours			
(+ travail à la houe)									
2	3	sec			P2	7	sec		
	4		1 jour	8		1 jour			
	12		13 jours	9		10 jours			
	35		38 jours	18		4 jours			
(+ travail à la houe)									
NON 1	13	sec			P3	19	sec		
	16		1 jour	20		1 jour			
	23		5 jours	32		6 jours			
	36		31 jours						
NON 2	14	sec			P4	21	sec		
	15		1 jour	31		5 jours			
	24		5 jours						
0 1	28	sec			P5	25	sec (seul. 30min. de pluie)		
	29		2 jours	26		1 jour			
	33		28 jours	P6		27		sec (seul. 30min. de pluie)	
		30	2 jours						

En général, on peut distinguer trois conditions différentes:

1. Un sol sec, soit non remué après la saison sèche (ou la période de jachère), soit labouré de fraîche date, mais avec un profil presque sec, et n'ayant pas reçu de pluie depuis le labour.
2. La situation peu de temps après une précipitation (un ou deux jours), où le profil du sol et la surface du sol sont mouillés; une croûte s'est formée lors de la précédente précipitation.
3. La situation où la croûte est présente, mais la surface du sol est sèche.

On s'est efforcé d'inclure ces situations typiques dans chacun des traitements. Pendant chaque essai, la pluie fut fournie jusqu'à ce que l'équilibre entre I et P fût atteint.

4.4.3 - Résultats

Tous les résultats ne sont pas donnés ici, mais seulement un certain nombre de courbes représentant le taux d'infiltration I en fonction de la précipitation cumulée Pt. Ceci est identique à I en fonction de t, puisque P est constante.

4.4.3.1 - Parcelles non remuées.

Quelques résultats des expériences sur les parcelles 1 et 2 sont donnés dans la figure 4.71; les courbes 1 et 3 montrent l'infiltration pendant une précipitation sur un sol initialement sec. Il s'agissait d'un sol n'ayant pas été remué (peut-être seulement foulé par quelques personnes). Après une pluie de 60mm, une I constante (If) d'environ 11mm/h fut atteinte. Les essais du lendemain (courbes 2 et 4) montrent l'effet de l'humidification et la

formation d'une croûte, une faible If de 10mm/h fut atteinte après seulement 8mm de pluie.

Les autres essais ne sont pas représentés dans la figure, les courbes obtenues furent intermédiaires entre les premières et les secondes. Pour les valeurs de If de ces essais, il faut se rapporter à la table 4.39. Les résultats des expériences sur la parcelle 01 sont également montrés sur la figure 4.71; la courbe 28 représente l'infiltration dans un sol dont les 5mm supérieurs furent enlevés. I fut initialement plus élevée qu'en 1 et 3, puis est retombée jusqu'à une valeur If d'environ 20mm/h, ce qui est beaucoup plus élevé que l'If des courbes 1 et 3, mais indique qu'une croûte s'est formée pendant la précipitation. Après deux jours (courbe 29), l'If fut atteinte plus tôt, bien que sa valeur ne fut que de 17mm/h. Le résultat d'une "altération atmosphérique" est montré par la courbe 33, avec une If de 8.5mm/h. Les résultats des parcelles pulvérisées ne figurent pas ici, leurs courbes furent à peu près semblables à celles des parcelles 1 et 2, et le détergent n'eut pas d'effet positif observé.

4.4.3.2 - Parcelles travaillées.

Quelques parcelles furent labourées au début de la saison pluvieuse (fin Mai) avec une petite charrue à versoir (10-15cm de profondeur) dans un sol dont l'humidité (en poids) était d'environ 6%. Les parcelles furent protégées de pluie, jusqu'à l'essai "sec".

Dans la figure 4.72, on peut trouver un résumé des trois expériences de "base" sur chaque parcelle. La très grande augmentation dans la capacité d'infiltration due au travail de la terre est montrée dans les courbes 5,7,19 et 21. If n'est atteinte qu'après 100 à 200mm de pluie, et la valeur réelle de If n'est alors que de 35 à 40mm/h. Le second essai

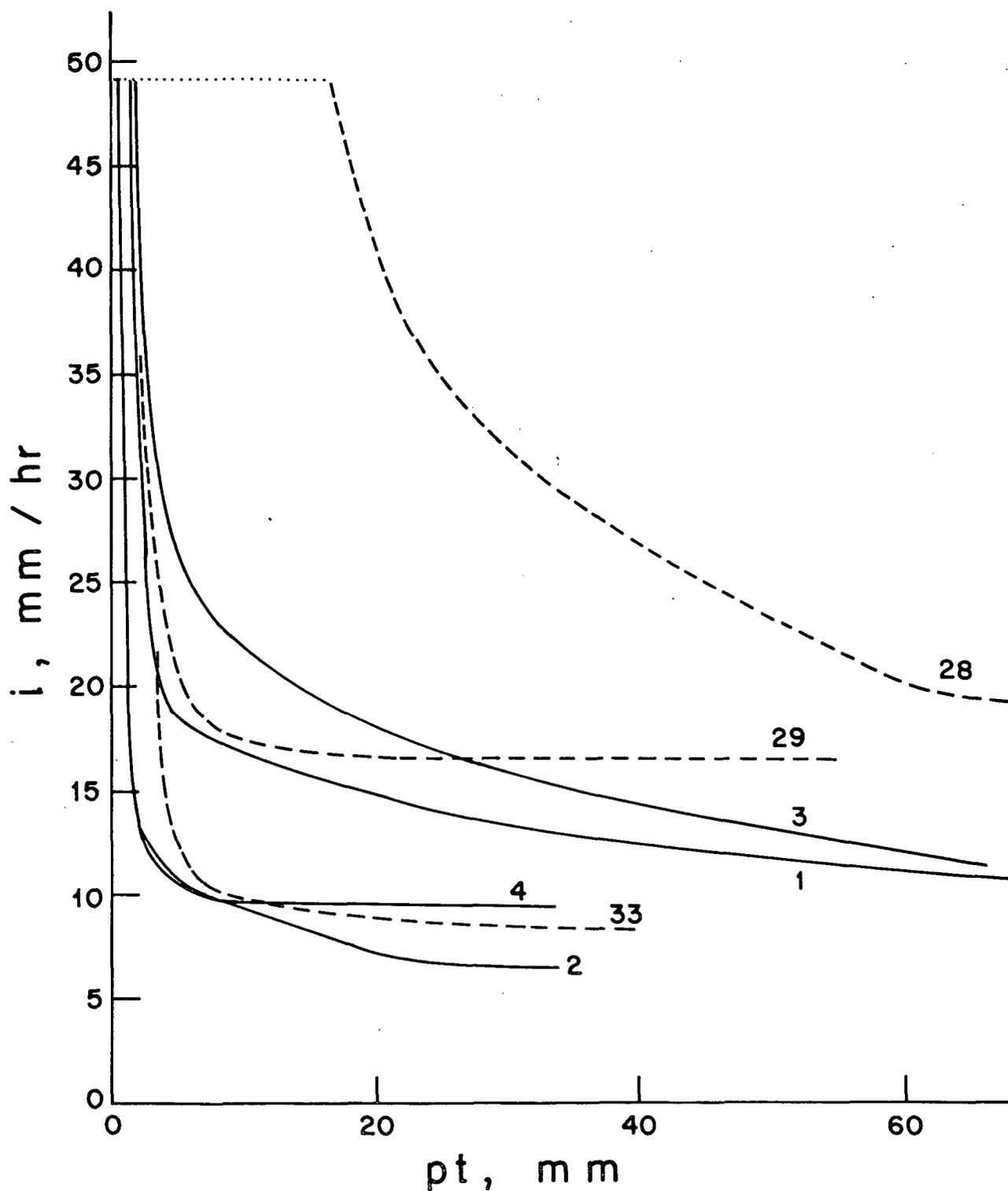


Fig. 4.71: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie.
Parcelles non remuées, (Mali).

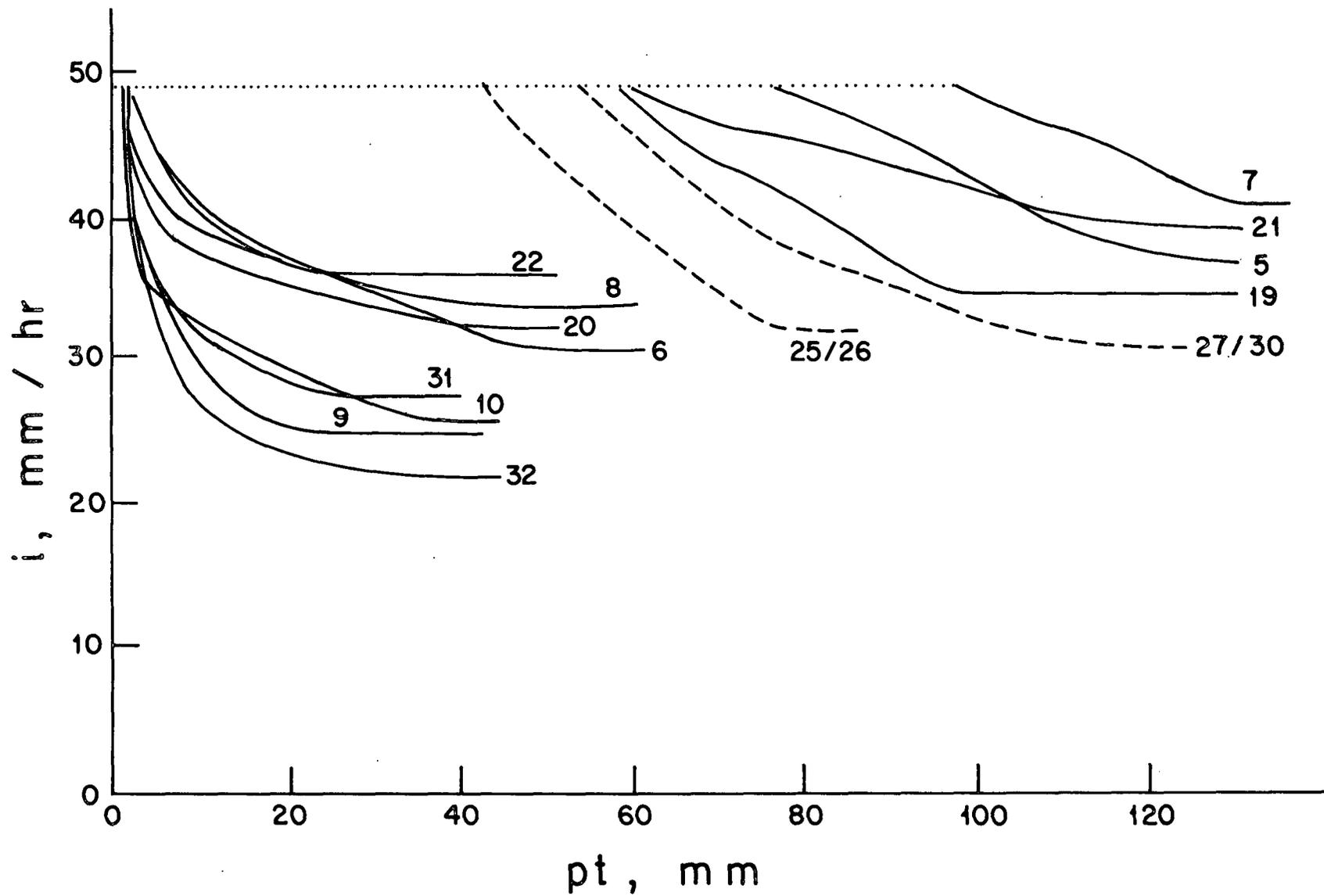


Fig. 4.72: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie.
Parcelles préparées, (Mali).

(exp. 6,8,20,22) réalisé le lendemain, montre que, bien qu'If ne fût pas beaucoup plus basse (30-36mm/h), cette valeur a été atteinte après 20 à 40mm de pluie. Après le dessèchement de la croûte et de la couche arable (exp. 9,10,31 et 32) après 5 à 10 jours, If fut plus basse (22-28mm/h), et fut atteinte encore plus tôt. La figure 4.72 montre également qu'il existe une grande différence entre le labour et la mise en levées, bien que le labour donne un stockage de surface supérieur (le ruissellement de surface pendant les expériences 5 et 7 débute plus tard). Un aspect important du travail de préparation de la terre est le fait qu'If reste élevée après la première pluie (environ 35mm/h comparé à environ 11mm/h pour les parcelles non remuées). L'altération (par les éléments météorologiques) sous la forme de cycles de mouillage et d'assèchement, peut avoir un effet positif sur la formation de la croûte (comme l'a montré Hillel, 1960). Les expériences 25/26 et 27/30 sur les parcelles (en levées) P5 et P6 montrent bien un tel effet; le premier essai fut effectué sur 30 minutes seulement, le second (après deux jours) fut effectué jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. Les courbes cumulées de la figure 4.72 montrent que l'If a été atteinte plus tôt. Ceci indique que l'interprétation des résultats doit se faire attentivement; des petites averses nombreuses produiront une croûte plus tôt qu'une seule pluie de même volume.

4.4.3.3 - Le tracé des courbes

En physique des sols et en sciences d'irrigation, de nombreuses relations entre le taux d'infiltration et le temps (ou le volume de pluie cumulée) ont déjà été proposées. Pour exploiter les résultats des expériences avec les simulateurs de pluie (c'est-à-dire pour calculer le bilan hydrique d'un champ, ou pour introduire ces résultats dans des modèles calculant le ruissellement

de surface en se servant des données de précipitation), il est nécessaire de trouver une relation mathématique entre le taux d'infiltration et le temps ou la précipitation cumulée. Avec les courbes obtenues de l'infiltration en fonction du volume (ou du temps), on a essayé d'ajuster deux types d'équations: a. la courbe de "sorptivité", (Stroosnijder, 1976), basée sur le principe que le taux d'infiltration décroît comme l'inverse de la racine carrée du temps:

$$I_t = a + bt^{-1/2}$$

b. la relation proposée par Morin et Benyamini (1977), dans laquelle le taux d'infiltration est une fonction du volume de pluie cumulée, ainsi que le montre la formule suivante:

$$I_t = I_f + (I_i - I_f) \exp(-\gamma p.t)$$

où:

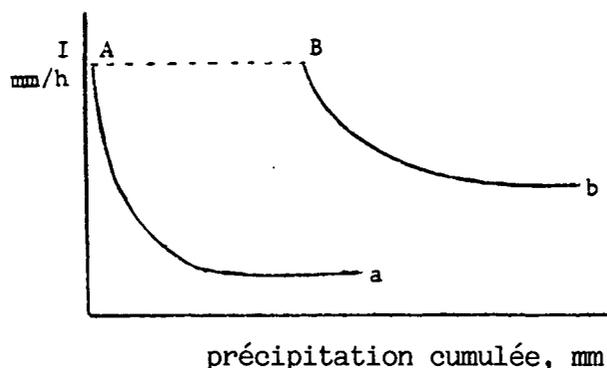
I_f = taux d'infiltration finale

I_i = taux d'infiltration initiale

γ = coefficient du sol, se rapportant aux propriétés de la croûte

$p.t$ = pluie cumulée (intensité de la pluie P x le temps t).

L'équation de Morin devrait être appropriée au cas où l'infiltration est influencée par la formation d'une croûte à la surface. D'après les travaux avec les simulateurs de pluie, une courbe représentant le taux d'infiltration en fonction de la pluie cumulée aura la forme générale suivante:



La ligne en pointillés représente l'intensité de la pluie fournie.

On peut distinguer deux "cas":

- a. le ruissellement de surface commence immédiatement après le début de la pluie.
- b. le ruissellement de surface ne commence que lorsqu'un certain volume de pluie a atteint la surface.

Le cas (a) est typique d'une situation où la capacité de stockage de surface est nulle ou très faible, et la capacité d'infiltration initiale est plus faible que l'intensité des précipitations.

Le cas (b) est la cas d'un sol avec un taux d'infiltration initiale élevé, et/ou une forte capacité de stockage de surface. Pour le tracé de la courbe, il ne faut pas extrapoler les résultats d'origine à gauche des points A et B, car ces zones ne sont pas applicables au ruissellement de surface.

Les équations obtenues à partir du tracé de la courbe peuvent avoir des taux d'infiltration initiale très élevés (plus élevés que cela n'est réalisable en pratique), mais il faut noter que la pluie tombant pendant la première période ne causera en fait aucun ruissellement de surface.

Les paramètres expérimentaux obtenus pour les deux types de courbe sont

donnés dans les tables 4.39 et 4.40. Pour les parcelles non remuées et de levées, il est préférable de faire une approximation des courbes du taux d'infiltration en fonction de $P \times t$ sous condition de croûte, par une courbe exponentielle, tandis que pour le tracé des courbes des parcelles non encroûtées, il y a une légère différence entre la sorptivité et les relations exponentielles.

4.4.3.4 - Taux d'infiltration finale

Les résultats des taux d'infiltration finale sont présentés dans la table 4.41.

Pour les parcelles non remuées, le modèle est évident: le taux d'infiltration finale un jour après le premier essai de pluie est le plus bas, (comparé au premier essai et au suivant). Ceci est probablement dû à la haute teneur hydrique du profil du sol (parcelles 1, 2, NON1 et NON2). L' I_f de la parcelle 01 est la plus basse après le dernier essai, ici l'altération par des éléments météorologiques a probablement rendu la (nouvelle) croûte encore plus imperméable. Le labour et les levées ont une très grande influence sur le taux d'infiltration, comme le montrent non seulement la valeur de I_f , mais aussi la quantité de pluie requise pour atteindre le taux final.

La valeur du taux d'infiltration finale est particulièrement importante pendant les pluies de longue durée, mais aussi dans les cas où l'eau peut être emmagasinée dans les dépressions à la surface pour empêcher le ruissellement.

Table 4.39: Paramètres de courbe, parcelles non remuées.

		Formule exponentielle:				Formule de "sorptivité"			
		$I_t = I_f + (I_i - I_f)e^{-\gamma P t}$				$I_t = a + b t^{-1/2}$			
PARC. N°	EXP. N°	I_i	I_f	γ	COEF. DE CORREL.*	a	b	COEF. DE CORREL.*	
1	1	30,7	11,0	0,118	0,891	7,44	34,52	0,885	
	2	22,5	6,7	0,260	0,941	3,54	19,20	0,944	
	11	21,4	7,7	0,064	0,998	5,74	26,16	0,916	
	34	95,4	10,5	0,622	0,987	1,25	42,30	0,716	
2	3	33,0	11,5	0,059	0,970	5,81	58,00	0,981	
	4	35,6	9,6	0,779	0,998	-2,52	32,53	0,859	
	12	36,0	16,3	0,053	0,995	13,99	38,02	0,896	
	35	30,5	14,0	0,155	0,978	6,84	39,74	0,917	
NON 1	13	48,7	0,0	0,059	0,998	-7,02	97,60	0,918	
	16	17,7	3,8	0,087	0,908	0,69	28,09	0,908	
	23	50,5	10,5	0,252	0,975	0,92	49,68	0,909	
	36	64,1	8,5	0,426	0,962	1,80	35,54	0,833	
NON 2	14	38,1	12,5	0,076	0,995	6,59	57,01	0,992	
	15	72,4	5,8	0,339	0,998	-7,84	66,77	0,953	
	24	61,1	8,7	0,306	0,997	-7,08	70,29	0,945	
0 1	28	109,6	19,2	0,065	0,993	-11,27	269,22	0,986	
	29	92,1	16,3	0,580	0,995	11,30	25,56	0,759	
	33	2707,9	8,5	1,455	0,992	-0,81	44,52	0,712	

* L'adaptation de la courbe ne recouvre que la partie descendante. Il faut se rappeler, en considérant les coefficient de corrélation pour la formule de sorptivité, que la courbe adaptée dévie de la courbe expérimentale après que I_f soit atteinte.

Table 4.40: Paramètres de courbe, parcelles labourées.

		Formule exponentielle:				Formule de "sorptivité"			
		$I_t = I_f + (I_i - I_f)e^{-\gamma P t}$				$I_t = a + b t^{-1/2}$			
PARC. N°	EXP. N°	I _i	I _f	γ	COEF. DE CORREL.*	a	b	COEF. DE CORREL.*	
P1	5	1355,8	37,1	0,057	0,988	-8,47	566,20	0,964	
	6	46,1	30,8	0,052	0,986	28,43	34,61	0,925	
	10	39,7	26,0	0,072	0,988	22,97	30,63	0,938	
	17	97,2	28,8	0,032	0,981	1,06	326,34	0,987	
P2	7	2727,0	41,3	0,059	0,957	-3,43	573,30	0,972	
	8	49,2	33,7	0,074	0,999	29,55	37,35	0,982	
	9	59,8	25,0	0,204	0,999	-27,69	687,01	0,965	
P3	19	153,6	35,5	0,040	0,972	2,84	374,74	0,985	
	20	46,3	32,7	0,084	0,987	28,72	32,28	0,991	
	32	94,2	22,1	0,275	0,997	9,48	72,74	0,915	
P4	21	200,4	39,4	0,043	0,979	11,72	330,59	0,990	
	22	59,1	36,6	0,173	0,994	29,79	39,36	0,985	
	31	60,0	27,8	0,204	0,993	18,47	50,94	0,978	
P5	26	348,6	31,7	0,065	0,986	-18,57	491,37	0,998	
P6	30	257,3	30,7	0,045	0,996	-10,80	482,92	0,985	

* L'adaptation de la courbe ne recouvre que la partie descendante. Il faut se rappeler, en considérant les coefficient de corrélation pour la formule de sorptivité, que la courbe adaptée dévie de la courbe expérimentale après que I_f soit atteinte.

Table 4.41: Taux d'infiltration finale (mm/hr).

		REPETITION		MOY.	RUISSELLE.
		1	2		DE SURFACE EN % DE PRECIPIT.
a. Non remuée (parcelles 1 et 2)	sec	11,0	11,5	11,3	76,9
	après 1 jour	6,7	9,6	8,1	83,5
	après 13-14 jours	7,7	16,3	12,0	75,5
	après 36 jours	10,5	14,4	12,4	74,7
b. Non remuée + NONIDET (parcelles NON 1 et 2)	sec	0	12,5	6,2	87,3
	après 1 jour	3,8	5,8	4,8	90,2
	après 5 jours	10,5	8,7	9,6	80,4
	après 31 jours	8,6		8,6	82,4
c. Croûte enlevée (parcelle 0 1)	sec	19,2		19,2	60,8
	après 2 jours	16,3		16,3	66,7
	après 28 jours	8,6		8,6	82,4
d. Labourage (parcelles P1 et P2)	nouveau	37,1	41,3	39,2	20,0
	après 1 jour	30,8	33,7	32,2	34,3
	après 10 jours	26,0	25,0	25,5	48,0
	surface passée à la houe	28,8	32,7	30,7	37,3
e. Levées (parcelles P3 et P4)	nouveau	35,5	39,4	37,9	22,7
	après 1 jour	32,7	36,6	34,6	29,4
	après 6 jours	22,1	27,8	24,9	49,2

4.4.4 - Résultats - Mali

4.4.4.1 - Sol nu, non remué

Pendant la saison pluvieuse de 1979, on a mesuré le ruissellement de surface sous conditions de pluies naturelles, sur des parcelles semblables à celles qui ont été utilisées avec les simulateurs de pluie, à la fois sur un sol préparé et planté de millet (voir chapitre 3), et sur un sol nu, non remué.

Dans la table 4.42 sont donnés les résultats suivants:

- a. le ruissellement de surface réel mesuré sur les parcelles S1N (pluie naturelle),
- b. le ruissellement de surface calculé d'après les résultats du simulateur et l'analyse des précipitations,
- c. le ruissellement de surface calculé avec l'équation $I(t) = S\sqrt{t}$.

La table montre tout d'abord que les valeurs calculées et mesurées du ruissellement de surface sont très élevées. Un ruissellement de surface cumulé d'environ 40% de la précipitation totale fut obtenu pour les averses où le ruissellement de surface fut mesuré, et, pour ce mêmes averses, on a calculé un ruissellement de surface d'environ 50%.

Sur les 41 averses de 1979, 18 ne provoquèrent pas de ruissellement de surface sur le sol S1N, et le volume final de pluie de ces averses ne fut que 35,7mm sur un total de 362,7mm (10%). Ce ruissellement de surface représente environ 45% de la pluie totale de toute la saison.

Deuxièmement, la table montre que la différence entre le ruissellement de surface calculé et le ruissellement de surface mesuré est petite, même plus petite qu'entre les deux méthodes de calcul. Les valeurs du ruissellement cumulé calculées sont de 68,2mm d'après la formule utilisant $S\sqrt{t}$, de 71,7mm

d'après la formule de Morin-Benyamini, et les valeurs mesurées furent de 78,0mm. Le fait que les valeurs sont inférieures n'est pas significatif, car les différences peuvent être attribuées à un certain nombre d'averses où un faible ruissellement de surface fut mesuré, et où le calcul donna une valeur nulle. La méthode de mesure du ruissellement de surface a tendance à surestimer ce ruissellement, alors que l'erreur de mesure est de l'ordre de 1 et 2mm. D'après les résultats ci-dessus, on peut conclure que le calcul du ruissellement de surface, à la fois par la formule de Morin-Benyamini et par l'estimation de la sorptivité est assez précis (avec une erreur inférieure à 10%).

Les mesures (simulateurs de pluie et ruissellement de surface "naturel") furent effectuées sur des parcelles nues de toute végétation, et dont le stockage de surface est donné par analyse sur ordinateur (voir également la table 4.42):

STOCKAGE/ RETENTION MM	RUISELLEMENT	
	DE SURFACE MM	% DE PLUIE (LA PRECIPITATION TOTALE EST DE 362MM)
0	162.4	44.9
0.5	146.5	40.5
5	97.5	27.0
10	70.0	19.3

Ainsi, en augmentant modérément le stockage de surface, on peut réduire de façon considérable les pertes par ruissellement.

Table 4.42: Quantité (mm) de ruissellement de surface pour 1979 sur sol S1N; résultats mesurés et calculés.

AVERSE N°	DATE DE L'AVERSE	VOLUME DE PLUIE	RUIS. DE SURFACE MESURE	D'APRES L'EQUATION DE LA SORPTIVITE $s\sqrt{t}$	RUISELLEMENT DE SURFACE CALCULE CALCULE D'APRES L'EQUATION DE MORIN-BENYAMINI ET LES DONNEES DE PRECIPITATION. STOCKAGE EN FLAQUE ASSUME, MM			
					0	0,5	5	10
2	10/5	20,6	-	8,4	8,3	6,3	0,6	0
3	22/5	14,8	-	7,6	5,9	5,4	0,9	0
5	2/6	8,3	-	3,0	2,1	1,6	0	0
8	6/6	10,6	-	4,0	4,4	3,9	0	0
10	10/6	14,4	4,0	8,8	9,9	9,4	4,9	0
11	21/6	8,8	2,5	0	0	0	0	0
12	13/7	7,0	2,0	0	0	0	0	0
14	17/7	7,9	3,0	4,3	2,3	1,3	0	0
15	21/7	7,2	1,5	0	0,3	0	0	0
16	24/7	7,5	3,0	0,4	0,7	0	0	0
17	25/7	4,0	0,3	0	0,6	0	0	0
18	28/7	32,6	22,5	21,1	19,2	18,6	14,1	9,1
19	31/7	15,3	-	8,2	6,4	5,9	1,4	0
20	4/8	82,4	+	70,1	63,6	63,1	58,6	53,6
24	16/8	14,1	10,5	7,7	9,7	9,2	4,7	0
27	23/8	4,9	0,6	0	0	0	0	0
29	30/8	4,3	1,0	0,3	1,0	0	0	0
30	2/9	5,6	1,0	0,4	0,9	0,4	0	0
32	7/9	9,6	4,5	3,5	4,7	4,2	0	0
33	9/9	5,5	1,0	0	1,7	1,2	0	0
34	13/9	27,9	16,5	19,0	17,3	16,8	12,3	7,3
36	18/9	6,9	3,0	2,1	2,4	1,9	0	0
39	25/9	6,1	1,0	0,6	2,0	1,5	0	0
tot.	°	174,3	78,0	68,2	71,7			
tot.	°°	326,3		169,5	162,4	150,7	97,5	70,0

° Uniquement les averses où le ruissellement de surface a été mesuré.

°° Uniquement les averses où le ruissellement de surface est identique à celui calculé (= toutes les averses sont notées).

+ Capacité des barils de récupération supérieure à la précipitation totale pour ce site: 362.0mm.

4.4.4.2 - Sols cultivés

On peut observer l'importante influence qu'ont les travaux du sol sur les caractéristiques d'infiltration du sol S1N d'après les courbes d'infiltration en fonction des précipitations, déterminées à l'aide du simulateur (voir figures 4.73-4.82). Afin de quantifier cette influence sur toute la saison pluvieuse, le ruissellement de surface fut calculé par l'analyse des pluies sur ordinateur, lorsque les travaux de la terre sont supposés être effectués à différentes dates dans la saison. Les résultats en sont donnés dans la table 4.43. Cette table montre que la date à laquelle la terre est travaillée, par rapport à une précipitation, est très importante; ainsi, le travail après l'averse 19 s'est effectué relativement tard dans la saison, mais juste avant la grosse pluie de 82mm; (pour la liste des pluies, voir la table 4.42). Comme le labour renouvelle le stockage de surface, le ruissellement de surface total, dans ce cas, est plus faible que dans les champs labourés tôt, comme on peut le voir d'après les résultats de la colonne de droite, dans la table 4.43, pour 1979, surtout pour les parcelles labourées.

4.4.5 - Conclusions

4.4.5.1 - Analyse des précipitations

- Les intensités de pluie dans la zone semi-aride de l'Afrique de l'Ouest sont élevées; elles sont plus élevées que dans de régions dont le climat est comparable, comme certaines parties de l'Inde et du Zimbabwe, et beaucoup plus élevées que dans les climats méditerranéens, comme en Israël.

Table 4.43: Ruissellement de surface calculé assumant un travail de la terre à différentes dates dans la saison, et les différentes valeurs du stockage de surface, sol S1N, Niono, Mali*

ANNEE/ PRECIP.	TRAVAIL APRES LE JOUR L' AVERSE		RUISELLEMENT DE SURFACE APRES LABOUR, MM STOCKAGE DE SURFACE					RUISELLEMENT DE SURFACE APRES LEVEES, MM STOCKAGE DE SURFACE				
	n°	n°	0	0,5	2,0	5,0	10,0	0	0,5	2,0	5,0	10,0
1979/ 361mm	142	3	90,8	85,2	73,0	54,8	38,6	91,1	85,5	73,2	57,8	38,3
	160	9	95,1	89,0	75,3	54,8	38,6	95,2	89,0	75,3	54,8	38,3
	205	16	98,6	90,5	75,5	55,0	38,6	101,3	92,6	76,1	54,8	38,3
	212	19	97,5	87,8	69,8	43,3	20,5	109,7	99,9	81,8	55,3	32,4
	Sans travail		162,4	150,9	127,1	97,5	70,0	Comme pour le labour				
1978/ 271mm	159	3	60,6	55,3	42,4	25,7	19,1	59,6	54,4	41,9	25,2	18,6
	190	6	59,8	53,0	38,5	18,8	7,3	66,0	59,3	45,2	25,6	13,9
	193	7	56,4	49,5	35,0	12,4	1,2	68,2	61,0	45,6	22,9	11,0
	196	9	80,3	74,1	59,7	37,1	25,3	88,2	74,3	59,9	37,2	25,3
	210	13	88,0	79,5	62,1	37,3	25,3	88,2	79,7	62,2	37,7	25,3
Sans travail		125,4	113,0	91,2	58,2	32,9	Comme pour le labour					
1977/ 376mm+	173	5	83,2	73,7	53,5	30,0	8,2	85,8	76,2	56,0	32,9	11,1
	199	9	83,2	72,3	49,9	25,1	3,9	90,6	79,1	55,8	29,8	3,7
	220	14	103,1	92,1	69,9	45,8	19,7	105,8	94,3	70,7	45,8	19,8
	223	16	128,4	117,3	94,2	69,7	43,0	131,9	120,3	97,2	71,5	43,1
	Sans travail		179,6	166,2	136,7	96,2	47,9	Comme pour le labour				

+ Zone de précipitation S2.

* Cette table donne le ruissellement de surface calculé pour la saison, en supposant que les travaux ont été réalisés à différentes dates.

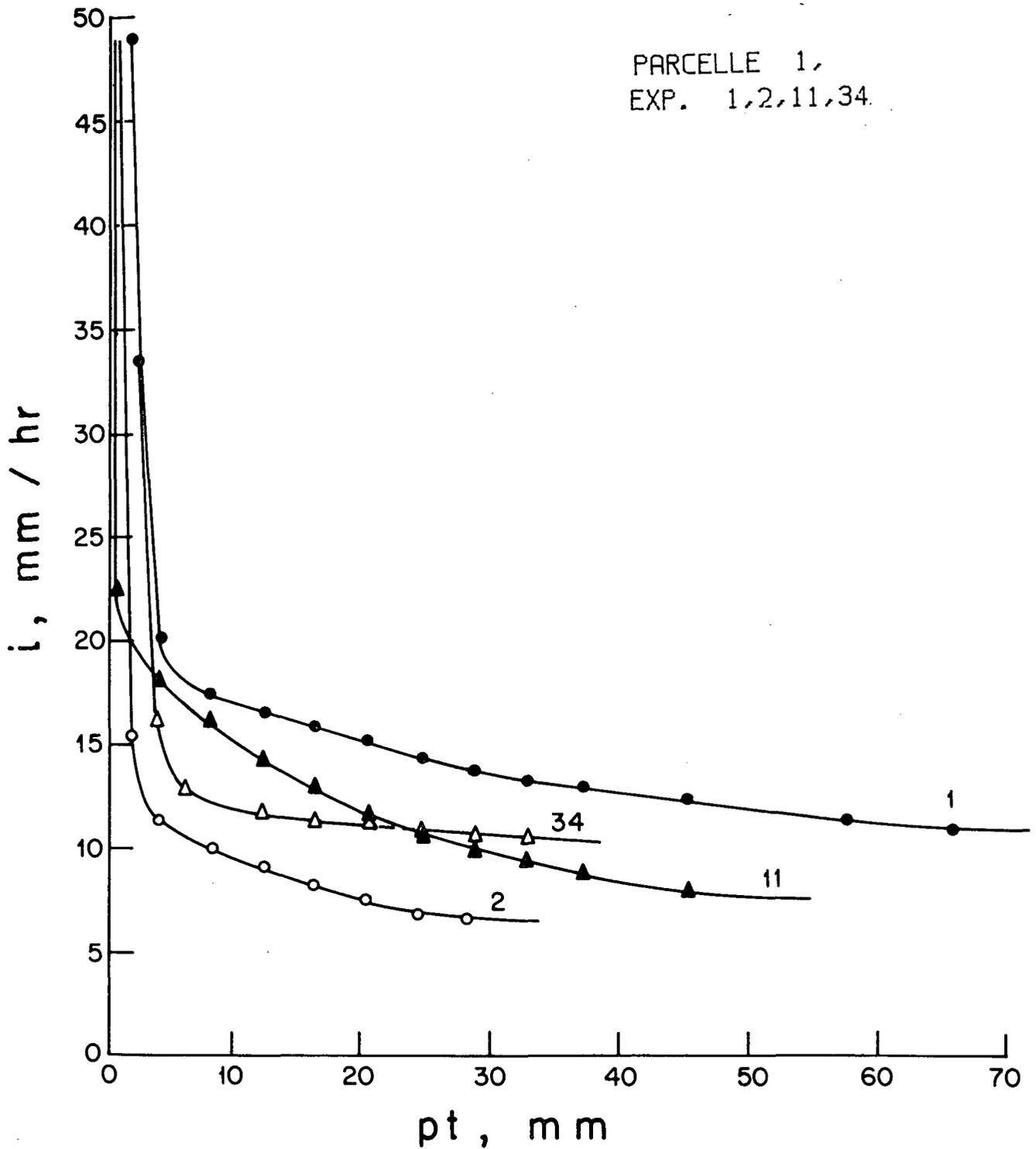


Fig. 4.73: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles non remuées, (Mali).

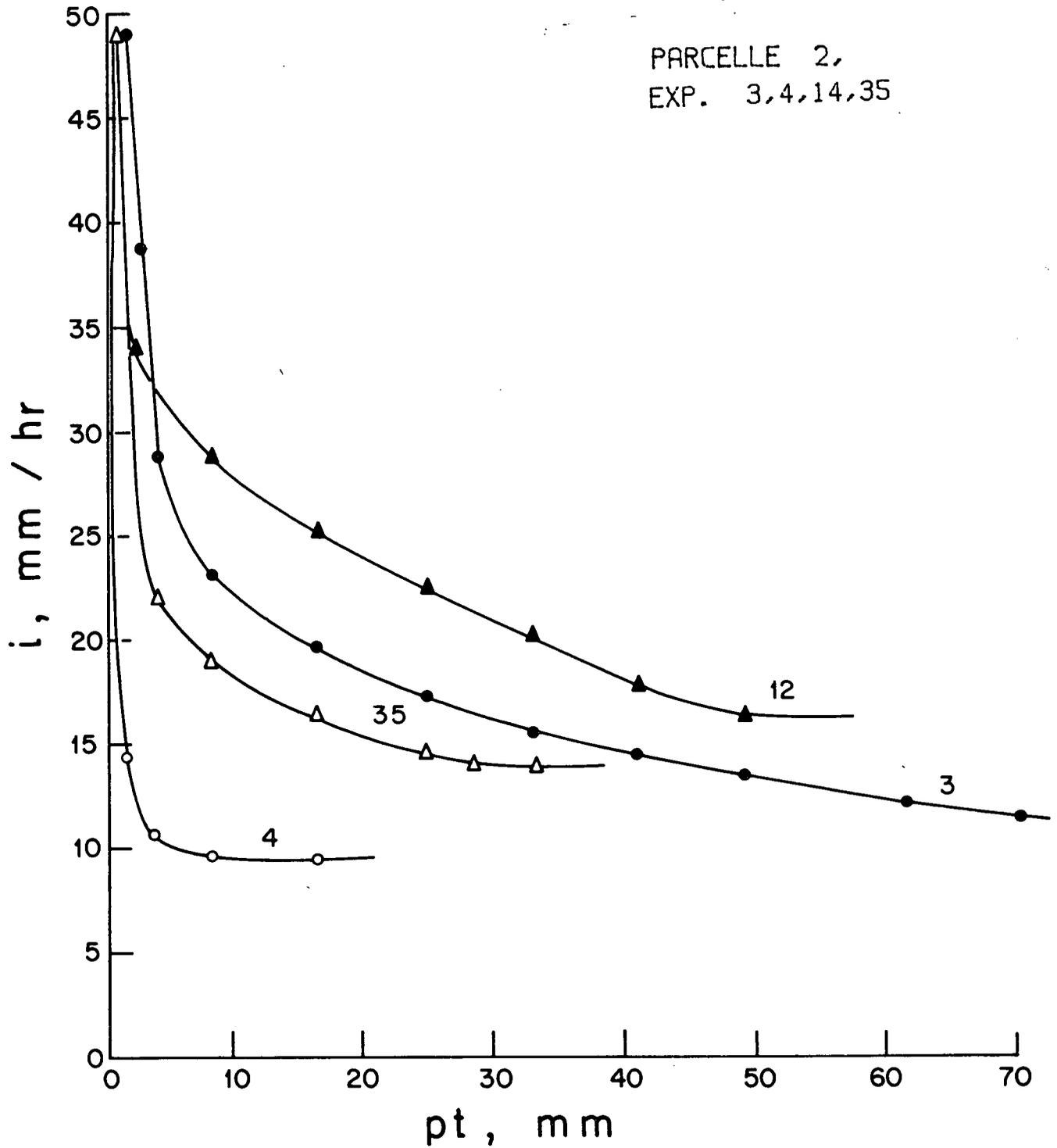


Fig. 4.74: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles non remuées, (Mali).

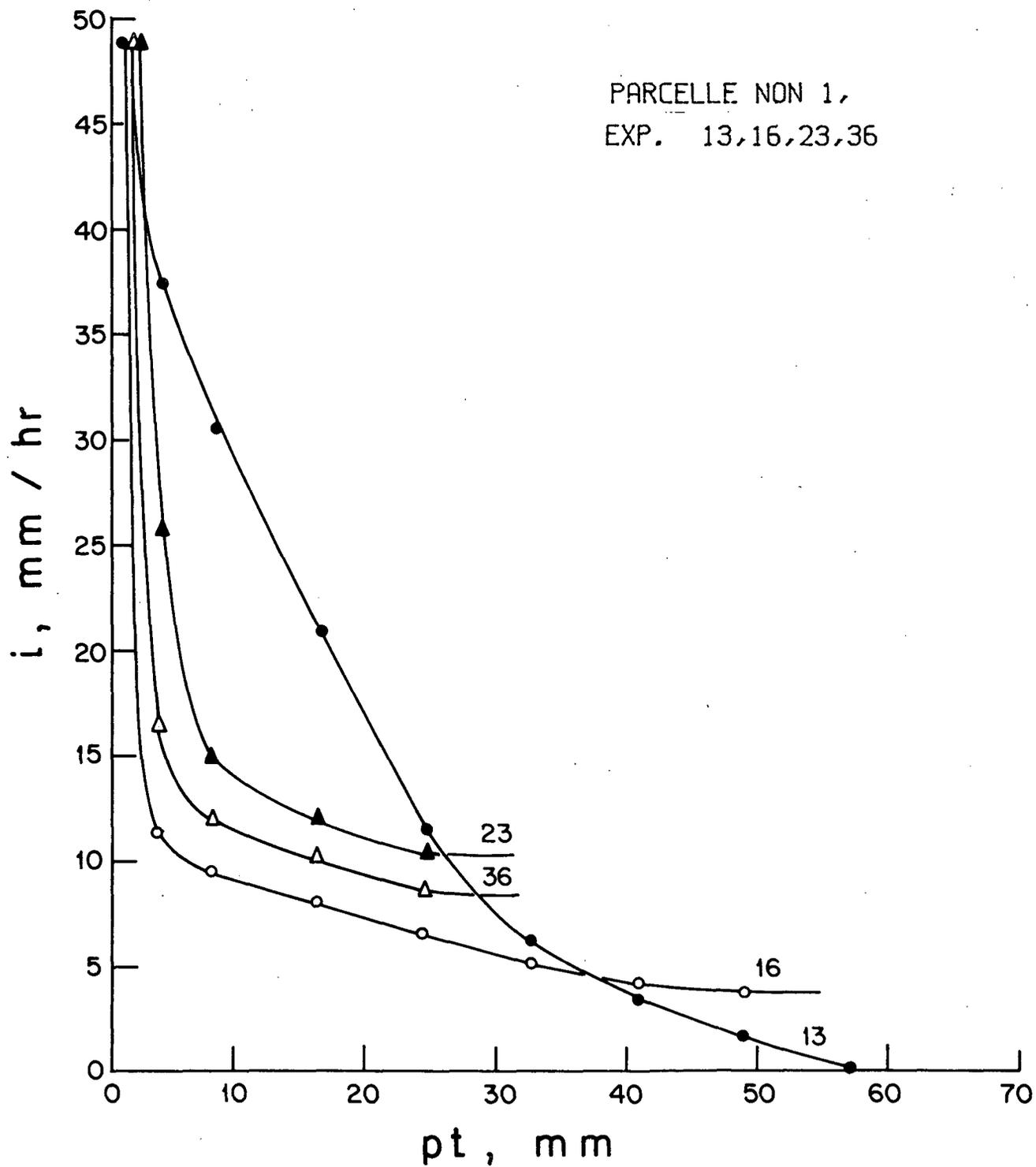


Fig. 4.75: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles non remuées, (Mali).

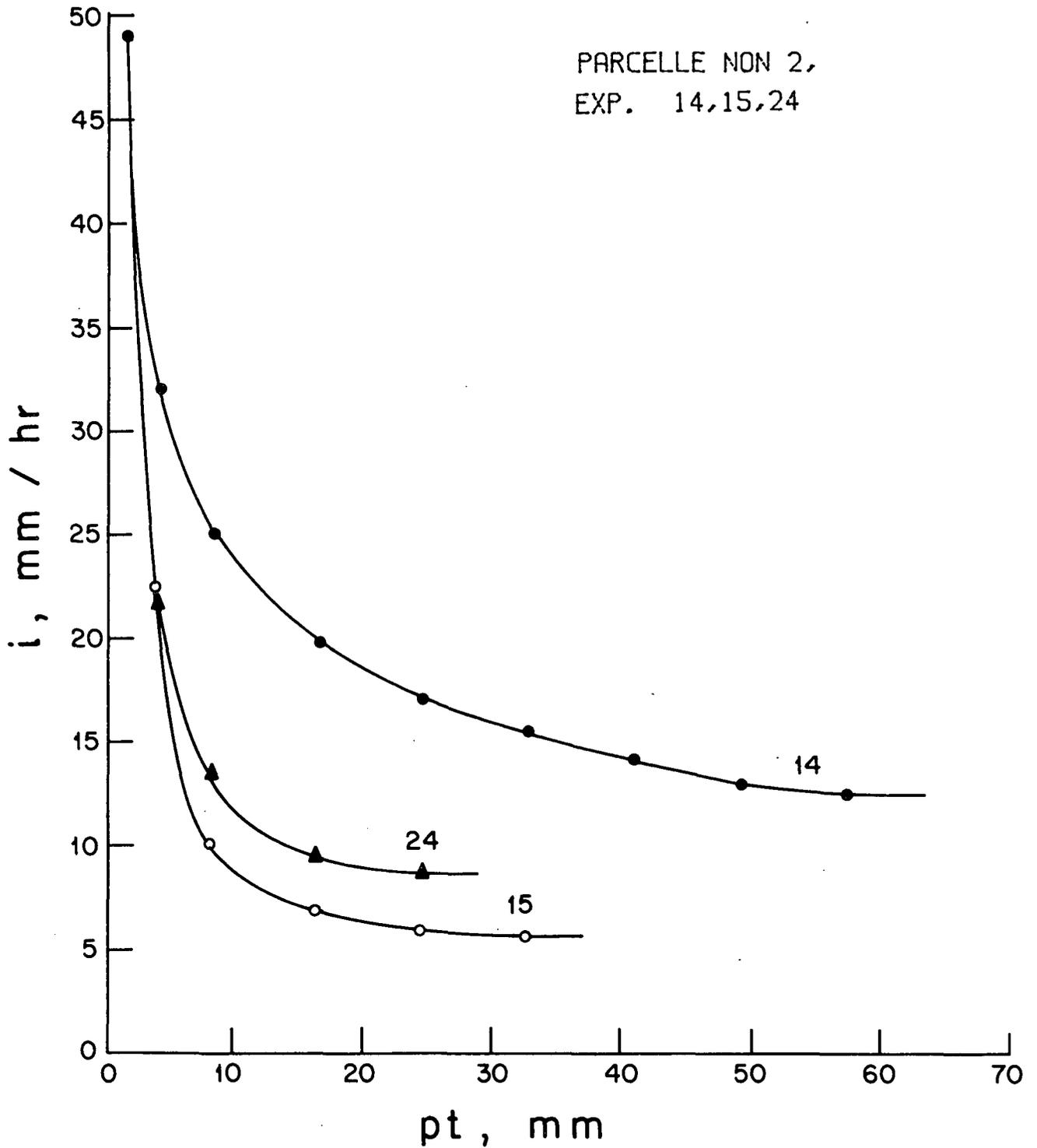


Fig. 4.76: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles non remuées, (Mali).

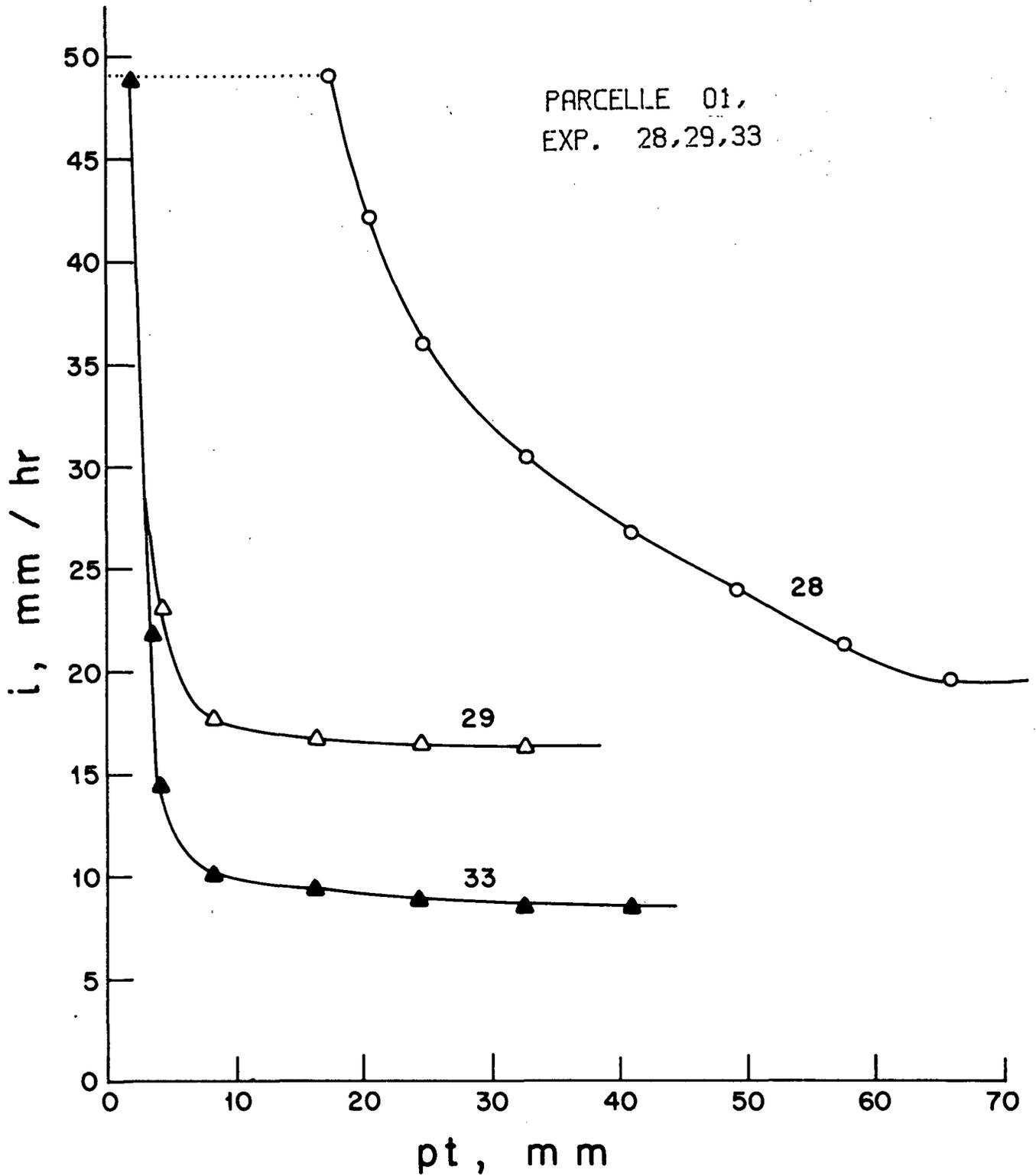


Fig. 4.77: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles non remuées, (Mali).

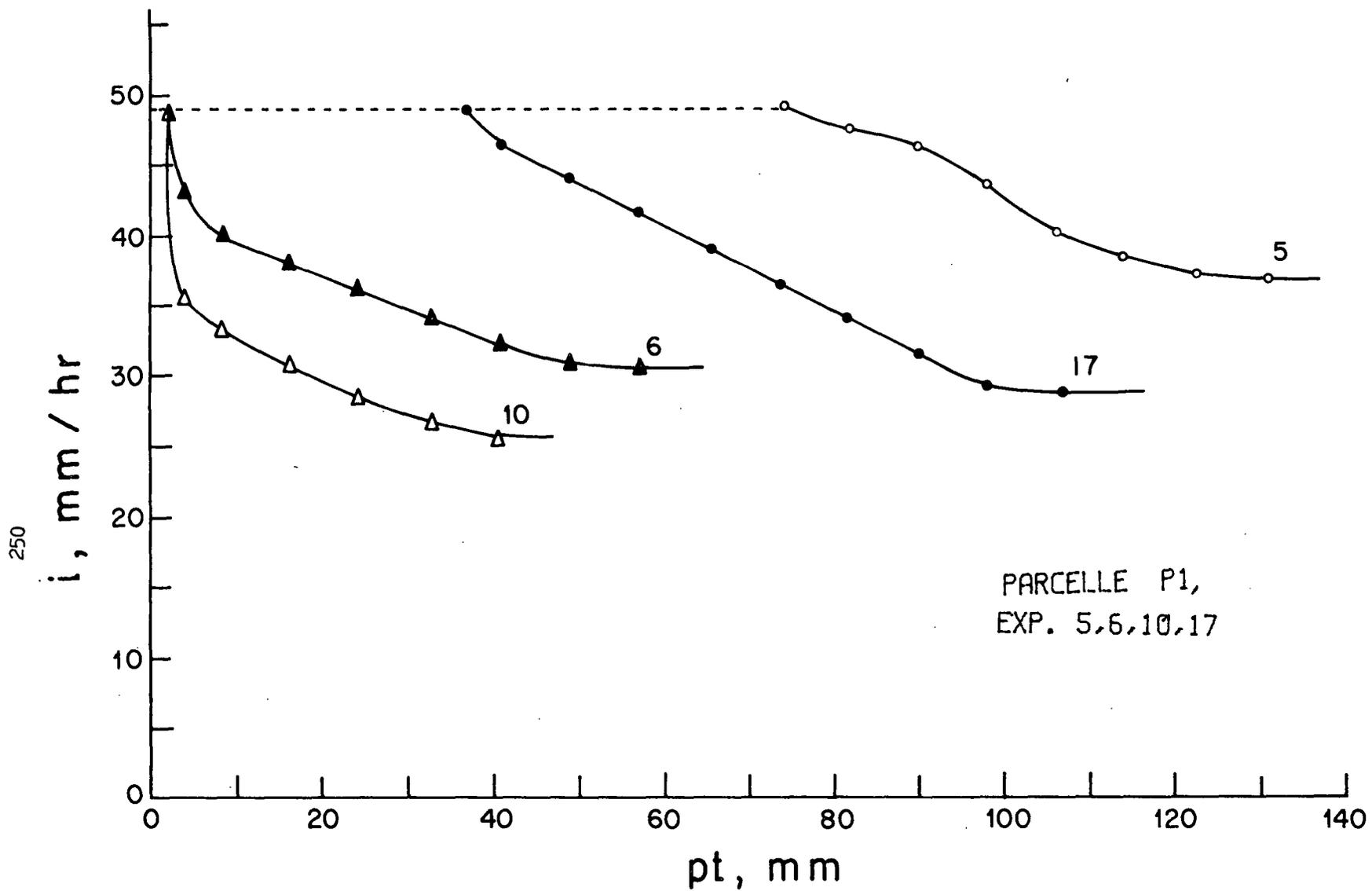
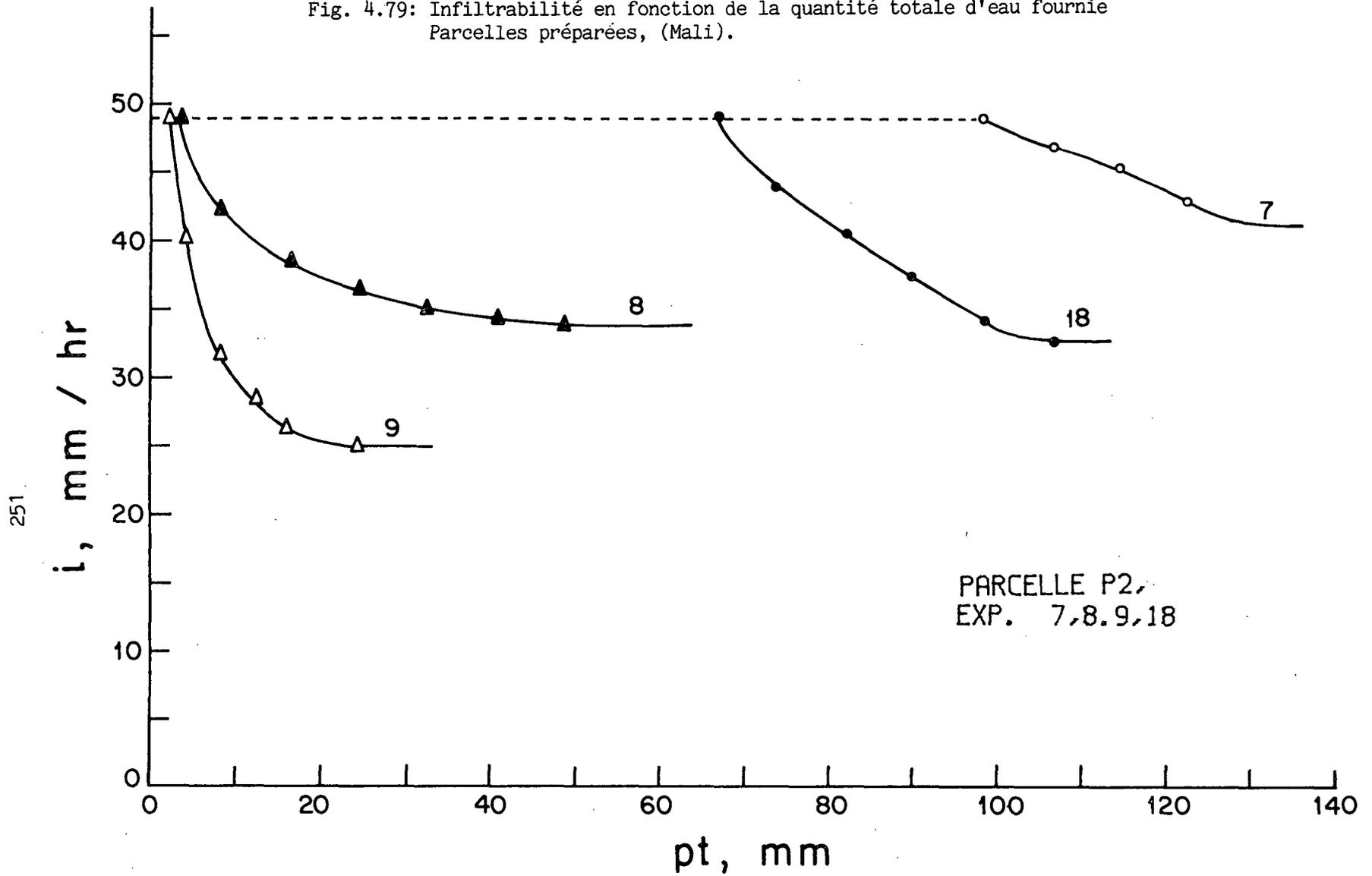


Fig. 4.78: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles préparées, (Mali).

Fig. 4.79: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles préparées, (Mali).



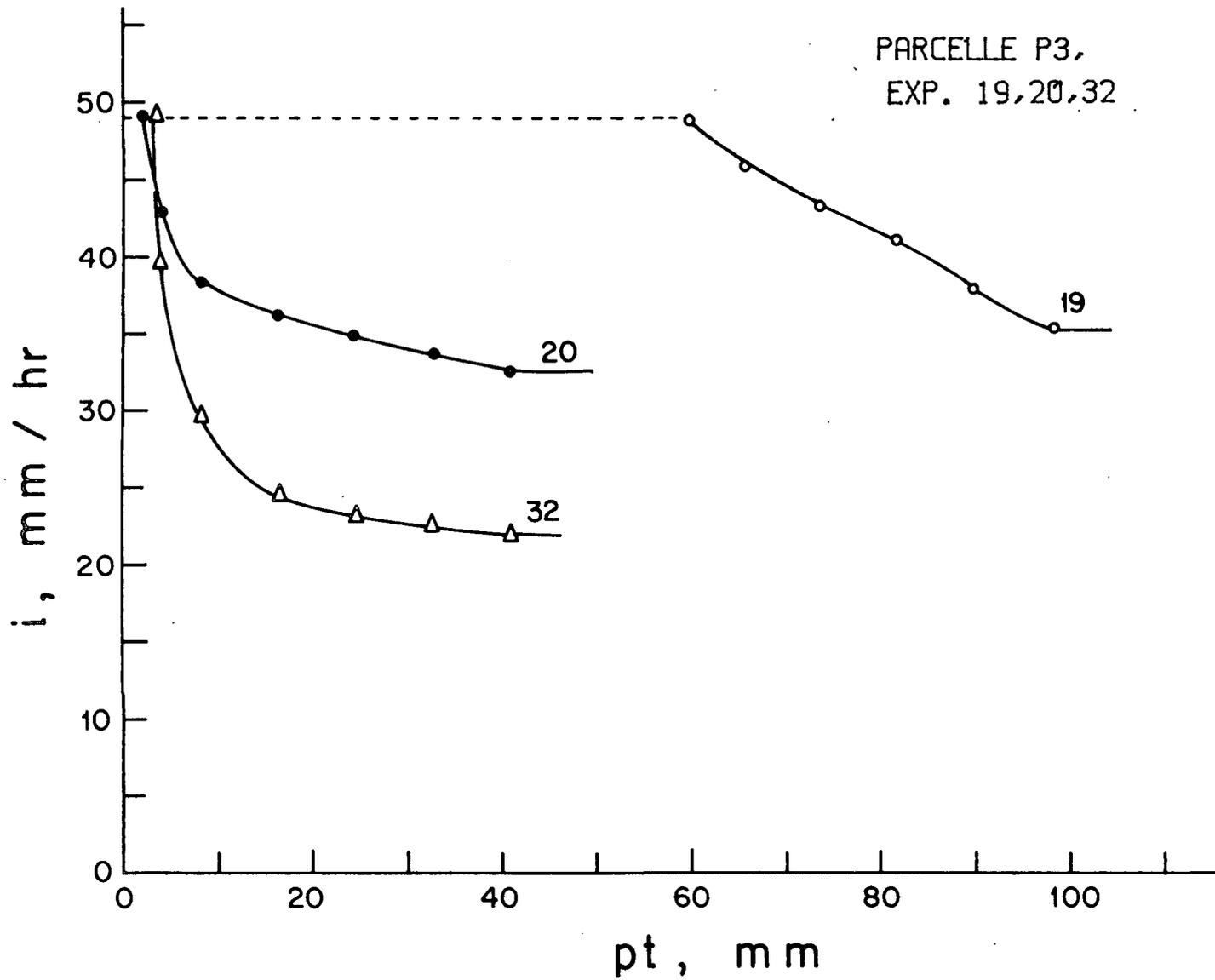
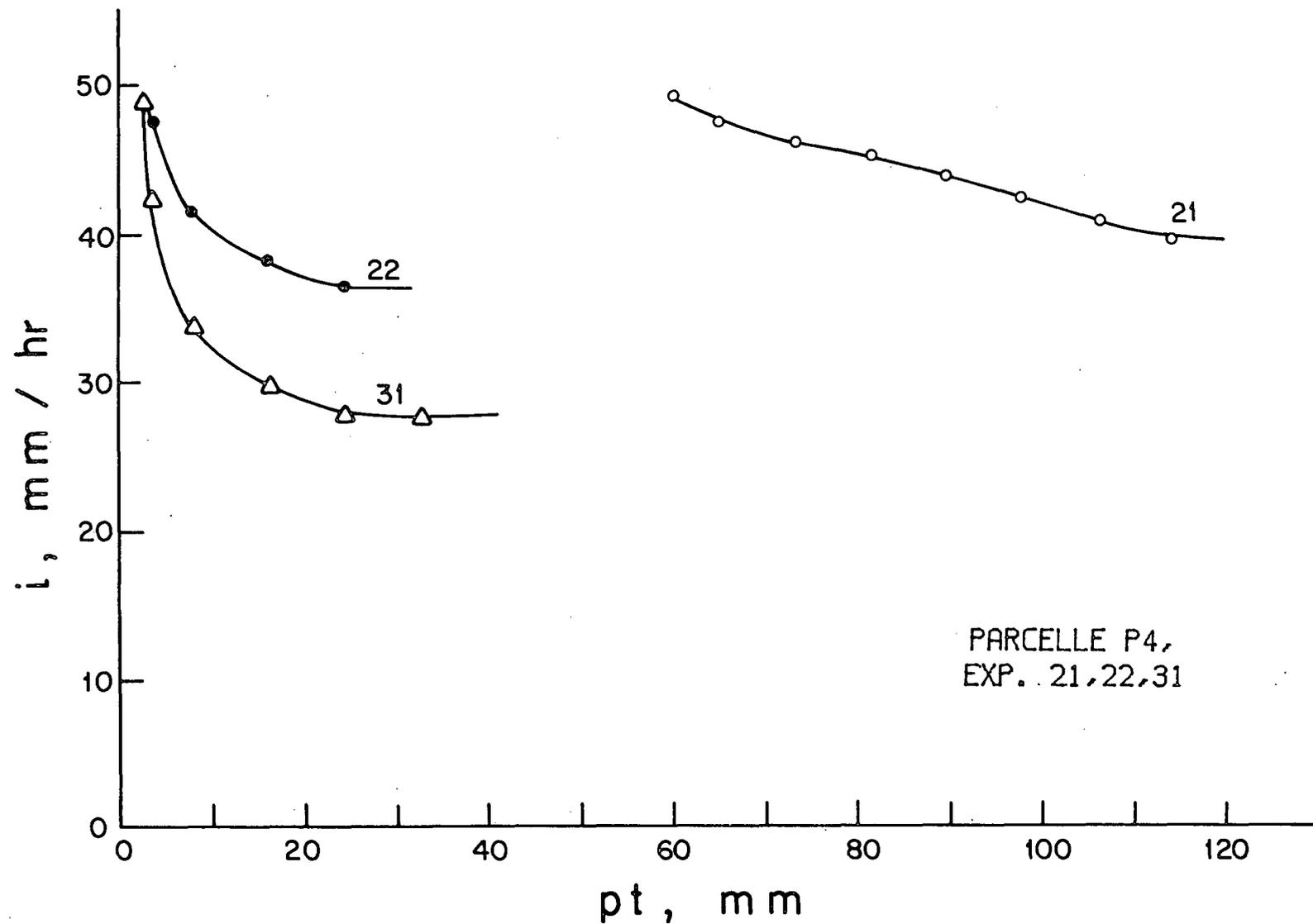


Fig. 4.80: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles préparées, (Mali).

Fig. 4.81: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles préparées, (Mali).



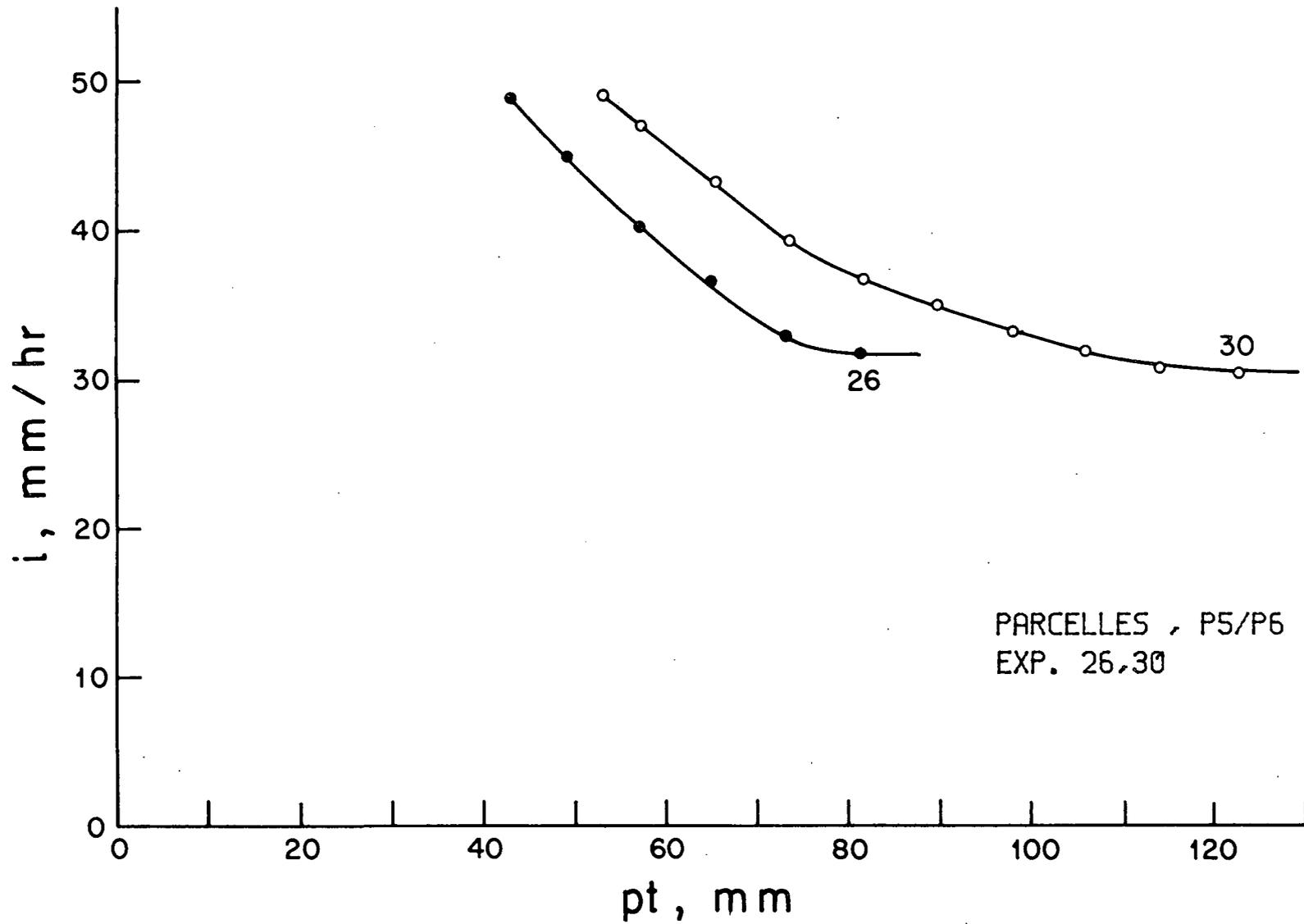


Fig. 4.82: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie
Parcelles préparées, (Mali).

- Les averses plus fortes (>20mm de pluie par averse) ont des intensités supérieures à la moyenne. Ce sont ces averses qui contribuent le plus au ruissellement de surface.
- Le travail du sol empêche de façon considérable le ruissellement de surface, grâce à l'amélioration de l'infiltrabilité. Un travail résultant dans l'augmentation de la capacité de stockage de surface (même sans améliorer de façon significative l'infiltrabilité) a même un effet plus important sur la prévention du ruissellement de surface, pour les sols sableux étudiés.
- La période critique pour l'approvisionnement en eau de la plante ou de la jeune pousse est pendant le premier mois de la saison pluvieuse. C'est à cette période que les mesures à prendre pour la conservation de l'humidité sont les plus efficaces; plus tard dans la saison, on peut avoir recours à un drainage de surface.
- Pour obtenir de bons conseils sur les nouveaux systèmes et méthodes de préparation du sol en se basant sur des données de pluie, il faut rassembler et analyser un bon nombre de données. Grâce à la technologie actuelle, on peut enregistrer sur place sur ordinateur les résultats relevés sur pluviomètres.

Pour une éventuelle extrapolation des résultats d'autres régions, il faut considérer trois conditions importantes:

4.4.5.1.1 - Le caractère des précipitations dans la région des mesures.

Bien que le nombre des données disponibles soit restreint, il est clair que les intensités peuvent considérablement varier d'un endroit à un autre. Dans le but de faire une évaluation quantitative du ruissellement de surface, on a combiné les données du sol S1N et celles des pluies du Niger (intensités élevées) et de l'Inde (intensité), de la même façon que les données du Mali

ont été traitées. Les intensités ont effectivement un rôle important dans la formation du ruissellement de surface. Bien que les quantités totales de pluie en Inde soient élevées, le ruissellement de surface, pour les années analysées, y est inférieur; le ruissellement de surface exprimé en pourcentage des précipitations totales fut de 30, 31, 25 et 12% pour l'ICRISAT, de 52, 35 et 35% pour Niamey, et de 45, 46 et 48% pour Niono (en supposant une rétention de surface nulle).

4.4.5.1.2 - Les caractéristiques du sol. Le sol S1N sur lequel ont été réalisées les expériences avec le simulateur est un sol sableux fin typique, ayant une forte tendance à former une croûte, lorsqu'il est soumis à la pluie. Les sols avec un pourcentage d'argiles inférieur ou avec une fraction de sable plus grossier peuvent avoir un taux d'infiltration finale plus élevé.

4.4.5.1.3 - La supposition que le sol est nu, tout au long de la période de croissance. Les plantes, en se développant, vont protéger le sol. Les gouttes de pluie vont être interceptées, et leur impact va être réduit. L'importance générale de la couverture de feuillage n'est pas encore claire. Des résultats de sols loessiques israéliens indiquent que la croûte se formant lors de la première ou des deux premières grandes averses conserve son intégrité physique et ses propriétés hydrauliques durant toute la saison, à moins que le sol ne soit cultivé, auquel cas le feuillage sera moins bénéfique. D'autre part, lorsqu'une croûte se brise à cause de la rétraction du sol due à l'assèchement, puis se reforme à chaque pluie suivante, le feuillage peut arrêter le processus de la formation de la croûte. Pour la région (climatologique) où les expériences furent réalisées, le feuillage de la plante cultivée n'eut pas d'effet protecteur en début de saison, et ceci pour plusieurs raisons:

- I. La densité et la géométrie de la culture sont telles que seule une partie de la surface est recouverte. Les plantes de millet suivant un modèle de 0.80 x 1.10 m ne recouvrent pas complètement la surface.
- II. A cause du manque d'engrais, le développement de la plante (et donc de la pousse des feuilles protectrices) est faible dans les premiers temps.
- III. Les principales variétés de millet cultivées ici ont leurs feuilles orientées vers le haut, ce qui n'est pas très efficace pour intercepter les gouttes de pluie.
- IV. Lorsqu'une croûte s'est formée tôt dans la période de croissance, l'impact des gouttes de pluie sera moins important pour la production du ruissellement de surface que le volume et l'intensité de la pluie.

La contribution des averses ultérieures de la saison au ruissellement de surface sera cependant corrigée pour le développement du feuillage, lorsque cela sera nécessaire. Bien qu'aucune donnée ne soit disponible, il semble probable que l'ISF (index de la surface de la feuille, surface totale des feuilles par unité de surface de terre) soit le meilleur moyen d'exprimer l'effet protecteur d'une culture.

4.4.5.2 - Contribution des grosses averses au ruissellement de surface

Ainsi que Delwaulle (1973) le fit remarquer, ce sont les grosses averses qui causent les plus grandes pertes par ruissellement. Ce phénomène a également été observé au Mali. Les deux raisons de ces taux élevés sont les suivantes:

1. A cause des grandes quantités de pluie, la surface du sol devient saturée, une croûte est susceptible de se former et, de ce fait, le taux d'infiltration peut diminuer considérablement.
2. L'intensité de précipitation des grosses averses est généralement plus

élevée (voir chapitre 4), de sorte qu'une croûte peut se former plus tôt et l'infiltrabilité du sol semble être dépassée.

On a utilisé les quelques données disponibles pour calculer le ruissellement de surface, en se servant des caractéristiques d'infiltration au sol S1N du Mali. D'après les résultats du traitement "sans préparation du sol", on différencie entre les averses inférieures à 20mm et celles supérieures à 20mm. Leur contribution respective au ruissellement de surface est donnée dans la table 4.44. Il est clair que sur les emplacements d'Afrique de l'Ouest, seulement un petit nombre d'averses représente un haut pourcentage du ruissellement de surface total. Pour l'Inde, ceci est moins prononcé, car la pluie tombe sous forme de grosses averses, mais d'intensité généralement plus faible. Pour des valeurs de stockage de surface de 10mm, presque tout le ruissellement de surface est produit pendant les averses supérieures à 20mm.

Table 4.44: Relation entre la taille des averses et leur contribution au ruissellement de surface, calculé par l'analyse des précipitations sur ordinateur: données du sol S1N. Seules les averses contribuant au ruissellement de surface ont été considérées.

SITE	ANNEE	PRECIP. TOTALE	AVERSES		RUISSELLEMENT DE SURFACE STOCKAGE DE SURFACE SUPPOSE							
			>20MM	<20MM	0,5MM				10CM			
			NO	VOLUME	NO	VOLUME	>20MM	<20MM	>20MM	<20MM	>20MM	<20MM
Niono	1977	330,2	5	191,3	12	138,9	107,6	65	58,6	35	47,9	0
	1979	326,3	4	163,5	12	162,8	104,8	70	45,9	30	70,0	0
Niamey	1970	451,0	7	299,1	12	151,9	191,3	84	36,4	16	124,6	1,0
	1971	355,0	7	202,3	15	152,7	90,1	65	49,0	35	28,5	1,9
	1972	127,3	1	39,8	12	87,5	29,2	41	41,7	59	17,9	0
ICRISAT	1974	586,4	10	531,6	4	54,8	211,8	92	17,8	8	108,2	0
	1975	694,8	11	544,7	10	150,1	185,3	84	35,6	16	82,8	0
	1976	550,8	8	450,8	6	100,6	126,1	87	18,3	13	66,7	0
	1977	273,8	5	199,1	5	74,7	26,6	70	11,4	30	0	0

4.4.6 - Discussion et conclusions

4.4.6.1 - Expériences avec simulateur de pluie, Mali

- Suivent quelques remarques générales sur la précision de ces expériences: à cause de la nature des mesures, tous les résultats sont basés sur la supposition que la pluie est fournie exactement à une intensité connue. L'eau du ruissellement est récupérée, et son volume mesuré: le taux d'infiltration est donc la différence entre le taux de précipitation et le taux de ruissellement. Par conséquent, dans des conditions où le pourcentage de ruissellement est élevé, il faut s'efforcer d'éviter les erreurs; par exemple, avec une intensité de pluie de 50mm/h et un taux de ruissellement de 40mm/h, le taux d'infiltration résultant sera de 10mm/h. Une erreur de 2% (1mm/h) dans l'intensité de pluie augmentera jusqu'à 10% l'erreur sur le taux d'infiltration.
- Le tracé de la courbe a montré que, dans les cas où la croûte est présente, l'équation de Morin donne une meilleure concordance, tandis que la courbe de "sorptivité" est presque égale dans les autres cas où le sol est sec, ou sans croûte. En général, la concordance de la courbe de sorptivité fut assez bonne jusqu'à ce qu'un taux constant d'infiltration fût atteint. Cependant, il n'y eut aucune différence évidente dans la concordance des courbes des essais de pluie sur sol "encroûté" et sur sol "non encroûté".
- L'influence du labour, de la mise en levées ou du hersage du sol sur l'amélioration de l'infiltration est considérable; cette influence est due:
 - a. à la destruction de la croûte de surface,
 - b. à l'ameublissement de la couche arable du sol,
 - c. à la création d'un stockage de surface de l'eau.

La croûte réapparaîtra bientôt, comme le montrent les expériences sur la parcelle 01: le deuxième essai de pluie montre une croûte très nette, et le troisième essai de pluie, qui eut lieu après deux semaines (avec quelques précipitations) montre que la croûte limite encore plus l'infiltration.

Le taux d'infiltration finale est toutefois considérablement plus bas sur les parcelles non remuées, ce qui est probablement dû au fait qu'ici le sol n'a pas été remué depuis longtemps. Sur les champs des agriculteurs où les mêmes parcelles furent travaillées l'année précédente, Il doit être plus élevée.

4.4.6.2 - Expériences avec simulateur de pluie, Israël.

Dans le but de faciliter une analyse plus quantitative et plus générale, et de tenter de faire une prévision, il faut obtenir des informations sur l'influence des différents traitements sur la fonction d'infiltration du sol. Ce travail fut réalisé avec un simulateur de pluie de type "Morin", à des taux de précipitation de 32 à 34 mm/h. Des tests furent effectués au champ après une pluie de 350 mm, et on peut ainsi assumer qu'une condition stable d'encroûtement a déjà été atteinte. Le sol du champ fut également emporté en laboratoire et soumis à des averses simulées dans les boîtes. Les résultats du simulateur sont présentés dans les figures 4.83-4.86; ces résultats concernent la première averse et la (les) averse(s) suivante(s), et nous permettent d'étudier le rétablissement de l'infiltrabilité lorsque le sol s'assèche. Dans chacun des cas, sont montrés les points expérimentaux, et la courbe qui leur est ajustée par l'équation de Morin-Benyamini. Il y a en général une bonne concordance entre les points expérimentaux et la courbe calculée, surtout pour les sols encroûtés. On voit qu'ici un rétablissement

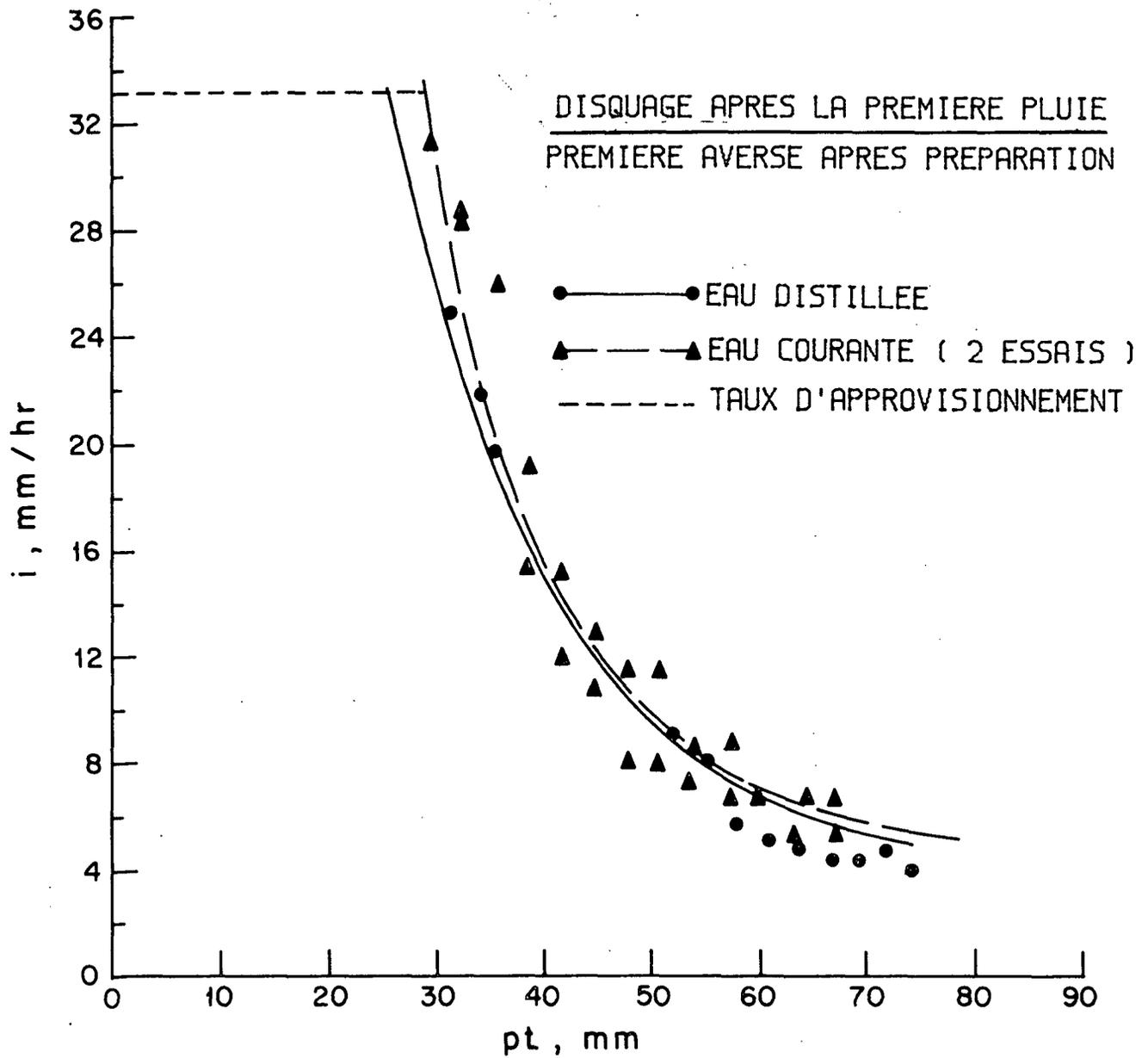


Fig. 4.83: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie. (Israël).

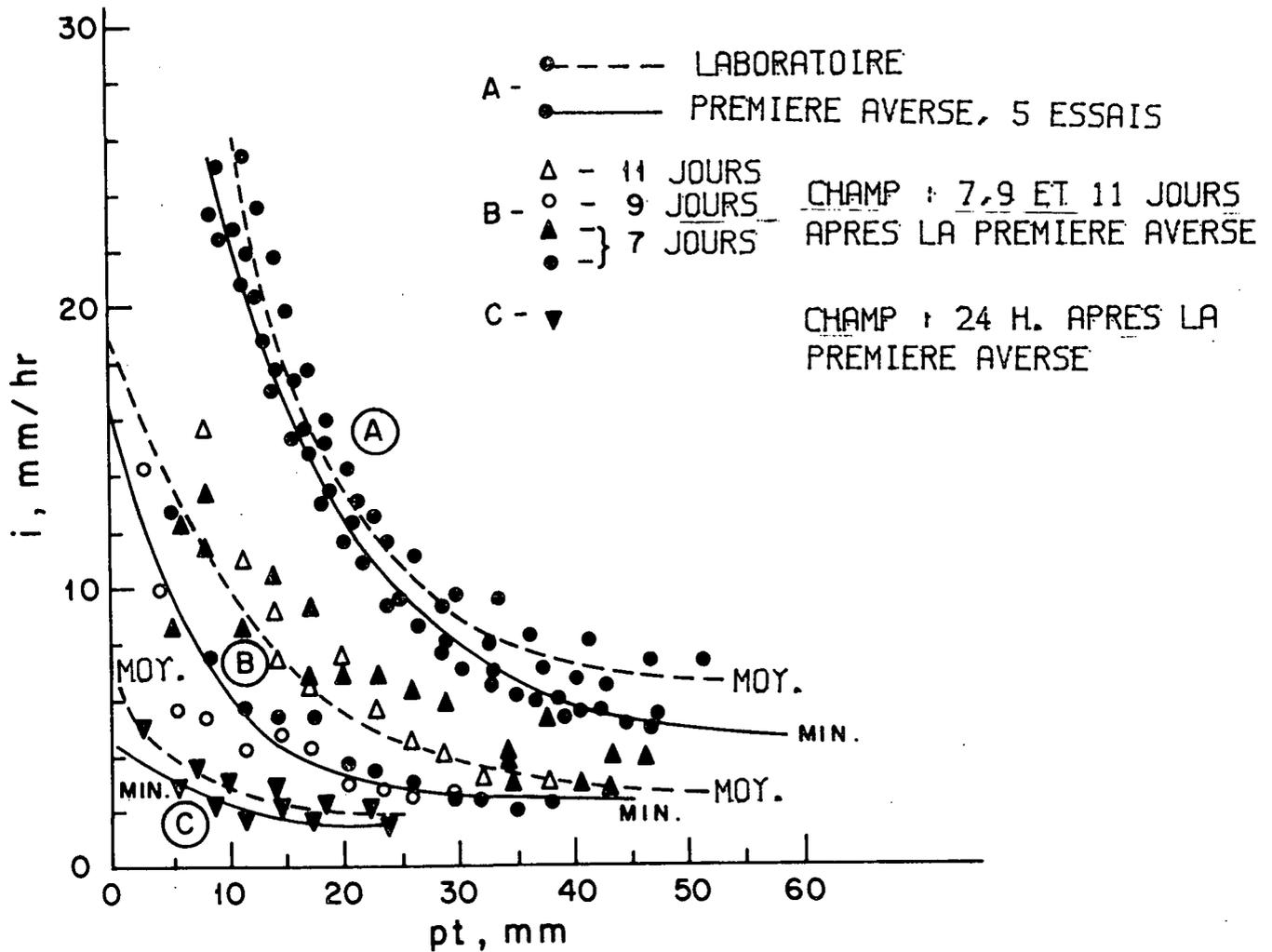


Fig. 4.84: Infiltrabilité déterminée au laboratoire et au champ en fonction de la quantité totale d'eau fournie. (Israël).

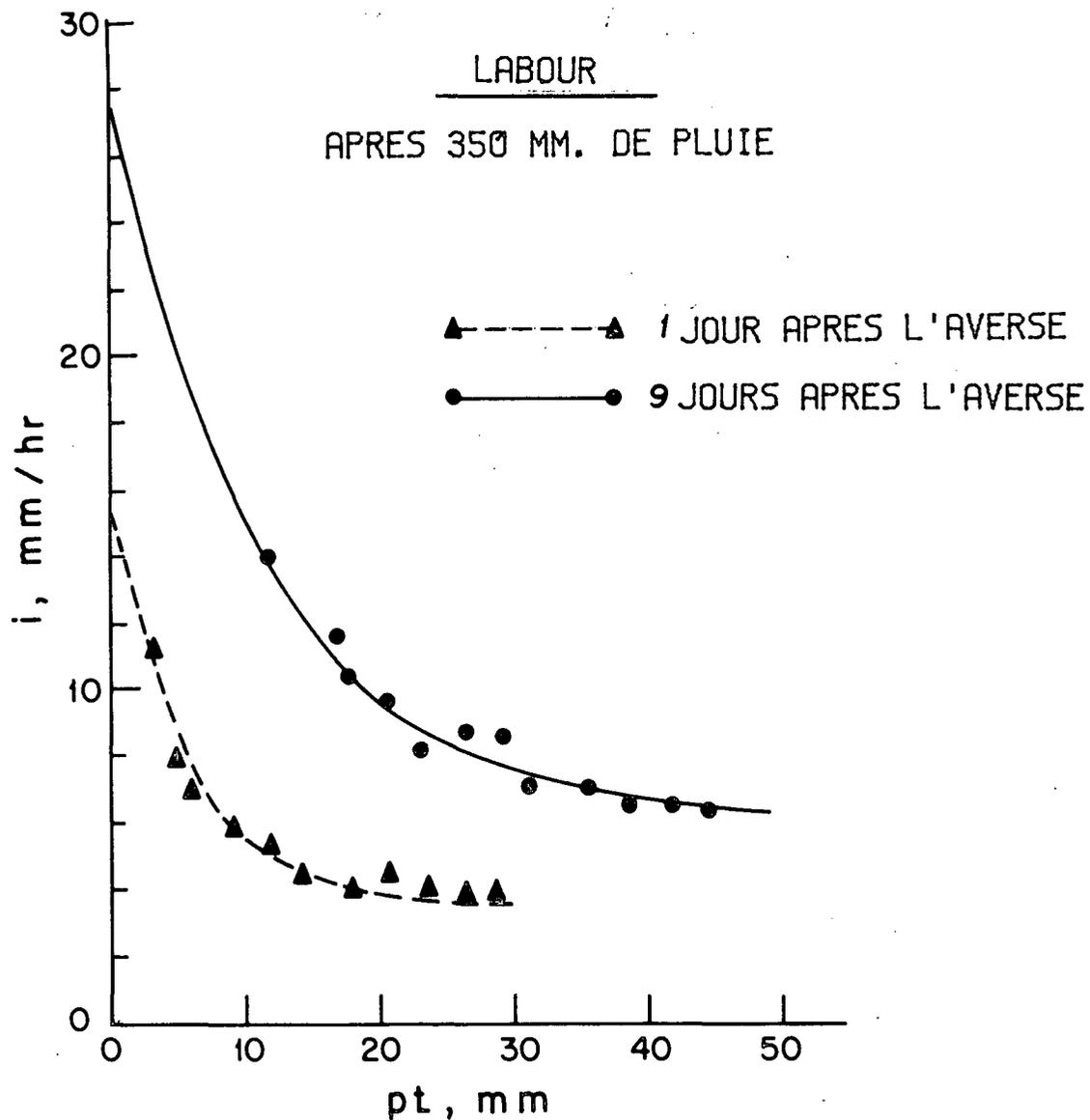


Fig. 4.85: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie. (Israël).

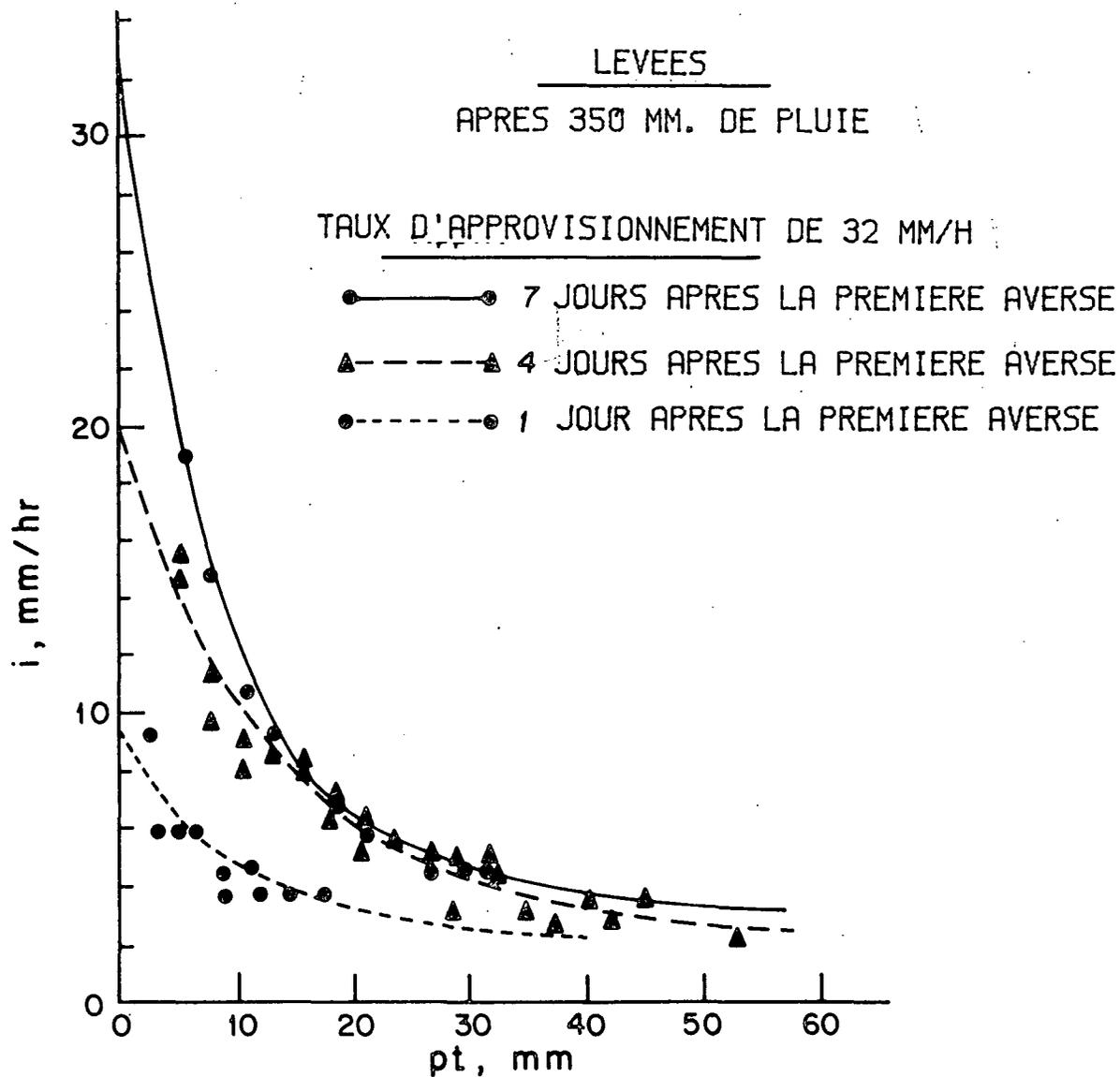


Fig. 4.86: Infiltrabilité en fonction de la quantité totale d'eau fournie. (Israël).

pratiquement complet est obtenu entre 4 et 7 jours dans les conditions du champ. L'infiltrabilité finale des parcelles de disquage et de levées est d'environ 2mm/h, tandis que celle des parcelles labourées est d'environ 4mm/h. Aussi petite que semble être cette différence, elle peut avoir une influence considérable sur la production du ruissellement de surface dans le champ. Comme le niveau général de l'infiltrabilité est très bas, et qu'il y a des sols affectés par le sodium dans la région, on réalisa une expérience dans le but de comparer l'eau distillée avec l'eau du robinet, afin de vérifier s'il existe une différence dans l'infiltration sous eau de pluie ou sous irrigation d'été. On a supposé que si le sol était affecté par le sodium, l'apport d'eau distillée causerait une plus grande dispersion du sol, et donnerait donc une infiltrabilité beaucoup faible. Les données de la figure 4.83 montrent qu'il n'y a pas de différence essentielle entre l'eau du robinet et l'eau distillée. Sur la parcelle qui a subi un disquage avant l'irrigation, l'essai de pluie montre premièrement une infiltrabilité initiale apparente élevée, qui ne retomba pas en dessous du taux d'application avant qu'environ 30mm d'eau n'aient pénétré dans le sol. Deuxièmement, le dernier taux observé qui n'a pas encore atteint l'infiltrabilité finale stable fut d'environ 4mm/h, tandis que dans la parcelle anciennement disquée, il ne fut que de 2mm/h. On peut obtenir quelque amélioration, quoique provisoire, en travaillant le sol pendant l'hiver. On a utilisé ci-dessus le terme d'infiltrabilité apparente, car le taux d'infiltration est calculé comme le taux d'apport moins le ruissellement de surface. Il est possible que le résultat plus élevé obtenu soit dû à l'augmentation du stockage de surface, elle-même due à l'augmentation de la rugosité de la surface, qui est certainement un phénomène temporaire. Comme le stockage de surface est généralement faible, de l'ordre de quelques millimètres tout au plus, il n'en est pas moins surprenant

qu'après qu'un encroûtement maximal a été atteint, l'infiltrabilité dans le sol labouré soit plus élevée que dans le sol disqué (figures 4.84, 4.85). Ceci peut être une indication que les propriétés de la croûte ne sont pas le seul facteur déterminant de l'infiltrabilité, et que les conditions de la couche sous-jacente à la croûte ont aussi leur importance. Les tests de laboratoire donnèrent eux-aussi une infiltrabilité supérieure à celle des tests en champ, ce qui est probablement dû au fait que la stabilité finale de la croûte n'a pas encore été atteinte.

Les différents coefficients obtenus d'après les tests de laboratoire et de champ furent appliqués à 6 averses, le ruissellement de surface calculé fut comparé au ruissellement de surface observé, les coefficients de corrélation et les écarts-type furent calculés (table 4.47). On voit que c'est l'équation dérivée du laboratoire qui a donné la meilleure prévision, et que l'équation dérivée du ruissellement de surface maximal en champ est presque aussi bonne. La raison de ceci n'est pas encore claire aujourd'hui. La valeur de cette analyse réside dans sa capacité de prévoir le ruissellement de surface et l'infiltration d'une surface donnée, d'après des tests effectués au champ ou au laboratoire, sur de petites parcelles à l'aide d'un infiltromètre, dans la mesure où des données standards de précipitation sont disponibles. Il est donc possible d'obtenir quelque orientation concernant la conception de structures hydrauliques, et de méthodes de conservation de l'eau ou du sol, sans avoir à collecter des données de champ de parcelles à grand ruissellement de surface sur plusieurs années. Bien que cette analyse ne soit pas encore complètement terminée, on peut tirer quelques conclusions intermédiaires à partir des données qualitatives rapportées plus haut.

Table 4.47: Comparaison entre les quantités de ruissellement de surface observées, provenant d'averses choisies à Alumim en hiver 1979, et les quantités calculées d'après les équations dérivées des expériences avec simulateur de pluie en champ et en laboratoire.

DATE DE L'AVERSE	PRECIPITATION MM	RUISSellement DE SURFACE MESURE DANS LA PARCELLE DISQUEE, MM	RUISSellement DE SURFACE CALCULE		
			DONNEES DE CHAMP, MOYENNE MM	DONNEES DE CHAMP, RUISSellement DE SURFACE MAXIMAL, MM*	TESTS DE LABORATOIRE, RUISSellement DE SURFACE MAXIMAL, MM
29/11/79	63	20	20,0	23,5	23,9
06/12/79	42	19	13,9	20,2	19,7
14/12/79	52	35	18,2	31,3	29,1
27/12/79	66	20	4,7	11,8	16,2
07/01/80	67	35	17,4	25,2	32,6
23/01/80	89	44	37,5	40,9	46,0
Total	379	173	112	153	168
Différence moyenne entre mesuré et calculé			10,2	3,3	0,9
Ecart type de la différence			7,2	5,3	3,7

* Les données moyennes de champ représentent la moyenne de plusieurs expériences. Le ruissellement de surface maximal représente les données des expériences.

4.4.7 - Résumé

La configuration de la surface du sol en levées, préférée des agriculteurs du Nord du Néguev et de nombreux endroits des tropiques semi-arides, est la plus mauvaise des solutions possibles pour la prévention du ruissellement de surface et pour la conservation de l'eau, ainsi que pour la prévention de l'érosion. Dans le cas présent, même dans une année avec une précipitation annuelle moyenne de 150%, la profondeur de l'humidification fut à peine suffisante dans les parcelles de levées ou de disquage. Dans le traitement de labour, une profondeur d'humidification suffisante fut atteinte

à la fin-Janvier, après 380mm de pluie, ce qui est proche de la moyenne à long-terme. Si l'on suppose que dans une autre année "normale", la taille des averses et leur répartition dans le temps sont les mêmes, ou qu'elles n'influencent pas l'infiltration totale (supposition qui est certainement une sur-simplification), dans ce cas, un champ en jachère labouré devrait obtenir un réapprovisionnement suffisant dans une telle année, en dépit du ruissellement de surface et des pertes prévisibles par érosion. Dans le traitement des barrages de rigoles, une profondeur d'humidification suffisante (150mm) fut atteinte cette année-là à la mi-Janvier, après 320mm de pluie. C'est donc ce traitement qui semble être particulièrement efficace pour les années relativement sèches. Une analyse statistique des résultats des précipitations de 24 années à l'endroit-même de cette expérience a été effectuée par Morin, et montre qu'il y a une probabilité de 50% que la précipitation d'une année excède 375mm, une probabilité de 80% qu'elle excède 275mm et de 70% qu'elle excède 330mm. Ainsi, dans 30% des années, la précipitation (en termes de probabilité) est inférieure à 330mm. Pendant une telle année, seules des rigoles avec des barrages pourront réapprovisionner le stockage de façon suffisante. Cette année-là, alors qu'une précipitation normale moyenne de 380mm a été atteinte, la profondeur d'humidification des parcelles de levées n'a été que de 75mm, environ la moitié de la profondeur requise. L'exploitant israélien doit donc rajouter 100mm de pré-irrigation pour sa culture d'été, ce qui représente environ 25% de son budget d'eau de l'été. Le prix actuel de l'eau d'irrigation justifie les mesures requises pour la conservation de l'eau. Cependant, dans les conditions de manque d'eau, lorsque l'eau est rationnée suivant des règlements administratifs, ou lorsque la seule méthode possible de culture est l'agriculture basée sur la pluie, la valeur réelle de l'eau dépasse son prix officiel.

4.5 - Observations sur les activités d'un exploitant local

Les travaux des champs d'un exploitant local près de Niono ont été observés pendant la saison pluvieuse de 1979. Un rapport détaillé est donné dans l'appendice 4, et un résumé des faits les plus importants est donné ici.

4.5.1 - L'exploitant.

L'exploitant dont la ferme fut observée appartient à la tribu des Bambara, tribu d'agriculteurs représentant un pourcentage important de la population du Mali. Cet agriculteur ne peut pas être considéré comme un agriculteur "moyen" de cette région. Pendant les recherches, son principal travail était chauffeur pour un projet de recherches hollandais à Niono. La taille de sa famille, c'est-à-dire le nombre de personnes dépendant de son entreprise agricole, était de 26 personnes en 1979. A cause de son travail de chauffeur, les activités journalières de la ferme étaient réalisées par son jeune frère et par un ouvrier permanent.

4.5.2 - La ferme.

L'agriculteur possédait en 1979 une surface de 39 hectares. 33 hectares de cette surface devaient être plantés de millet et le reste d'arachide. Une ferme de 39 hectares peut être considérée comme étant de taille importante dans cette région, bien qu'on ne puisse obtenir d'information officielle sur la taille des exploitations. Selon une estimation grossière, la taille moyenne d'une exploitation varie entre 5 et 10 hectares. En général, les pentes dans les champs (dans un bloc) n'excédaient pas 1.5%. Au moment de la préparation du sol, le champ n'était pas nu, des arbres et des branches d'arbustes étant dispersées sur sa surface. Environ 75% de la

surface totale était cultivable.

4.5.3 - Le sol.

Les caractéristiques physiques du sol ont été mesurées et rapportées dans les figures 4.87 et 4.88.

4.5.4 - L'équipement agricole.

L'équipement (personnel) disponible de cet agriculteur consistait en trois charrues à traction animale. Deux de ces charrues étaient équipées d'un versoir normal (sans coutre ni autre ustensile), et la troisième d'une butteuse. Les charrues étaient supportées à l'avant par une roue. Chaque charrue était tirée par une paire de boeufs (des zébus) au moyen d'un double joug et d'une chaîne. En plus de ces charrues, seules des houes à bras étaient utilisées, avec un bras court ou long, et une lame de fer. Il n'y avait aucun autre outillage. Pour les transports entre les champs et le marché, on se servait d'une charrette à deux roues (pneus) tirée par un âne.

4.5.5 - Les activités de l'agriculteur.

Comme le sol était trop dur pour être travaillé à sec par traction animale, l'agriculteur fut forcé d'attendre que le sol fût ramolli par la pluie. La décision de commencer les opérations fut basée en grande partie sur la quantité de pluie tombant au début de la saison pluvieuse, mais aussi sur les probabilités et prévisions d'un mode de précipitation plus stable et plus fiable. Ce dernier est évidemment basé sur l'expérience de l'agriculteur. Bien qu'en 1979 il y eut à peu près 50mm de pluie à la fin du mois de Juin, ceci ne constituait pas, aux yeux de l'agriculteur, une bonne raison pour

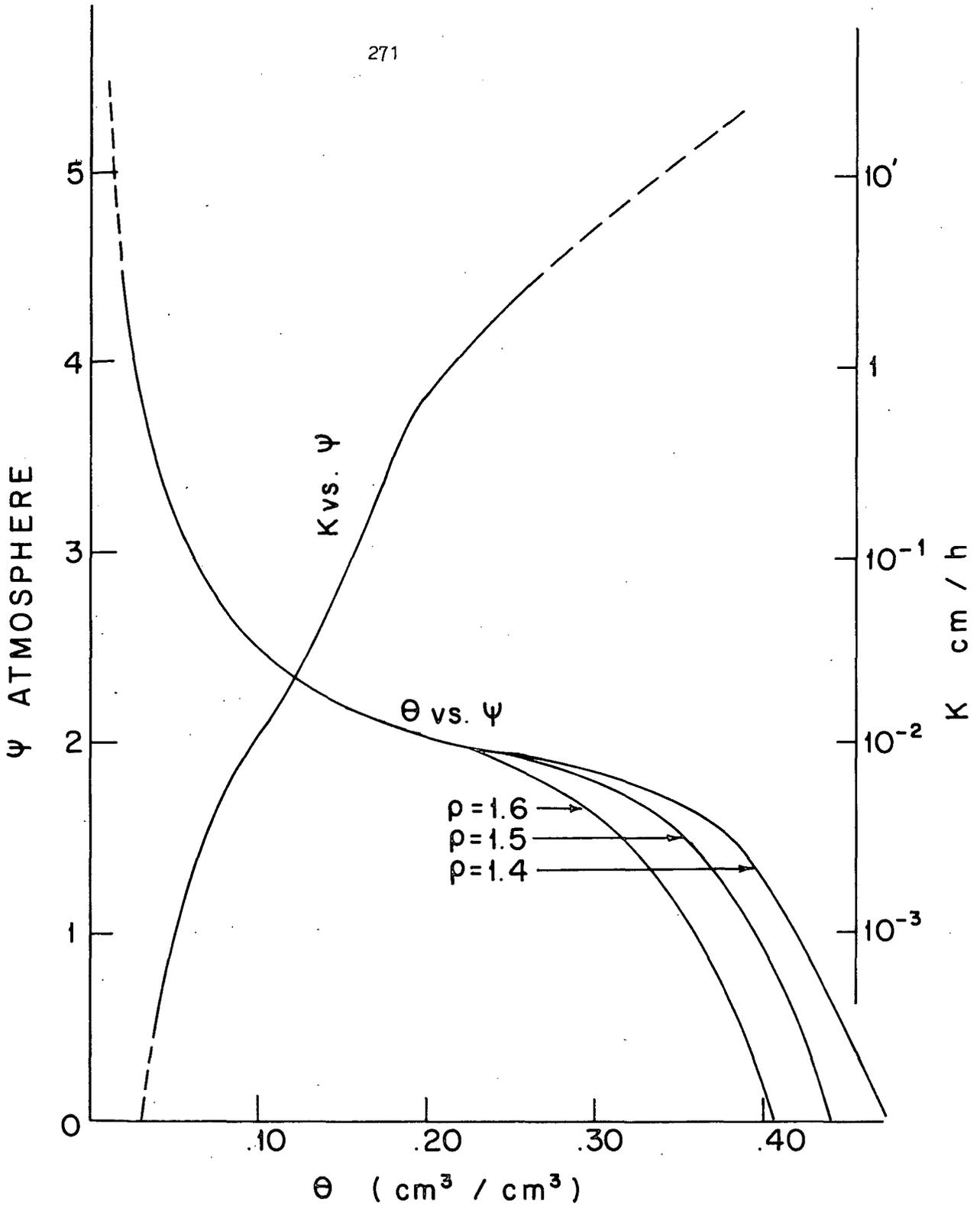


Fig. 4.87: Propriétés hydrauliques du sol S1N, Niono, Mali.

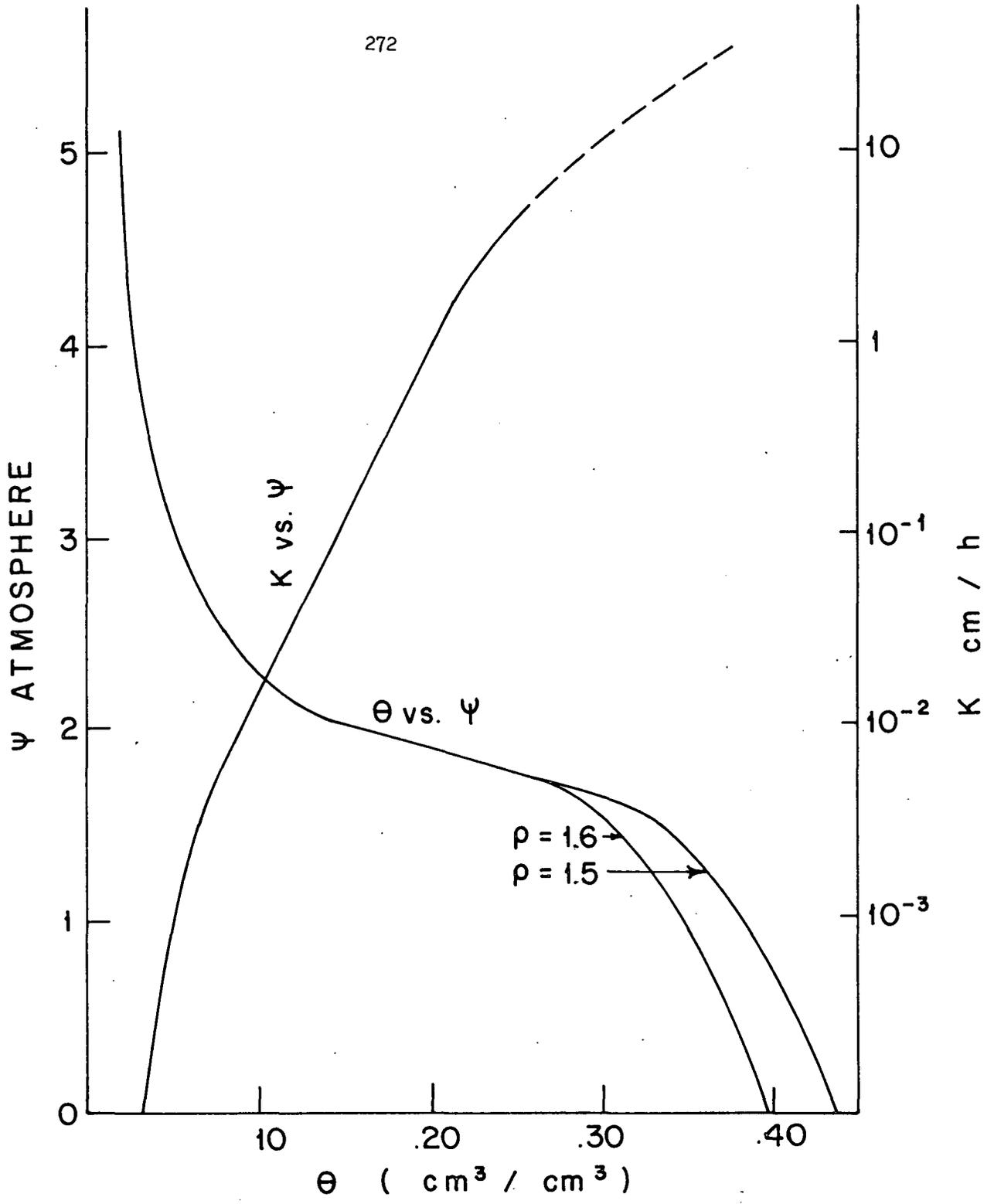


Fig. 4.88: Propriétés hydrauliques du sol de Millet, Niono, Mali.

commencer ses activités. Cependant, on a semé en Juin, dans cette région, un peu de millet de type "actif" (ou millet Gero, Kassam, 1976). C'est un millet dont la période de croissance dure deux mois, comparé au millet de type "tardif" (ou Maiwa) dont la période de croissance dure environ cinq mois.

L'agriculteur commença la préparation du lit de semence le 16 Juillet (par comparaison avec le 5 Juillet en 1978). Les 16 millimètres de pluie du 15 Juillet furent considérés comme une quantité suffisante pour un bon départ. Les premières activités eurent lieu sur une partie du champ qui avait également été mise en culture les années précédentes. Sur cette partie du champ, on pouvait encore distinguer la forme des levées. La teneur hydrique dans les (anciennes) rigoles était de 4.3%, et de 2.9% au sommet des levées (pourcentage pondéral mesuré à 10cm du haut). Cependant, après trois jours, la teneur hydrique du sol fut de nouveau trop basse, et les animaux, en particulier les boeufs de l'adosseuse, n'arrivèrent pas à tirer. On décida alors de déplacer les activités en un endroit plus bas du champ (les bas-fonds), où la teneur hydrique était encore assez élevée. Le cinquième jour, la teneur hydrique y devint trop basse, et on interrompit toute activité. Après les 8,5mm de pluie du 22 Juillet, on reprit les activités, et on ne rencontra plus de problème supplémentaire concernant la teneur hydrique pendant la poursuite des travaux de la terre.

En 1978, du millet poussait sur environ 15 hectares. Comme aucun travail n'eut lieu après la récolte, les traces des levées étaient encore visibles. Sur la terre récemment acquise, la surface était encore vierge et plate avec une verdoyante végétation. Le système de travail sur les deux parties du champ fut essentiellement le même, mais à cause de l'état initial de la surface du sol, les opérations furent différentes. Sur la terre précédemment travaillée, la position des levées ne fut pas changée, et celles-ci furent

reconstruites en reformant les rigoles. Ce travail fut réalisé avec la charrue à versoir en passant deux fois sur la même rigole, dans les deux directions opposées, transportant ainsi le sol de la rigole sur la levée. Les deux boeufs étaient attachés à la charrue de telle façon que l'un des deux avançait dans la rigole à ouvrir ou tout juste ouverte. La charrue était équilibrée au premier passage, mais pas au deuxième. Il fallait maintenir la charrue inclinée sur le côté de façon à tracer une ligne droite. Avec l'adosseuse, la reconstruction des levées fut effectuée en passant une seule fois dans la rigole, ce qui résulta en un travail de meilleure qualité, et sans problèmes d'équilibrage.

Sur la partie vierge du champ, la qualité du travail avec la charrue à versoir fut supérieure, car la végétation exigeait que le sol fût retourné. Le problème de l'équilibrage lors du deuxième passage fut également moindre. L'adosseuse réalisa un mauvais travail car le sol ne pouvait pas être retourné et transporté assez loin pour former une levée de taille raisonnable. Les racines d'herbes situées en faible profondeur posèrent plus de problèmes dans cette partie du champ, car le pouvoir de coupe de la lame de l'adosseuse était inférieur à celui de la charrue à versoir.

Chaque paire d'animaux attelés à la charrue ou à l'adosseuse était conduite par un jeune garçon qui guidait les animaux par devant, et par une personne plus âgée dont le rôle était de diriger la charrue afin que l'un des deux animaux suive la rigole. Les deux premières paires de boeufs consistaient en un animal âgé et bien entraîné, et en un deuxième, plus jeune, qui devait être entraîné pendant ces travaux du sol. La troisième paire d'animaux, celle qui devait effectuer la mise en levées, qui est un travail plus difficile, consistait en deux boeufs plus âgés et bien entraînés. Il faut mentionner que, par rapport aux travaux du sol effectués

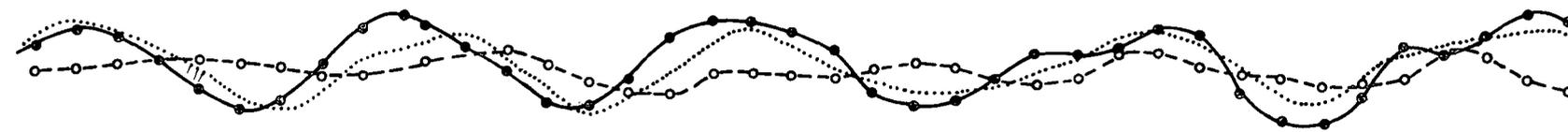
par d'autres agriculteurs de la région, les ouvriers n'ont pas très bien travaillé.

La distance entre les levées était en moyenne de 80cm, variant de 60 à 100cm suivant le système de travail du sol et le degré de qualification de la main-d'oeuvre employée. La hauteur des levées, immédiatement après leur construction, était de 20 à 25cm, mais diminuait sous la pluie. On fit quelques mesures sur la taille des levées, (cf. figure 4.89).

Les semis de millet furent effectués à la main, de la façon suivante. Les graines sont transportées dans une coupe faite dans unealebasse. Le semeur prend environ 15 petites graines entre le pouce et les autres doigts, et les dépose délicatement (en position debout) sur le sommet de la levée fraîchement labourée, sans faire de trou pour la plante. Avec le pied du semeur, les graines sont alors recouvertes et enfoncées dans le sol, obtenant ainsi un meilleur contact graine-sol, ainsi qu'un meilleur approvisionnement d'humidité à la graine. La profondeur du semis ne dépasse pas un à deux centimètres. Les graines de millet ont été ici mélangées à des haricots de variété "Niebe" (*Vigna linguiculata*), pour fournir de la nourriture aux animaux de la ferme après la récolte du millet. Le rapport millet-haricots "Niebe" fut tel que dans la pousse finale une plante de millet sur neuf contenait une plante de "Niebe" (type rampant). La distance entre deux plantes fut d'environ 1.10m (deux petits pas de semeur).

L'émergence des graines semées fut faible à cause de la basse teneur hydrique du sol (environ 4%). Une surface de presque quatre hectares fut labourée et semée de nouveau, à cause de cette raison. Le 8 Août, les plantes de la surface semée avant le 26 Juillet furent comptées. L'émergence fut de 63% .

Le 22 Août, furent comptées les plantes de la surface semée entre le 26



276



..... AVANT PREPARATION
 —●— IMMEDIATEMENT APRES PREPARATION
 -○- APRES 2 SEMAINES ; ETAT CONSOLIDE

0 10 20 30 40 50 60
 ECHELLE , CM.

Fig. 4.89: Mesures du relief du champ de l'agriculteur.

Juillet et le 15 Août, le pourcentage d'émergence ici fut de 76%, et dans une des parcelles située plus bas (donc plus humide), ce taux fut même de 89%. Ces pourcentages sont tout-de-même assez bas car, sur chaque "butte", 15 graines furent semées, et à peine une plante par butte fut comptée. Une germination de 70% fut déterminée au laboratoire.

On a observé que l'émergence dans les dépressions ne fut pas maximale, à cause d'un excès d'eau, provoquant la mort des plantes germées.

Les activités au champ pendant le travail du sol et les semis furent telles qu'on ne peut pas donner un exemple-type des activités journalières ou hebdomadaires. Avant le début des travaux au champ l'agriculteur a donné le schéma général suivant de ses activités:

- début des travaux du sol à 7h du matin, travail continu jusqu'à 13h, avec une pause pour le repas.
- à ce moment, les boeufs ont terminé leur tâche quotidienne et peuvent se reposer.
- les laboureurs vont à présent ensemençer la surface préparée le matin.
- le travail quotidien se termine aux environs de 15h.

En pratique, ce schéma ne fut pas tellement respecté, mais les surfaces furent toujours préparées et ensemençées le même jour. Les semis furent souvent effectués par l'un des laboureurs dans les moments où les boeufs se reposaient (pendant de brèves pauses le matin). Les semis étaient considérés comme un travail moins fatigant, et étaient effectués en rotation par les ouvriers.

Les travaux du sol et le semis se terminèrent le 15 Août, un mois après avoir commencé. Cette date est principalement dictée par la photopériodicité du millet; tout le millet "tardif" mûrit approximativement à la même date sans rapport avec la date de semis, de sorte que les plantes

semées plus tard n'ont qu'une brève période de croissance. Il ne serait pas rentable de planter ce type de millet après le 15 Août, car le rendement serait probablement très bas.

Bien qu'on ne puisse pas étudier de façon précise l'organisation du travail à cause de son déroulement irrégulier, on peut faire une approximation comme le montre la table ci-dessous. En supposant qu'une journée de travail compte sept heures et demie, et que la distance entre deux levées est de 80cm, la vitesse de travail et le rendement ont été mesurés.

Rendement et vitesse de travail pendant les opérations de préparation du sol.

	ZONE "VIERGE"		ZONE PREPAREE EN 1978	
	RENDEMENT DE TRAVAIL (HA/JOUR)	VITESSE (KM/HR)	RENDEMENT DE TRAVAIL (HA/JOUR)	VITESSE (KM/HR)
Adosseuse	0,35	0,88	0,74	1,16
Charrue à versoir	0,35	1,09	0,41	1,28

Le labour fut évidemment plus aisé sur la surface précédemment cultivée, et les animaux purent tirer la charrue et l'adosseuse à une plus grande vitesse que sur la surface "vierge". L'appareil à levées n'a pas particulièrement bien fonctionné sur la surface "vierge", à cause des problèmes déjà mentionnés, et la profondeur du labour fut également difficile à conserver, ce qui influença également la vitesse du travail.

4.5.5.1 - La conservation du sol et de la culture pendant la période de croissance.

Environ trois jours après la fin des travaux de préparation du sol et le

semis, on termina également le ré-ensemencement et on commença le désherbage. Cette opération fut aussi effectuée avec une charrue. Comme l'expliqua l'agriculteur, cette opération combine les actions de lutte contre les mauvaises herbes et de renforcement des levées. On n'utilisa cependant pas l'adosseuse à cause de son action coupante jugée insatisfaisante, et de son mauvais travail. Ceci aussi fut l'initiative de l'agriculteur, car le fait de recouvrir de terre les petites herbes présentes à l'aide de l'adosseuse aurait pu donner des résultats tout à fait satisfaisants, en ce qui concerne la suppression des mauvaises herbes.

Le désherbage avec la charrue fut alors effectué, presque de la même façon que les travaux de préparation primaire: chaque rigole fut labourée deux fois, lors du premier passage, un côté de la levée fut coupé par la charrue et la terre fut rejetée de l'autre côté. Lors du deuxième passage, on fit la même opération, mais sur le deuxième côté de la levée. Le résultat final fut efficace en ce qui concerne la lutte contre les mauvaises herbes, mais les levées avaient à présent une pente raide et une pente plus douce. Après une lourde averse, le sol de la pente raide fut emportée dans la rigole, découvrant ainsi les racines des plantes de millet. L'ouvrier devait également diriger la charrue avec beaucoup de précaution, afin de ne pas couper les racines des plantes avec la lame.

La quantité de travail requise pour le désherbage avec la charrue fut de 0,50 hectare par charrue, par jour (une équipe de deux personnes). Par comparaison avec les travaux de préparation primaire, le désherbage fut réalisé plus vite, ce qui indique une plus faible résistance du sol. Les activités de désherbage furent réduites au stade de trois à quatre feuilles (des mauvaises herbes). A la fin des opérations, une surface de 8 hectares fut couverte. Ceci n'est pas habituel, (en général, toute la surface est

dés herbée au moins une fois), mais dans ce cas, l'agriculteur eut besoin de la main-d'oeuvre et de l'équipement pour ses rizières.

En plus de la lutte contre les mauvaises herbes, les activités de dés herbage avec la charrue ont une influence sur l'infiltrabilité du sol, car elles brisent la surface étanche qui se forme sous la pluie. Il semble qu'un dés herbage répété (soit à l'aide d'une charrue, soit manuellement à l'aide d'une houe) n'est pas réalisé dans le seul but d'améliorer l'infiltration de l'eau de pluie. On a pu observé que, dans de très nombreux cas, des opérations de dés herbage furent effectuées dans des champs contenant très peu de mauvaises herbes.

Il est intéressant de noter que le champ personnel d'un travailleur permanent (et garde), adjacent au champ de notre agriculteur, était dans un état meilleur et plus propre, à cause d'un meilleur entretien. On n'utilisa pas d'herbicides chimiques contre les mauvaises herbes.

Insectes et maladies. La lutte contre les insectes et les maladies fut uniquement de nature préventive, en traitant les graines avant le semis avec un insecticide qui nous est inconnu. Un problème plus important dans cette région est que les graines sont arrachées et mangées par les fourmis. Aucune autre mesure de protection des cultures ne fut prise pendant la période de croissance. Dans les régions de plus de 600mm de précipitation, les maladies sont plus fréquentes. On a observé quelques dégâts causés par les sauterelles.

Production de graines et de matière sèche. Les rendements finaux furent mesurés le 10 Novembre, le rendement en grains fut de 326kg/ha, la production totale de matière sèche fut de 1233kg. En comparaison avec les situations

rapportées par Kassam (1976) et Irvine (1976), ceci semble être la moyenne dans ces régions climatiques, mais ce rendement est en fait très bas, par rapport au rendement potentiel de ces régions qui de 10 à 15 fois élevé (Penning de Vries et Djiteye, 1980). (voir également les résultats d'Israël).

L'humidité du sol fut mesurée pendant la période de croissance à des endroits déterminés (voir Appendice 4). Il y eut une nette différence dans le stockage de l'humidité dans le sol entre les endroits situés le long des pentes et les dépressions. Il est clair que la teneur hydrique plus grande de l'endroit le plus bas est due à un écoulement d'eau venant des zones plus élevées.

Grace à une bonne répartition des pluies après le semis pendant cette saison des pluies, il n'y eut pas de problèmes sérieux d'approvisionnement d'eau, mais il se peut que les zones plus élevées souffrent de la sécheresse, lorsque l'intervalle entre deux pluies est plus long, et que le ruissellement de surface n'est pas empêché.

4.5.6 - Les levées à barrages.

A cause du ruissellement de surface observé et de la rapide formation d'une croûte de surface après une pluie, on a pensé que le moyen le plus simple et le plus efficace de produire un mode uniforme d'infiltration, serait un stockage semi-permanent de l'eau à la surface du sol. Comme les levées sont, dans cette région, la base des systèmes de culture, on pourrait facilement y instaurer un système de levées à barrages. Ce système fut développé, entre autres, pour les régions agricoles d'Afrique centrale et occidentale par le NIAE (Fao, 1966), comme aux Etats-Unis dans les années 30.

Bien que ce système soit, à l'origine, prévu pour les exploitations mécanisées dans les régions à haute précipitation, les principes de base peuvent également être appliqués à d'autres régions. Un essai préliminaire fut réalisé sur le champ de l'agriculteur afin d'étudier l'influence sur le système de levées et de rigoles.

Les parcelles furent construites, avec des barrages tous les 4 mètres, sur une largeur de 5 levées, c'est-à-dire environ 4 mètres. Pendant la période située entre la mi-Août et la fin Septembre, on n'observa aucun ruissellement de surface sur ces parcelles, sauf après la lourde averse du 4 Août (80mm). Pendant cette averse particulière, les barrages furent endommagés, et un ruissellement de surface se produisit. Les dégâts se limitèrent (à cette petite échelle) aux barrages, et l'eau put s'écouler le long des rigoles, sans déborder. La construction de levées à barrages résulte en un plus grand stockage de l'humidité dans le sol: aux emplacements A et B, respectivement 61% et 13% de plus que dans les parcelles de contrôle furent mesurés (en moyenne sur toute la période des mesures).

Bien qu'on ait obtenu des résultats positifs, il faut se rappeler que la construction des barrages et leur conservation à des intervalles réguliers est un travail fastidieux. Le système peut cependant être mécanisé, simplement en utilisant la traction animale, ce qui ne demande qu'un faible investissement de capitaux. On peut introduire un équipement destiné à la construction des barrages, comme par exemple des disques montés sur une carcasse de charrue, éventuellement tirée par des animaux, ainsi que l'a proposé l'ICRISAT (1979). L'équipement peut être manoeuvré par un bras ou manuellement (en soulevant les disques à des intervalles réguliers pour former les barrages), ainsi que l'a décrit le FAO (1966). Des résultats quantitatifs supplémentaires sur ce système sont donnés dans la section décrivant le

travail effectué en Israël.

4.5.7 - Influence des travaux de préparation de la surface sur l'infiltration.

Une faible infiltrabilité du sol est une conséquence de la formation d'une croûte de surface. Sur un sol fraîchement préparé, le taux d'infiltration est élevé, mais décroît rapidement, à cause de la pluie, jusqu'à un taux final faible et constant (voir appendice 3). Sous la deuxième pluie et les suivantes, le taux d'infiltration fut bas depuis le début de la pluie. La destruction de la croûte, même superficiellement comme par les opérations de désherbage, peut améliorer l'infiltrabilité. A deux endroits (A et B), de petites parcelles furent aménagées, desquelles on pouvait collecter l'eau du ruissellement de surface.

Dans la table ci-dessous, figurent les résultats des deux endroits, sur le ruissellement de surface des parcelles régulièrement cultivées (désherbage et destruction de la croûte après chaque averse) et des parcelles où seul un désherbage fut effectué, (en arrachant les mauvaises herbes). Les données présentées dans la table sont les moyennes de cinq pluies, toutes inférieures à 20mm.

Ruissellement de surface provenant des parcelles avec différents systèmes de protection des cultures: le ruissellement de surface est exprimé en pourcentage de pluie totale.

Moyenne de cinq pluies (inférieures à 20mm).

EMPLACEMENT/ TRAITEMENT	PENTE DE LA PARCELLE (%)	RUISSELLEMENT DE SURFACE (%)
A (croûte brisée)	0,8	15,5
A (encroûté)	0,8	60,3
B (croûte brisée)	1,4	7,7
B (encroûté)	1,4	45,0

4.5.8 - Conclusions.

Dans le but d'améliorer les conditions de vie de la population des pays semi-arides ou en voie de développement, il est d'une extrême importance de bien connaître ces régions.

Même si un projet de recherches a pour but l'amélioration des aspects "techniques", comme la production agricole, en plus des facteurs physiques comme le climat, les sols, les cultures, etc..., il faut également étudier l'environnement socio-économique. Lorsque l'on trouve certaines solutions techniques aux problèmes, il faut vérifier que ces solutions (qui impliqueront inévitablement des changements dans les pratiques habituelles de l'agriculteur) ont des chances d'être adoptées.

Dans cette étude, nous avons essayé de déterminer certains aspects des activités des agriculteurs; à cause des objectifs de ce projet, nous avons accordé une attention particulière aux pratiques agricoles, spécialement aux opérations au champ de préparation du sol, de semis et de protection des cultures. Ces opérations (et surtout la préparation du sol) requièrent de l'agriculteur la plus grande partie de son travail et de son temps pour la production de nourriture pour lui-même et pour sa famille.

Etant donné le peu de temps disponible, on ne put étudier en détail que le "comment" des activités de l'agriculteur, mais pas le "pourquoi". Malgré ces restrictions, on a pu tirer les conclusions suivantes, mais il faut se rappeler que certaines de ces conclusions ne peuvent être appliquées à d'autres régions.

- Le programme des activités est entièrement dicté par le climat, à cause de l'apport limité en énergie et des conditions défavorables du sol (le début des travaux de préparation demande l'humidification du sol). La décision de commencer est prise avec un minimum de risques, par exemple tôt dans la

saison, au moment où la couche arable est suffisamment humide pour commencer le labour. Ce labour précoce peut être effectué comme des travaux de préparation primaire, dans le but d'ouvrir la surface à l'infiltration de l'eau de pluie, et d'avoir le lit de semence prêt pour le semis qui a lieu environ un mois plus tard. Cependant toutes les activités ne débutèrent qu'au moment de planter, et la raison donnée par l'agriculteur fut qu'il ne voulait pas risquer qu'il arrivât quelque chose à ses bêtes si tôt après la période de sécheresse (période où elles se trouvaient dans un état physique assez faible).

- Seule une légère attention fut accordée à la lutte contre les mauvaises herbes, car notre agriculteur estima que ses activités dans les rizières étaient plus importantes. Les agriculteurs dans les régions sèches, qui n'ont pas de terre irriguée, passent plus de temps sur leurs champs de millet qui ont, de ce fait, une bien meilleure apparence.
- Les agriculteurs de la région se rendent certainement compte des limitations du travail animal disponible, et peuvent très bien imaginer quels sont les avantages d'un travail programmé, bien qu'ils ne réalisent probablement pas le nombre de problèmes associés à l'utilisation ou à l'introduction de tracteurs (par exemple).
- Les agriculteurs ont réalisé que les pertes en eau de pluie ont lieu pendant les pluies intensives. A cause de la nature des sols et de la topographie de la région, il fut difficile d'observer une érosion. Il n'est techniquement pas possible de prendre des mesures efficaces pour empêcher les pertes par ruissellement de surface; les agriculteurs se méfient des systèmes qui empêchent le ruissellement de surface. Par exemple, on ne vit pas de levées le long des lignes de contour, car les agriculteurs craignirent qu'un écroulement éventuel des levées ne causât un débordement

et beaucoup plus de dégâts que la perte d'eau dans leur système actuel.

- Le système actuel de culture dans cette région, sous forme de reconstruction des levées existantes, est un système rationnel, car moins de 50% de la surface totale est retravaillée. On peut cependant améliorer la réalisation de l'opération. La charrue à versoir n'est pas l'outil idéal pour la construction des levées, malgré son influence bénéfique contre les mauvaises herbes due à l'action inverse du soc. Notre agriculteur s'est rendu compte de ce fait, et dès que ses moyens financiers lui permirent d'acquérir de l'équipement, il acheta un appareil à construire les levées. Le choix des outils était très limité et ce type particulier d'adosseuse ne fut pas idéal. Un appareil à levées de taille et de forme appropriées, et comprenant éventuellement un couteau pour désherber, conçue de façon à suivre les contours des levées et des rigoles, peut apporter une amélioration. Il est clair que ces outils (un peu) plus perfectionnés demandent des travailleurs plus compétents; lorsque la distance entre les levées dépasse de beaucoup la moyenne, un couteau à désherber peut faire plus de mal que de bien.
- L'introduction de pratiques modifiées pour la conservation de l'eau sur les pentes et sur les endroits plus élevés des champs demande également des changements supplémentaires; un des moyens possibles pour empêcher le ruissellement de surface est la construction de levées à barrages, système qui peut très bien s'adapter à un modèle de levées déjà existant. L'efficacité de ce système, du point de vue de la conservation de l'eau et de l'augmentation du rendement (ce qui, finalement, est le plus important), doit être étudiée à fond, et, en attendant, il faut rechercher la solution la plus pratique pour la construction des barrages et pour leur conservation pendant la saison des pluies. Il est clair que l'efficacité d'un tel système dépend en grande partie du mode de précipitation.

- D'autres systèmes de culture doivent également être étudiés, on peut, par exemple, construire des levées plus larges (pour empêcher leur écroulement et le débordement d'eau) le long des lignes de contour; ce système peut également avoir une influence bénéfique sur la conservation de l'eau, mais il faudra un expert pour la détermination des lignes de contour.
- Un point très important pour les recherches ultérieures est l'attention qu'il faut accorder à l'interaction entre les effets des travaux de préparation sur le sol, l'eau et la plante. Il est indispensable de coopérer avec d'autres disciplines, dans le but de réussir dans les changements introduits dans les pratiques agricoles de cette région.

5 - RESUME ET CONCLUSIONS GENERALES

Des expériences au champ et au laboratoire ont été réalisées en Israël, en Hollande et au Mali, dans le but d'étudier différents aspects des propriétés structurales d'un sol nécessitant des travaux de préparation, avec l'objectif de définir quelles sont les conditions critiques à la culture sous les conditions semi-arides. Les principales questions étudiées furent les effets des travaux de préparation primaire et de la structure de la couche de surface (en général comme conséquence de la préparation du lit de semence), sur le rendement de la culture, l'accent étant mis surtout sur l'influence des traitements sur le régime hydrique du sol.

Les techniques expérimentales incluent :

- 1) des expériences au champ sur de larges parcelles de sorgho, d'arachide et de coton, avec des régimes de précipitation africains simulés par un système d'irrigation par aspersion, qui ne possède pas l'énergie cinétique élevée des précipitations naturelles;
- 2) de larges parcelles, semées de blé, exposées aux précipitations naturelles d'hiver en Israël;
- 3) des expériences sur petites parcelles, pour étudier l'influence de l'impact des gouttes de pluie sur la structure de la surface du sol, en utilisant deux sortes de simulateurs de pluie;
- 4) des expériences au laboratoire avec un simulateur de pluie fixe, sur échantillons de sol remué, et enfin,
- 5) des tests physiques standards en laboratoire pour la caractérisation du sol.

L'humidité du champ et sa densité furent déterminées par un humidimètre à neutrons de profondeur et de surface, par un mesureur de densité de surface gamma et par un mesureur de profondeur gamma à double tube. Le potentiel

hydrique du sol fut mesuré avec des tensiomètres, et le potentiel hydrique de la plante avec une cellule de pression Schollander. Les volumes de précipitation et de ruissellement de surface furent mesurés.

Les principaux résultats de ce projet de recherche furent les suivants:

1) Dans de nombreux cas, le rendement est une fonction de la densité initiale de pousse, ce qui révèle que la germination et l'émergence sont parmi les étapes les plus critiques qui influencent la production finale. Dans certains cas, les meilleures germination, émergence et densité de pousse furent trouvées dans des lits de semence sans préparation ou avec une très fine structure. Cependant, la suite du développement de la plante fut quelquefois la plus faible dans le traitement sans préparation, et la meilleure dans les traitements de labour profond. Comme ces deux buts sont parfois contradictoires, il est souhaitable de trouver une combinaison optimale ou un traitement combiné. Un labourage de zone semble être une bonne solution, lorsque l'on peut appliquer la technologie requise.

2) Lorsqu'une pousse particulière a été établie, l'approvisionnement en eau de la plante est le facteur le plus important pour la production dans la zone semi-aride. Des différences dans l'approvisionnement en eau, dans la mesure où elles sont assez importantes, masqueront l'effet des autres facteurs.

3) D'après les résultats obtenus, on a trouvé que les travaux de préparation primaire en eux-mêmes n'ont pas d'influence à long-terme, à moins que le procédé de préparation n'influence le régime hydrique du sol (comme par exemple certaines conditions où la préparation primaire influence l'infiltration de l'eau dans le sol). Lorsque ce fut le cas, particulièrement sous les pluies de haute intensité, les travaux de préparation du sol eurent effectivement une forte influence bénéfique sur le

rendement.

4) Une grossière structure de surface a généralement une influence positive sur l'infiltration de l'eau, à la fois à cause de la désintégration plus lente des agrégats, qui retarde la formation de la croûte, et aussi à cause de l'augmentation de la capacité de stockage de surface.

5) Les résultats obtenus sur deux sols loessiques et sur un vertisol argileux en Israël, et sur des sols sableux au Mali, indiquent que la formation d'une croûte de surface est, dans tous les cas, le principal facteur limitant l'infiltration de l'eau, et donc le facteur ayant la plus grande influence sur le régime hydrique du sol.

6) L'infiltrabilité des deux sols loessiques décroît très vite avec le temps ou avec la quantité d'eau fournie, et lorsque l'eau est fournie à un taux d'environ 30 mm/h, ce qui est un taux courant pour un bon nombre d'averses au Sahel, la quantité totale d'infiltration avant le début du ruissellement de surface est de l'ordre de 10 mm seulement. Si on ne prend aucune mesure spéciale pour augmenter le stockage de surface par un aménagement du sol, les sols qui ont été travaillés en profondeur, soit par labour profond, soit par un sous-solage, absorbent, avant que le ruissellement de surface ne commence, plus d'eau que les sols à labour léger qui ont une fine structure de surface.

7) La destruction mécanique de la croûte produit une amélioration provisoire de l'infiltrabilité, et peut être réalisée tout en luttant contre les mauvaises herbes. Cependant, de tels travaux de préparation répétés peuvent provoquer plus tard une désintégration des agrégats et la détérioration de la structure du sol, ainsi qu'une tendance accrue à la formation d'une croûte et au ruissellement de surface lors des averses successives. La destruction mécanique de la croûte peut augmenter de

façon considérable l'émergence des plantes germées, si elle est effectuée au moment opportun et avec suffisamment de précaution pour ne pas endommager les jeunes pousses. Cette solution est très risquée, à cause de ses exigences.

8) Lorsque l'on peut se procurer des données à long-terme concernant les précipitations, y compris les intensités des pluies enregistrées sur pluviomètre, on peut calculer les probabilités statistiques des quantités saisonnières de pluie, leur répartition dans le temps, ainsi que les différents index caractérisant l'agressivité du mode de précipitation. Avec une bonne connaissance des propriétés du sol, on peut ainsi prévoir le degré de la formation de la croûte (et donc la production du ruissellement de surface), ainsi que l'érosivité du mode de précipitation.

9) Différents emplacements géographiques ayant des quantités de précipitation annuelle similaires se sont révélées être différentes quant à l'agressivité du mode de précipitation. C'est pourquoi les données d'intensité sont si importantes pour prévoir ou évaluer les risques de ruissellement de surface et d'érosion en différents endroits.

10) La comparaison des mesures de précipitation, de ruissellement de surface et d'érosion avec les résultats des modèles de prévision montre un très haut degré de corrélation. Les propriétés d'infiltration du sol ont été prévues avec succès d'après la caractérisation du sol en laboratoire avec un simulateur de pluie fixe, et c'est pourquoi on peut prévoir le ruissellement de surface et l'érosion en des endroits non connus, dans la mesure où l'on peut se procurer des données de précipitations à long-terme et prendre des échantillons de sols remués pour la caractérisation en laboratoire.

11) Comme l'important stockage de surface créé par un labour profond

est de nature temporaire et n'est pas utilisable comme lit de semence (bien qu'utilisable en période de jachère), le système de levées à barrages s'est révélé être le plus efficace pendant les périodes de jachère et pendant la période de croissance d'une culture en rangées. Cette méthode a l'avantage d'être applicable à une agriculture hautement mécanisée ainsi qu'à un équipement simple à traction animale, et même aux systèmes de préparation du sol basés sur un travail manuel. Par contre, le système de culture en levées, préféré des agricultures israélienne et ouest-africaine, est le plus mauvais des moyens de conservation du sol et de l'eau.

12) La stabilisation des agrégats de surface par différents agents de conditionnement du sol peut être très efficace pour la prévention de la croûte, pour l'augmentation de l'infiltration et la suppression de l'évaporation, suivant l'agent de conditionnement choisi et les propriétés du sol. Cependant, tous les agents testés ont été jugés trop chers, même pour un régime économique intensif de cultures commerciales, comme il existe en Israël.

A la suite des observations faites à certains endroits en Afrique de l'Ouest, et à la suite de l'amorce de l'application des conclusions tirées en Israël, on peut énoncer quelques remarques finales. Quelques unes des solutions proposées posent encore quelques problèmes techniques d'adaptation à certaines cultures et de développement de l'outillage. De plus on n'arrive pas à se procurer toutes les données techniques nécessaires concernant les vastes régions de la zone semi-aride. L'approche qui a été faite dans ce projet semble être prometteuse pour un développement ultérieur: la simulation des conditions physiques d'une "région-objectif" où les procédés de recherches sont difficilement réalisables; le développement des informations de base concernant le sol et le climat de

cette "région-objectif"; la synthèse des données locales et des résultats des recherches, et enfin, la vérification et la modification des recommandations pour les conditions de champ de cette "région-objectif".

On ne saurait trop insister sur le fait que, lorsqu'une région doit développer ses méthodes d'exploitation, et ceci est particulièrement vrai pour les pays en voie de développement, ceci doit être fait en coopération avec des agronomes, des ingénieurs agronomes, des sociologues et des économistes, afin d'assurer que les solutions proposées sont adaptées aux besoins. En introduisant de nouvelles méthodes, il faut veiller à ce que le risque couru par l'agriculteur soit minimal, de façon à le convaincre à faire de nouvelles tentatives.

6 - PERSPECTIVES SUR L'AVENIR

L'augmentation du stockage de surface par le système des levées à barrages est le résultat le plus important de ce projet, et le plus réalisable dans l'immédiat. Le modèle combinant l'analyse des précipitations et les propriétés du sol nous permet de prévoir la valeur potentielle de ce système, sur les sols où les expériences au champ n'ont pas encore été effectuées. L'une des directions que l'on peut prendre comme continuation de ce travail est de compléter ces prévisions pour un nombre supplémentaire de types de sol, en Israël et dans d'autres pays, en utilisant des échantillons de sol remué, et ces prévisions seront suivies par des vérifications au champ.

Il est souhaitable d'adapter cette méthode à d'autres cultures et d'améliorer certains aspects techniques qui sont encore problématiques avec les cultures qui ont été tentées jusqu'à présent. Ainsi, on peut essayer d'adapter ce système à des cultures en planches, et également de faire pousser en système de planche des cultures en rangées solidement ensemencées. Les principaux exemples convenant à cette possibilité sont le coton, le maïs, la betterave à sucre, le sorgho et le blé. Les pommes de terre cultivées en levées sont un autre "candidat" pour le système, ainsi que d'autres cultures. La plupart des problèmes qui ne sont pas encore résolus concernent l'adaptation et le développement de l'outillage. Par exemple, il faut trouver une solution pour le coton, pour résoudre le problème du passage des machines au-dessus des barrages de rigoles.

Les deux hivers en jachère furent, le premier anormalement sec, et le deuxième anormalement humide, et il nous faut des données de champ supplémentaires pour vérifier la performance des levées à barrages dans des conditions plus proches de la moyenne. De plus, il est extrêmement

important d'étendre les mesures de ruissellement de surface à des champs plus vastes, car toutes les données disponibles aujourd'hui sont basées uniquement sur des parcelles de ruissellement, quoiqu'elles soient de taille relativement grande. A cause des difficultés bien connues en hydrologie de faire une extrapolation à partir de petites unités de surface à de plus grandes, il est essentiel d'évaluer l'efficacité des levées à barrages pour des champs entiers.

Le système de levées à barrages ne résout que le problème du contrôle de l'excédent de pluie en surface, mais ne s'attaque pas au problème de base qui est la faible infiltrabilité. Il se peut que, pour de nombreux sols, il s'agisse d'une propriété intrinsèque du sol qui ne peut pas être transformée facilement. Cependant, plusieurs faits exigent des recherches supplémentaires sur la dynamique de la structure du sol, au laboratoire et au champ. Ces faits sont les suivants: les résultats positifs obtenus concernant l'infiltration à la suite de certains procédés de préparation du sol, la réalisation d'un labourage de zone par un sous-solage minimal, suivi de la préparation du lit de semence en bandes étroites avec une fraiseuse, et les soupçons croissants que se produit une lente détérioration de la structure due au compactage.

Des projets de recherche concernant la continuation de ces travaux sont actuellement en préparation.

7 - REALISATIONS SUPPLEMENTAIRES DE CE PROJET

En plus des aspects scientifiques de ce projet de recherche, un certain nombre de réalisations supplémentaires ont été obtenues. Plusieurs étudiants hollandais ont effectué leur stage ("practicum") en travaillant sur ce projet, et un étudiant a obtenu son diplôme de M.Sc. (Master of Science) sur le travail qu'il a effectué ici. Plusieurs étudiants israéliens ont également travaillé sur ce projet, et pourront se servir du matériel pour leur propre thèse. Un chercheur de Turquie, à titre d'invité, a participé plusieurs mois au projet, et a eu l'occasion d'étudier des techniques de recherche au champ, y compris l'utilisation d'un équipement de radiation.

Dans le but de continuer les recherches au laboratoire et au champ sur l'influence des différents outils sur la structure du sol, et de déterminer les exigences du projet, un "simulateur de culture" avec des pièces interchangeables a été développé, et il est actuellement testé au Kenya, avant que son utilisation ne soit planifiée en Afrique de l'Ouest.

La mesure au champ des croûtes fines par des instruments conventionnels n'est pas suffisamment précise, et c'est pourquoi on a développé un "pénétrromètre à billes", basé sur le principe suivant: on place dans le sol, avant la formation de la croûte, de petites billes rattachées à un fil de fin diamètre, et on mesure la force requise pour tirer ces billes vers le haut, au travers de la croûte, au moment choisi.

Le prototype d'une machine à briser la croûte, possédant un système de précision du contrôle de la profondeur, a été conçu en utilisant les pièces standards d'un désherbeur rotatif. Des essais au champ ont montré que cette machine est efficace pour certaines cultures comme la betterave à sucre, et les cultures à bulbes, comme l'oignon et le glaieul; la machine

facilite l'émergence des jeunes pousses, sans avoir recours à une irrigation de germination pour ramollir la croûte. Cet outil semble prometteur, mais il demande des modifications supplémentaires ainsi que l'amélioration du contrôle de la profondeur.

Deux machines à former les barrages de rigoles pour le système des levées à barrages ont été construites dans un atelier appartenant à la coopérative des agriculteurs, et à leurs frais. Chaque machine est basée sur des modèles déjà existants, auxquels des modifications locales ont été apportées. Le système de levées à barrages commence à être accepté rapidement par les exploitants locaux, qui sont prêts l'essayer avant-même que tous les problèmes de recherche et développement ne soient complètement résolus. Le système est actuellement appliqué à des champs en jachère d'hiver, mis précédemment en levées lors de la préparation au semis de coton au printemps, et aux cultures de coton et de maïs pendant la saison d'irrigation de l'été; un travail de développement se poursuit actuellement, dans le but d'adapter ce système à des cultures supplémentaires.

REFERENCES

- Agarwal, R.P. and M. Raj, 1975. Effect of cultural practices on soil moisture and crop yield under dryland agriculture. Soil Conservation Digest, Vol. 3, No.1: p.48-53.
- Ahn, P.M., 1974. West African Soils. Oxford University Press, London, U.K.
- Ahn, P.M., 1978. Soil factors affecting rainfed agriculture in semi-arid regions with particular reference to the Sahel zone in Africa. See: Cannell, G.H. (ed.): p. 128-165.
- Al-Fahkry, A.K., 1976. Improvement of dry land farming in Northern Iraq. In: Recent stage and prospects of agricultural mechanization in developing countries. Akademie Verlag, Berlin: p. 143-149.
- Ali, M. and R. Prasad, 1974. Effects of mulches and type of seedbed on pearl millet under semi-arid conditions. Expl. Agric. Vol. 10: p. 263-272.
- Andrews, C.J. and M. Sheldrick, 1979. Hoeing survey in Northern Nigeria. See: Commonwealth Secretariat, p. 153-161.
- Anon., 1979. Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop, Tucson, Arizona, March 1979. USDA-AR-SEA, Oakland, Calif., U.S.A.
- Arndt, W. 1965a. The nature of the mechanical impedance to seedlings by soil surface seals. Aust. J. Soil Res. 3:45-54.
- Arndt, W. 1965b. The impedance of soil seals and the forces of emerging seedlings. Aust. J. Soil Res. 3: 55-68.
- Arnon, I., 1972. Crop production in dry regions. Vol. 1. Leonard Hill, London, U.K.
- Bailey, H.P., 1979. Semi-arid climates: Their definition and distribution. See: Hall, A.E. et al., p. 73-97.

- Baver, L.W., W.H. Gardner and W.R. Gardner, 1972. Soil Physics, Wiley, New York, U.S.A.
- Bennett, O.L., D.A. Ashley and B.D. Doss, 1964. Methods of reducing soil crusting to increase cotton seedling emergence. Agron. J. 56: 162-165.
- Bhan, S., 1974. Dry farming research in Uttar Pradesh. World Crops Vol. 26: p. 73-74.
- Bhushan, L.S., G. Singh and D.T. Anderson, 1977. Efficiency of deep tillage on moisture conservation and yield of rainfed crops. Soil Conservation Digest, Vol. 5, No.1: p. 8-14.
- Bielorai, H., A. Mantell and D. Shimshi, 1976. Peanuts. In: Irrigation of Field and Orchard Crops under Semi-arid Condition, p. 45-51. J. Shalhevet et al., (eds.) International Irrigation Information Center, Bet Dagan, Israel.
- Blondel, D., 1965. Premiers éléments sur l'influence de la densité apparente du sol sur la croissance racinaire de l'arachide et du sorgho. Ses conséquences sur les rendements. Proc. OAU/STRC Symp. on the maintenance and improvement of soil fertility, Khartoum: p. 173-181.
- Bolton, F.E. and D.E. Booster, 1978. Tillage, moisture conservation and water use efficiency for dryland cereal production in winter rainfall regions. See: Cannell, G.H. (ed.), p. 552-588.
- Bowden, L., 1978. Geographic aspects of the world's semi-arid tropics. See: Cannell, G.H. (ed.), p. 60-71.
- Bowden, L., 1979. Development of present dryland farming systems. See: Hall, A.E. et al., p. 45-72.
- Bryan, Rorke B., 1973. Surface crust formed under simulated rainfall on Canadian Soils. Consiglio Nazionale delle Recherche Laboratorio per la Chimica del Terreno, Pisa, Conferenze - 2.

- Burrows, W.C., R.E. Reynolds, F.C. Stickler and G.E. van Riper (eds.), 1970. Proceedings of an International Conference on Mechanized Dryland Farming, August 1969, Des Moines, U.S.A.
- Cannell, G.H. (ed.), 1978. Proceedings of an International Symposium on Rainfed Agriculture in Semi-arid Regions, April, 1977, Riverside, California, U.S.A.
- Cary, J.W. and D.D. Evans (eds.), 1974. Soil crusts. Technical Bulletin No. 214, Agric. Exp. Station, Univ. of Arizona, Tuscon, U.S.A.
- Charreau, C., 1969. Influence des techniques culturales sur le développement du ruissellement et de l'érosion en Casamance. L'Agron. Trop. XXIV: p. 836-842.
- Charreau, C. and L. Seguy, 1969. Mesure de l'érosion et du ruissellement a Sefa en 1968. L'Agron. Trop. XXIV: p. 1055-1097.
- Charreau, C. and R. Nicon, 1971. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-Africaine et ses incidences agronomiques. L'Agronomie Tropicale XXVI: 209-255, 531-565, 903-978, 1183-1247.
- Charreau, C., 1978. Some controversial technical aspects of farming systems in semi-arid West Africa. See: Cannell, G.H. (ed.): p. 313-360.
- Chaudhri, K.G., K.W. Brown and C.B. Holder, 1976. Reduction of crust impedance to simulated seedling emergence by the addition of manure. Soil Sci. 122: 216-222.
- Chen, Y. et al., 1980. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. J. Soil Sci. (approved).
- Choudhury, M.S.U., A.K. Al-Fahkry, L.K. Ismail and K.Y. Vartanian, 1977. Mechanized tillage- dryland farming in Iraq. AMA spring 1977, p. 11-16.
- Chowdhury, S.L., 1975. Cropping systems in the semi-arid tropics of India. See: ICRISAT, 1975: p. 373-384.

- Clark, R.N., 1979. Furrow dams for conserving rainwater. (Personal communication, mimeo preprint, Agric. Engineer, USDA Southwestern Great Plains Res. Ctr., Bushland, Texas).
- Clark, R.N. and E.B. Hudspeth, 1980. Runoff control for summer crop production. (Personal communication, mimeo preprint).
- Commonwealth Secretariat, 1979. Proceedings of the Appropriate Tillage Workshop, IAR, Zaria, Nigeria, January 1979, London, U.K.
- Coocheme, J. and P. Franquin, 1967. An agroclimatology survey of a semi-arid area in Africa, south of Sahara, W.M.O. Tech. Note 86.
- Das, F.C., S.B. Patel, A.K. Srivastava and S.K. Tripathi, 1977. Energy requirement in tillage operations for crop production. Journal of Research, OUAT, Vol. VII, No.1-2: p. 1-7.
- Davy, E.G., F. Mattei and S.I. Solomon, 1976. An evaluation of climate and water resources for development of agriculture in the Sudano-Sahelian zone of West-Africa. W.M.O. Special Environment Report No. 9.
- Defraigne, J.P., 1967. Expérience de culture modernisée en Haute Volta. Ferme communautaire de Haute Volta. Oléagineux 22(5): p. 301-306.
- Delorme, G.A., 1963. Répartition et durée des précipitations en Afrique Occidentale. Monographies de la Météorologie Nationale No.28, Paris, France.
- Delwaulle, J.C., 1973. Résultats de six ans d'observations sur l'érosion au Niger. Bois et Forêts des Tropiques 150: 15-36.
- Dexter, A.R., 1977. Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. Journal of Terramechanics 14(1): 11-22.
- DFLRS, 1977. Interim scientific report. Dryland farming research scheme, phase II, Botswana.
- DFLRS, 1980a. Incoming Review, March 1980. Dryland farming research scheme, phase III, Botswana.
- DFLRS, 1980b. First annual report. Dryland farming research scheme, phase III, Botswana.

- D'Hoore, J.L., 1965. Soil map of Africa, Scale 1 to 5.000.000. Joint project No. 11, Commission for Technical Cooperation in Africa, Lagos
- El-Sharkawy, M.A. and K. Sgaier, 1975. Effect of tillage on root penetration and grain yield of Mexican Wheat, grown in the Lybian desert. Lybian Journal of Agric., Vol. 4: p. 25-28.
- Epstein, E. and W.J. Grant, 1967. Soil losses and crust formation as related to some soil physical properties. Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am. 31: 547-550.
- FAO, 1966. Equipment and methods for tied-ridging. FAO Informal Working Bulletin No. 28.
- Fournier, F., 1967. Research on soil erosion and soil conservation in Africa. Sols Africains 12: p. 53-96.
- FSRP, 1977. Annual Report, Farming Systems Research Program, ICRISAT 1975-1976, Hyderabad, India.
- FSRP, 1978. Annual Report, Farming Systems Research Program, ICRISAT 1976-1977, Hyderabad, India.
- Gaury, C., 1977. Agricultural mechanization. In: Leakey, C.L.A. and J.B. Wills (eds.), Food crops of the lowland tropics. Oxford Univ. Press, U.K.: p. 273-293.
- Gerard, C.J., 1965. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cation on soil strength. Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am. 29: 641-645.
- Gibbon, D., 1975. Dryland crop production systems in semi-arid Botswana; their limitations and potential for improvement. See: ICRISAT, 1975: p. 351-360.
- Gregoire, R., 1976. La culture attelée en zone Soudano-Sahélienne. Le Courrier (Bruxelles) 37: p. 31-34.
- Grierson, I.T., 1979. Effects of varying tillage procedures on crop growth factors in Southern Australia. Proceedings ISTRO Conference, Stuttgart, BRD, Vol. 1, p. 17-20.

- Hadas, A., 1978. Tillage-soil physical conditions and crops response. See: Cannell, G.H. (ed.), p. 441-459.
- Hadas, A. and E. Stibbe, 1977. Soil crusting and emergence of wheat seedlings. *Agronomy J.* 69: 547-550.
- Hanks, R.J., 1960. Soil crusting and seedling emergence. *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci.* 1: 340-346.
- Hanks, R.J. and F.C. Thorp, 1956. Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate, and crust strength. *Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am.* 20: 307-310.
- Hanks, R.J. and F.C. Thorp, 1957. Seedling emergence of wheat, grain sorghum and soybeans as influenced by soil crust strength and moisture content. *Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am.* 21: 357-359.
- Hanway, D.G., 1970. Cultural practices in mechanized dryland farming. See: Burrows, W.C. et al. (eds.): p. 102-123.
- Hargreaves, W.M., 1977. The dry farming movement in retrospect. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée*, Vol XXIV, No. 2-3: p. 213-232.
- Hegarty, T.W. and S.M. Royale, 1977. Portable load transducer penetrometer for soil strength studies. *Laboratory Practice* 26: 29-30.
- Hegarty, T.W. and S.M. Royale, 1978. Combined effects of moisture content prior to compactive effort and rainfall quantity in soil crust strength. *J. of Soil Science*, 29: 167-173.
- Heinemann, Jr., W.H., J.W. Cary and A.E. Dilworth, 1973. Experimental machines for auto dibble planting. *Transactions of the ASAE*, 16: 656-659.
- Hemwall, J.B. and H.H. Scott, 1962. Use of 4-tert-butylpyrocatechol as a fracturing aid in crusting soils. *Agron. J.* 54: 535-538.
- Henderson, H.D., M. Almassi, A.A. Malik and Z. Mahuddadi, 1979. Deep tillage in the Beka'a Plain, Lebanon. *ASAE Winter Meeting 1979*, Paper No. 79-1523.

- Hillel, D., 1960. Crust formation in loessial soils. Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci., Madison, Wisc., U.S.A. 1: 330-339.
- Hillel, D., 1967. Runoff inducement in arid lands. Final technical report, submitted to USDA, Rehovot, Israel.
- Hillel, D. et al., 1969. Soil-Crop-Tillage Interactions in dryland and irrigated farming. Technical Report to USDA, Rehovot, Israel.
- Holder, C.B. and K.W. Brown, 1974. Evaluation of simulated seedling emergence through rainfall induced soil crusts. Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am. 38: 705-710.
- Hoogmoed, W.B. and E. Rawitz, 1979. Soil tillage in dry tropical regions. Proc. 8th Conf. Int'l. Soil Tillage Res. Org., Vol. I, 21-26. Univ. of Hohenheim, FRG.
- Hudson, N.W., 1971. Soil Erosion. Cornell University Press, Ithaca, New York, U.S.A.
- Hutchings, R.J., 1977. Aspects of resource conservation in Australian agriculture with particular reference to the role of reduced tillage. In: Proceedings of the International Conference on Energy Conservation in Crop Production, April 1977, Massey University, New Zealand: p. 63-68.
- ICRISAT, 1975. Proceedings of an International Workshop on Farming Systems, November 1974, Hyderabad, India.
- ICRISAT, 1979. Report of work 1977-1978: Farm Power and Equipment program. Internal Report ICRISAT, Hyderabad, India.
- ICRISAT, 1980. Annual Report 1978-1979. Hyderabad, India.
- Irvine, F.R., 1976. West African Crops. Oxford University Press, London, U.K.
- Jones, M.J. and A. Wild, 1975. Soils of the West African Savanna. Techn. communication No. 55, LAB, Harpenden, U.K.

- Kampen, J., 1979. Farming systems research and technology for the semi-arid tropics. Intern. Symp. on Development and Transfer of Technology for Rainfed Agriculture and the SAT Farmer, August 1979, Hyderabad, India.
- Kassam, A.H., 1976. Crops of the West African semi-arid tropics. ICRISAT, Hyderabad, India.
- Kassam, A.H., M. Dagg, J.M. Kowal and F.H. Khadr, 1976. Improving food crop production in the Sudan Savanna Zone of northern Nigeria. Outlook on Agric. (ICI) 8: 341-347.
- Kemper, W.D., John S. Olsen and Alan Hodgdon, 1975. Irrigation method as a determinant of large pore persistence and crust strength of cultivated soils. Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am. 39: 519-523.
- Kowal, J., 1968a. Physical properties of soils at Samaru, Zaria, Nigeria: Storage of water and its use by crops. I. Physical status of soils. Niger. Agric. J. 5: p. 13-20.
- Kowal, J., 1968b. Physical properties of soils at Samaru, Zaria, Nigeria: Storage of water and its use by crops. II. Water storage characteristics. Niger. Agric. J. 5: p. 49-52.
- Kowal, J., 1969. Physical properties of soils at Samaru, Zaria, Nigeria: Storage of water and its use by crops. III. Seasonal pattern in soil water changes under various vegetation covers and bare fallow. Niger. Agric. J. 6: p.18-29.
- Kowal, J., 1974. Study of soil surface crusts in the loess plain soils of northern Nigeria. Samaru Research Bulletin 220.
- Kowal, J. and A.H. Kassam, 1976. Energy load and instantaneous intensity of rainstorms at Samaru, northern Nigeria. Trop. Agriculture (Trinidad): 185-197.
- Krause, R. and F. Lorentz, 1979. Bodenbearbeitung in den Tropen und Subtropen. Schriftenreihe GTZ, Band 79, GTZ Eschborn (BRD).

- Labouesse, F., 1977. La jachère en Tunisie, analyse économique et sociale. *Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée (JATBA)*, Vol. XXIV No. 2-3: p. 233-240.
- Lal, R., 1976. Soil erosion problems on an alfisol in western Nigeria and their control. IITA Monograph No. 1, Ibadan, Nigeria.
- Lawes, D.A., 1966. Rainfall conservation and the yields of sorghum and groundnuts in northern Nigeria. *Expl. Agric.* 2: p. 139-146.
- Leeuwrik, D.M., 1975. Farming systems in the Mediterranean region. See: ICRISAT, 1975: p. 303-310.
- Lemos, Petzeval and J.F. Lutz, 1977. Soil crusting and some factors affecting it. *Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am.* 21: 485-491.
- Lyle, W.M. and O.R. Dixon, 1977. Basin tillage for rainfall retention. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 20: 1013-1017.
- Matthews, M.D.P. and D.W.M. Pullen, 1977. Cultivation trials with ox-drawn equipment in the Gambia, 1973-1975. *The Agricultural Engineer*: p. 77-80.
- Meigs, P., 1953. World distribution of arid and semi-arid homoclimates. *Arid Zone Res.*, 2: p.203-210.
- Mogan, W.B. and J.C. Pugh, 1969. *West Africa*. Methuen, London, U.K.
- Monnier, J., 1965a. Contribution a l'étude de la traction bovine au Sénégal. (1me partie). *Machinisme Agricole Tropical* 10: p. 3-25.
- Monnier, J., 1965b. Contribution a l'étude de la traction bovine au Sénégal. (2e partie). *Machinisme Agricole Tropical* 11: p.15-27.
- Morin, J., D. Goldberg and I. Seginer, 1967. A rainfall simulator with a rotating disk. *Trans. ASAE* 10: 74-77, 79.
- Morin, J. and Y. Benyamini, 1977. Rainfall infiltration into bare soils. *Water Resources Res.* 13: 813-817.
- Morin, J. and H.S. Jarosch, 1977. Runoff rainfall analysis for bare soils. Pamphlet No. 164. Volcani Center, Bet Dagan, Israel.
- Morin, J., Y. Benyamini and A. Michaeli, 1981. The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. *Journal of Hydrology* 52: 321-335.

- Morton, C.I. and W.F. Buchele, 1960. Emergence energy of plant seedlings. *Agr. Eng.* 41: 428-431 and 453-455.
- Nuttall, W.F., 1970. Effect of organic amendments on some physical properties of luvisolic soils in relation to emergence on rapeseed in a growth chamber. *Canadian J. Soil Sci.* 50: 397-402.
- Nuttonson, M.Y., 1961. The physical environment and agriculture of Morocco, Algeria and Tunisia, with special reference to their regions containing areas climatically and latitudinally analogous to Israel (Vol. 1) and also: Lybia and Egypt (Vol. 2) American Institute of Crop Ecology.
- Orev, Y., 1976. Improving single furrow animal plowing in Botswana. *World Crops*, Vol. 28: p. 252-253.
- Page, E.R. and B.J. Hole, 1977. Soil crust strength measurement. *Commun. in Soil Sci. and Plant Analysis*, 8: 139-148.
- Penning de Vries, F.W.T. and M.A. Djiteye (eds.), 1980. La production primaire au Sahel. Wageningen, The Netherlands.
- Perrin de Brichambaut, G., 1970. Similarities and differences in worldwide dryland farming. See: Burrows, W.C. et al. (eds.), p. 20-35.
- Phillips, S.H. and H.M. Young, 1973. No-tillage farming. Reiman Associates, Milwaukee, Wisc., U.S.A.
- Poulain, J.F. and R. Tourte, 1970. Effects of deep preparation of dry soil on yields from millet and sorghum, to which nitrogen fertilizers have been added (sandy soil from a dry tropical area). *Afric. soils* 15: p. 553-586.
- Rawitz, E., S. Dasberg, A. Hadas and D. Hillel, 1964. The effects of irrigation method and cropping system on some structural properties of a loessial sierozem of the northern Negev. *Israel J. Agric. Res.* 14: 197-202.

- Rawitz, E., M. Margolin and D. Hillel, 1972. An improved variable intensity sprinkling infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37: 533-535.
- Rhebergen, W., 1979. Enige aspecten van korstvorming op minder stabiele gronden. Doctoraal scriptie, Vakgroep Grondbewerking LH, Wageningen, The Netherlands.
- Richards, L.A., 1953. Modulus of rupture as an index of crusting of soil. *Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am.* 17: 321-323.
- Roose, E., 1967. Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *L'Agron. Trop.* XXII: p. 123-152.
- Royle, Sheila M. and T.W. Hegarty, 1978. Soil impedance and field emergence in calabrese. *J. Horticulture Science* 52: 535-543.
- Royle, Sheila M. and T.W. Hegarty, 1978. Soil impedance and its effects on calabrese emergence. *Acta Horticulturae*, 72: 259-266.
- Salmon, D., 1979. A review of EFSAIP (Evaluation) in Botswana. See: Commonwealth Secretariat: p. 147-152.
- Schlebecker, J.T., 1977. Tillage and crops on prairies and plains: America 1830-1960. *Journal d'Agriculture et de Botanique Appliquée*, Vol. XXIV, No. 2-3: p. 171-184.
- Schultz, J.E., R.J. French and I.T. Grierson, 1976. Tillage programmes for cereals in South Australia. *Proceedings, 7th ISTRO Conference, Uppsala, Sweden*: p.36.1-36.8.
- SCSA, 1973. Conservation tillage. *Proceedings of a National Conference by the Soil Conservation Society of America, March 1973.* Ankeny, Iowa, U.S.A.
- SCSA, 1977. Special Issue, *Journal Soil and Water Conservation*, Vol. 32, No.1.
- SCSA, 1979. Effects of tillage and crop residue removal on erosion, runoff, and plant nutrients. *Special Publication No. 25.* Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, U.S.A.

- Sébillotte, M., 1977. Jachère, système de culture, système de production, méthodologie d'étude. Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée, Vol. XXIV, No. 2-3: p. 241-266.
- Siband, P., 1972. Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute-Casamance. Principaux résultats. L'Agron. Trop. XXVII: p. 574-591.
- Sims, H.J., 1977. Cultivation and fallowing practices. In: Russell, J.S. and E.L. Greacen (eds.), Soil factors in crop production in a semi-arid environment. Univ. of Queensland Press, St. Lucia, Australia. p.243-261.
- Singh, S.D. and R.C. Singh, 1973. Studies of tillage fertility on pearl millet in sandy arid plains of Rajasthan. Ann. Arid Zone, Vol. 12, No.3-4: p.145-154.
- Sivakumar, M.V.K., S.M. Virmani and S.J. Reddy, 1979. Rainfall climatology of West Africa: Niger. Information Bulletin No. 5, ICRISAT, India.
- Smith, C.J., 1966. Problems in establishing dry-land pastures in Rhodesia. J. British Grassland Soc. 21: 238-244.
- Sombroek, W.S. and I.S. Zonneveld, 1971. Ancient dune field and fluvial deposits in the Rima-Sokoto river basin (N.W. Nigeria). Soil Survey Papers No. 5, Netherlands Soil Survey Institute, Wageningen, The Netherlands.
- Sorour, F.A., M.A. El-Sharkawy and M.S. Osman, 1975. Influence of tillage methods on growth and on yield of corn. Lybian Journal of Agric. Vol. 4: p. 47-50.
- Spratt, E.D. and S.L. Chowdhury, 1978. Improved cropping systems for rainfed agriculture in India. Field Crops Research Vol. 1: p.103-126.
- Sta-M'Rad, M'Hamed, 1978. Rainfed agriculture in semi-arid Tunisia. See: Cannell, G.H. (ed.), p. 498-512.

- Stewart, B.A., D.A. Dusek and J.T. Musick, 1980. Use every drop of rainfall and irrigation water. (Personal communication from B.A. Stewart, Conservation and Production Laboratory, USDA, Bushland, Texas, mimeo preprint from "Southwest Farm Press").
- Stout, B.A., W.F. Buchele and F.W. Snijder, 1901. Effect of soil compaction on seedling emergence under simulated field conditions. *Agricultural Engineering*, 42: 68-71.
- Stroosnijder, L., 1976. Infiltratie en herverdeling van water in de grond. *Versl. landbouwk. Onderz.* 847, Wageningen, The Netherlands.
- Stroosnijder, L., 1977. Aspects of soil and water in the Sahel in Mali. In: *Proceedings of "An International Symposium on Rainfall Agriculture in Semi-Arid Regions"*, April 1977, Riverside, U.S.A.
- Stroosnijder, L., 1980. Le bilan d'eau du sol. In: Penning de Vries, F.W.T. and M.A. Djiteye (eds.): *La production primaire du Sahel*, Wageningen, The Netherlands.
- Tackett, J.L. and R.W. Pearson, 1965. Some characteristics of soil compaction on seedling emergence under simulated field conditions. *Agricultural Engineering*, 42: 68-71.
- Taylor, H.M., 1962. Seedling emergence of wheat, grain, sorghum and guar, as affected by rigidity and thickness of surface crusts. *Proc. of the Soil Sci. Soc. of Am.* 26: 431-433.
- Timm, H. et al., 1971. Soil crusting. *California Agric.* 25: 5-7.
- Toughton, J.T. and D.G. Cummins (eds.), 1978. *Proceedings of the First Annual South-Eastern No-Tillage Systems Conference*, November, 1978, Georgia Experimental Station, Georgia, U.S.A.
- Tourte, R. and J.C. Moomaw, 1977. Traditional African systems of agriculture and their improvement. In: Leakey, C.L.A. and J.B. Wills (eds.), *Foodcrops of the Lowland Tropics*, Oxford Univ. Press, U.K.: p.295-312.
- Verney, R. and P. Williame, 1965. Results of studies of erosion on experimental plots in Dahomey. *Proc. OAU/STRC Symp. on The Maintenance and Improvement of Soil Fertility*, Khartoum.

- Virmani, S.M., M.V.K. Sivakumar and S.J. Reddy, 1978. Rainfall probability estimates for selected locations of semi-arid India. Research Report No. 1, ICRISAT, India.
- Whiteman, P.T.S., 1975. Moisture conservation by fallowing in Botswana. Expl. Agric. Vol. 11: p. 305-314.
- Wiese, A.F., 1977. Limited tillage in the U.S.A. In: Proceedings of the International Conference on Energy Conservation in Crop Production, April 1977, Massey University, New Zealand: p. 21-30.
- Wilde, J.C. de, 1967. Experiences with agricultural development in tropical Africa, Vol. I, The synthesis, and Vol. II, The case studies. Johns Hopkins Press, Baltimore, U.S.A.
- Willcocks, T.J., 1979. Semi-arid tillage research in Botswana. See: Commonwealth Secretariat: p. 127-146.
- Williams, W.A., 1956. Evaluation of the emergence force exerted by seedling of small seeded legumes using probit analysis. Agron. J. 48: 273-274.
- Wischmeyer, W.H., D.D. Smith and R.E. Uhland, 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. Agric. Engng. 39: 458-474.
- Wischmeyer, W.H. and D.D. Smith, 1978. Predicting rainfall losses. Agriculture Handbook No. 537, USDA, Washington DC, U.S.A.
- Wolf, D. and H.J. Luth, 1979. Tillage equipment for clod-forming soils. Trans. ASAE Vol. 22, No. 5: p. 1029-1032.
- Yesilsoy, M.S., 1978. Tillage and cultural practices for wheat under winter rainfall conditions in Central Anatolia. See: Cannell, G.H. (ed.), p. 498-512.