

UNIVERSITÉ PARIS 6

THESE

PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE TITRE DE
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6
SPÉCIALITÉ : PÉDOLOGIE

PAR

Roland POSS

**TRANSFERTS DE L'EAU
ET DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX
DANS LES TERRES DE BARRE DU TOGO.
CONSÉQUENCES AGRONOMIQUES**

Soutenu le 4 juillet 1991 devant le jury composé de :

MM.	G. PÉDRO	<i>Président</i>
	G. de MARSILY	
	M. VAUCLIN	<i>Rapporteur</i>
	J.C. FARDEAU	<i>Rapporteur</i>
	C. CHÉVERRY	
	C. PIERI	



Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un programme de recherche mené conjointement par l'IRAT et l'ORSTOM (Département des Eaux Continentales). La reproduction de l'ouvrage a été effectuée au CEN de Cadarache grâce à un financement de l'ORSTOM.

A Hugues Saragoni.

Ce travail est, pour une grande part, également le sien.

AVANT PROPOS

Ce mémoire représente la synthèse d'une partie d'un programme de recherche réalisé depuis 8 ans, au Togo de 1983 à 1989, en France depuis. Il est difficile de remercier ici tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette oeuvre de longue haleine, tant la liste est longue des collègues qui se sont intéressés à cette recherche et qui l'ont faite avancer, parfois de manière décisive.

Pendant toute la durée de ce programme de recherche, le professeur G. PÉDRO s'est préoccupé de son avancement et des conditions dans lesquelles il s'effectuait, tout en m'accordant une confiance sans faille. Il m'a ensuite incité à faire l'effort de réflexion nécessaire à un travail de thèse et m'a donné le temps et l'environnement scientifique pour le réaliser. Il a enfin supervisé l'interprétation des résultats et la rédaction. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

Malgré ses occupations multiples, souvent fort éloignées des problèmes évoqués dans ce mémoire, le professeur G. de MARSILY s'est intéressé à ce travail. Il a pris sur son temps pour relire le manuscrit et participer à ce jury. Je tiens à lui témoigner toute ma gratitude.

Depuis mon admission à l'ORSTOM en 1974, le professeur C. CHEVERRY n'a jamais manqué l'occasion de discuter amicalement de mes recherches et de me conseiller de nouvelles approches. Je suis heureux qu'il ait accepté de siéger à ce jury.

Lorsque l'interprétation des résultats concernant les transferts d'eau dans le sol débuta, c'est tout naturellement vers l'équipe de l'IMG de Grenoble que je me suis tourné. J'ai trouvé en M. VAUCLIN un interlocuteur toujours prêt à me recevoir et à m'indiquer de nouvelles voies de recherche. Le chapitre consacré à l'étude de la précision des résultats lui doit beaucoup.

Grâce à son ouverture d'esprit hors du commun, J.C. FARDEAU s'est intéressé dès nos premiers contacts au programme en cours au Togo. Une véritable coopération s'est ensuite développée en dépit de l'éloignement et de nos différences de personnalité. A mon retour en France, J.C. FARDEAU a guidé mon travail de réflexion et de rédaction tout en m'initiant à de nouveaux domaines de la Science des Sols. Je tiens à le remercier ici tant pour le temps qu'il m'a consacré que pour avoir accepté de participer à ce jury.

C. PIERI a été à l'origine de ce programme de recherche, prévu pour durer une quinzaine de jours ! C'est ensuite avec beaucoup d'intérêt qu'il a suivi chacune des étapes, de l'élaboration du protocole de terrain à l'interprétation des résultats et à la rédaction, apportant son appui au développement du programme. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté de faire partie de ce jury, non seulement pour tout ce qu'il a fait pour la

réalisation du programme, mais également comme représentant de l'IRAT, qui s'est engagé résolument dans cette action interorganisme.

Ce mémoire est, en fait, un des résultats d'un travail réalisé en commun avec Hugues SARAGONI, agronome à l'IRAT. Nous avons partagé depuis l'origine du programme les espoirs, les difficultés, les bons comme les mauvais moments. Nos discussions furent parfois vives, mais elles restèrent toujours amicales. Nous avons formé une équipe soudée où chacun savait pouvoir compter sur l'autre. Au moment de la rédaction, il est difficile dans de telles conditions de faire la part de la contribution de chaque membre de l'équipe : c'est la raison pour laquelle ce mémoire lui est dédié.

A. FORGET a été la cheville ouvrière de la réalisation du travail de terrain et de la saisie des résultats. Il m'est agréable de le remercier ici pour toute l'aide qu'il m'a apportée pendant les 8 années au cours desquelles nous avons travaillé ensemble au Togo. Son dévouement, son inaltérable entrain et le sérieux de son travail en font le collaborateur avec lequel chaque pédologue de l'ORSTOM souhaiterait travailler.

Pendant qu'il était chef de la mission IRAT, E. LATRILLE n'a pas ménagé ses efforts pour aplanir toutes les difficultés matérielles et administratives qui sont apparues. Après son retour en France, il a contribué à l'interprétation des résultats en me faisant partager son expérience d'agronome de terrain. Il a enfin pris sur son temps pour relire, avec sa méticulosité habituelle, la partie agronomique de ce mémoire.

Ce travail repose sur l'analyse d'un essai de longue durée conduit simultanément sur deux stations agronomiques. Tous les praticiens savent la difficulté de poursuivre un essai en respectant un protocole précis. C'est à M. ISSIFOU que revient le mérite de nous avoir soulagé, H. SARAGONI et moi-même, de la lourde charge de suivre l'essai. Nous n'oublierons pas non plus sa gentillesse et son sens des relations humaines qui l'ont tant fait regretter lorsqu'il prit sa retraite en 1989.

Au Togo, j'ai bénéficié de l'appui de toute l'équipe du Centre ORSTOM de Lomé, que je remercie ici. J'ai plaisir à mentionner J.L. LIERDEMAN, Directeur du Centre lors de mon départ du Togo, qui m'a toujours assuré de son appui amical. La plus grande partie des analyses d'eau et de sol a été réalisée à Lomé par le laboratoire de l'ORSTOM sous la direction de J. DELARIVIERE. L'interprétation des résultats sur les transferts d'éléments minéraux a été rendue possible grâce au soin et à l'esprit critique avec lequel il contrôlait les analyses.

Je ne saurais terminer les remerciements à tous ceux qui m'ont aidé au Togo sans mentionner Koffi et Kossi MISSINOU, observateurs de terrain consciencieux pendant de longues années, et tous les habitants du village de Davié qui ont participé aux travaux de terrain.

A mon retour en France, j'ai été chaleureusement accueilli par M. VALLERIE et J.F. VIZIER dans le cadre de l'antenne ORSTOM de Cadarache. C'est ainsi que j'ai eu la chance de travailler, pendant presque deux ans, dans le Département de Physiologie Végétale et des Ecosystèmes du CEA, sous la direction de L. SAINT LEBE. J'ai été intégré à l'équipe dirigée par G. GUIRAUD, qui a su créer au sein de son groupe

une atmosphère amicale fondée sur la confiance réciproque. G. GUIRAUD n'a pas ménagé son temps pour discuter de mes résultats, m'aider à organiser le document et à le mettre en forme. J'ai également profité de la présence de P. MOUTONNET, qui a suivi le développement de ce programme de recherche depuis l'origine et m'a apporté son soutien jusqu'à la fin. Au cours de la phase de rédaction, j'ai eu la chance de bénéficier de l'appui de Sylvie DOULBEAU. Son aide efficace et souriante m'a été précieuse pour la mise en forme du document et la réalisation des illustrations. Je tiens également à remercier Christine MAROL pour son soutien chaleureux tout au long de la rédaction et de la mise en forme du texte. Ses remarques pertinentes m'ont souvent conduit à clarifier des idées et à mieux les exprimer.

L'équipe de l'IRAT de Montpellier a également fourni un appui décisif. La mise au point des méthodes de prélèvements et l'interprétation des résultats chimiques ont été réalisées grâce à l'aide efficace de R. OLIVER et de nombreuses analyses ont été réalisées dans le laboratoire de P. FALLAVIER. En ce qui concerne la modélisation du bilan hydrique, seule une collaboration étroite avec J.P. FRÉTEAUD a permis une amélioration du modèle initial. L'interprétation agronomique des résultats de simulation a été rendue possible par un travail en commun avec J. IMBERNON, qui est venu plusieurs fois au Togo pour mener à bien cette recherche.

Une étude sur le transfert de l'eau dans le système eau-sol-plante nécessite de connaître certains paramètres microclimatiques. J'ai plaisir à remercier B. MONTENY, venu nous aider à installer une station de mesure depuis la Côte d'Ivoire, et qui a ensuite participé à l'interprétation des résultats.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à R. LAMY, qui n'a pas ménagé ses efforts pour retrouver des articles parfois anciens à partir de références bibliographiques incomplètes ou erronées et qui m'a signalé certaines publications en relation avec le sujet étudié.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PREMIERE PARTIE :

MILIEU NATUREL, MATÉRIEL ET MÉTHODES

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	21
CHAPITRE I. LES SOLS	
1. CARACTERES PÉDOLOGIQUES GÉNÉRAUX	23
2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	30
3. INTERPRÉTATION PÉDOGÉNÉTIQUE	37
4. LA DÉGRADATION DES TERRES DE BARRE	39
5. CONCLUSION	40
CHAPITRE II. LE CLIMAT	
1. LES MÉCANISMES GÉNÉRAUX DU CLIMAT AU TOGO MÉRIDIONAL	41
2. LES PRÉCIPITATIONS	43
3. LA DEMANDE ÉVAPORATIVE	47
4. CONCLUSION	51
CHAPITRE III. LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	
1. LES TECHNIQUES CULTURALES ET LA FERTILISATION	54
2. LES PARCELLES ÉTUDIÉES	55
3. LE MAIS NH1	55
4. LES MÉTHODES UTILISÉES	57
CHAPITRE IV. LA CROISSANCE DU MAIS ET LA CONSOMMATION D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX	
1. LA CROISSANCE DU MAIS	61
2. LA CONSOMMATION D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX	69
3. CONCLUSION	73

DEUXIEME PARTIE : LES TRANSFERTS HYDRIQUES

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	77
CHAPITRE V. LA PRÉCISION DES MESURES RÉALISÉES A L'AIDE DES HUMIDIMETRES A NEUTRONS ET DES TENSIOMETRES	
1. INTRODUCTION	83
2. LES DROITES D'ÉTALONNAGE DES HUMIDIMETRES ET LEUR PRÉCISION	85
3. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE L'HUMIDITÉ A UNE PROFONDEUR ET A UNE DATE DONNÉES	93
4. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE LA VARIATION D'HUMIDITÉ A UNE PROFONDEUR DONNÉE ENTRE DEUX DATES	107
5. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DU STOCK HYDRIQUE A UNE DATE DONNÉE	116
6. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE LA VARIATION DU STOCK HYDRIQUE ENTRE DEUX DATES	123
7. CONCLUSION SUR LA PRÉCISION DES MESURES D'HUMIDITÉ ET DE STOCK HYDRIQUE	127
8. PRÉCISION SUR L'ÉVALUATION DES QUANTITÉS DRAINÉES	129
9. CONCLUSION	142
CHAPITRE VI. LA DYNAMIQUE DE L'EAU	
1. MÉTHODE	145
2. LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LA PARCELLE NUE	147
3. LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LES PARCELLES CULTIVÉES	155
4. CONCLUSIONS	176
CHAPITRE VII. LE BILAN HYDRIQUE. ÉVALUATION ET MODÉLISATION	
1. ÉVALUATION DU BILAN AU COURS DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE	181
2. MODÉLISATION DU BILAN	187
3. CONCLUSION	209
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	211

TROISIEME PARTIE : LES TRANSFERTS MINÉRAUX

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE	217
CHAPITRE VIII. L'ÉTUDE DE LA SOLUTION DU SOL A L'AIDE DE BOUGIES POREUSES	
1. LES PROBLEMES POSÉS PAR LE PRÉLEVEMENT DE LA SOLUTION DU SOL A L'AIDE DE BOUGIES POREUSES	220
2. LE DISPOSITIF DE PRÉLEVEMENT ET LES MÉTHODES D'ANALYSE	224
3. LE PRINCIPE DES CALCULS	228
CHAPITRE IX. LA DYNAMIQUE DES IONS EN SOLUTION	
1. LA DYNAMIQUE DU POTASSIUM	231
2. LA DYNAMIQUE DES NITRATES	236
3. LA DYNAMIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNESIUM	239
4. LES MÉCANISMES D'ABSORPTION PAR LES RACINES	243
5. CONCLUSION	246
CHAPITRE X. LE BILAN MINÉRAL	
1. L'ÉVALUATION DU BILAN MINÉRAL PAR LA DIFFÉRENCE APPORTS-EXPORTATIONS	250
2. COMPARAISON AVEC LE BILAN RÉSULTANT DES ANALYSES DE SOL	262
3. CONSÉQUENCES SUR LA FERTILISATION MINÉRALE DU MAIS	281
CONCLUSION	287
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE	291

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

TABLES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PROBLEMES AGRONOMIQUES DU TOGO MÉRIDIONAL

Le Togo méridional, seule région du golfe de Guinée où la savane atteint l'océan Atlantique, est une très ancienne région agricole. En raison de fortes densités de population (souvent plusieurs centaines d'habitants au kilomètre carré), les superficies cultivées par actif agricole sont toujours faibles : 0,7 ha dans la zone la plus densément peuplée (SCHWARTZ, 1983) et 1,3 ha (de 0,6 à 2,0 ha) dans le reste de la région (TRIOMPHE, 1986). L'outillage agricole est resté très rudimentaire. Il est composé d'une houe de petite dimension utilisée pour labourer et sarcler appelée "daba", d'un coupe-coupe pour débroussailler, d'un couteau à lame courte utilisé en particulier pour récolter les régimes de noix de palme, et d'un pieu assez lourd pour semer le maïs. La culture attelée est pratiquement inconnue dans la région. Malgré la présence endémique de trypanosomiase, elle serait possible, du moins dans toutes les zones proches de bas-fonds dans lesquels les animaux pourraient aller paître, car les sols s'y prêtent bien. Mais l'élevage, peu pratiqué, reste toujours une activité réservée aux Peuhls et méprisée par les autres habitants de la région. Il en résulte que le labour et les portages doivent être effectués par les agriculteurs et que le fumier est extrêmement rare.

La plus grande partie de la région (92 % d'un terroir étudié par TRIOMPHE, 1986) est semée en maïs en premier cycle de culture. Le semis est effectué en poquets parfois démarisés à 3 ou 4 pieds une quinzaine de jours après le semis, sans que cette opération soit systématique. Deux ou trois sarclages assurent généralement un bon contrôle des adventices lorsque les champs ne sont pas envahis par *Imperata*. L'engrais (15-15-15) reste très peu utilisé dans toute la région : complètement ignoré sur les zones où la pratique de la jachère subsiste, il est utilisé à faible dose sur les sols les plus épuisés.

Le maïs est rarement conduit en culture pure. Il est le plus souvent associé à du manioc, planté 3 semaines après le maïs. De l'arachide est parfois introduite dans l'association, soit en plus, soit à la place du maïs. Le manioc occupe le champ en principe pendant un an, bien qu'il soit parfois récolté plus précocement. Après la récolte du maïs en août, une nouvelle culture est généralement mise en place entre août et octobre pour la deuxième saison de culture. C'est souvent du maïs, surtout si la récolte de première saison a été faible, mais l'arachide ou le niébé sont également fréquents. Les résidus de récolte sont généralement exportés des champs à la récolte pour être utilisés comme combustible.

Lorsque la fertilité des champs décline, le maïs est abandonné. Seuls le manioc et le niébé parviennent à pousser sur les sols les plus épuisés, mais les rendements sont alors dérisoires. La fertilité était traditionnellement restaurée par une jachère de 8 ans ou plus. Ce système est toujours utilisé dans les zones où les densités de population sont les plus faibles, même si la durée de la jachère diminue régulièrement. Mais il est complètement abandonné dans les zones les plus peuplées, où les champs sont cultivés sans interruption parfois depuis une quarantaine d'années. Le couvert arbustif met plusieurs années à se reconstituer sur les sols épuisés laissés en jachère : les arbustes se développent lentement sur les sols appauvris, d'autant plus qu'ils sont régulièrement coupés pour fournir du combustible et que le petit bétail, laissé en vaine pâture, consomme le peu de végétation qui parvient à se développer. Seules des jachères de très longue durée, impossibles à implanter dans les zones les plus peuplées, pourraient restaurer naturellement la fertilité des sols.

Les rendements obtenus varient fortement selon la pluviométrie et selon les parcelles. En première saison de culture, au cours de laquelle les pluies sont généralement suffisantes, le rendement en maïs est en moyenne de 8 q.ha⁻¹ sur les sols non épuisés en culture pure (environ 4 q.ha⁻¹ en culture associée), contre 0 à 3 q.ha⁻¹ en deuxième saison des pluies, car la pluviométrie est beaucoup plus aléatoire. Lorsque le sol est épuisé, les rendements en maïs ne dépassent pas 2 à 4 q.ha⁻¹ (LOUETTE, 1988). Pour le manioc, les rendements chutent de 30 à 40 t.ha⁻¹ sur les sols récemment mis en culture jusqu'à 5 à 6 t.ha⁻¹ dans les sols épuisés (DABIN, 1956). Il en résulte pour l'agriculteur de très faibles niveaux de production et une insécurité importante qui le rend méfiant à l'égard de toute innovation ne se traduisant pas par une augmentation immédiate de rendement. Le maïs est surtout produit pour être autoconsommé, alors que le manioc est généralement vendu. Les rentrées financières des trois quarts des familles de la zone dense étaient en 1967 de moins de 50 000 CFA par an (LE COCQ-LITOUX, 1974), et la situation s'est détériorée depuis. Dans certaines zones, les villages sont à peine auto-suffisants au niveau alimentaire ; ils dépendent de l'argent envoyé par les habitants qui ont émigré pour satisfaire à leurs autres besoins (SCHWARTZ, 1983). C'est pourquoi beaucoup d'agriculteurs exercent maintenant une double activité, lorsqu'ils ne migrent pas vers des zones moins peuplées ou vers des centres urbains.

L'agriculture de la région est donc fondée sur la culture du maïs, en culture pure ou en association avec le manioc. En raison d'un problème foncier considérable, les exploitations sont de petite taille et l'occupation de l'espace est intensive. L'exploitation continue du milieu conduit à un épuisement des sols qui se traduit par une diminution spectaculaire des rendements. Or, il est nécessaire d'augmenter la production pour faire face à la croissance rapide de la population de la région malgré ce contexte socio-économique défavorable. En raison de la faiblesse de l'épargne mobilisable, les solutions à rechercher doivent faire appel le moins possible à des intrants et elles doivent donner des résultats rapides qui seuls assurent leur acceptabilité par les agriculteurs.

Parmi les trois principaux éléments fertilisants, le potassium joue un rôle particulier. Il est rare en effet que les sols africains présentent des carences en potassium aussi prononcées que celles qui ont été observées

dans les terres de Barre après quelques années de culture (PIERI, 1989). Par ailleurs, les conséquences des stress hydriques que les cultures subissent presque chaque année, en particulier au cours du deuxième cycle de culture, sont amplifiées par une carence potassique. C'est pourquoi il est important de mettre l'accent sur la dynamique du potassium lors de l'étude de ces sols.

Les recherches agronomiques conduites sur les terres de Barre du Togo et du Bénin depuis une quarantaine d'années ont permis de définir des systèmes agricoles vulgarisables auprès des agriculteurs. Ces systèmes reposent sur l'adoption de plusieurs "thèmes techniques" (utilisation de variétés sélectionnées, densités et dates de semis, travail du sol...) et sur une succession maïs-légumineuse interrompue parfois par une sole de manioc, avec apport d'une fertilisation minérale (MARQUETTE *et al.*, 1982 ; LOUE, 1980). La durabilité des systèmes préconisés est le plus souvent déduite du maintien des rendements obtenus, plus rarement d'analyses de sols. Or, la durabilité de ces agro-systèmes ne peut être établie qu'après avoir dressé un bilan minéral du sol, qui seul permet d'attester que le capital-sol est préservé sur le plan chimique. Par ailleurs, les dates de semis préconisées ont été déterminées de manière empirique : l'établissement d'un calage des cycles culturaux sur la base de critères objectifs était susceptible de procurer une augmentation de rendement sans nécessiter de dépense pour l'agriculteur.

OBJECTIFS ET PLAN DES RECHERCHES

L'objectif de ce travail est de préciser certains aspects du fonctionnement hydrique et chimique d'un agro-système vulgarisable auprès des agriculteurs, et d'en tirer les conséquences agronomiques en ce qui concerne le choix des dates de semis et la conduite de la fertilisation minérale.

L'approche retenue est la quantification des transferts d'eau et d'éléments minéraux dans l'agro-système. Les transferts hydriques dans le sol ont été mesurés au champ grâce à l'utilisation conjointe d'humidimètres à neutrons et de tensiomètres, l'extrapolation dans le temps et dans l'espace étant réalisée par un modèle de simulation du bilan hydrique. Les transferts minéraux dans le sol résultent de l'entraînement des éléments par les flux de drainage et de l'absorption racinaire. Ils ont été évalués, sur les mêmes parcelles que les flux hydriques, en mesurant l'évolution au cours du temps des teneurs en éléments minéraux de la solution du sol à l'aide de capteurs en porcelaine poreuse et en déterminant les quantités d'éléments minéraux contenus dans la plante à ses différents stades de développement végétatif.

Les données sur le milieu naturel nécessaires à cette étude, ainsi que le matériel et les méthodes utilisées, sont exposées dans *la première partie*.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des transferts hydriques : l'évaluation des flux hydriques permet d'appréhender le bilan hydrique du système sol-plante-atmosphère.

Dans *la troisième partie*, le bilan minéral est établi à partir des flux d'éléments minéraux dans le sol et dans la plante. Ce bilan est ensuite confronté à celui déduit des analyses de sol, ce qui conduit à présenter en conclusion un certain nombre d'enseignements et de recommandations.

PREMIERE PARTIE

MILIEU NATUREL,

MATÉRIEL ET MÉTHODES

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE

Les terres de Barre (du portugais "barro", la boue avec laquelle sont construites les maisons) jouent un rôle important dans la production vivrière du Togo et du Bénin. C'est pourquoi elles ont fait l'objet de nombreuses études au cours des 40 dernières années. Les premiers travaux ont essentiellement concerné l'aspect cartographique et pédogénétique (LENEUF, 1949 ; COMBEAU, 1951). Cette phase d'inventaire et de caractérisation s'est développée au cours des années cinquante et soixante, avec notamment la publication des cartes pédologiques de VOLKOFF (1976) et VOLKOFF & WILLAIME (1976) pour le Bénin et de MILLETTE & VIELLEFON (1965) et LAMOUREUX (1969) pour le Togo. Toutes les données acquises ont été synthétisées par FAUCK (1972) et par CHAUVEL (1977) ; ensuite, les études pédogénétiques ont été presque complètement abandonnées.

Les recherches consacrées à l'agronomie sont apparues au début des années cinquante avec la création de stations de recherche et de points d'appui dans les deux pays. La région compte actuellement une dizaine de sites expérimentaux. Une synthèse de l'ensemble des travaux agronomiques concernant les terres de Barre du Togo et du Bénin (comprenant une bibliographie exhaustive sur le sujet) a récemment été tirée des nombreux résultats obtenus par les organismes français (ORSTOM, IRAT, IRHO et IRCT) ou internationaux (IITA) et par les services nationaux (Direction de la Recherche Agronomique et Institut National des Sols au Togo, Service d'Agropédologie et CARDER au Bénin) qui ont travaillé dans cette région (LOUETTE, 1988).

Dès les premières études, les chercheurs ont noté qu'après quelques années de culture les rendements diminuaient considérablement. Il est devenu courant d'opposer les terres récemment défrichées après une longue jachère aux sols cultivés depuis dix ans ou plus, et de dire que les terres de Barre étaient "dégradées" par la surexploitation. L'IRAT a créé la station de recherche de Davié en 1967 afin de conduire des essais agronomiques sur des terres de Barre réputées non dégradées et le point d'appui d'Agbomédji pour étudier

altitude 90 m), au centre d'un plateau qui se poursuit jusqu'à la ville de Tsévié, à 5 km au nord (figure I.1). Le point d'appui d'Agbomédji (terres de Barre dégradées) se trouve à une cinquantaine de kilomètres de Davié, sur un plateau proche du littoral situé entre Aklakou et Anecho.

Le but de cette première partie est double. Le premier objectif est d'évaluer la représentativité de la station de Davié. Pour cela, le climat et les sols de la station ont été comparés aux connaissances déjà acquises sur les terres de Barre. Le deuxième objectif est de présenter des données, relatives au milieu et à la plante, nécessaires à la compréhension de la dynamique de l'eau et des éléments minéraux. Cette présentation du milieu n'a donc pas de prétention à l'exhaustivité en ce qui concerne les terres de Barre.

CHAPITRE I

LES SOLS

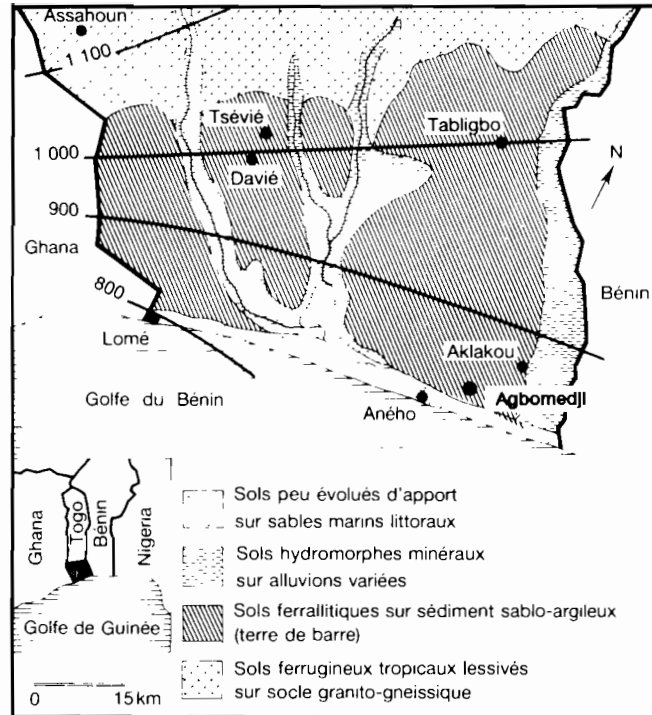
L'objet de ce chapitre est double :

- situer les sols de la station de Davié et le travail réalisée par rapport au contexte régional et aux études antérieures ;
- fournir les données pédologiques relatives à l'organisation des sols nécessaires à la caractérisation des transferts d'eau et d'éléments dans les sols.

Le premier paragraphe est consacré à la présentation du milieu, de l'échelle du paysage à celui du profil. Cette présentation permet de discuter la représentativité des sols étudiés et de fournir des données sur l'organisation morphologique des sols. L'organisation de l'espace poral et les propriétés de rétention de l'eau sont présentées dans le deuxième paragraphe. Les résultats des études pédologiques antérieures sont exposés dans le troisième et le quatrième paragraphe, ce qui permet de positionner l'étude réalisée par rapport aux connaissances actuelles sur ces sols.

1. CARACTERES PÉDOLOGIQUES GÉNÉRAUX

Les terres de Barre forment un ensemble très homogène le long du Golfe de Guinée, depuis Accra (Ghana) jusqu'au delta du Niger au Nigéria. Leur extension est maximale au Bénin, où elles pénètrent jusqu'à 120 km du littoral. Au Togo, elles constituent une bande située à l'arrière du cordon littoral et des lagunes dont la largeur est comprise entre 30 et 50 km (figure I.1). La présence de ces sols est strictement liée à celle d'un matériau particulier, le Continental Terminal. Il s'agit d'un épandage qui a recouvert toute la région sur une épaisseur de quelques mètres à quelques centaines de mètres probablement à la fin du tertiaire (SLANSKY, 1959). Cet épandage s'est effectué en milieu continental : il est azoïque et constitué de matériau ayant déjà subi une altération ferrallitique, comme en atteste la présence de couches superposées



Source : POSS *et al.*, 1988

FIGURE I.1
Organisation générale des sols au Togo méridional (d'après LAMOUROUX, 1969) et isohyètes annuelles moyennes (1965-1985)

grande profondeur (MILLETTE & VIEILLEFON, 1965). Il est probable que la mise en place se soit effectuée au cours d'une phase climatique de type subaride, car les dépôts présentent des pentes très faibles, qui évoquent une redistribution le long de grands glaciers. L'évolution géochimique ultérieure a été extrêmement limitée ; FAUCK (1972) souligne d'ailleurs qu'il est difficile de parler de pédogenèse ferrallitique puisque les matériaux originels ont déjà cette caractéristique.

Dans toute la région, les terres de Barre se présentent sous forme de plateaux à très faible pente (généralement inférieure à 1 %), dont l'altitude au-dessus du niveau de la mer ne dépasse pas 100 m. Ces plateaux sont traversés par des vallées à fond plat dont les cours d'eau proviennent du socle granito-gneissique situé plus au nord. Le réseau hydrographique propre aux terres de Barre est pratiquement inexistant : même pendant la saison des pluies, aucune rivière n'est permanente. Le ruissellement est extrêmement faible à l'échelle régionale, mais il n'a pu être mesuré car tous les cours d'eau sont alimentés par des apports venus du socle. Enfin, une nappe phréatique est presque toujours présente vers 50 m de profondeur, mais le sol n'est jamais engorgé.

L'histoire culturelle des parcelles de la station de Davié est très variable. Si la plus grande partie de la station est constituée de parcelles d'essais agronomiques, un lambeau de forêt sacrée d'environ 2 000 m² a été conservé en bordure de station. Il constitue le témoin d'un sol qui n'a pas été cultivé depuis au moins un siècle. Par ailleurs, plusieurs parcelles sont laissées en jachère herbacée. Leurs âges sont différents, en raison des multiples essais conduits sur la station depuis près de 25 ans. Des résultats d'analyse de sol de ces jachères

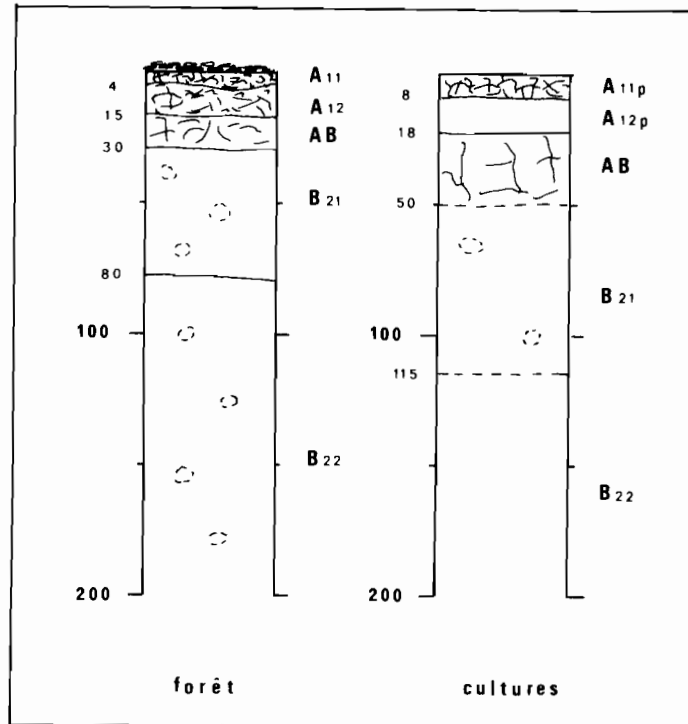


FIGURE I.2
 Représentation schématique des profils de sols sous forêt et sous jachère après culture (station de Davié)

seront utilisés lors de l'étude des bilans minéraux pour situer la fertilité des sols cultivés. Enfin, pour caractériser le fonctionnement hydrique et minéral d'un sol nu, une jachère de 10 ans a été défrichée en 1986 et ensuite maintenue sans végétation à l'aide de sarclages successifs.

Sur tout le plateau sur lequel est située la station de Davié, les sols sont très homogènes latéralement au point de vue morphologique (DOME, 1985). Les profils ne diffèrent que par la profondeur de l'appauvrissement en argile de l'horizon superficiel et la teneur en matière organique.

La figure I.2 représente schématiquement les deux principaux types de profils qui se trouvent sur la station, en prenant l'exemple d'un profil sous forêt et d'un profil sous une jachère de 5 ans environ. Leur organisation morphologique est présentée de manière synthétique dans les tableaux I.1 et I.2, en reprenant la terminologie proposée par MAIGNIEN (1969).

TABLEAU I.1
Principaux caractères morphologiques du sol sous forêt sacrée (Davié)

Prof. (cm)	Notation ABC	Couleur (humide)	Taux de m.o. (%)	Taux d'argile (%)	pH	Structure	Porosité	Cohésion	Abondance et taille des racines	Transition à l'horizon suivant
0-4	A 11	5 YR 2,5/2	6,9	6,3	7,0	Fragmentaire nette généralisée, grumeleuse très fine (micropeds) à moyenne, associée à particulaire (sables déliés)	Très poreux. Très nombreux pores vacuolaires	Très meuble, à l'état humide comme à l'état sec	Très nombreuses, fines à très fines	Nette, ondulée
4-15	A 12	5 YR 3/2	2,0	11,1	6,9	Fragmentaire nette généralisée, grumeleuse grossière à très grossière	Très poreux. Très nombreux pores fins et moyens vacuolaires et tubulaires	Meuble, à l'état humide comme à l'état sec	Nombreuses racines très fines à grosses	Distincte, ondulée
15-30	AB	2,5 YR 2,5/4	0,9	14,8	7,2	Fragmentaire peu nette, massive par endroits, polyédrique subanguleuse grossière	Poreux. Très nombreux pores vacuolaires et tubulaires	Meuble, à l'état humide comme à l'état sec	Nombreuses racines, très fines à grosses	Distincte, ondulée
30-80	B 21	10 R 3/4	0,5	28,6	5,9	Fragmentaire peu nette. Polyédrique grossière	Poreux. Pores fins et moyens vacuolaires, et cavités biologiques	Meuble à l'état humide. Peu meuble à l'état sec	Racines peu nombreuses, très fines à grosses	Distincte, régulière
80-190	B 22	10 R 3/4	0,3	46,4	6,1	Fragmentaire peu nette, polyédrique grossière	Poreux. Pores fins et moyens vacuolaires et cavités biologiques	Meuble à l'état humide. Peu meuble à l'état sec	Quelques racines fines. Très rares grosses racines	-

TABLEAU I.2
Principaux caractères morphologiques du sol sous jachère de 5 ans (Davié)

Prof. (cm)	Notation ABC	Couleur (humide)	Taux de m.o. (%)	Taux d'argile (%)	pH	Structure	Porosité	Cohésion	Abondance et taille des racines	Transition à l'horizon suivant
0-8	A 11 p	5 YR 3/3	0,9	6,7	5,5	Fragmentaire nette généralisée, grumeleuse très fine à très grossière très nette, avec tendance particulaire	Très poreux, à porosité interagrégats	Meuble, à l'état humide comme à l'état sec	Racines très nombreuses, très fines	Distincte, régulière
8-18	A 12 p	5 YR 3/2	0,8	8,1	5,7	Massive peu nette à éclats émoussés	Poreux. Pores très nombreux, très fins, vacuolaires	Meuble à l'état humide, peu meuble à l'état sec	Racines peu nombreuses, très fines	Nette, régulière
18-50	AB	2,5 YR 3/4	0,5	20,5	5,3	Fragmentaire peu nette, polyédrique subanguleuse moyenne à grossière	Très poreux. Pores très nombreux, très fins et moyens vacuolaires	Meuble à l'état humide, peu meuble à l'état sec	Racines peu nombreuses, très fines	Graduelle, ondulée
50-115	B 21	10 R 3/6	0,3	35,9	5,1	Fragmentaire peu nette, polyédrique (parfois subanguleuse) moyenne à grossière	Poreux. Pores fins et moyens vacuolaires. Quelques cavités biologiques	Meuble à l'état humide, peu meuble à l'état sec	Quelques rares racines très fines, passant à très rares en profondeur	Diffuse, régulière
115-190	B 22	10 R 3/6	0,1	43,6	5,1	Fragmentaire nette, polyédrique moyenne à grossière	Poreux. Pores fins à moyens vacuolaires	Meuble à l'état humide, peu meuble à l'état sec	Très rares racines très fines	-

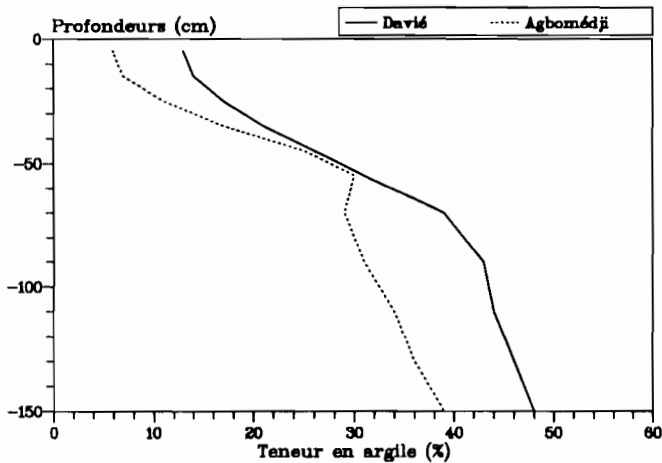


FIGURE I.3
*Profils de teneur en argile dans les terres de Barre
 (Stations de Davié et Agbomédji, moyenne de 96
 prélèvements à Davié, 60 prélèvements à Agbomédji)*

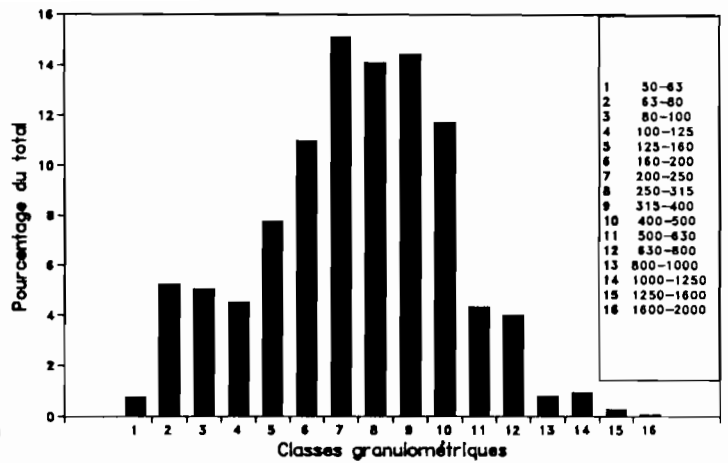


FIGURE I.4
*Granulométrie des sables à Davié (horizon 0-10 cm,
 moyenne de 6 prélèvements, en micromètres)*

Dans les terres de Barre la texture est toujours sableuse sur au moins 10 cm : les profils granulométriques moyens obtenus à Davié et à Agbomédji fournissent deux exemples typiques, le cas de Davié étant proche de la moyenne générale et celui d'Agbomédji représentant le pôle sableux (figure I.3). La régularité des courbes de la figure I.3 résulte du grand nombre de prélèvements réalisés : pour chaque profil prélevé, un front d'appauvrissement en argile apparaît nettement à une profondeur comprise entre 15 et 40 cm. La profondeur du front d'appauvrissement présente une forte variabilité spatiale à une échelle décimétrique, à Davié comme au Bénin (RAUNET, 1973).

Un maximum de teneur en argile a été mis en évidence en profondeur à l'aide de deux échantillonnages effectués à la tarière jusqu'à 5 m de profondeur : il se situe vers deux mètres dans un cas, vers trois mètres dans l'autre (respectivement 35 % et 37 % d'argile). Ces observations sont en accord avec celles de FAUCK (1972) : cet auteur a noté que la grande majorité des profils de l'ensemble des "sols rouges" présente une teneur maximale en argile comprise entre 30 et 45 %. Comme toujours dans ces sols (MILLETTE & VIEILLEFON, 1965), le gradient de teneur en argile en fonction de la profondeur est faible et il n'est donc pas possible de définir de véritable horizon d'accumulation. Par ailleurs, aucune cutane argileuse n'a pu être mise en évidence dans les sols étudiés. Les teneurs en argile diminuent progressivement en profondeur pour atteindre 30 % à 5 m, en accord avec le profil granulométrique moyen défini par FAUCK. Sur la station de Davié, le sol se poursuit jusqu'à plus de 10 m, profondeur courante pour les sols rouges (MAGNIEN, 1964). La teneur en argile figure seule dans les tableaux synthétiques car les teneurs en limons sont faibles, comme toujours dans les vieux sols ferrallitiques : environ 3 % de limons fins (2-20 μm) et 6 % de limons grossiers (20-50 μm). La granulométrie des sables varie peu dans les horizons de surface (MILLETTE & VIEILLEFON, 1965). Elle présente un seul maximum entre 0,2 et 0,3 mm (figure I.4), ce qui provoque

parfois d'importantes erreurs sur les teneurs en sables grossiers et en sables fins (la limite entre sables grossiers et sables fins est conventionnellement fixée à 0,2 mm). Il faut noter enfin l'absence totale d'éléments grossiers, caractère général des terres de Barre.

La couleur du sol est franchement rouge en profondeur, malgré une teneur en fer total qui ne dépasse pas 5 % dans l'horizon B 22, et le matériau ne présente aucune tache d'hydromorphie. Même en étudiant une centaine de profils, FAUCK (1972) n'est d'ailleurs pas parvenu à "détecter une liaison" entre la couleur et la richesse en argile et en fer. Cet auteur a noté que la pédogenèse avait produit une "homogénéisation morphologique remarquable" de tous les horizons B des "sols rouges", quelle que soit leur origine. Une partie de son travail concerne d'ailleurs les causes de cette convergence.

Comme tous les "sols rouges", le sol de Davié présente donc un profil caractérisé par la présence d'horizons supérieurs, dont les plus superficiels sont organiques, surmontant des horizons B profonds, homogènes et rubéfiés dans lesquels aucune accumulation d'argile n'apparaît nettement. C'est pour décrire cette organisation morphologique que le terme "appauvrissement" a été introduit (FAUCK, 1964), sans qu'aucune connotation de type pédogénétique y soit attachée.

La matière organique est toujours bien humifiée (C/N compris entre 10 et 11). Le taux de matière organique, qui atteint près de 7 % en surface sous forêt à Davié, décroît très rapidement à la mise en culture. Il se maintient à des valeurs de l'ordre de 1 % dans l'horizon de surface des sols cultivés, quels que soient les traitements. Il s'agit là d'un caractère général de tous les "sols rouges".

La structure du sol est généralement fragmentaire peu nette en profondeur, voire franchement massive. Les éléments polyédriques fins décrits par plusieurs auteurs dans des sols analogues (pseudo-sables de FAUCK et micro-nodules de CHAUVEL) sont peu visibles. En surface, la structuration est liée au type d'utilisation du sol : nettement grumeleuse sous forêt, elle devient rapidement massive, juxtaposée à particulaire, après défriche. Lorsqu'une parcelle cultivée est laissée en jachère, la fragmentation de la structure réapparaît progressivement dans les horizons de surface. Le profil décrit dans le tableau I.2 constitue un exemple de régénération de la structure sur les 8 premiers centimètres après 5 années de jachère. Lorsque la fragmentation de la structure est marquée, le sol reste toujours meuble quel que soit l'état d'humectation. Mais, lorsque la structure devient continue, le sol présente de fortes variations de cohésion en fonction de l'humidité. Si à l'état humide il reste toujours meuble, il devient en revanche peu meuble à assez cohérent à l'état frais et à l'état sec, en surface comme en profondeur. La forte cohésion aux faibles humidités pose des problèmes de travail du sol en conditions sèches et rend la récolte de l'arachide et du manioc difficile. Lors de l'installation du matériel de mesure (tubes d'humidimètre à neutrons et tensiomètres), il a d'ailleurs été nécessaire d'effectuer une irrigation pour pouvoir faire pénétrer la tarière en-dessous de 50 cm.

Au point de vue minéralogique, les sols de Davié sont principalement constitués de quartz, de kaolinite et d'oxydes de fer. Le quartz est le seul minéral primaire présent dans ce type de sol, car il résiste mieux que les autres à l'altération ferrallitique. Il représente de 50 à 80 % de la phase solide du sol selon la teneur en

argile. La kaolinite domine dans la fraction inférieure à 2 micromètres. Des interstratifiés 2/1 ont également été détectés, mais uniquement à l'état de traces. FAUCK (1972) souligne que des interstratifiés ont "souvent été cités" dans les "sols rouges" et il estime qu'ils sont les résidus des illites des roches-mères qui ont subsisté, peut-être protégés par des produits amorphes. Enfin les sols de Davié contiennent jusqu'à 5 % d'hydroxydes de fer sous forme d'hématite et de goethite, teneur habituelle dans ces sols. La gibbsite n'a jamais été détectée.

Sous forêt, des racines ont été observées jusqu'à 8 mètres de profondeur à Davié, mais la profondeur atteinte par le système racinaire est inconnue. DABIN (1956) avait également noté que les racines pénétraient "à grande profondeur". Sous jachère herbacée ancienne, les racines colonisent le sol sur plus de deux mètres. La végétation naturelle réalise donc une exploitation profonde du sol.

En ce qui concerne leur classification, les terres de Barre de Davié sont des sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris dans la classification française (CPCS, 1967). Dans le système FAO (FAO-UNESCO, 1989), la classification varie selon les parcelles (BRABANT, comm. pers.). Dans tous les cas, un horizon ferrallique peut être reconnu, qui prime sur le B argique : il s'agit donc d'un Ferralsol. La couleur vive de l'horizon B indique toujours le caractère rhodique. Mais, sous forêt et jachère ancienne, l'horizon A est mollique, alors qu'il est ochrique dans les champs cultivés (couleur plus vive et teneur en carbone inférieure à 0,6 %). Il s'agit donc d'un "Ferralsol rhodique, mollique" sous forêt et jachère ancienne, et d'un "Ferralsol rhodique, ochrique" dans les champs cultivés et les jachères récentes. Pour la Soil Taxonomy (USDA, 1975), l'horizon diagnostique est un Horizon B oxisol, il s'agit donc d'un oxisol. Le régime hydrique est "ustic". Il s'agit donc d'un "typic Eustrustox". Ces dénominations ne sont fournies ici qu'à titre indicatif. En effet si la dénomination des terres de Barre varie peu dans le système français, des terres de Barre du Bénin apparemment très voisines d'après leur organisation ont été séparées au niveau supérieur de la classification dans le système FAO et le système USDA lors d'une réunion sur la corrélation des sols tenue à Cotonou (FAO, 1989). Ces systèmes reposent en effet sur les propriétés chimiques des sols, souvent difficiles à apprécier en raison de la variabilité des résultats fournis par les laboratoires d'analyses.

Les caractéristiques relevées sur les terres de Barre de Davié sont donc pour la plupart en accord avec celles décrites dans les études déjà réalisées. Cette représentativité n'a rien d'étonnant car les terres de Barre sont "remarquablement homogènes", pour reprendre l'expression de RAUNET (1973). Il faut toutefois nuancer cette appréciation : les variations de teneur en argile des horizons de surface interviennent fortement sur les capacités agronomiques des terres de Barre et les sols de Davié représentent, avec environ 13 % d'argile en surface, le pôle le plus argileux et le plus fertile. Par ailleurs, l'homogénéité latérale des sols ne s'observe que sur les plateaux proprement dits (environ 90 % des sols de la région, zones alluviales exclues). En effet un gradient toposéquentiel marqué apparaît en bordure des plateaux en direction des axes de drainage. Les sols deviennent alors beaucoup plus sableux, et des phénomènes d'hydromorphie apparaissent à la base des profils (MILLETTE & VIEILLEFON, 1965 ; DOME, 1985). La caractérisation fine de l'organisation et du fonctionnement de ce système de sols de versants reste à effectuer. Dans le cadre de ce travail, seuls les sols

des plateaux, d'où provient la plus grande partie de la production agricole de la région, seront étudiés. Les sols de la station de Davié en constituent un exemple représentatif.

2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

2.1. L'espace poral

2.1.1. LA DENSITÉ APPARENTE

La densité apparente ρ_b a été déterminée au cylindre pour la majorité des horizons, et au densitomètre à membrane pour les horizons de surface sous forêt, où l'abondance des racines interdisait l'utilisation des cylindres. Les cylindres utilisés avaient un volume de 250 cm³ et la partie intérieure était usinée un demi millimètre plus large que le biseau, afin d'éviter le frottement de l'échantillon contre les parois lors du prélèvement (LELIEVRE, 1981). Le densitomètre à membrane permettait des prélèvements jusqu'à 3000 cm³, mais les volumes prélevés étaient compris entre 400 et 1300 cm³. Le nombre de répétitions a été de 6 sur les 20 premiers centimètres, et de 4 dans les horizons plus profonds.

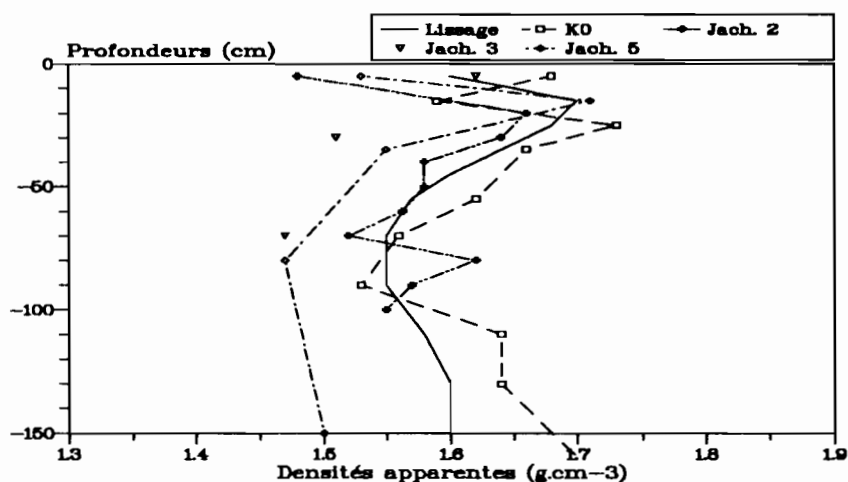


FIGURE I.5
Profils de densités apparentes sous parcelles cultivées et jachères récentes (cylindre de 250 cm³, 4 à 6 répétitions)

Quatre profils de densité apparente ont été réalisés (figure I.5) : l'un était situé dans une parcelle cultivée (parcelle N2 P1 K0 notée KO), les trois autres dans des jachères de 2, 3 et 5 ans (notés jach. 2, jach. 3 et jach. 5). Les courbes obtenues sont-elles significativement différentes ?

TABLEAU I.3
Exemples d'écart-type sur les mesures de densité apparente pour quelques profondeurs et moyenne générale (cylindre de 250 cm³, parcelle N2P1K0 et parcelles en jachère, en g.cm⁻³)

Profondeurs (cm)	N2P1K0	Jachère 2 ans	Jachère 3 ans	Jachère 5 ans
5	0,03	0,07	0,02	0,04
15	0,02	0,04	-	0,05
30	0,07	0,03	0,04	0,08
50	0,05	0,06	-	0,08
100	0,03	0,04	-	0,09
150	0,03	0,04	0,03	0,06
Moyenne toutes profondeurs	0,04	0,04	0,03	0,06

L'écart-type des mesures de densité apparente a été calculé à partir des résultats des mesures (tableau I.3). L'écart-type n'est pas plus élevé en surface que dans les horizons profonds : il n'était donc pas utile d'effectuer plus de répétitions en surface. Par ailleurs, les écart-types moyens ont été très proches d'un profil de densité à l'autre (de 0,03 à 0,04 g.cm⁻³, soit un CV de 2 %), sauf pour le profil de la jachère de 5 ans, qui a été utilisé pour mettre au point la méthode. Comme chaque valeur de densité représente 6 ou 4 prélèvements, l'intervalle de confiance est de $\pm 0,03$ g.cm⁻³ en surface et de $\pm 0,04$ g.cm⁻³ en profondeur. Les différentes courbes de la figure I.5 sont donc significativement différentes.

Les profils sous jachère présentent tous la même forme générale : la densité apparente passe par un maximum vers 20 cm de profondeur, décroît ensuite jusque vers 80 cm, puis augmente de nouveau faiblement en profondeur. Cette forme générale a également été retrouvée à Agbomédji. L'évolution des densités apparentes en fonction de la profondeur est également la même en K0, sauf à 15 cm où la densité est beaucoup plus faible.

Sous jachère, le maximum situé à 20 cm correspond à un horizon dans lequel la compacité est plus élevée que dans le reste du profil ; il serait l'objet d'une dégradation actuelle (FAUCK, 1972 ; CHAUVEL, 1977). Le minimum relatif situé à 80 cm pourrait provenir de l'activité de la faune du sol. Le sol présente, en effet, de nombreuses cavités qui témoignent d'une intense activité biologique jusque vers 115 cm. Enfin l'accident relevé sur le profil sous culture est probablement lié à la date de prélèvement : les échantillons ont été prélevés au cours de la petite saison sèche et la faible densité apparente à 15 cm résulte certainement du labour de première saison. D'autres profils de densité, réalisés sous culture à Davié et à Agbomédji au cours de la grande saison sèche, ne présentent pas cette anomalie. La densité apparente des terres de Barre n'est donc pas significativement modifiée par des temps de jachère pouvant atteindre 5 ans.

A partir des différents profils de densité, un profil moyen a été défini (noté "Lissage" sur la figure I.5). C'est ce profil qui a été utilisé tant pour l'établissement des droites d'étalonnage de l'humidimètre neutronique que pour les calculs de bilans en éléments minéraux. Son intervalle de confiance peut être estimé à 0,02 g.cm⁻³.

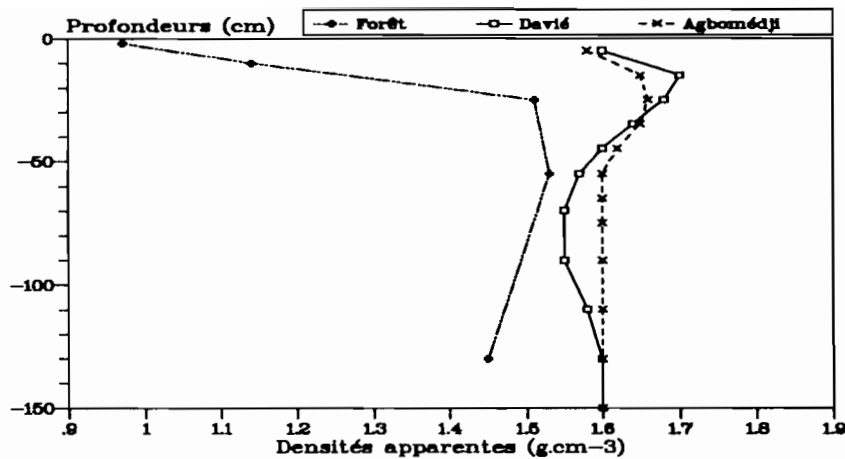


FIGURE I.6
 Comparaison des profils de densités apparentes sous forêt à Davié et sous parcelles cultivées ou jachères récentes à Davié et Agbomédji (cylindre de 250 cm³, 4 à 6 répétitions, valeurs brutes sous forêt, valeurs lissées pour les parcelles cultivées et en jachère)

Si les profils de densité apparente sont très proches à Davié et à Agbomédji (figure I.6), ils diffèrent considérablement du profil de densité apparente initial sous forêt. Bien qu'aucune analyse fine ne puisse être tentée car le profil de densité sous forêt n'a été établi que par 4 échantillons par niveau, il apparaît que les densités ont été considérablement augmentées en surface par la mise en culture (plus de 50 %).

2.1.2. LA DENSITÉ RÉELLE

La densité réelle ρ_s a été établie par la méthode de ROOSE (cité par AUDRY *et al.*, 1973). Le principe consiste à mesurer le volume occupé par un poids P de terre sèche, en laissant bouillir la terre pendant 2 heures dans une fiole jaugée, et en ajustant ensuite le niveau de l'eau. Les pesées de la fiole pleine d'eau (P1) et de la fiole contenant le mélange terre + eau (P2) permettent de calculer la densité réelle :

$$\rho_s = \frac{P}{P + P1 - P2}$$

En raison de sa rapidité et de sa simplicité, cette méthode a été préférée à la méthode classique au pycnomètre. La mesure a été réalisée sur chaque échantillon prélevé pour déterminer la densité apparente. En utilisant des échantillons de 50 g de terre, des ballons de 250 cm³ et un local climatisé à 20°C, l'écart-type moyen est de 0.02 g.cm⁻³ (CV inférieur à 1 %), sans que la dispersion des résultats soit plus élevée en surface.

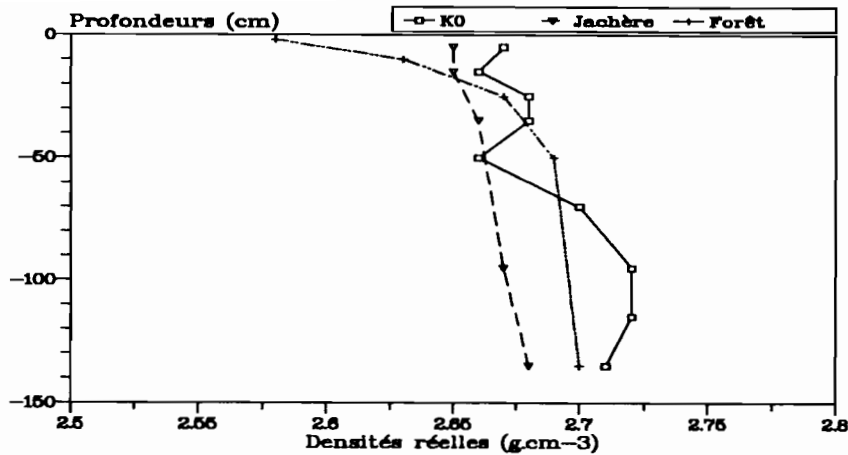


FIGURE I.7
Profils de densités réelles (méthode par ébullition, 6 répétitions en surface, 4 répétitions en profondeur)

Les valeurs de densité réelle tendent à augmenter faiblement en profondeur (figure I.7), en raison de la diminution du taux de matière organique, mais elles restent comprises pour la parcelle K0 et pour la jachère entre $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ et $2,72 \text{ g.cm}^{-3}$.

Une valeur de $2,68 \text{ g.cm}^{-3}$ peut être retenue pour les calculs sur l'ensemble du profil, aussi bien pour la parcelle cultivée que pour les parcelles sous jachère : cette valeur fournit une estimation de la densité réelle avec une erreur inférieure à 1 % en valeur relative.

2.1.3. LA POROSITÉ TOTALE

La porosité ϕ_f a été déduite, pour chaque profondeur de mesure, des valeurs de densité apparente ρ_b et de densité réelle ρ_s :

$$\phi_f = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s}$$

L'écart-type est en moyenne de $0,02 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (CV de l'ordre de 5 %), mais il varie de $0,004 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ à $0,06 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ selon les niveaux de mesure. Les valeurs obtenues sous la parcelle K0 et sous jachère ne sont donc pas significativement différentes (figure I.8). Sur l'ensemble du profil, la porosité est comprise entre $0,35 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ et $0,45 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ pour ces deux parcelles. Ces valeurs sont faibles pour des sols ferrallitiques (HUMBEL, 1976), et sont probablement à relier à la faible fragmentation de la structure de l'ensemble des horizons. Le minimum s'observe vers 20 cm de profondeur, au niveau de l'horizon AB : une porosité totale de $0,35 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ est considérée comme limitante pour assurer un enracinement correct des plantes cultivées.

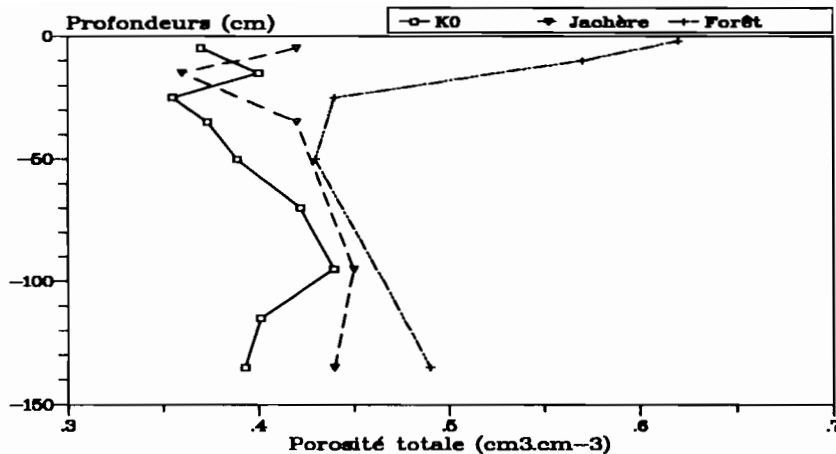


FIGURE 1.8
Profils de porosité totale (6 répétitions en surface, 4 répétitions en profondeur)

Par rapport à la forêt, la porosité totale sous culture et sous jachère est beaucoup plus faible sur les 30 premiers centimètres. En revanche, la porosité totale des horizons profonds ne semble pas modifiée par la mise en culture. Ces résultats sont concordants avec ceux obtenus par CHAUVEL (1977) en Casamance. Cet auteur a montré que sous culture l'horizon AB des "sols rouges" correspondait au minimum de porosité, alors que la porosité était à peu près constante sur tout le profil sous forêt. La porosité minimale trouvée était de $0,37 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, soit une valeur presque identique à celle trouvée dans les terres de Barre. En s'appuyant sur le fait que le minimum de porosité se manifeste même en parcelles paysannes, CHAUVEL a conclu que la faible porosité de horizons AB ne résultait pas d'un tassement par les engins agricoles mais d'une évolution pédogénétique.

Dans les terres de Barre, la porosité est donc toujours inférieure à $0,50 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ dans les horizons profonds, caractère qui semble lié à la faible fragmentation de la structure. Dans les 20 premiers centimètres, la porosité est élevée sous forêt, mais elle s'effondre jusqu'à $0,35 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ à la mise en culture. Les chiffres disponibles sur des jachères de 2 à 5 ans montrent qu'aucun accroissement de la porosité de surface ne peut être obtenu par une jachère de courte durée.

2.2. La réserve utile

Quelle quantité d'eau les racines de maïs peuvent-elles puiser dans le sol, en fonction de la profondeur atteinte par le front racinaire ? Ce paramètre est indispensable pour modéliser le bilan hydrique, bien que sa détermination pose des problèmes théoriques importants (HILLEL, 1974). La réserve utile est en effet définie comme la différence de stock hydrique entre le sol à la "capacité au champ" et le sol à un état d'humectation tel que les plantes ne sont plus capables d'en extraire l'eau. La notion de sol à la "capacité au champ" suppose que le drainage cesse quelques jours après un apport d'eau. Or, les équations de circulation

de l'eau en milieu non saturé montrent que le drainage ne cesse jamais totalement. La "capacité au champ" d'un sol n'est donc pas une propriété physique intrinsèque mais un paramètre empirique plus ou moins précis selon la diminution du drainage en fonction du temps. L'état hydrique à partir duquel les plantes ne sont plus capables d'extraire l'eau du sol est également difficile à définir. Si pour la plupart des plantes, l'humidité au pF 4,2 correspond au point de flétrissement permanent, l'évaporation du végétal diminue fortement lorsque la tension de l'eau dans le sol augmente en valeur absolue : dans le cas du maïs étudié, la plante commence à souffrir dès que la tension dépasse 400 hPa dans la zone d'extraction racinaire. Nous prendrons néanmoins l'humidité au pF 4.2 pour les calculs, en sachant qu'une partie de la réserve est difficilement utilisable par la plante.

La valeur de l'humidité à la "capacité au champ" a été recherchée à l'aide du suivi d'un drainage interne. Le sol a été humecté par submersion (apport d'une lame d'eau de 500 mm) sur une surface de 1 m², puis recouvert d'une bâche de 4 mètres de côté et d'une épaisse couche d'herbe pour éviter toute évaporation de la surface et l'échauffement des horizons superficiels. Des prélèvements ont été effectués à la tarière pendant 4 jours, l'espacement entre des mesures successives étant proportionnel au temps. L'humidité des échantillons a été déterminée par séchage à l'étuve à 105°C et les résultats convertis en stock hydrique par tranche de sol.

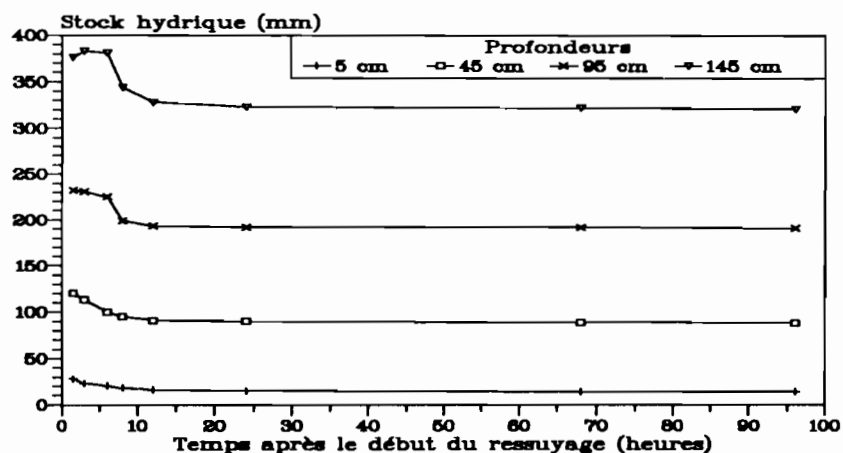


FIGURE I.9
Evolution du stock hydrique au cours du drainage interne (valeur du stock entre la surface et la profondeur indiquée)

Les courbes obtenues (figure I.9) montrent que dans les terres de Barre le ressuyage après un apport d'eau, même important, est très rapide : après 24 heures, les variations de stock deviennent très faibles. La notion de "capacité au champ" peut donc s'appliquer à ces sols. Nous verrons dans la deuxième partie que cette diminution rapide du drainage provient des formes particulières des relations $K(h)$ et $K(\theta)$.

Les valeurs d'humidité à pF 4,2 ont été déterminées, à l'aide d'une presse à membrane, sur des échantillons prélevés sur 12 fosses différentes situées dans les champs d'expérimentation. Les résultats (tableau I.4)

montrent une croissance en profondeur liée au gradient d'argile. La réserve utile a été déterminée par tranches de sol. Les valeurs trouvées, particulièrement faibles (70 mm sur le premier mètre, moins de 100 mm sur 1,5 m), semblent liées à une texture défavorable (sableuse en surface, riche en argile et pauvre en limon à la base) et à une faible structuration. Il est remarquable que les horizons sableux de surface puissent fournir plus d'eau aux plantes que les horizons profonds : la quantité totale présente dans le sol est plus faible, mais l'eau est moins fortement retenue que dans les horizons argileux.

TABLEAU I.4
Humidités massiques à pF 4,2 (moyenne de 12 prélèvements) et réserve utile par tranche de sol

Profondeur (cm)	w à pF 4,2 (g.g ⁻¹)	Réserve utile sur la tranche (mm)	Réserve utile totale (mm)
0-10	0,041	10	10
10-20	0,050	10	20
20-30	0,067	9	29
30-40	0,083	8	37
40-60	0,100	13	50
60-80	0,117	8	58
80-100	0,123	10	70
100-120	0,124	12	80
120-140	0,126	12	92
140-160	0,130	12	103

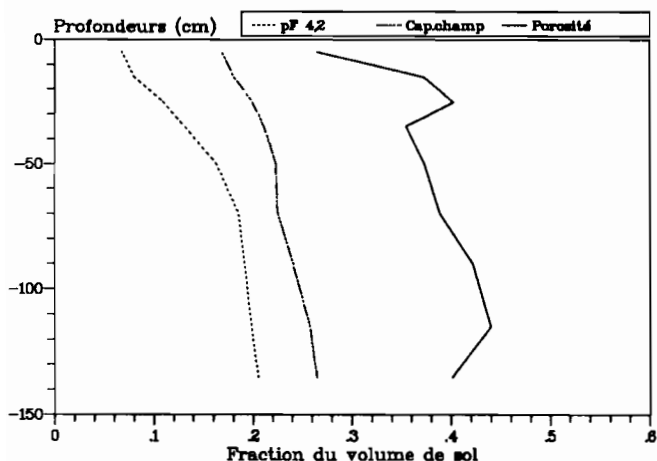


FIGURE I.10
Composition volumique moyenne des parcelles cultivées et des sols sous jachère

La représentation des valeurs d'humidité au pF 4,2, d'humidité à la "capacité au champ" et de porosité sous forme de diagramme volumique (figure I.10) permet de visualiser l'organisation de l'espace poral occupé par l'air et par l'eau. Il apparaît que la macroporosité (située entre la courbe d'humidité à la "capacité au champ" et la courbe de porosité totale) est comprise entre 12 et 20 % du volume total du sol, malgré la faible porosité totale. HUMBEL (1976) comme CHAUVEL (1977) avaient déjà noté un développement important de la macro-porosité dans les "sols rouges" auquel ils avaient imputé le drainage rapide de ces sols.

En raison de leur texture argileuse et de leur faible structuration les sols étudiés présentent donc une réserve utile assez faible. La macroporosité est en revanche bien développée sur l'ensemble du profil, ce qui explique l'absence d'engorgement même pour de fortes pluies.

3. INTERPRÉTATION PÉDOGÉNÉTIQUE

3.1. Origine de l'appauvrissement en argile des horizons superficiels

FAUCK (1972) interprète l'appauvrissement des horizons superficiels par l'action complexante de la matière organique. Cette interprétation repose sur la présence d'acides fulviques jusqu'à une grande profondeur dans le profil et d'un maximum de ces acides au niveau du front d'appauvrissement.

Etudiant le même problème, CHAUVEL (1977) propose un schéma qui ne fait intervenir que des contraintes physiques. En s'appuyant sur des observations à différentes échelles et sur des expérimentations de terrain et de laboratoire, cet auteur a montré que l'évolution des horizons supérieurs de ce type de sol résultait d'une disjonction entre l'argile, le squelette et les oxydes de fer qui résulterait de l'assèchement poussé de la surface des sols au cours de la saison sèche (phénomène qu'il a appelé ultra-dessiccation). L'air remplacerait l'eau au sein des assemblages élémentaires, provoquant l'éclatement de la structure. A la suite d'études lysimétriques pendant 13 ans, l'exportation annuelle d'argile à la base des lysimètres a été évaluée à 2 à 7 grammes d'argile par mètre carré de sol, soit quelques dizaines de kilogrammes par hectare. A partir d'une capacité d'échange de l'argile de 10 mé.100 g⁻¹, les pertes en bases échangeables qui résultent de ce départ ne sont que de quelques dizaines de grammes par an. Ces quantités ne sont pas mesurables avec les méthodes actuelles et sont négligeables par rapport aux pertes par d'éléments minéraux en solution (généralement de l'ordre de dizaines de kilogrammes par hectare et par an).

CHAUVEL (1977) a également cherché à préciser, en collaboration avec SIBAND (1974), l'action de l'homme sur l'appauvrissement des sols. Sur des sols analogues aux terres de Barre, la surexploitation des sols produit un éclaircissement de la couleur des horizons de surface ainsi qu'une diminution de la teneur en argile. Ce phénomène est cependant très lent : près d'un siècle serait nécessaire pour produire un éclaircissement notable. Sur les terres de Barre, il n'a jamais pu être prouvé de manière décisive que la surexploitation produisait un appauvrissement. La comparaison entre des forêts résiduelles et les sols cultivés avoisinants n'a en effet pas révélé de diminution significative systématique du taux d'argile dans les horizons de surface (RAUNET, 1973 ; DOME, 1985). Pour reprendre l'expression de RAUNET, il est possible que la culture continue des sols "entretienne et amplifie" le gradient textural, mais elle n'en est pas à l'origine et sa vitesse d'action est très lente.

L'appauvrissement des horizons superficiels des sols est donc un caractère principalement hérité de la pédogenèse et le flux annuel d'éléments minéraux qu'il provoque est négligeable par rapport aux pertes d'éléments en solution sous l'effet du drainage profond.

3.2. Origine des horizons B

Selon FAUCK (1972), la teneur en argile des horizons B proviendrait en premier lieu d'une dissolution du quartz du matériau originel. Cette désilicification des grains de quartz pourrait atteindre jusqu'à 50 % du

total de la silice, induisant un important enrichissement relatif en argile. L'accumulation relative d'argile pourrait être complétée par des apports de fer et d'argile provenant des horizons superficiels.

La rubéfaction des horizons B proviendrait de la présence de fer amorphe piégé sur les argiles, ensemble qui constituerait, mêlé aux grains de quartz, les pseudo-sables ou micro-nodules.

Les teneurs en silice dans les eaux de percolation seraient comprises entre 0 et 6 mg.l⁻¹. En comptant un drainage de 300 mm par an, les pertes de silice pourraient atteindre 20 kg.ha⁻¹.an⁻¹. Comme la silice est le seul élément propre à se dissoudre au sein des horizons B, les pertes d'origine pédogénétique d'autres éléments minéraux sous forme dissoute serait très faible dans ces horizons.

Si l'évolution pédogénétique est le moteur de la différenciation des sols sur le long terme, les flux mis en jeu chaque année sont extrêmement faibles. L'évolution pédogénétique ne peut donc être prise en compte au cours de cette étude et les flux qu'elle provoque n'interviennent pas sur les bilans qui peuvent être établis.

4. LA DÉGRADATION DES TERRES DE BARRE

L'expression "terre de Barre dégradée" a été introduite par des agronomes pour désigner des sols cultivés depuis longtemps, sur lesquels les rendements sont plus faibles que sur les sols récemment mis en culture. Dans une première synthèse, RAUNET (1973) a précisé que la réponse des plantes à des apports de matière organique humifiée était "beaucoup plus nette" sur les sols dégradés que sur les sols non dégradés. A l'origine, la notion de dégradation repose donc uniquement sur des critères agronomiques.

Les agronomes et les pédologues se sont ensuite attachés à préciser les caractères du sol responsables de cette dégradation, en comparant des sols dégradés et non dégradés, et en comparant des sols sous culture et des sols sous forêt résiduelle.

En ce qui concerne les propriétés physiques, il est acquis que la texture sableuse des horizons superficiels des sols est d'origine pédogénétique (Cf. paragraphe précédent).

La mise en culture des sols produit en revanche une nette augmentation de la compacité des horizons superficiels. Sous jachère ancienne, la structure de l'horizon superficiel est fragmentaire, souvent même grumeleuse. Dans les années qui suivent la mise en culture la structure devient massive et la cohésion variable selon l'état hydrique, comme à Davié.

Cette évolution de la structure du sol résulte de la diminution rapide des teneurs en matière organique lors de la mise en culture mentionnée précédemment. La stabilité de la structure suit l'évolution des teneurs en matière organique, ce qui explique pour une grande part la prise en masse des horizons superficiels ainsi que le glaçage rapide de la surface des sols après le labour et l'effondrement des buttes et des billons (RAUNET, 1973 ; POSS *et al.*, 1989-1990).

Mais la diminution du taux de matière organique s'accompagne également d'une évolution considérable des propriétés chimiques. La somme des bases échangeables, qui est de l'ordre de 10 mé.100 g⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm sous forêt et de 3 mé.100 g⁻¹ sous jachère ancienne, diminue à 1 ou 2 mé.100 g⁻¹ sous culture selon le système de culture adopté ; elle peut même atteindre 0,4 mé.100 g⁻¹ dans les cas les plus défavorables (DJEGUI, 1982). Cette évolution résulte principalement d'une diminution des teneurs en calcium et en magnésium, qui représentent plus de 90 % des cations retenus sur le complexe d'échange. Une diminution du pH s'en suit. Proche de la neutralité sous forêt, le pH est d'environ 6,0 sous jachère ancienne et il est généralement compris entre 5,5 et 6,0 sous culture. Le pH est rarement inférieur à 5,5 : seuls les sols de la région de Porto-Novo, intensément cultivés et soumis à un climat plus pluvieux que la moyenne de la zone, présentent des pH pouvant descendre jusqu'à 4,6 et des teneurs en aluminium échangeable parfois contraignantes pour les cultures (DJEGUI, 1982).

La teneur en potassium, qui peut atteindre dans l'horizon 0-10 cm jusqu'à 0,75 mmol.100 g⁻¹ sous forêt, est de l'ordre de 0,2 mmol.100 g⁻¹ sous jachère ancienne ; elle est toujours inférieure à 0,1 mmol.100 g⁻¹ en culture non fertilisée. Dès 1956, DABIN s'est demandé comment ces teneurs "excessivement faibles" pouvaient encore permettre la croissance des cultures...

Les teneurs en phosphore total présentent une variabilité spatiale importante. Des gisements de phosphates situés à la base des terres de Barre sont exploités dans la région : leur présence est généralement invoquée pour expliquer cette variabilité. Même si les cultures présentent parfois de fortes carences en phosphore, en particulier après quelques années de culture sans fertilisation, le phosphore ne peut donc pas caractériser l'état de fertilité du sol à l'échelle régionale.

La dégradation des terres de Barre se caractérise donc principalement par une diminution du taux de matière organique et par un appauvrissement du complexe d'échange qui en résulte en partie. La principale évolution des propriétés physiques est une prise en masse des horizons superficiels provenant de la diminution des teneurs en matière organique. Comme la dégradation affecte surtout des propriétés chimiques, elle est difficile à apprécier sur le terrain. Il convient donc de définir des pratiques culturales propres à enrayer le processus et, si possible, à rétablir un potentiel de production qui permette de satisfaire les besoins d'une population en augmentation rapide.

5. CONCLUSION

Les terres de Barre forment un ensemble de sols très homogènes latéralement dont les principaux caractères sont les suivants :

- des horizons de surface sableux sur au moins 10 cm ;
- une matière organique bien humifiée, mais dont la teneur ne dépassent pas 1 % après 3 ou 4 années de culture ;

- une augmentation rapide de la teneur en argile à une profondeur comprise entre 10 et 60 cm ;
- des horizons B très épais de couleur rouge sans éléments grossiers et sans aucune trace d'hydromorphie ;
- une structure à tendance massive dans tous les horizons après quelques années de mise en culture ;
- une réserve en eau utile particulièrement faible (70 mm dans le premier mètre), compensée par une faible cohésion à l'état humide qui permet le développement d'un enracinement profond ;

Après quelques années de culture, les rendements obtenus sur ces sols diminuent, à la suite d'une modification de certaines propriétés appelée communément dégradation. L'évolution porte principalement sur une diminution du taux de matière organique et des bases échangeables, mais elle s'accompagne également d'une augmentation de la compacité des horizons superficiels.

Les sols de Davié sont représentatifs de terres de Barre initialement non dégradées qui se dégradent à la suite d'une exploitation continue. Une connaissance de leur dynamique actuelle, tant en ce qui concerne les mouvements de l'eau que ceux des éléments minéraux, doit permettre de proposer des modes de gestion du milieu permettant de maintenir ou d'améliorer le potentiel de production du sol.

CHAPITRE II

LE CLIMAT

Ce chapitre est consacré à la présentation du climat du Togo méridional dans ses aspects qui interviennent sur la croissance des plantes et le régime hydrique des sols. Dans le premier paragraphe sont présentés les mécanismes qui déterminent le climat à l'échelle de l'Afrique de l'ouest. La description des apports par les pluies fait l'objet du deuxième paragraphe et celle de la demande évaporative l'objet du troisième.

1. LES MÉCANISMES GÉNÉRAUX DU CLIMAT AU TOGO MÉRIDIONAL

Le cadre conceptuel général des mécanismes déterminant les climats de l'Afrique occidentale a été fourni par le travail de LEROUX (1983), résumé par WAUTHY (1983). Seuls seront repris ici les éléments nécessaires à la compréhension du climat du Togo méridional.

La plus grande partie du continent africain est soumise à un climat déterminé par la présence de hautes pressions aux latitudes subtropicales et de basses pressions au niveau de l'équateur météorologique (zone de convergence intertropicale ZCIT). Au niveau des hautes pressions, l'air est subsident : le climat est donc très sec (déserts du Sahara et de Kalahari), et des vents se dirigent au sol vers les zones de basses pressions. Ces vents, les alizés, se chargent d'humidité sur les océans. La ZCIT constitue une vaste région qui s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres du sud au nord dans laquelle l'atmosphère, très humide, est particulièrement instable. Elle est donc le siège de pluies abondantes.

La ZCIT se déplace avec le mouvement apparent du soleil. Pour l'hémisphère boréal, elle avance vers le nord jusque vers le 20ème degré de latitude nord d'avril à juin, puis elle recule vers le sud, où elle atteint l'océan Atlantique vers la fin du mois de septembre. Elle passe ensuite dans l'hémisphère austral. La ZCIT passe sur le Togo méridional lors de sa montée vers le nord et au moment de son recul vers l'océan atlantique. La région est donc soumise à deux saisons des pluies : une saison généralement bien arrosée

d'avril à juin (appelée grande saison des pluies) et une saison à pluviométrie plus incertaine de septembre à octobre.

Avant le début de la première saison des pluies, les zones de hautes pressions sahariennes envoient sur l'ensemble des pays du Golfe de Guinée un alizé de secteur nord-est. Ce vent très sec (humidité relative de l'air de 10 à 30 %) appelé harmattan n'intéresse le sud du Togo que pendant les mois de décembre, janvier et février. Comme cette région est située à la limite de son aire d'extension, l'harmattan ne s'établit généralement pas de manière durable. Il s'étend sur la région pendant quelques jours, voire quelques semaines, puis il disparaît pour revenir ensuite. Cette période sans pluies, avec des incursions épisodiques d'harmattan, constitue la grande saison sèche (novembre à mars).

Au début de la première saison des pluies, les masses d'air de l'alizé austral, chargées d'humidité après leur contact avec l'océan atlantique, pénètrent sous les hautes pressions. L'atmosphère présente alors un profil vertical constitué d'air humide et instable au niveau du sol, surmonté d'une importante masse d'air stable, le contact constituant le front intertropical. L'air humide s'échauffe au contact du sol et une importante convection s'établit en cours de journée. Souvent des nuages se forment, mais le mouvement ascendant de l'air est bloqué au niveau du front intertropical, à une altitude de l'ordre de 1000 mètres. C'est pourquoi ces nuages ne provoquent pas de précipitations. Pour que des averses se produisent, il est nécessaire qu'un "creux barométrique" soit créé au sein des hautes pressions. Cela se produit lorsque des perturbations formées dans les zones tempérées contournent les hautes pressions subtropicales et affectent l'Afrique de l'Ouest. Il se forme alors des lignes de grains d'orientation nord-sud qui se déplacent d'est en ouest sur des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres. Les premières pluies ont donc souvent un caractère orageux.

Pendant la première saison des pluies, les hautes pressions d'altitude disparaissent. La convection donne alors naissance à des pluies abondantes, alimentées par l'humidité apportée par l'alizé austral.

Lorsque la ZCIT atteint les latitudes les plus septentrionales, le Togo méridional se situe en arrière de la zone d'activité. C'est la petite saison sèche, qui s'étend sur les mois de juillet et août. Les années où le déplacement vers le nord de la ZCIT est réduit, la petite saison sèche est moins marquée ; elle peut même disparaître entièrement, les mois de juillet et août étant alors les plus pluvieux (année 1968 par exemple).

Lors de son retour vers le sud, la ZCIT est moins active et les pluies moins abondantes. Au Togo méridional les précipitations sont particulièrement faibles, en raison de remontées d'eaux froides (*upwellings*) en bordure des côtes (HISARD, 1985) : au contact des eaux froides, les masses d'air deviennent plus stables, ce qui limite ensuite la convection sur plusieurs dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres.

Un autre phénomène local doit également être pris en compte : la différence d'échauffement entre le continent et l'océan provoque l'apparition quotidienne d'une brise de mer qui pénètre jusqu'à près de 40 km à l'intérieur des terres. L'intrusion de cet air stable diminue considérablement la convection. C'est ainsi que la zone littorale est souvent dégagée, alors que la zone intérieure est couverte de nuage, la limite étant

soulignée par un front de brise de mer fréquemment pluvieux. Les pluies d'origine convective sont donc beaucoup moins fréquentes dans la zone littorale que dans la zone intérieure. La conjonction des *upwellings* et des brises de mer expliquent que la région de Lomé est la moins arrosée de tout le Golfe de Guinée.

Seuls les aspects du climat en relation avec le problème étudié seront abordés : la caractérisation des précipitations, qui interviennent aussi bien sur les flux hydriques dans le sol que sur la croissance des plantes, et la demande évaporative, qui gouverne l'évapotranspiration des végétaux et l'évaporation de la surface du sol.

2. LES PRÉCIPITATIONS

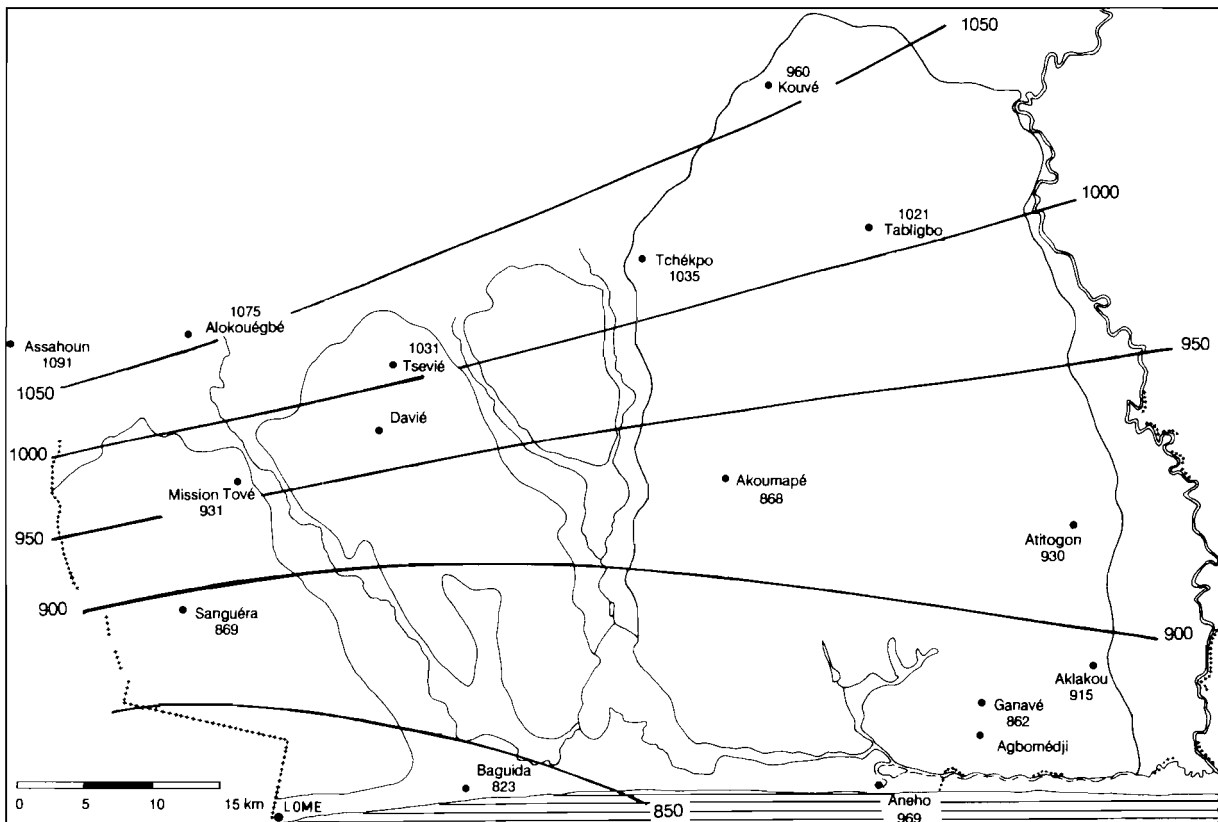


FIGURE II.1
Postes pluviométriques du Togo méridional et isohyètes (période 1965-1985)

Le Togo méridional compte une quinzaine de postes pluviométriques (figure II.1), dont certains ont plus de 50 ans (Aklakou, Aneho, Assahoun, Atitogon, Lomé, Mission Tové, Tabligbo, Tchekpo, Tsévié). Avant d'effectuer les traitements statistiques, toutes les données ont été contrôlées par comparaison avec les postes voisins (méthode des doubles cumuls).

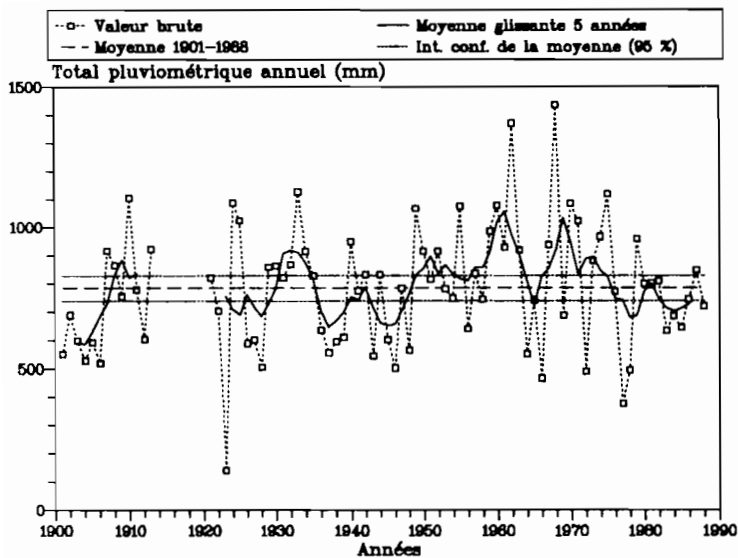


FIGURE II.2
Evolution du total pluviométrique annuel à Lomé en fonction du temps (période 1901-1988)

ou plus sèches (figure II.2), mais la pluviométrie moyenne des deux périodes retenues pour les calculs (1938-1985 et 1965-1985) est voisine de la moyenne générale. La pluviométrie de la région étudiée présente un important gradient depuis le littoral vers l'intérieur du continent (figure II. 1) : la différence entre le sud et le nord de la région atteint 200 mm, soit le quart du total pluviométrique de Lomé.

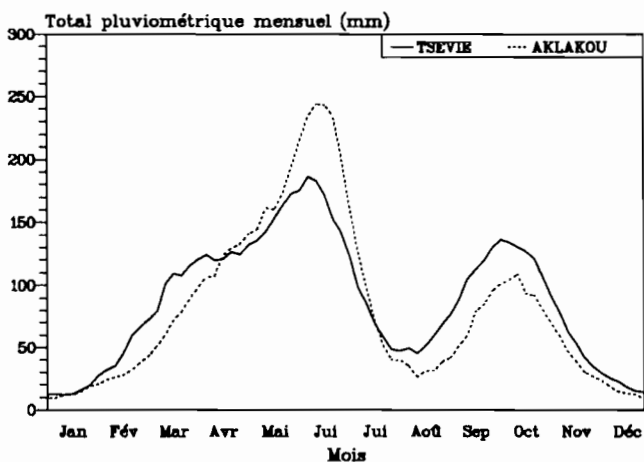


FIGURE II.3
Pluviométrie mensuelle de deux stations représentatives du Togo méridional (moyenne glissante par période de 10 jours, années 1938-1985)

Pour pouvoir utiliser des résultats à des fins de conseil agronomique, il est nécessaire de s'assurer que la pluviométrie n'évolue pas au cours du temps et que les chroniques pluviométriques utilisées sont représentatives. Une étude générale de la pluviométrie du Togo a prouvé que le climat ne semble présenter aucune tendance à long terme vers l'aridité, que ce soit au niveau de la pluviométrie totale annuelle ou à celui de la pluviométrie de chaque saisons de pluies (SÉGUI, 1988). Comme pour l'ensemble du pays, la variabilité interannuelle de la pluviométrie est importante au Togo méridional, avec des périodes plus humides

Les pluviométries mensuelles des stations de Tsévié (zone intérieure) et d'Aklakou (zone littorale) sont représentatives des pluviométries moyennes dans la région. Si les deux saisons des pluies sont nettement individualisées dans les deux cas, la répartition et le total diffèrent selon la zone (figure II.3). Les pluies débutent plus tardivement en première saison dans la zone littorale que dans le nord de la région, en raison de la brise de mer. Au coeur de la saison de pluies, en revanche, les pluies sont plus abondantes sur le littoral, car une partie de l'humidité apportée par les alizés se condense au contact de la côte.

La variabilité spatiale des précipitations est également élevée à l'échelle de quelques décimètres, de nombreuses pluies étant de nature convective. C'est pourquoi un pluviomètre a été placé à proximité immédiate des parcelles étudiées.

Au cours de la première saison des pluies, la pluviométrie totale varie entre 500 et 600 mm (tableau II.1), le littoral étant le plus arrosé. En deuxième saison, en revanche, le total pluviométrique est beaucoup plus faible dans la zone littorale (effet conjoint des *upwellings* et de la brise de mer). A Lomé, avec un total pluviométrique qui, un an sur cinq, ne dépasse pas 74 mm, la deuxième saison est parfois à peine marquée.

TABLEAU II.1
Pluviométrie des deux saisons des pluies au Togo méridional (période 1938-1986)

Période	Zone littorale						Zone intérieure			
	Lomé		Aklakou		Aneho		Tsévié		Tabligbo	
	Moy.	Mini (1 an/5)	Moy.	Mini (1 an/5)	Moy.	Mini (1 an/5)	Moy.	Mini (1 an/5)	Moy.	Mini (1 an/5)
Première saison des pluies (1er avr. - 15 juil.)	500	334	584	434	592	411	499	364	506	420
Deuxième saison des pluies (1er sept. - 15 déc.)	159	74	226	140	189	100	309	219	329	201

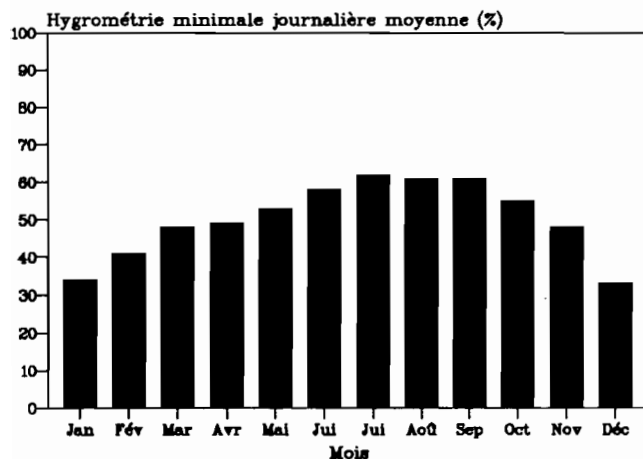


FIGURE II.4
Hygrométrie minimale journalière moyenne (Davié, 1985-1989)

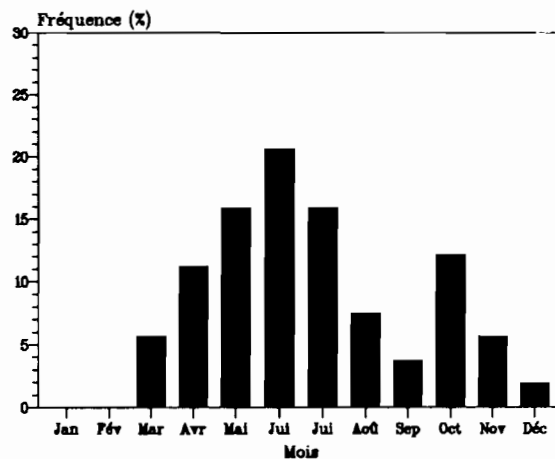


FIGURE II.5
Fréquence des pluies dont l'intensité maximale en 5 mn dépasse 50 mm.h⁻¹ (Cotonou 1965-1969, d'après les données de VERNEY & VOLKOFF, 1969)

L'effet sur les cultures du faible total pluviométrique de la deuxième saison des pluies est souvent accentué par l'arrivée de l'harmattan dès le 15 novembre. A cette époque, les cultures ne sont semées que depuis deux mois : la faible hygrométrie de l'air (figure II.4) produit un dessèchement rapide des plants en pleine phase de maturation.

La hauteur d'eau précipitée lors de chaque averse est faible quelle que soit la saison : 76 % des pluies ont une hauteur inférieure à 20 mm, et seulement 5 % dépassent 50 mm (Tsévié, période 1937-1986). Or, les intensités maximales des averses sont liées à la hauteur précipitée (BRUNET-MORET, 1967 ; POSS *et al.*, 1989-1990). La plupart des averses sont donc de petites pluies de faible intensité : elles pénètrent facilement dans le sol, et donnent naissance à des flux hydriques limités. Les averses les plus fortes, qui produisent les flux hydriques les plus importants, se produisent surtout au coeur de la saison des pluies (figure II.5). Les orages de début de saison des pluies (mars) sont parfois violents, mais ils ne représentent qu'environ 5 % des événements pluvieux de forte intensité.

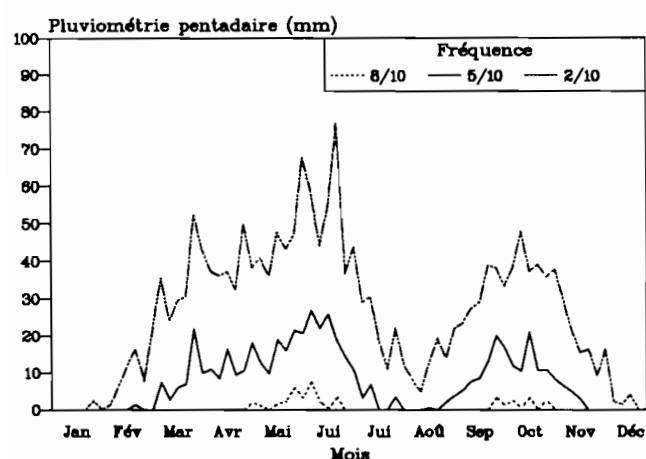


FIGURE II.6
Fréquence des hauteurs précipitées par périodes de 5 jours
(Tsévié, 1934-1986)

L'analyse fréquentielle des pluies (figure II.6) confirme que la plupart des pluies sont des averses au cours desquelles les hauteurs précipitées sont faibles : quelle que soit la pentade considérée, le total pluviométrique est inférieur à 25 mm dans la moitié des cas. Cette analyse montre en outre que le total pluviométrique peut être très faible, voire nul, pendant 5 jours consécutifs en mai-juin ou en octobre. Les épisodes secs peuvent même durer pendant plus de 10 jours, aussi bien en avril au moment des semis qu'en juin à l'époque de la floraison du maïs (tableau II.2). Le risque

de périodes sèches est plus élevé dans la zone littorale, y compris en juin où pourtant le total précipité est plus élevé (figure II.3).

TABLEAU II.2
Récurrence des épisodes secs de 10 jours consécutifs (en nombre de fois par an, valeurs empiriques, d'après SÉGUI, 1988)

	Première saison		Deuxième saison	
	Avril	Juin	Septembre	Octobre
Tabligbo (zone intérieure)	0,35	0,20	0,45	0,30
Aneho (zone littorale)	0,75	0,50	1,20	1,00

La pluviométrie du Togo méridional est donc caractérisée par la présence de deux saisons des pluies d'importance inégale. Au cours de la première (avril à juillet), le total précipité atteint 500 à 600 mm en moyenne pour toutes les stations, alors que pendant la seconde il n'est que de 150 à 300 mm. Le risque de longs épisodes sans pluies est élevé même pendant les époques les plus pluvieuses, particulièrement pendant

la deuxième saison des pluies. Au niveau agricole, la pluviométrie de la première saison est généralement suffisante pour assurer la croissance de cultures à cycles de 3 à 4 mois, malgré les risques provenant de la variabilité interannuelle du total pluviométrique et de la fréquence des épisodes secs. En revanche, la pluviométrie de la deuxième saison est insuffisante pour la plupart des cultures, d'autant plus que l'hygrométrie de l'air devient souvent inférieure à 50 % dès que les pluies cessent.

Par ailleurs, un important gradient climatique affecte la région. Il se manifeste surtout par une pluviométrie beaucoup plus faible sur la zone littorale au cours de la deuxième saison des pluies. Le gradient, moins net pendant la première saison des pluies, affecte surtout la répartition des averses au cours du temps. Au point de vue agricole, les conditions pluviométriques sont donc plus défavorables à proximité de la côte.

3. LA DEMANDE ÉVAPORATIVE

L'évapotranspiration est avant tout un phénomène énergétique : le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur consomme de l'énergie. Dans de nombreuses conditions naturelles, c'est cet aspect énergétique qui détermine la quantité d'eau évaporée (MONTENY *et al.*, 1981). Or, l'énergie dont dispose un couvert végétal provient en majeure partie de son bilan radiatif, différence entre le rayonnement reçu par le couvert et le rayonnement émis (rayonnement net). C'est pourquoi la Commission Internationale des Irrigations et du Drainage a proposé (Budapest, 1977) d'adopter une valeur de référence de l'évapotranspiration fondée sur la valeur du rayonnement net :

$$ET_o = [\Delta / (\Delta + \gamma)] (R_n + \Phi_o)$$

ET_o : évapotranspiration standard

R_n : rayonnement net

Φ_o : flux conductif à la surface du sol

Δ : dérivée de la fonction liant la tension de vapeur saturante à la température pour une température de l'air donnée

γ : constante psychrométrique

Il a été montré que cette évapotranspiration standard correspondait bien à l'évapotranspiration réelle lorsque le déficit hydrique de l'air et la régulation stomatique du couvert étaient faibles, donc dans le cas d'un couvert bien alimenté en eau dans un climat pas trop sec (MONTENY & LHOMME, 1980).

La plupart des études concernant les besoins en eau des cultures en Afrique de l'Ouest font référence à l'évaporation du bac de classe A (EVA, DANCETTE, 1983). Ce paramètre prend en compte non seulement le bilan radiatif, mais également les échanges convectifs liés au vent et au déficit de saturation de l'air. Il est généralement préféré à l'évapotranspiration standard ou à d'autres paramètres bioclimatiques car sa mesure est généralement réalisée par les stations climatologiques.

Quel est le paramètre à utiliser dans le cadre de cette étude ? Pour le déterminer, les valeurs obtenues par les deux méthodes seront comparées et elles seront confrontées aux valeurs de l'évapotranspiration selon Penman.

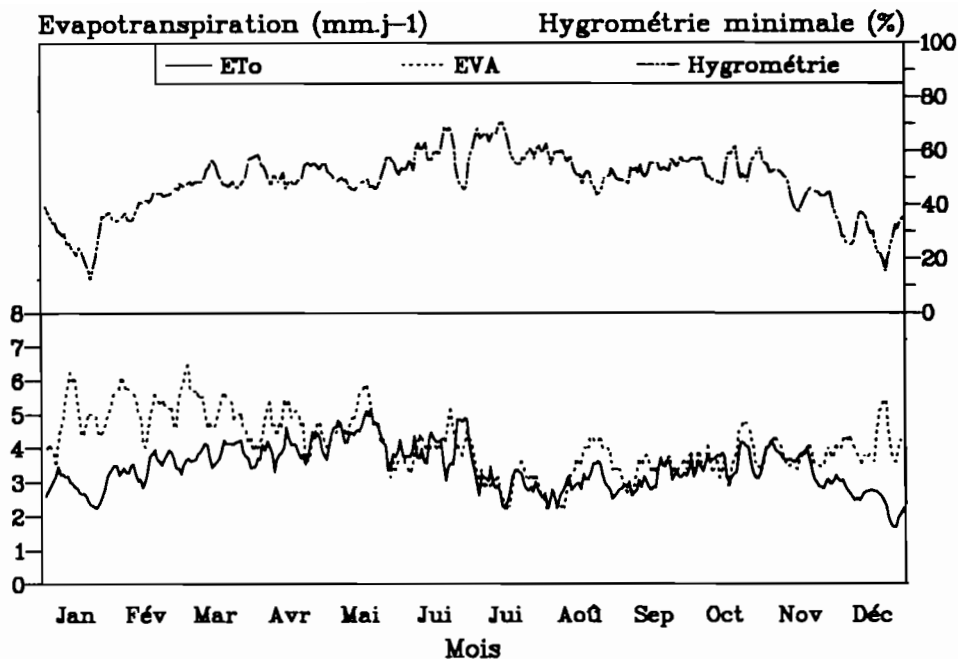


FIGURE II.7
 Evolution des valeurs d'ETo, d'EVA et de l'hygrométrie minimale au cours d'un cycle annuel (Davié, moyenne glissante sur 5 jours)

L'évaporation du bac de classe A a été mesurée dans les conditions standard, le bac étant disposé sur des chevrons en bois au centre d'une surface herbeuse dégagée. Le rayonnement net a été mesuré à l'aide d'un bilanmètre Schenck sur une parcelle irriguée cultivée en maïs. Le coefficient $\Delta/(\Delta + \gamma)$ varie peu en fonction de la température. Comme la plus grande partie du rayonnement se produit vers le milieu de journée un coefficient de 0,78, correspondant à une température de 30°C, a été utilisé (figure II.8). Le flux conductif à la surface du sol est proportionnel au rayonnement net dont il ne représente que quelques pour cent (MONTENY & LHOMME, 1980). Il a été négligé pour cette étude.

Au cours d'un cycle annuel, les valeurs d'ETo et d'EVA sont différentes en début et en fin d'année, mais elles sont très proches entre les mois d'avril et de novembre (figure II.7). Cette bonne correspondance pendant les deux saisons des pluies prouve qu'à cette époque les flux convectifs sont faibles. Ceci provient de la faible vitesse du vent (vitesse moyenne sur 24 heures comprise entre 4,0 et 7,2 km.h⁻¹ à Davié) et d'un faible déficit de saturation : pendant toute la saison des pluies, l'hygrométrie minimale journalière ne descend pas en-dessous de 50 % (figure II.4 page 45). Au cours de la petite saison sèche (août), l'hygrométrie est plus faible (figure II.7) : l'EVA est un peu plus élevée qu'ETo, mais la différence reste faible car les températures atteignent alors le minimum annuel (figure II.8).

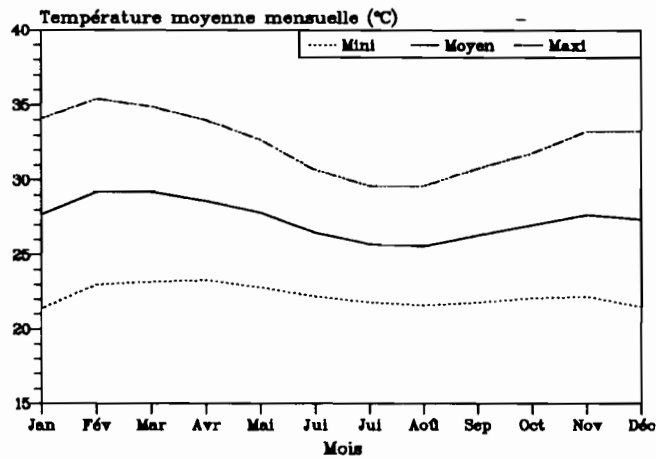


FIGURE II.8
Températures moyennes mensuelles mesurées sous abri (Tabligbo, 1960-1989)

Au cours de la grande saison sèche, la différence entre les deux paramètres climatiques est en revanche élevée, car bien que la vitesse de l'harmattan soit faible dans la région (vitesse moyenne mensuelle de $4,0 \text{ km.h}^{-1}$ à Davié en décembre), l'évaporation du bac de classe A est élevée (jusqu'à 6 mm.j^{-1}), en raison de la faible hygrométrie et de la température élevée pendant la journée.

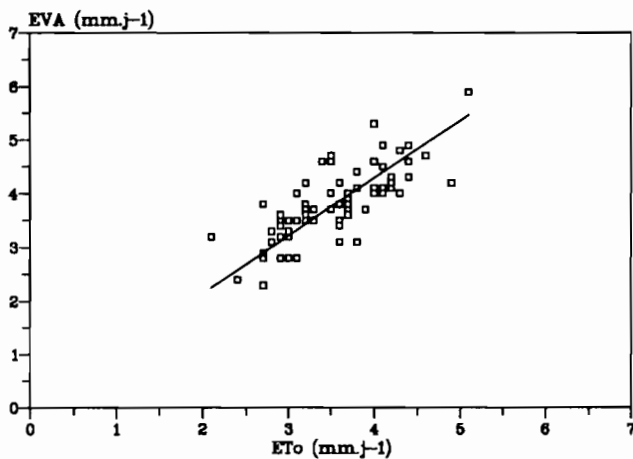


FIGURE II.9
Liaison entre les valeurs pentadaires d'ETo et d'EVA (Davié, 1985-1986)

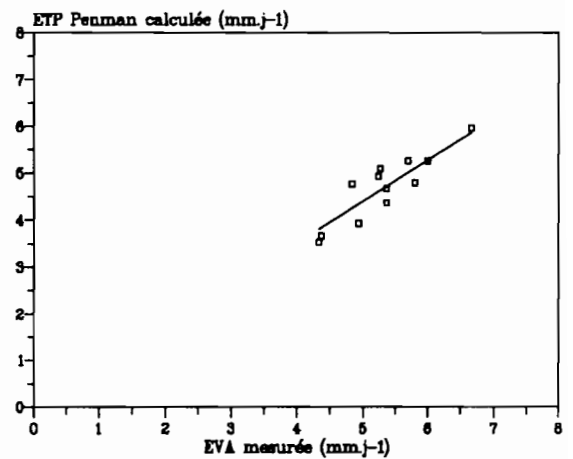


FIGURE II.10
Liaison entre les valeurs mensuelles d'ETP Penman et d'EVA (Lomé, ETP Penman d'après LOAEC et al., 1982, EVA d'après Météorologie Nationale)

Une régression linéaire empirique a été calculée entre les valeurs pentadaires d'EVA et d'ETo (figure II.9) :

$$\text{EVA} = 1,07 (\pm 0,01) \times \text{ETo}$$

$$(r = 0,71 \text{ pour } n = 76)$$

Les valeurs d'EVA sont légèrement plus élevées que les valeurs d'ET_o, en raison du facteur convectif. Les valeurs d'EVA mensuelles ont été comparées à celles d'ETP Penman sur la station de Lomé, seule station où les mesures indispensables à l'évaluation de l'ETP Penman sont réalisées :

$$\text{ETP Penman (mm.j}^{-1}\text{)} = 0,88 (\pm 0,02) \times \text{EVA} \quad (r = 0,89 \text{ pour } n = 12).$$

Cette relation est proche de celle trouvée par DANCETTE (1976) pour le Sénégal (ETP Penman = 0,78 × EVA pendant la saison des pluies).

Il est donc possible d'utiliser des relations empiriques pour estimer un paramètre en fonction d'un autre. Cependant les mesures d'ET_o et d'ETP Penman n'ont été réalisées que sur une station, alors que l'EVA est mesurée depuis plus de 15 ans sur deux stations climatiques et à Davié. C'est pourquoi l'EVA a été choisie pour caractériser la demande climatique de la région.

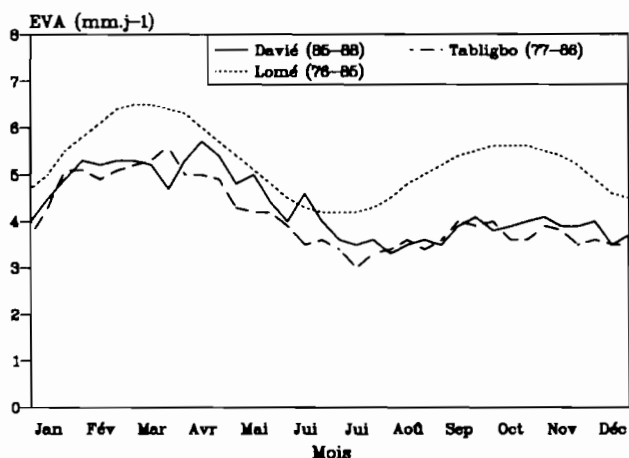


FIGURE II.11
Evapotranspiration mesurée au bac de classe A sur trois stations du Togo méridional (valeurs moyennes décadales, données Météorologie Nationale pour Lomé et Tabligbo)

Dans toute la région, les valeurs d'EVA restent toujours comprises entre 3 et 7 mm.j⁻¹ (figure II.11). Mais l'EVA sur l'année (Lomé 1892 mm, Tabligbo 1475 mm, Davié 1550 mm) est beaucoup plus élevée que la pluviométrie dans tous les cas. Il existe donc un déficit hydrique, même pour les arbres à enracinement profond. Les valeurs d'EVA sont très proches pour les deux stations situées à l'intérieur des terres (Davié et Tabligbo), mais elles sont environ 25 % plus faibles que les valeurs obtenues à Lomé. Cette évaporation plus élevée de la zone côtière provient probablement d'un ensoleillement plus important : 197 heures

par mois en moyenne à Lomé (période 1952-1988, données Météorologie Nationale), contre 170 heures à Tabligbo (1975-1988). L'ensoleillement est lié à la brise de mer, qui maintient souvent le ciel dégagé dans la zone littorale.

Pendant toute la saison des pluies, l'évaluation de la demande climatique par ET_o ou par EVA donne des chiffres voisins : elle est comprise entre 3 et 5 mm.j⁻¹. Mais en saison sèche l'EVA peut atteindre près de 7 mm.j⁻¹ en raison de la faible hygrométrie de l'air. La zone côtière est soumise à une évapotranspiration plus élevée que la zone intérieure, probablement en raison d'un ensoleillement plus intense.

4. CONCLUSION

Bien que la pluviométrie du Togo méridional soit peu abondante (de 800 à 1100 mm), deux saisons de culture peuvent y être pratiquées, en raison d'une évapotranspiration limitée à 3 à 5 mm.j⁻¹ pendant les saisons des pluies. Mais la pluviométrie de la deuxième saison des pluies (150 à 300 mm) est toujours limitante pour la croissance des cultures fortes consommatrices d'eau. Par ailleurs, les conditions climatiques ne sont pas homogènes dans toute la région : la zone littorale est soumise à une pluviométrie plus faible, des précipitations plus irrégulières et une évapotranspiration plus intense que la zone intérieure. La station de Davié est donc représentative de la zone intérieure, sur laquelle les pluies sont les plus abondantes et les plus régulières.

CHAPITRE III

LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La plus grande partie de ce travail repose sur l'analyse du comportement et du devenir de parcelles de deux essais NPK (factoriel 3^3 avec *confounding* à deux répétitions) mis en place en 1976 à Davié et à Agbomédji. Les parcelles ont été créées à partir d'une jachère de deux ans à Davié et d'une jachère d'un an à Agbomédji. Les objectifs initiaux de l'essai étaient les suivants :

- diagnostiquer les principales carences NPK sur le maïs ;
- étudier l'effet résiduel des doses de phosphore et de potassium apportées sur le maïs de première saison de culture sur une deuxième culture de maïs conduite sans engrais en deuxième saison des pluies ;
- en déduire des formules de fumure adaptées à la région, ce qui impliquait un nombre élevé de combinaisons (27).

Au cours de cette première phase (1976-1980), les parcelles furent cultivées en maïs et les résidus de culture exportés. A partir de la sixième année (1981), l'étude de l'effet résiduel des engrais fut stoppée pour introduire des légumineuses dans la succession culturale. Les parcelles élémentaires originelles de 72 m² furent alors subdivisées en deux sous-parcelles (A et B) de 28,8 m² utiles. Le sous-traitement A continua à recevoir une double culture annuelle de maïs. Le sous-traitement B fut toujours cultivé en maïs au cours de la première saison, mais il reçut une légumineuse (arachide ou niébé) en deuxième saison. Différentes doses d'engrais furent alors testées sur les cultures de deuxième saison et les résidus de récolte furent enfouis. Seuls les résultats obtenus sur les sous-parcelles recevant une double culture annuelle de maïs (sous-parcelles A) seront exposés dans le cadre de ce travail.

Les trois premiers paragraphes de ce chapitre fournissent des données sur le site d'étude et la plante : définition des techniques culturales et de la fertilisation de l'essai dans le premier, choix des parcelles dans le second et données générales sur la variété de maïs étudiée dans le troisième. Dans le quatrième paragraphe sont indiquées les méthodes d'étude retenues pour cette étude.

1. LES TECHNIQUES CULTURALES ET LA FERTILISATION

Le sol n'est labouré qu'une seule fois par an, au début de la grande saison des pluies. Ce labour est effectué à la houe sur une profondeur de 10 à 20 cm. C'est lors de ce labour annuel que furent enfouis, à partir de 1981, les résidus de récolte. Ceux-ci sont couchés entre les lignes de semis après chaque récolte pour favoriser leur attaque par la micro-faune du sol et donc leur enfouissement ultérieur.

TABLEAU III.1
Fertilisation minérale moyenne des principales plantes étudiées (kg.ha⁻¹)

Plante	Saison	Année	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
			N1	N2	P1	P2	K1	K2
Maïs	Première	1976 - 1989	15+ 15	30+30	30	60	30	60
Maïs	Deuxième	1976 - 1980	15+ 15	30+30	0	0	0	0
		1981 - 1989	15+ 15	30+30	30	60	30	60
		Moyenne pondérée	15+ 15	30+30	20	40	20	40
Arachide	Deuxième	3 ans	10	20	20	40	30	60
Niébé	Deuxième	5 ans	0	0	30	60	30	60

Les engrais (tableau III.1), apportés sous forme d'urée, de superphosphate triple et de chlorure de potassium, sont appliqués à la volée et légèrement enfouis. Le phosphore et le potassium sont épandus au semis, alors que l'apport d'azote est fractionné pour le maïs : moitié au démarrage et moitié quelques jours avant la floraison mâle.

Les semis sont effectués après une pluie de 15 à 20 mm. En moyenne, malgré d'inévitables variations saisonnières, la mise en place a pu être réalisée vers le 10 avril en première saison et vers le 10 septembre en deuxième saison (tableau III.2). Le maïs est semé à une densité de 42 000 plants.ha⁻¹, l'arachide à 120 000 plants.ha⁻¹ et le niébé à 100 000 plants.ha⁻¹. Deux sarclages manuels sont généralement nécessaires pour chacune des cultures, ainsi que 3 à 5 traitements insecticides sur le niébé.

TABLEAU III.2
Variétés utilisées et saisons de cultures (moyenne 1976-1989)

Caractéristiques		Première saison des pluies	Deuxième saison des pluies		
Culture	Plante Variété	Maïs NH1	Maïs NH1	Arachide 61 - 24	Niébé Vita 5
Calendrier moyen	Semis Récolte	10 avril 30 juillet	10 septembre 25 décembre	10 septembre 10 décembre	10 septembre 25 novembre
Cycle moyen (jours)	Semis - début floraison Semis - récolte	50 110	50 105	25 90	40 75

2. LES PARCELLES ÉTUDIÉES

Pour étudier l'effet spécifique du potassium sur la dynamique de l'eau et des éléments minéraux, les études doivent porter sur des parcelles où les autres éléments ne sont pas limitants et sont apportés aux mêmes doses. C'est pourquoi le suivi des dynamiques a été réalisé à Davié sur deux parcelles recevant les plus fortes doses testées d'azote et de phosphore ($N_2 = 60 \text{ kg N.ha}^{-1}$ et $P_2 = 45 \text{ kg P}_2\text{O}_5.\text{ha}^{-1}$). Cette fertilisation en azote et en phosphore correspond à celle qui est conseillée en vulgarisation agricole (MARQUETTE *et al.*, 1982). L'une des parcelles ne recevait aucune fertilisation potassique depuis 1976 (parcelle $N_2 P_1 K_0$), alors que l'autre recevait la fertilisation potassique maximale ($N_2 P_1 K_2$). Au cours des deux premières années d'expérimentation (1984 et 1985), les doses d'engrais potassique furent de $90 \text{ kg K}_2\text{O.ha}^{-1}$ en première saison et de $60 \text{ kg K}_2\text{O.ha}^{-1}$ en deuxième saison. La troisième année (1986), la même dose ($90 \text{ kg K}_2\text{O.ha}^{-1}$) fut apportée au cours des deux saisons afin de limiter les facteurs de différence entre les saisons. A partir de 1986, une parcelle nue a été ajoutée à titre de témoin aux deux parcelles cultivées.

3. LE MAÏS NH1

La variété de maïs NH1, ou IRAT 39, a été créée au Bénin en 1968 par l'IRAT (MARQUETTE *et al.*, 1982). C'est un hybride variétal (Niaouli Hybride n°1) à large base génétique, dont les parents sont le CN7 (composite Niaouli n°7, issu de croisements avec les variétés béninoises) et ATC 43-88 (African Top Cross n°43-88).

Le maïs NH1 a un cycle de 100 à 110 jours. La montaison débute environ 25 jours après le semis, la floraison mâle se produisant entre le 45ème et le 55ème jour du cycle. La floraison femelle s'effectue 3 à 5 jours après la floraison mâle et le brunissement des soies apparaît vers le 75ème jour.

Cette variété de maïs est vulgarisée depuis 1970 ; elle est bien acceptée par les agriculteurs car elle possède de nombreux caractères communs avec les variétés locales en raison de son parent CN7. En premier lieu, comme tous les maïs cultivés dans la région, c'est un maïs à grains blancs, caractère imposé par les consommateurs qui n'apprécient pas les variétés à grains jaunes. Il est de type farineux, à grain semi-denté, moyennement dur à moudre (il est possible de le moudre dans les moulins villageois). Son goût est considéré comme bon, bien qu'il soit moins prisé que celui des variétés locales, et il présente une bonne élasticité pour la préparation de "la pâte", caractère gustatif important. Les épis sont couverts de façon satisfaisante par les spathes, ce qui assure une bonne protection contre les attaques d'oiseaux (au champ) et d'insectes (dans les greniers). Les essais agronomiques ont montré par ailleurs qu'il répondait "relativement bien" à la fumure, qu'il était moyennement résistant à la rouille et à la sécheresse, mais qu'il était sensible à la virose à stries (*Maize streak virus*).

Cette variété n'est cependant pas entièrement satisfaisante. Les services de développement souhaiteraient disposer d'une variété à cycle plus court, qui autoriserait un plus grand étalement des dates de semis. Par ailleurs, le rendement maximal dans les conditions du Togo méridional ne dépasse pas 45 q.ha⁻¹. Les agriculteurs utilisent généralement les semences plusieurs années de suite, ce qui diminue encore les potentialités. Mais en attendant la vulgarisation de nouvelles variétés plus productives, actuellement en cours de sélection au Togo, le maïs NH1 reste l'une des variétés conseillées par les organismes de développement.

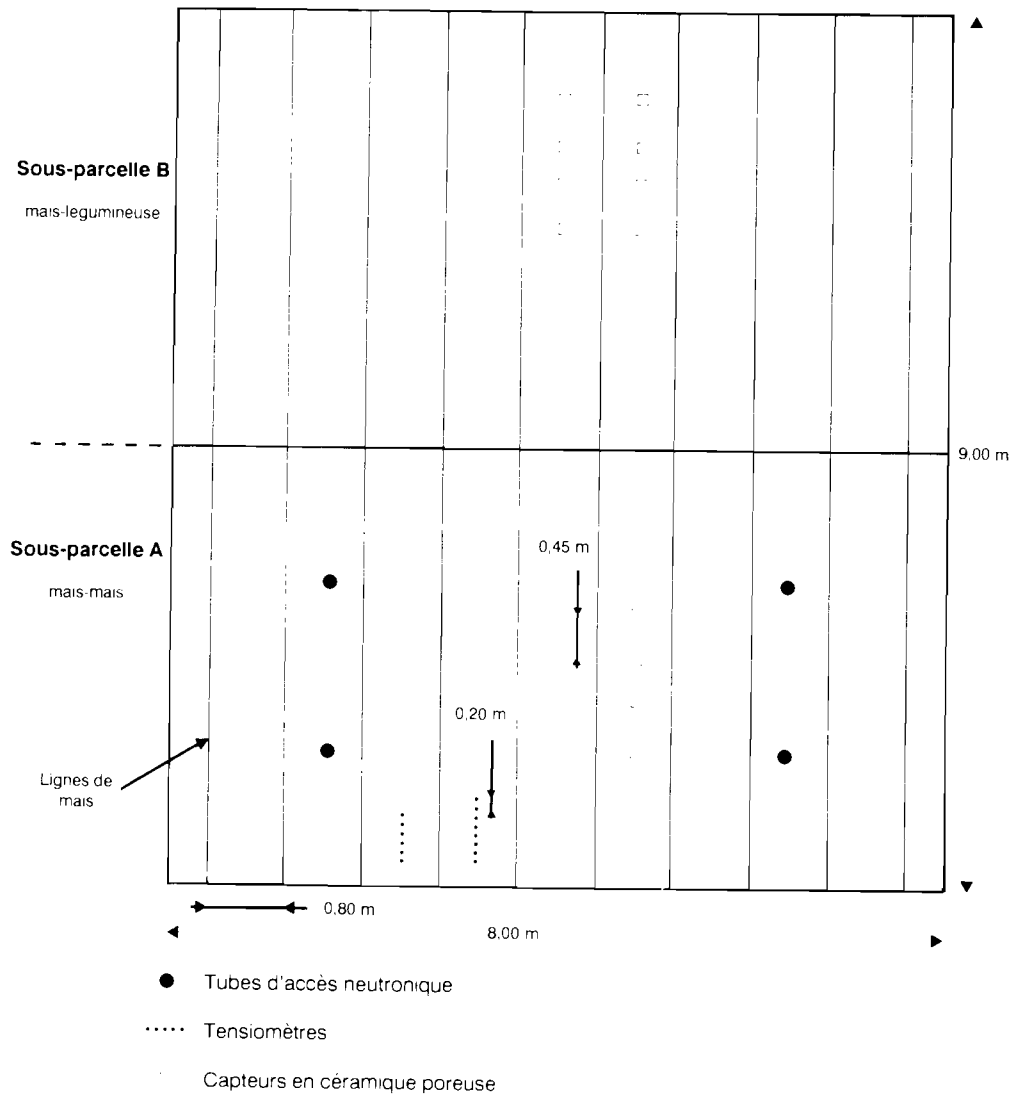


FIGURE III.1
Schéma de l'équipement des parcelles

4. LES MÉTHODES UTILISÉES

Les trois parcelles étudiées (N2 P1 K0, N2 P1 K2 et parcelle nue) ont été équipées de manière identique (figure III.1). Trois objectifs étaient recherchés :

- étudier la croissance du maïs et les prélèvements minéraux ;
- caractériser les transferts d'eau et établir le bilan hydrique ;
- caractériser les transferts d'éléments minéraux et établir le bilan minéral des sols.

4.1. Etude de la croissance du maïs

L'étude de la surface du feuillage a été conduite en suivant l'évolution du nombre de feuilles et de l'indice foliaire au cours du cycle cultural, à l'aide de relevés réalisés tous les 15 jours. L'indice foliaire est le rapport entre la surface de feuilles d'une culture et la surface de la parcelle qu'elle occupe. L'évolution de l'indice foliaire au cours du cycle cultural a été suivie en utilisant une méthodologie destructive proposée par MONTENY (comm. pers.). A chaque date de mesure, tous les plants couvrant une surface de 10,8 m² (3 lignes sur une longueur de 4,2 m) ont été coupés et toutes les feuilles séparées de la tige. Ces feuilles ont ensuite été séchées à l'étuve, puis pesées. La surface de feuille par gramme de matière sèche a été mesurée, en prélevant environ 500 échantillons de feuilles à l'aide d'un emporte-pièce de 2 cm de diamètre à chaque date de mesure (ce paramètre varie de 435 cm².g⁻¹ à la levée à 160 cm².g⁻¹ au moment de la maturation). Une méthode non destructive mais moins précise a également été utilisée pour déterminer l'indice foliaire maximal des parcelles sur lesquelles les plants ne devaient pas être détruits. Cette méthode repose sur la mesure de la longueur L et de la largeur l de toutes les feuilles des plants de maïs situés sur une surface de 10 m². La surface de feuillage est $L \times l \times K$, K étant un coefficient variable selon la forme des feuilles. La valeur moyenne de K est de 0,68 pour le maïs NH1 au Togo méridional (DJANAME, 1989).

Le suivi du développement racinaire a été réalisé à l'aide de fosses d'observations ouvertes le long de la ligne de bordure de la parcelle. La dimension des fosses permettait de décrire au moins 3 plants de maïs sur toute la profondeur atteinte par les racines. Le système racinaire du maïs situé à proximité du plan de la tranchée a été dégagé à l'aide d'un couteau. Les paramètres relevés étaient uniquement descriptifs : profondeur atteinte par le front racinaire et proportion des racines dans chaque tranche d'une épaisseur de 10 cm entre 0 et 20 cm de profondeur et de 20 cm ensuite par rapport au total des racines visibles.

La production de matière sèche par le maïs ainsi que les quantités d'éléments minéraux contenus dans la plante ont été étudiées au cours de 6 années successives. Dix plants ont été prélevés sur chaque parcelle (72 m²) à 6 stades physiologiques différents. La quantité de matière sèche de chaque organe (racines, tige, feuilles, grains, rafle et spathes) a été mesurée. L'estimation de la production de matière sèche à l'hectare a été effectuée en tenant compte des manquants. Les teneurs en éléments minéraux ont été déterminées sur 2 à 5 échantillons de chaque organe.

4.2. Etude des transferts hydriques dans le sol

Pour étudier les cinétiques de transfert de l'eau, les parcelles étaient équipées de tensiomètres et de tubes d'accès de sonde à neutrons.

Chacune des trois parcelles étudiées était équipée de 14 tensiomètres implantés tous les 10 cm entre 5 cm et 75 cm de profondeur et tous les 20 cm entre 95 cm et 195 cm. Les tensiomètres étaient placés selon deux lignes entre les lignes de semis, afin d'obtenir des mesures cohérentes avec les mesures humidimétriques, tant en ce qui concerne la position par rapport aux lignes de semis que les profondeurs étudiées (figure III.1). Les tensiomètres utilisés étaient équipés de manomètres à mercure (Système DTM 5000 de NARDEUX). Le tube capillaire reliant le tensiomètre au dispositif manométrique a été enfoncé d'environ 5 cm à l'intérieur du tensiomètre afin d'éviter tout désamorçage en présence d'air au sommet du tensiomètre. Une purge était effectuée lorsque le niveau de l'eau dans le tensiomètre était descendu d'environ 4 cm par rapport au sommet. Des purges plus fréquentes ont été tentées en début d'expérimentation, mais les tensions mettent plusieurs jours à retrouver les valeurs d'avant la purge dès qu'elles atteignent quelques centaines d'hPa. Il est donc préférable d'éviter d'intervenir sur les tensiomètres lorsque ce n'est pas indispensable. Le matériel employé présente des pressions d'entrée d'air élevées au niveau de la bougie en céramique : les tensiomètres ne décrochent que rarement et les valeurs restent fiables jusque vers 700 hPa. Les charges supérieures à 700 hPa ont été fixées à 800 hPa lors des calculs. Les valeurs des tensiomètres décrochés ont également été maintenues à 800 hPa jusqu'à ce qu'une pluie humecte le sol à leur profondeur d'implantation et permette leur réamorçage. La précision des mesures sera étudiée dans la deuxième partie.

Sur les parcelles cultivées, les mesures utilisées dans ce travail ont été effectuées au cours de la première saison de culture 1984, puis d'avril 1985 à avril 1987. Sur la parcelle nue, les mesures ont porté sur la période comprise entre mars 1986 et mars 1987. Les relevés étaient effectués tous les matins entre 6 heures et 7 heures.

Comme l'acquisition et le traitement des données neutroniques demandent un travail important, seules les sous-parcelles comportant la succession maïs-maïs ont été équipées de tubes d'accès neutroniques. A la suite des expérimentations conduites en Afrique de l'Ouest, il a été choisi d'implanter 4 tubes d'accès par parcelle. Le choix de ce nombre est discuté dans le chapitre IV. Les tubes d'accès étaient enfoncés à plus de deux mètres, mais les résultats n'ont été dépouillés qu'entre la surface du sol et la profondeur maximale atteinte par le front racinaire (1,5 m). Afin de diminuer le coût de l'installation, des tubes en PVC (gaine téléphonique de 46 mm de diamètre extérieur et de 2 mm d'épaisseur) ont été préférés à des tubes en aluminium. Les tubes ont été placés entre les rangs de maïs, à 1,4 m de la bordure des parcelles. Il n'a pas été possible d'implanter des tubes plus près des lignes de semis car la manipulation de l'humidimètre endommage les pieds de maïs (feuilles cassées notamment). Les mesures ont été effectuées tous les 5 cm entre 5 cm et 75 cm de profondeur, tous les 20 cm ensuite, à l'aide d'humidimètres SOLO 25 (NARDEUX) équipés d'une source $^{241}\text{AmBe}$ de 1480 MBq. Trois humidimètres ont été successivement utilisés au cours de l'expérimentation.

La période couverte est la même que celle des mesures tensiométriques, mais la périodicité est différente. Au cours des saisons de culture, les mesures étaient quotidiennes (sauf en 1984, où elles étaient effectuées deux fois par semaine), sur les parcelles cultivées comme sur la parcelle nue. En-dehors de ces périodes, les humidités étaient mesurées deux fois par semaine. La première mesure était effectuée à 5 cm de profondeur : nous verrons lors de l'étude de la précision de l'évaluation du stock sur la tranche 0-20 cm (chapitre IV) que cette mesure proche de la surface n'introduit pas d'erreur importante et qu'elle permet de caractériser une tranche de sol dans laquelle les variations d'humidité sont importantes. En profondeur, les humidités étaient déterminées tous les 10 cm jusqu'à 75 cm, tous les 20 cm ensuite. A chaque niveau, deux mesures en "temps long" étaient effectuées (comptage sur 18 secondes), et 3 mesures étaient réalisées dans un fût rempli d'eau avant et après chaque profil d'humidité, afin de corriger une éventuelle dérive.

4.3. Etude des transferts d'éléments minéraux dans le sol

Pour étudier la dynamique des éléments minéraux, des capteurs de solution du sol en céramique poreuse ont été utilisés. Le choix s'est porté sur des bougies de 45 mm de diamètre de marque Soil Moisture (référence 653x1 B2M2), qui sont probablement les capteurs les plus utilisés dans le monde. Sous culture, 64 capteurs ont été implantés selon le dispositif suivant :

- 2 traitements (N2 P1 K0 et N2 P1 K2) ;
- 2 sous-traitements (A et B) ;
- 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) ;
- 4 répétitions.

Les 4 répétitions ont été obtenues en équipant les deux blocs de l'essai factoriel avec deux capteurs par sous-parcelle recevant le même traitement.

Sur le sol nu, 32 capteurs ont été installés :

- 4 profondeurs (30, 60, 120 et 180 cm) ;
- 8 répétitions.

Les échantillons d'eau recueillis ont été analysés au laboratoire de l'ORSTOM de Lomé. Le potassium a été dosé en émission de flamme, le calcium et le magnésium en absorption atomique en milieu acide avec un tampon de 1 % de lanthane. Les teneurs en chlore ont été déterminées en potentiométrie automatique par le nitrate d'argent 0,02 M avec addition de 1 ml de chlorure de potassium 0,02 M pour faciliter la détection du virage. Les teneurs en nitrates ont été obtenues par colorimétrie par l'acide phénoldisulfonique de l'extrait évaporé à sec. Une recherche des ions sulfate, des ions phosphate et des ions ammonium a été réalisée sur quelques échantillons. Les ions sulfate ont été dosés par néphélométrie du précipité du sulfate de baryum, les ions phosphate par colorimétrie du bleu de molybdène et les ions ammonium par défécation alcaline puis coloration par le réactif de Nessler.

4.4. Etude des quantités d'éléments minéraux contenues dans le sol

Pour établir le bilan des éléments minéraux contenus dans le sol, un échantillonnage du sol des parcelles étudiées a été réalisé en mars 1987, soit 5 mois après de dernier apport d'engrais. Les prélèvements ont été effectués à la tarière par tranche de 10 cm jusqu'à 60 cm, puis tous les 20 cm jusqu'à 160 cm. Chaque échantillon analysé correspond à 12 prélèvements différents : 3 prélèvements ont été effectués à l'emplacement des lignes de maïs et 3 prélèvements dans l'interligne pour les deux blocs de l'essai. Les échantillons ont été tamisés à 2 mm après séchage à l'air.

La granulométrie des échantillons a été déterminée par sédimentation (pipette Robinson) après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée et dispersion par agitation mécanique en présence de pyrophosphate de sodium. L'azote total a été déterminé par la méthode Kjeldahl. Le calcium échangeable a été extrait par échange à la cobalti-hexamine, le magnésium et le potassium échangeables par échange à l'acétate d'ammonium. Le dosage de ces éléments a été effectué de manière identique à celle utilisée pour les échantillons d'eau. Le phosphore assimilable a été déterminé à l'aide de la méthode Olsen-Dabin (extraction par un mélange de bicarbonate de sodium et de fluorure d'ammonium 0,5 M à pH 8,5). Les teneurs en calcium échangeable et en phosphore assimilable ont été mesurées au CIRAD à Montpellier ; les autres analyses ont été effectuées à l'ORSTOM (laboratoire de Lomé). Les éléments totaux ont été déterminés par attaque à l'acide nitrique bouillant et par attaque fluoro-perchlorique, mais les chiffres n'ont pas été retenus, car la variabilité des résultats (environ 30 % de variation sur un échantillon donné) les rendait inutilisables pour établir des bilans.

Pour étudier le rôle de la matière organique sur le bilan du potassium non échangeable, certains échantillons ont fait l'objet d'une séparation granulométrique selon la méthode préconisée par FELLER *et al.* (1990). Les échantillons ont été dispersés en les laissant au contact d'une résine sodique, puis séparés selon les tailles des constituants en n'utilisant que des méthodes de fractionnement physiques. Les fractions de taille supérieure à 20 micromètres ont été séparées par tamisage à l'eau et les fractions les plus fines par sédimentation, centrifugation et floculation. Pour séparer les résidus végétaux du sol des particules minérales, certaines fractions granulométriques ont été divisées en une "fraction légère" (Fl) et une "fraction dense" (Fd) par agitation et sédimentation dans l'eau. Pour quelques échantillons, des méthodes complémentaires (diffraction des rayons X, microscopie électronique, dilution isotopique et isothermes d'adsorption selon la méthode de BECKETT) ont été utilisées. Ces méthodes seront précisées dans le texte.

CHAPITRE IV

LA CROISSANCE DU MAIS ET LA CONSOMMATION D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX

L'objet de ce chapitre est de fournir les éléments relatifs à la plante nécessaires à l'interprétation des résultats concernant les transferts d'eau et d'éléments minéraux dans les sols, ainsi que ceux permettant le calcul des exportations par les grains et par les résidus de culture. La plupart des résultats présentés dans ce chapitre ont déjà fait l'objet d'une publication (SARAGONI & POSS, 1991).

La transpiration du couvert dépend en grande partie de la surface du feuillage et de l'extension du système racinaire : la description des paramètres de croissance du maïs fait l'objet du premier paragraphe de ce chapitre. Les quantités d'éléments minéraux absorbées par la plante au cours de son cycle cultural sont étudiées dans le second paragraphe, à partir des quantités de matière sèche produites et des teneurs en éléments minéraux des différents organes.

1. LA CROISSANCE DU MAIS

1.1 La croissance des parties aériennes

1.1.1. LA HAUTEUR TOTALE

La croissance du maïs a été suivie pendant 5 saisons de culture. L'année 1985 est un exemple de situation où la pluviométrie est suffisante du semis jusqu'au 60^{ème} jour, en première comme en deuxième saison. Après la germination (4^{ème} jour après le semis), la croissance en hauteur suit une courbe sigmoïdale, avec un taux d'accroissement maximal entre le 25^{ème} et le 45^{ème} jour (figures IV.1 et IV.2). Pour la parcelle fertilisée en potassium, la croissance a été voisine en première et en deuxième saison de culture, car la pluviométrie fut suffisante. La hauteur atteinte a été de 261 ± 18 cm en première saison et 258 ± 26 cm en deuxième saison (intervalle de confiance égal à l'écart-type). A partir de ces chiffres, la hauteur à la base de la panicule,

souvent préférée à la hauteur totale, peut être calculée (hauteur moyenne de la panicule : 31 cm). Au cours de la montaison, la croissance atteint $6,5 \text{ cm.j}^{-1}$ en première saison et $5,5 \text{ cm.j}^{-1}$ en deuxième. DJANAME (1989), travaillant sur 4 variétés de maïs, a trouvé des chiffres comparables sur NH1 et sur une variété locale (Djinouton), alors que des variétés plus récemment sélectionnées (d'origine CIMMYT) atteignent à peine 150 cm à la base de la panicule et présentent des taux de croissance maximaux de l'ordre de $3,5 \text{ cm.j}^{-1}$. La variété NH1 garde donc de son parent béninois des caractères de grande taille et de croissance rapide à la montaison qui n'existent plus dans les variétés récemment sélectionnées. Lorsque la parcelle est fertilisée en potassium mais la pluviométrie insuffisante durant la période comprise entre le semis et la floraison, comme c'est souvent le cas en deuxième saison, la croissance est ralentie, mais la hauteur finale des plants varie peu (environ 10 cm de moins).

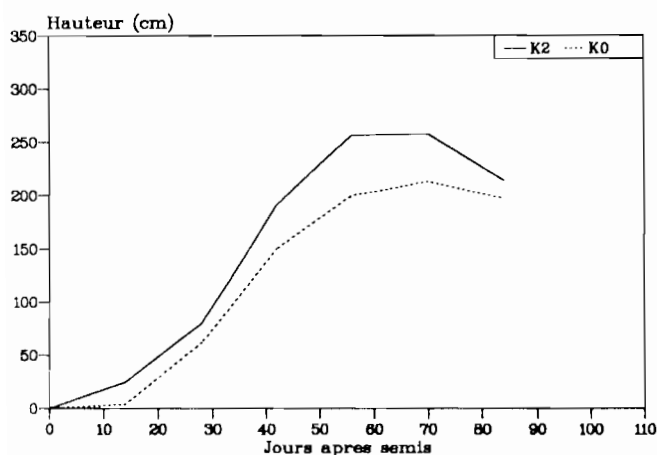


FIGURE IV.1
Evolution de la hauteur totale du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1985)

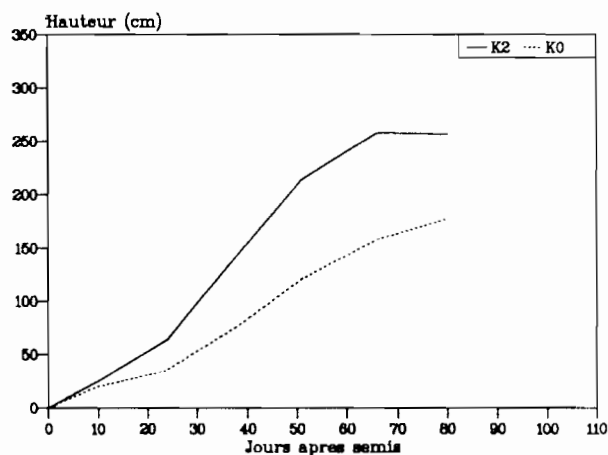


FIGURE IV.2
Evolution de la hauteur totale du maïs NH1 au cours du cycle cultural (deuxième saison 1985)

La différence de croissance liée à la fertilisation potassique apparaît dès les premiers stades physiologiques, en première comme en deuxième saison. La différence s'accroît ensuite au cours de la montaison : elle atteint près de 50 cm en première saison de culture et 100 cm en deuxième (hauteur totale maximale de la parcelle N2 P1 K0 respectivement de $213 \pm 21 \text{ cm}$ et $158 \pm 61 \text{ cm}$). Cette croissance plus faible provient principalement d'une diminution de l'allongement des cellules, comme en atteste la présence d'entre-nœuds courts, signe habituel de carence potassique. Il s'agit là d'un effet direct de la carence potassique : il est bien établi, en effet, que l'extension cellulaire est la conséquence d'une accumulation de potassium dans les cellules nécessaire à la stabilisation du pH dans le cytoplasme et à l'augmentation du potentiel osmotique dans les vacuoles (MARSCHNER, 1986). Mais la fertilisation ayant été la même pour les deux saisons, la différence de croissance entre la première et la deuxième saison de culture pour la parcelle non fertilisée ne peut pas s'expliquer par ce facteur.

En conditions d'alimentation hydrique et minérale satisfaisantes, la hauteur du maïs NH1 à la base de la panicule est donc comprise entre 2,0 et 2,5 m dans les conditions de l'essai. En conditions limitantes d'alimentation hydrique, mais avec une fertilisation équilibrée, la hauteur totale atteinte n'est que peu affectée. En revanche, lorsque le maïs souffre de carence potassique, la croissance est fortement réduite.

1.1.2. LE NOMBRE DE FEUILLES

Le nombre de feuilles a été relevé pour les mêmes plants de maïs que ceux choisis pour mesurer la hauteur totale. En première saison de culture, le nombre de feuilles augmente proportionnellement au temps entre la levée et la floraison (45-50ème jour) et demeure constant jusqu'au 85ème jour (figures IV.3 et IV.4). Au cours de cette saison de culture, les différences sont toujours faibles entre la parcelle N2 P1 K2 et la parcelle N2 P1 K0 (13,9±1,3 feuilles en N2 P1 K2 contre 13,5±1,2 feuilles en N2 P1 K0, pour la première saison 1985). Le nombre de feuilles est plus faible en deuxième saison, la diminution étant plus marquée pour la parcelle N2 P1 K0 que pour la parcelle N2 P1 K2 (12,0±1,2 feuilles en N2 P1 K2 contre 10,3±1,8 feuilles en N2 P1 K0).

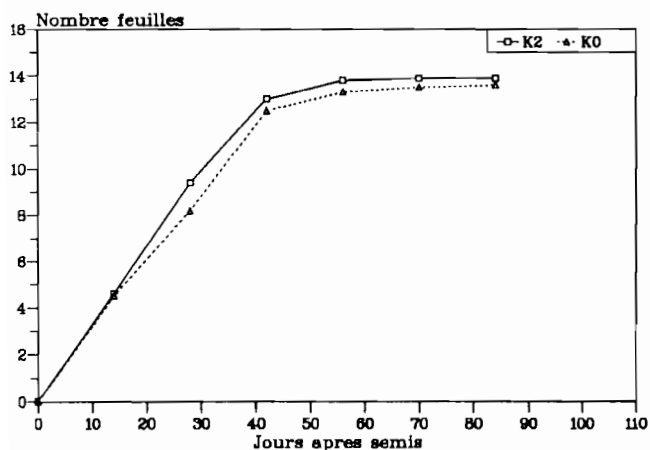


FIGURE IV.3

Evolution du nombre de feuilles du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1985)

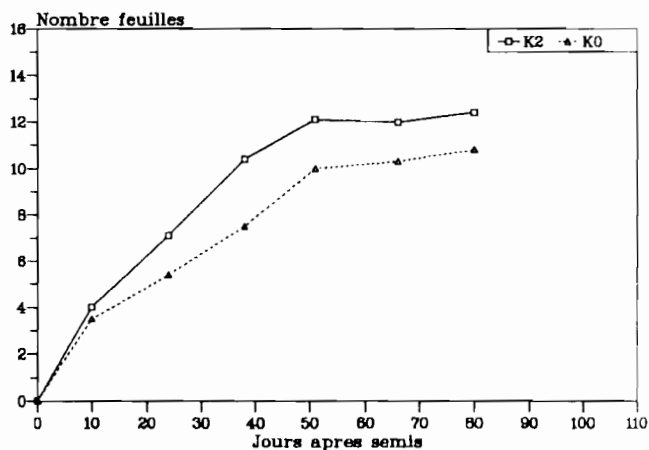


FIGURE IV.4

Evolution du nombre de feuilles du maïs NH1 au cours du cycle cultural (deuxième saison 1985)

La fertilisation potassique a donc peu d'effet sur le nombre de feuilles en première saison. Elle intervient par contre en deuxième saison, mais son effet sur le nombre de feuilles est plus faible que sur la hauteur totale (-38 % sur la hauteur en N2 P1 K0 par rapport à N2 P1 K2, -14 % sur le nombre de feuilles).

1.1.3. L'INDICE FOLIAIRE

L'évolution de l'indice foliaire au cours du cycle cultural a été suivie pendant les deux saisons de culture 1987, en utilisant la méthodologie préconisée par Monteny (chapitre III). En raison de son caractère

destructeur, cette méthode n'a pas été utilisée sur les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 de l'essai factoriel, mais sur une parcelle recevant la même fertilisation que N2 P1 K2. Il n'a pas été possible d'étudier ainsi l'évolution de l'indice foliaire liée à une carence potassique, car la station ne comportait pas de témoin K0.

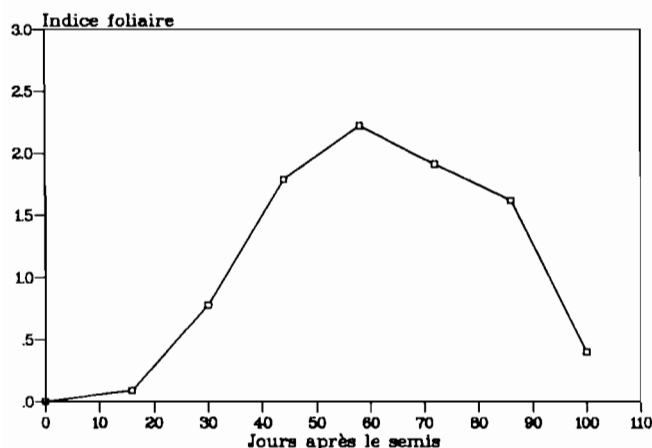


FIGURE IV.5
Evolution de l'indice foliaire du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1987, fertilisation minérale non limitante)

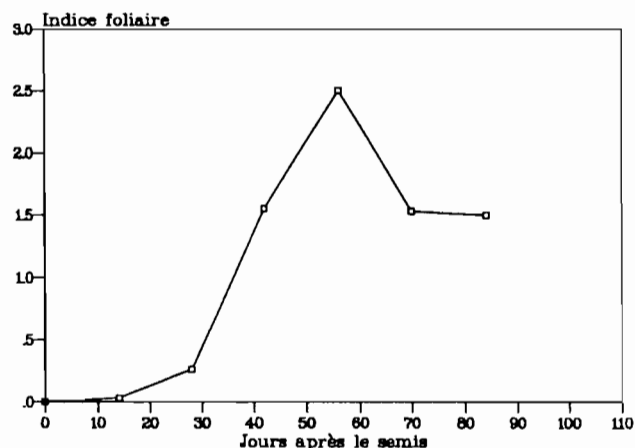


FIGURE IV.6
Evolution de l'indice foliaire du maïs NH1 au cours du cycle cultural (deuxième saison 1987, fertilisation minérale non limitante)

Les courbes de première et de deuxième saison de culture sont voisines jusqu'à la fin de la floraison (60ème jour, figures IV.5 et IV.6). Jusqu'au début de la montaison (25ème jour), les indices foliaires sont très faibles (moins de 0,3). Ils augmentent ensuite rapidement pour atteindre un maximum d'environ 2,5 à la fin de la floraison. Ensuite l'indice foliaire diminue en raison de la sénescence du feuillage. Cette diminution est toujours plus rapide en deuxième saison car les pluies sont rares en fin de cycle.

Une valeur maximale d'indice foliaire de 2,5 est faible par rapport aux valeurs de l'ordre de 5,0 obtenues en zone tempérée. Ne serait-il pas possible d'augmenter les indices foliaires et les rendements en augmentant la densité de semis ? Une expérimentation a été conduite au cours de la première saison 1988 pour étudier l'influence de trois densités de semis (42 000, 50 000 et 62 000 plants.ha⁻¹) sur la croissance du maïs (DJANAME, 1989). La pluviométrie de la saison d'expérimentation a été abondante et suffisamment bien répartie pour fournir des données en conditions de bonne alimentation hydrique. Les résultats ont montré qu'il était possible d'augmenter l'indice foliaire d'environ 20 % en augmentant la densité de semis de 50 %, mais que l'effet sur les rendements était insensible (moins de 3 % de différence entre les traitements extrêmes). Par ailleurs, les plants sont alors beaucoup plus chétifs (le poids total de matière sèche diminue de 293 g à 211 g), la productivité par plant est réduite d'environ 30 % (de 120 g de grains à 87 g) et le coût en main-d'oeuvre augmente de 50 %. Avec la variété NH1, la pluviométrie du sud-Togo et son ensoleillement, il n'est donc pas souhaitable de dépasser la densité de 42 000 plants.ha⁻¹ sur les terres de Barre, ce qui conduit à des indices foliaires d'environ 2,5 en conditions de bonne alimentation hydrique et minérale.

Une valeur approchée de l'indice foliaire maximal en conditions d'alimentation hydrique ou minérale limitantes a été mesurée sur les parcelles de l'essai NPK au cours de la deuxième saison 1990 par la méthode non destructive exposée au chapitre III. La pluviométrie fut particulièrement faible. En conditions de fertilisation minérale équilibrée (N2 P1 K2), l'indice foliaire maximum fut de 0,86, soit trois fois plus faible qu'en première saison. Le nombre maximal de feuilles était de 8,6 (par rapport à 12), mais le nombre de pieds manquants sur la parcelle est resté limité (18 %). Lorsque la carence potassique (N2 P1 K0) s'est surimposée au stress hydrique de la deuxième saison, l'indice foliaire est tombé à 0,16. Cet indice extrêmement bas provient en partie d'une diminution du nombre de feuilles (seulement 5,0 feuilles en moyenne par plant) et d'un développement moindre du limbe, mais il est également lié à un taux de manquants élevé (41 %) dû au dépérissement de nombreux pieds en cours de croissance et à une forte sensibilité à la verse des plants carencés en potassium. La verse est une manifestation habituelle de carence potassique, le potassium ayant une action sur la lignification des tissus vasculaires (PISSAREK, 1973 cité par MARSCHNER, 1986).

En première saison, l'indice foliaire du maïs est donc inférieur à 0,3 jusqu'au début de la montaison. Il augmente ensuite rapidement et passe par un maximum au moment de la floraison (2,5 en conditions de bonne alimentation hydrique et minérale). Il décroît ensuite d'autant plus rapidement que les conditions d'alimentation hydrique de la fin du cycle sont défavorables. En conditions d'alimentation minérale équilibrée, un stress hydrique peut diviser l'indice foliaire par trois, en agissant sur le nombre de feuilles et sur leur croissance. Lorsque la carence potassique s'y ajoute, l'indice foliaire chute jusqu'à 0,16, laissant le sol pratiquement nu, car au développement végétatif réduit s'ajoute une proportion importante de manquants.

1.1.4. LA CINÉTIQUE DE PRODUCTION DE MATIÈRE SÈCHE

En terme de production de matière sèche, le cycle végétatif du maïs peut être divisé en 4 phases principales (figure IV.7).

Du semis au 25^{ème} jour, la production de matière sèche cumulée reste inférieure à 400 kg.ha⁻¹ dans les conditions optimales de croissance (parcelle N2 P1 K2 en première saison des pluies). Du 25^{ème} jour à la floraison femelle (vers le 60^{ème} jour), la vitesse de croissance de la tige et des feuilles est maximale. A la fin de cette période, la quantité totale de matière sèche produite atteint 4 000 kg.ha⁻¹. Entre le 60^{ème} jour et le 100^{ème} jour (stade maturité), le développement de la tige et des feuilles diminue, mais la production de matière sèche ne ralentit pas, en raison du développement de l'épi (grains, rafle et spathes). La quantité de matière sèche contenue dans la plante est maximale à la fin de cette phase (8 300 kg.ha⁻¹).

De la maturité à la récolte, la quantité de matière sèche décroît (tableau IV.1). Cette diminution a principalement pour origine une réduction de 41 % du poids des feuilles. Ce phénomène est fréquent sur le sorgho (JACQUINOT, 1964 ; ARRIVETS, 1976 ; GIGOU, 1984), le mil (SIBAND, 1981) et sur le riz (GIGOU & CHABALIER, 1987), mais il semble moins décrit sur le maïs (HANWAY, 1962). Il s'explique

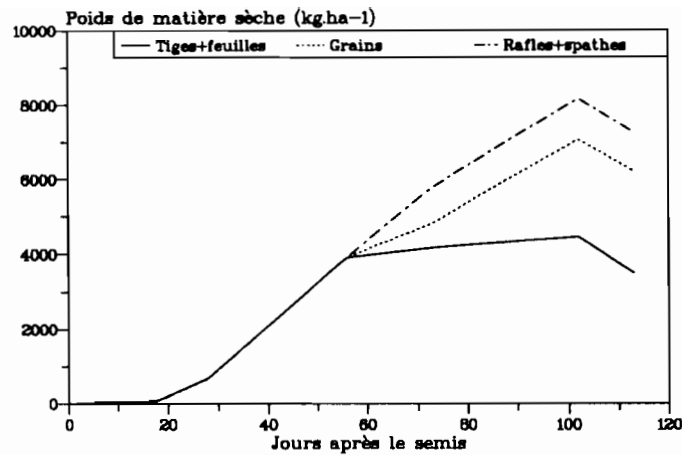


FIGURE IV.7
Evolution du poids de matière sèche du maïs NH1 au cours du cycle cultural
(parcelle N2 P1 K2, première saison des pluies)

en grande partie par la chute des feuilles en fin de cycle cultural, mais des exsorsions racinaires et le pluviollessivage des éléments contenus dans les feuilles semblent également devoir être invoqués.

TABLEAU IV.1
Evolution du poids de matière sèche entre la maturité et la récolte (parcelle N2 P1 K2, première saison des pluies, en kg.ha⁻¹)

	Tiges	Feuilles	Grains	Rafles	Spathes	Total
Maturité	2 680	1 780	2 610	470	620	8 160
Récolte	2 440	1 050	2 730	490	560	7 270
Evolution moyenne (% du poids à maturité)	-9,0	-41,0	+4,6	+4,3	-9,7	-12,2

Au cours de la première saison des pluies, le poids de matière sèche formée sur la parcelle N2 P1 K0 au stade maturité est de 4 800 kg.ha⁻¹ (figure IV.8), soit 3 360 kg.ha⁻¹ de moins que celui observé sur la parcelle N2 P1 K2 (-41 %). La diminution de poids affecte plus les grains (-65 %) que les autres organes aériens (-30 %). Au cours de la deuxième saison des pluies (figure IV.9), le poids à la maturité est de 4 820 kg.ha⁻¹ sur la parcelle N2 P1 K2 (-41 % par rapport à la première saison) et de 1 680 kg.ha⁻¹ sur la parcelle N2 P1 K0 (-79 % par rapport à la parcelle N2 P1 K2 en première saison).

Lorsque le maïs est soumis à une carence minérale ou à un stress hydrique, le poids des grains formés et le poids des pailles sont diminués. L'analyse des résultats obtenus avec 5 niveaux de fertilisation sur les parcelles de l'essai factoriel étudié ont montré que le poids des pailles (tiges + feuilles) était corrélé au rendement en grains par une relation linéaire dans une gamme de rendements compris entre 100 kg.ha⁻¹ et 3 500 kg.ha⁻¹ (SARAGONI & POSS, 1991) :

$$\text{Poids des pailles (tiges + feuilles)} = 0,99 \times \text{Poids des grains} + 612 \quad (\text{en kg ms.ha}^{-1})$$

$$r = 0,96 \text{ pour } n = 74$$

Quelles que soient les conditions de culture, les proportions de spathes et de rafle sont constantes par rapport au poids de grains : le rapport rafle/grain est proche de 0,18 et le rapport spathe/grain proche de 0,20. Ces trois relations permettent d'évaluer le poids des différents organes de la plante à partir du rendement en grains.

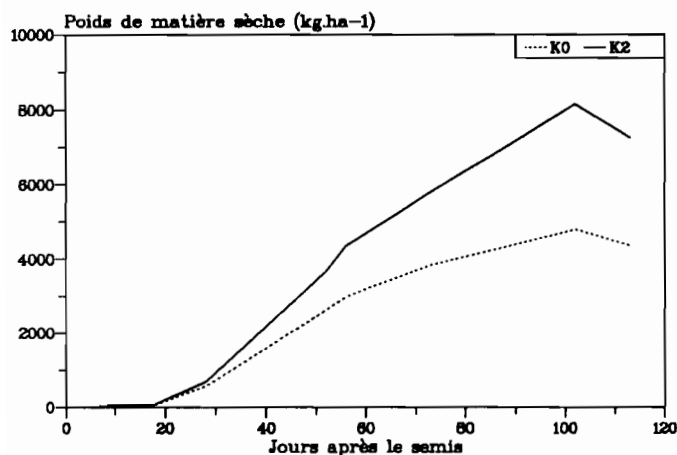


FIGURE IV.8

Evolution du poids de matière sèche formé par le maïs NH1 au cours du cycle cultural de la première saison

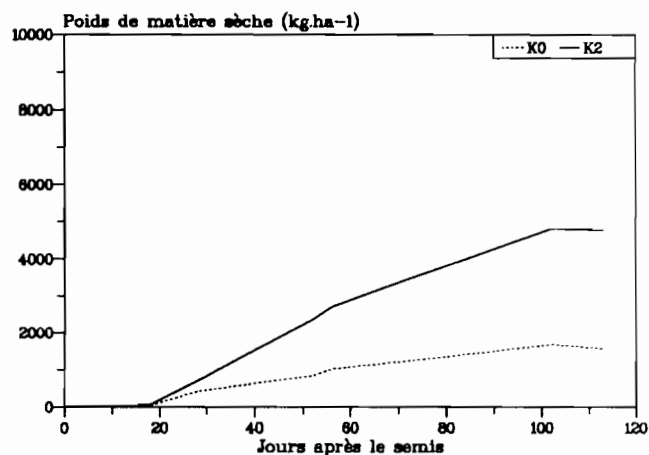


FIGURE IV.9

Evolution du poids de matière sèche formé par le maïs NH1 au cours du cycle cultural de la deuxième saison

1.2. Le développement racinaire

Le développement racinaire a été suivi sous maïs au cours des premières saisons des années 1984 et 1985 pour la parcelle N2 P1 K0 et la parcelle N2 P1 K2 selon la méthode décrite au chapitre III. Le développement des racines a été très proche en 1984 et en 1985. Dans les deux cas, aucune différence n'a été notée entre la parcelle N2 P1 K0 et la parcelle N2 P1 K2 (figure IV.10). Jusqu'au début de la montaison, le développement des racines reste limité : la profondeur atteinte est d'environ 20 cm au 25ème jour. Elle croît ensuite rapidement jusqu'au début de la floraison ($4,3 \text{ cm.j}^{-1}$), puis plus lentement ensuite ($1,2 \text{ cm.j}^{-1}$). Comme le sol est meuble pendant toute la saison des pluies, les racines des plantes annuelles pénètrent facilement en profondeur, et ce d'autant mieux que le sol ne présente pas de gradient brutal, ni textural ni structural. La croissance des racines semble se poursuivre jusqu'à la fin du cycle végétatif où la profondeur atteinte est d'environ 150 cm. Ce développement est très proche de celui observé pour le mil sur sol sableux au Sénégal (CHOPART, 1983) : trois phases de croissance racinaires calées sur les mêmes stades de développement physiologique que pour le maïs ont également été identifiées avec une vitesse de croissance maximale du même ordre de grandeur ($3,5 \text{ cm.j}^{-1}$). Le même modèle de progression du front racinaire semble donc pouvoir s'appliquer aux deux céréales dans les sols meubles sans éléments grossiers.

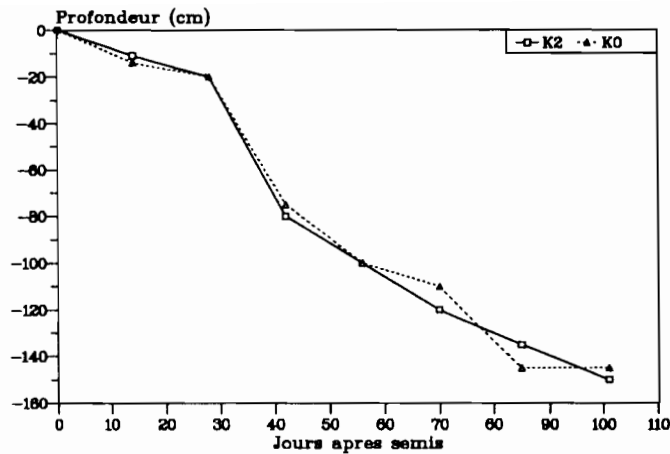


FIGURE IV.10
Evolution de la profondeur maximale atteinte par les racines du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1984)

La répartition des racines dans le sol a été représentée sous forme de diagramme à trois dimensions pour visualiser l'évolution de la proportion des racines dans chaque horizon en fonction du temps (figures IV.11 et IV.12). Le pourcentage de racines est exprimé pour chaque tranche de sol de 10 cm par rapport au total. Il apparaît que, même en fin de cycle lorsque la pénétration est la plus profonde, plus de 50 % des racines sont situées dans les 20 premiers centimètres. Dans les horizons plus profonds, la proportion est toujours inférieure à 10 % du total.

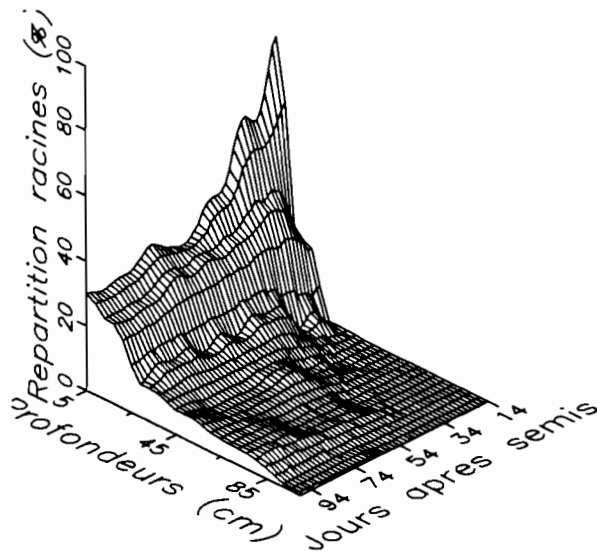


FIGURE IV.11
Evolution de la répartition des racines du maïs NH1 dans le sol au cours du cycle cultural (parcelle N2 P1 K0, première saison 1985)

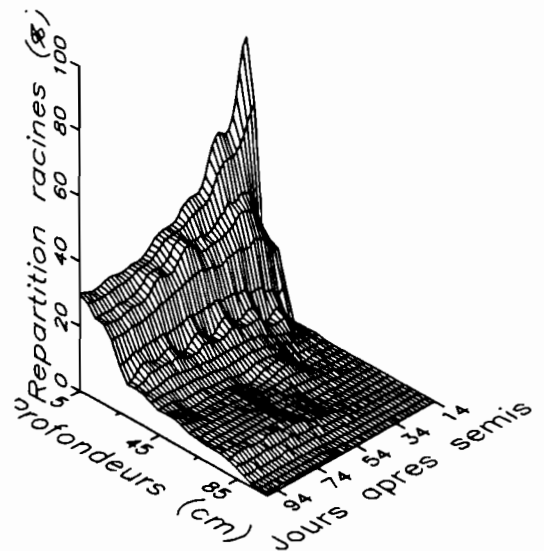


FIGURE IV.12
Evolution de la répartition des racines du maïs NH1 dans le sol au cours du cycle cultural (parcelle N2 P1 K2, première saison 1985)

L'extension latérale du système racinaire s'effectue rapidement. Dès le début de la montaison, la densité racinaire est constante dans l'interligne à une profondeur donnée, sauf à proximité de la surface en raison du chevelu racinaire situé à l'aplomb de chaque pied de maïs. L'exploitation des réserves hydriques et minérales semble donc homogène latéralement et les mesures effectuées au milieu de l'interligne sont représentatives de l'ensemble du sol. Ce résultat est conforme aux observations de CHOPART (1983) sur le mil.

Au cours de la première saison de culture, la croissance des racines sur la parcelle fertilisée en potassium n'est donc pas significativement différente de celle observée sur la parcelle non fertilisée. Elle s'effectue en trois phases successives (levée, montaison et floraison-maturation). Pendant la montaison, la vitesse de croissance atteint plus de 4 cm.j^{-1} et la profondeur du front de pénétration racinaire parvient jusqu'à 1,5 m : comme l'avaient noté VOLKOFF & WILLAIME (1976), les horizons de profondeur des terres de Barre sont d'excellents supports de culture sur le plan physique. La colonisation de l'interligne s'effectue pendant les premières semaines ; après un mois, tout gradient latéral a disparu (sauf dans les 10 premiers centimètres), autorisant les mesures hydriques et minérales dans l'interligne. Aucune mesure de développement racinaire n'a été réalisée au cours de la deuxième saison de culture.

2. LA CONSOMMATION D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX

2.1. La composition minérale des différents organes

La teneur en éléments minéraux de tous les organes de la plante décroît au cours du cycle cultural (figure IV.13 pour l'ensemble des tiges et des feuilles).

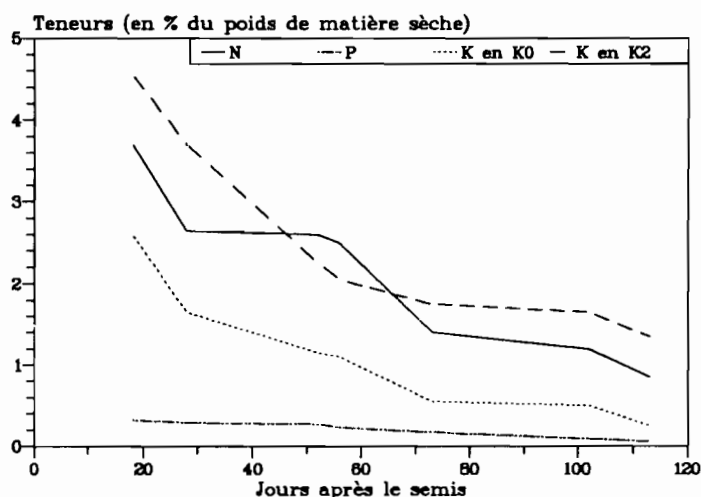


FIGURE IV.13
Evolution des teneurs en azote, phosphore et potassium dans les pailles du maïs NH1 (tiges + feuilles, première saison des pluies, parcelle N2 P1 K2)

A la récolte, les teneurs en éléments minéraux sont très différentes selon les organes (tableau IV.2) :

- les teneurs en azote et en phosphore les plus élevées se situent dans les grains ;
- les teneurs les plus fortes en potassium, en calcium et en magnésium sont observées dans les pailles ;
- les teneurs en calcium et en magnésium sont particulièrement faibles dans les grains.

TABLEAU IV.2
Teneurs en éléments minéraux des pailles et des grains de maïs à la récolte (en % de matière sèche, première saison de culture)

Eléments	Pailles		Grains		Rafles		Spathes	
	N2P1K0	N2P1K2	N2P1K0	N2P1K2	N2P1K0	N2P1K2	N2P1K0	N2P1K2
N	0,70	0,85	2,06	1,85	0,68	0,48	0,45	0,46
P	0,07	0,06	0,30	0,33	0,07	0,04	0,05	0,04
K	0,48	1,32	0,40	0,44	0,48	0,50	0,20	0,49
Ca	0,40	0,39	0,01	0,01	0,03	0,02	0,12	0,10
Mg	0,47	0,31	0,10	0,09	0,05	0,04	0,18	0,16

Il existe une relation de proportionnalité entre la teneur en potassium échangeable dans l'horizon 0-20 cm et la teneur en potassium des pailles (SARAGONI & POSS, 1991). C'est pourquoi les teneurs en potassium dans les pailles varient selon la fertilisation : sur la parcelle N2 P1 K0, les teneurs représentent 35 % de celles mesurées sur la parcelle N2 P1 K2. La fertilisation potassique n'intervient pas, en revanche, sur les teneurs en potassium des grains et des rafles.

Il existe une relation étroite ($r = 0,86$ pour $n = 58$) entre les teneurs en magnésium et les teneurs en potassium dans les feuilles, les teneurs en magnésium diminuant lorsque les teneurs en potassium augmentent (SARAGONI & POSS, 1991). Cette liaison, également observée sur les variétés de maïs cultivées en France (CALMES, 1959 ; LOUE, 1980), explique que les teneurs en magnésium sont plus élevées dans les pailles de la parcelle N2 P1 K2 que dans celles de la parcelle N2 P1 K0 (+52 %).

TABLEAU IV.3
Teneurs en éléments minéraux des racines à la maturité (en % m.s., première saison des pluies, moyenne de 6 variétés)

Eléments	Teneurs à maturité
N	1,00
P	0,08
K	1,54
Ca	0,21
Mg	0,10

Les teneurs en éléments minéraux des racines n'ont pas été déterminées dans l'essai étudié. Les valeurs disponibles sont celles obtenues à la maturité en conditions de fertilisation non limitantes sur une station de recherche située à une quinzaine de kilomètres de Davié (SARAGONI & POSS, 1991). Les teneurs en éléments minéraux des racines varient peu entre les variétés de maïs : les chiffres obtenus pour différentes variétés ont donc été regroupés (tableau IV.3). Ces chiffres sont proches de ceux mesurés dans les pailles (tableau IV.2).

Dans l'Illinois (USA), SNIDER (1953) a obtenu des valeurs voisines sur des parcelles fertilisées. Cet auteur a noté que dans les parcelles non fertilisées, seule la teneur en potassium diminuait significativement (-80 %).

2.2. La cinétique des prélèvements minéraux au cours du cycle cultural

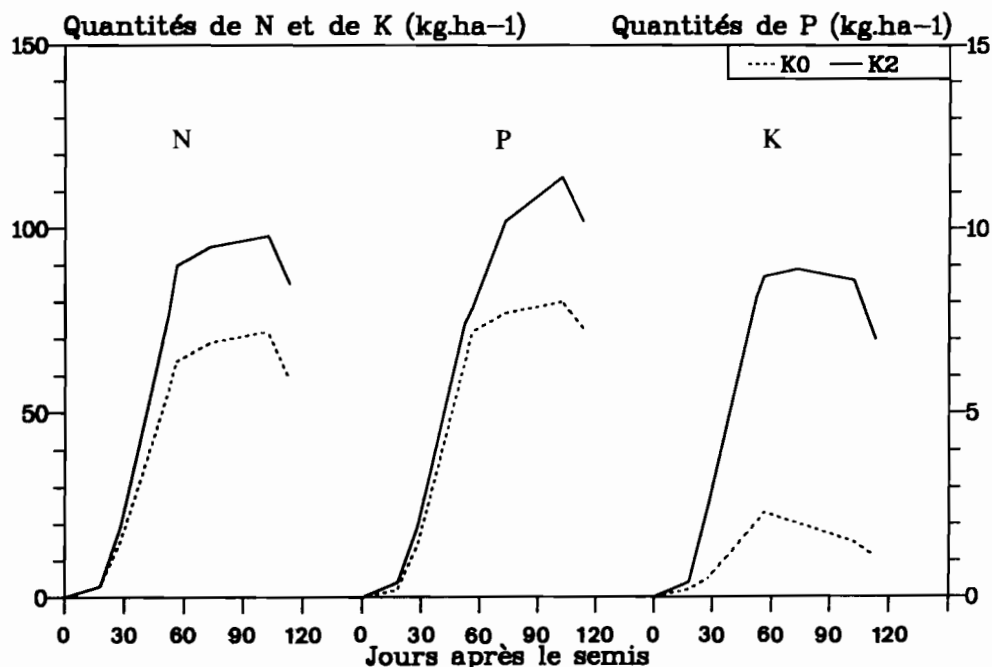


FIGURE IV.14

Quantités d'éléments minéraux contenues dans le maïs NH1 au cours du cycle cultural (totalité de la partie aérienne, première saison des pluies, d'après SARAGONI & POSS, 1991)

Au cours du cycle cultural, l'augmentation du poids de chaque organe est beaucoup plus rapide que la diminution des teneurs en éléments minéraux. C'est la raison pour laquelle l'évolution des quantités d'éléments minéraux contenues dans la plante suit les 4 phases définies pour la production de matière sèche, la phase comprise entre le 25^{ème} jour et la floraison correspondant au maximum d'absorption (figure IV.14). En fin de cycle, cependant, la quantité de potassium contenue dans les parties aériennes commence à décroître avant que le poids maximum de matière sèche soit atteint (stade maturité) : les feuilles, qui contiennent la plus grande partie du potassium, commencent à se dessécher avant la maturité de la plante.

TABLEAU IV.4

Quantités d'éléments minéraux contenues à la maturité dans le maïs NH1 (en kg.ha⁻¹, première saison de culture, parcelle N2 P1 K2)

Eléments	Parties aériennes				Racines		Total
	Tiges et feuilles	Grains	Rafles et spathe	Total parties aériennes	Poids	% parties aériennes	
N	53,5	41,8	6,0	101,3	15,7	15	117,0
P	4,0	8,6	1,0	13,6	1,2	9	14,8
K	73,6	11,5	8,7	93,8	24,1	26	117,5
Ca	20,3	0,3	1,0	21,6	3,3	15	24,9
Mg	15,2	3,4	0,8	19,4	1,6	8	21,0

L'azote et le potassium sont les éléments les plus abondants dans la plante : environ 110 kg.ha⁻¹ à la maturité en conditions de fertilisation minérale non limitante (tableau IV.4). Au cours de la période

d'absorption maximale, les prélèvements journaliers atteignent 3,3 kg N.ha⁻¹ et 2,2 kg K.ha⁻¹, contre 0,3 kg P.ha⁻¹.

La répartition des éléments dans les différents organes (tableau IV.4) reflète celle des teneurs (tableau IV.2). *Le phosphore est principalement localisé dans les grains. L'azote est réparti en quantités presque égales entre les pailles (tiges et feuilles) et les grains. Le potassium, le calcium et le magnésium sont surtout localisés dans les tiges et les feuilles, mais les quantités de potassium contenues dans les racines représentent environ la moitié de celles des tiges et des feuilles.*

TABLEAU IV.5
Quantités moyennes d'éléments contenus dans les parties aériennes du maïs NH1 à la maturité selon la fertilisation et la saison de culture (en kg.ha⁻¹)

Élément	Première saison		Deuxième saison	
	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
N	72	101	16	54
P	8	14	2	10
K	15	94	11	60
Ca	15	22	3	10
Mg	19	19	5	10
Rendement grains	1120	2730	420	1790

L'effet de la carence potassique sur la quantité d'éléments minéraux contenus dans les parties aériennes du maïs en première saison est variable selon les éléments (tableau IV.5). La diminution la plus forte concerne le potassium, car non seulement la quantité de paille formée sur la parcelle N2 P1 K0 est réduite par rapport à celle de la parcelle N2 P1 K2, mais de plus la teneur en potassium est environ trois fois plus faible (tableau IV.2). *A contrario*, les quantités de magnésium sont égales car les teneurs sont plus élevées dans la parcelle N2 P1 K0 que dans la parcelle N2 P1 K2. En deuxième saison, les quantités de tous les éléments minéraux sont plus faibles qu'en première saison pour un niveau de fertilisation donné, car le poids de pailles et surtout celui des grains sont moindres.

Pour calculer les quantités totales absorbées par le couvert au cours du cycle cultural, les quantités d'éléments minéraux contenues dans les racines doivent être évaluées. En l'absence de déterminations sur chacune des parcelles, la proportion entre le poids des éléments minéraux des racines et celui des parties aériennes a été prise constante (tableau IV.4).

TABLEAU IV.6
Evolution des quantités d'éléments minéraux contenues dans les parties aériennes du maïs entre la maturité et la récolte (en kg.ha⁻¹, première saison de culture, parcelle N2 P1 K2)

Stade végétatif	N	P	K	Ca	Mg
Maturité	101,3	13,6	93,8	21,6	19,4
Récolte	85,2	11,5	63,3	14,6	14,4
Evolution (% maturité)	-16	-15	-33	-32	-26

La diminution de la quantité de matière sèche entre la maturité et la récolte produit une réduction des quantités d'éléments minéraux contenues dans la plante (tableau IV.6). En valeur relative, la libération la plus importante concerne le potassium, le calcium et le magnésium, en raison de leur localisation principale dans les tiges et les feuilles (tableau IV.2). En valeur absolue, les éléments les plus libérés sont le potassium et l'azote (30 kg K.ha⁻¹ et 16 kg N.ha⁻¹).

Ces résultats permettent d'évaluer les exportations d'éléments minéraux des parcelles à partir des rendements en grains et des teneurs dans les différents organes. Les exportations minérales par les récoltes sont très différentes selon que les résidus sont restitués à la parcelle ou non (tableau IV.7). *Les résidus de récolte constituent le terme principal des exportations de potassium, de calcium et de magnésium par le maïs.* Ces éléments sont en effet beaucoup plus abondants dans les pailles que dans les grains, les rafles et les spathes.

TABLEAU IV.7
Proportion des différents éléments minéraux dans les organes du maïs à la récolte (en % du poids, parcelle N2 P1 K2, première saison 1976-1980)

Elément	Grains	Paille	Rafles	Spathes
N	60	34	3	3
P	74	22	2	2
K	15	77	4	4
Ca	2	93	1	4
Mg	17	76	1	6

3. CONCLUSION

Le maïs NH1 est une variété de grande taille (2,0 à 2,5 m à la base de la panicule), dont le développement végétatif s'effectue en 4 phases principales. Au cours des 25 premiers jours après le semis, la production totale de matière sèche n'est que de 400 kg.ha⁻¹ dans les conditions optimales de croissance et l'indice foliaire est de 0,3 à la fin de la période (stade 10 feuilles). Du 25ème au 55ème jour (floraison femelle), la croissance de l'appareil végétatif est maximale. Les quantités de matière sèche synthétisées atteignent alors 190 kg.ha⁻¹.j⁻¹. Au 55ème jour, la couverture du sol est la plus forte (indice foliaire de 2,5). Entre le 55ème jour et le 100ème jour (maturité), le développement de l'appareil végétatif est pratiquement stoppé et

l'indice foliaire diminue en raison de la sénescence du feuillage, alors que la production de matière sèche demeure de $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ en raison du développement de l'inflorescence femelle. Au 100ème jour, le poids de matière sèche est maximal. Entre la maturité et la récolte, le poids de matière sèche décroît fortement : à la chute des feuilles s'ajoute probablement une élimination du contenu des cellules sénescents par pluviollessivage et par translocation à l'intérieur de la plante.

Un stress hydrique ne réduit que faiblement le développement végétatif de la plante lorsque la fertilisation n'est pas limitante (parcelle N2 P1 K2 en deuxième saison des pluies), mais la quantité de grains formés ainsi que les quantités d'éléments minéraux contenues dans la plante sont affectées. Lorsque la fertilisation est déficiente en potassium, la quantité de matière sèche formée et le rendement en grains sont considérablement diminués, même lorsque l'alimentation hydrique est suffisante (parcelle N2 P1 K0 en première saison des pluies) ; en revanche, le développement du système racinaire ne semble pas affecté par une carence potassique lorsque l'alimentation hydrique est suffisante.

Lorsque l'absence de fertilisation potassique et un stress hydrique se cumulent (parcelle N2 P1 K0 en deuxième saison des pluies), le développement de la plante est très réduit et de nombreux pieds meurent en cours de croissance. Il en résulte un indice foliaire qui peut alors n'être que de 0,16 à la floraison et des rendements en grains inférieurs à $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

DEUXIEME PARTIE
LES TRANSFERTS HYDRIQUES

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

Le fonctionnement hydrique des sols pose des questions de différentes natures.

La première concerne **la connaissance du fonctionnement hydrique de l'écosystème dans son ensemble**. Quel est le stock d'eau dans le sol et quelles sont ses variations annuelles ? Apparaît-il du drainage dans les terres de Barre ? Sur quelle profondeur le sol s'assèche-t-il au cours de la saison sèche ? Quel est l'effet de la végétation sur le fonctionnement ?

Les études les plus approfondies sur le fonctionnement hydrique des sols en Afrique de l'Ouest sont celles de ROOSE (1981). A partir de données sur différentes stations réparties de la zone forestière ivoirienne au Sahel, il a pu montrer que du drainage apparaissait systématiquement à la base des sols en année à pluviométrie moyenne, sauf en région sahélienne. Dans la région forestière et la région des savanes, les variations de stock hydrique dans la tranche 0-150 cm sont comprises entre 150 et 200 mm ; elles ne sont plus mesurables en-dessous de 150 cm dans la zone des savanes. Les études ultérieures ont confirmé ces résultats. CHABALIER (1984) a démontré en cases lysimétriques que le drainage pouvait atteindre 500 mm par an sous culture de coton ou de maïs dans le nord de la Côte d'Ivoire avec un total pluviométrique de 1166 mm. Au Sénégal, CHAUVEL (1977) a mis en évidence des régimes hydriques très différents suivant les types de sols. Dans les sols rouges, le front d'humectation gagne progressivement la profondeur en début de saison des pluies, et aucun engorgement n'apparaît ensuite. En fin de saison sèche, l'humidité est voisine de celle au point de flétrissement. Dans les sols beiges, en revanche, l'eau pénètre rapidement jusque vers 140 cm par des voies de circulation privilégiées et se redistribue ensuite. Ces sols sont soumis à un engorgement temporaire pendant la saison des pluies, mais ils se dessèchent beaucoup plus que les sols rouges au cours de la saison sèche. La mise en culture accroît l'engorgement sur les sols beiges et le fait apparaître sur les sols rouges. Elle limite le dessèchement du sol en-dessous de 100 cm de profondeur, car le système racinaire des cultures est moins profond que celui de la végétation naturelle. Les pertes d'eau par

ruissellement et drainage sont évaluées dans tous les cas à 250 à 300 mm par an. Enfin, les variations annuelles de stock sur les deux premiers mètres sont de l'ordre de 200 à 250 mm. Sur le sol très sableux de Bambe, VACHAUD *et al.* (1982), puis CISSE (1986) ont montré que l'humidité pouvait évoluer sous culture jusqu'à une profondeur de 3 mètres, en raison d'une capacité de rétention faible (les variations annuelles de stock observées sur l'ensemble du profil ne dépassent pas 80 mm). De plus, CISSE a montré que les flux de drainage pouvaient être différents sous une même culture, en fonction de la fertilisation, sans que les propriétés hydrodynamiques du sol soient modifiées, illustrant ainsi clairement le rôle de la plante. Bien que travaillant dans un milieu plus humide (Cameroun), HUMBEL (1976) a obtenu des résultats assez proches. Pour tous les sols ferrallitiques rouges et profonds, le drainage est rapide et profond. Dans l'Adamaoua, avec 1600 mm de pluviométrie annuelle en une seule saison des pluies, le drainage de l'ordre de 500 à 800 mm par an. L'humidité des horizons superficiels en fin de saison sèche est inférieure à l'humidité au pF 4,2 sur plusieurs décimètres, voire 2 m en saison particulièrement sèche. L'humidité de fin de saison sèche constitue un "pôle stable" du pédoclimat pour les sols de la région soudanienne du Cameroun : la même humidité minimale est observée tous les ans. HUMBEL en déduit que les bilans hydriques doivent donc être calculés par rapport par rapport à l'état hydrique en fin de saison sèche. Mais les variations annuelles de stock sont beaucoup plus importantes au Cameroun qu'en Afrique de l'Ouest : 220 à 280 mm dans les zones soudanaises, 200 à 400 mm dans les zones de forêt. Ces chiffres semblent résulter d'une texture qui est plus argileuse que celle de la moyenne des sols de l'Afrique de l'Ouest (toujours plus de 50 % d'argile dans les horizons B), ainsi que d'une forte micro-structuration. Un des objectifs de cette étude est de caractériser *in situ* les mécanismes qui se succèdent au cours d'un cycle climatique annuel, en insistant sur le rôle d'une culture sur le fonctionnement hydrique.

La seconde question à résoudre est celle de **l'utilisation de l'eau par la culture**. Quels sont les besoins en eau du maïs NH1 au cours de son cycle physiologique ? Comment la plante réagit-elle à un stress hydrique ? Quelles sont les conséquences sur le rendement ?

L'étude des besoins en eau des cultures a été réalisée dans différentes stations agronomiques d'Afrique de l'Ouest à l'aide de mesures au champ ou en lysimètres. Dans son article de synthèse sur ce sujet, DANCETTE (1983) indique les besoins des principales plantes de la région des savanes par décennie, en les exprimant par rapport à l'évaporation du bac de classe A. Il indique les besoins de 3 variétés de maïs dont les cycles ont des durées du même ordre de grandeur que le cycle du maïs NH1 (entre 100 et 110 jours). Les valeurs décennales de coefficients culturaux proposées par DANCETTE passent par un maximum à l'époque de la floraison. Cette évolution de la demande est conforme aux résultats de tous les essais, qu'ils soient conduits au champ dans la lignée du travail de pionnier de TULAIKOV (1929) ou au laboratoire (MOUTONNET & COUCHAT, 1979). Cependant, les coefficients culturaux proposés pour le maïs ont tous été déterminés au Sénégal et au Burkina Faso sur des variétés différentes et sous des climats plus secs

que celui du Togo méridional. Il convenait donc de préciser ces besoins pour le maïs NH1 dans une zone climatique très différente.

Les relations entre le développement physiologique du maïs, ses besoins en eau et le rendement en grains ont fait l'objet d'un chapitre dans l'ouvrage de synthèse de SALTER & GOODE (1967). Un stress hydrique modéré au cours de la période comprise entre la germination et la floraison mâle ou sévère entre la germination et le stade 7-8 feuilles, produit une diminution de la quantité de matière sèche, mais ne réduit pas le rendement en grains. La plante est par contre très sensible à la sécheresse au cours de la période comprise entre la floraison mâle et le stade grain laiteux (ROBELIN, 1963). Au cours de cette période, un stress de deux jours peut réduire le rendement de 22 %, un stress de 6-8 jours peut le réduire de 50 % (ROBINS & DOMINGO, 1953). Entre le stade grain laiteux et la maturité, l'effet d'un stress hydrique est variable selon les variétés, mais il est beaucoup plus faible que lorsqu'il se produit au cours de la phase précédente (DENMEAD & SHAW, 1960). Ces connaissances ont été résumées par SALTER & GOODE (1967) : "...soil moisture conditions during the period of flowering and early grain formation are particularly critical in determining grain yield in maize." Il était donc important de vérifier si ces observations s'appliquent au cas étudié.

La dernière question concerne l'effet d'une carence potassique sur la consommation en eau du maïs. Le manque de potassium se traduit-il par une variation de la consommation en eau de la plante ? Si oui, d'où provient cette variation ? Peut-elle expliquer les différences de rendement observées entre la parcelle fertilisée et la parcelle non fertilisée ?

De nombreuses études, détaillées dans les synthèses de MENGEL & KIRKBY (1982) et de MARSCHNER (1986), ont porté sur le rôle physiologique du potassium vis-à-vis des transferts et des états de l'eau dans la plante. D'autres ont porté sur son incidence sur l'efficacité de l'eau (BLANCHET *et al.*, 1962 ; BRADBURY & MALCOLM, 1977). Pour la plante entière, les conclusions de ces études sont confuses, en raison probablement du grand nombre de mécanismes, différents selon les plantes, dans lesquels le potassium est impliqué (MORIZET & MARTEL, 1988). En effet, uniquement pour la transpiration foliaire, le potassium intervient directement à deux niveaux : sur le potentiel osmotique des cellules et sur la régulation stomatique.

Le potentiel osmotique agit sur la transpiration de la plante en déterminant la tension de l'eau dans les cellules des racines (donc l'absorption d'eau à partir du sol) et la tension de l'eau dans les feuilles (donc les échanges avec l'atmosphère). Le potassium est l'ion le plus abondant dans le cytoplasme et les sels de potassium sont les principaux responsables du potentiel osmotique des cellules (MARSCHNER, 1986). Il s'agit là d'un effet physique direct. Mais le potassium intervient également indirectement en activant des enzymes, en particulier celles qui sont responsables du transport membranaire qui lui-même régule la teneur en potassium dans le cytoplasme ("pompes"). Une carence en potassium peut donc provoquer par

simple effet osmotique une augmentation de l'évaporation des feuilles et une diminution du prélèvement hydrique des racines (BLANCHET *et al.*, 1962).

La régulation stomatique implique le potassium à deux niveaux dans le cas du maïs. En l'absence d'ensoleillement, les stomates sont maintenus fermés par la turgescence des cellules voisines, ce qui est un mécanisme spécifique au maïs. Une carence en potassium pourrait donc provoquer une évaporation nocturne qui n'apparaît pas lorsque la fertilisation est correcte. Mais par ailleurs l'ouverture des stomates durant les phases d'ensoleillement nécessite un afflux de potassium dans les cellules de garde (phénomène souvent mis en évidence, en particulier par HUMBLE & HSIAO, 1970). Une carence en potassium peut donc limiter la transpiration diurne. Ces mécanismes antagonistes peuvent expliquer que des apports de potassium provoquent selon les cas une augmentation de la transpiration du maïs (MOTTRAM, 1985) ou une diminution (ADETORO, 1990)

Cette revue simplifiée des modes d'action du potassium sur la transpiration du maïs montre la complexité du problème. En l'absence d'étude spécifique de la physiologie de la plante au cours de l'expérimentation, il n'est pas envisageable de définir les mécanismes qui interviennent dans le cas étudié. L'interprétation aura donc pour but de proposer un schéma qui soit cohérent avec les observations réalisées et qui permette d'expliquer en quoi "la fertilisation potassique permet de sauver la récolte de maïs", pour reprendre l'expression de LATRILLE (comm. pers.).

Pour étudier ces différents problèmes, deux méthodes complémentaires ont été utilisées. La première méthode a consisté à étudier les flux et les bilans au niveau parcellaire pendant la durée d'étude. Celle-ci a été conduite en évaluant les différents termes de l'équation de conservation de la masse :

$$P = R + \text{Variation de stock} + D + \text{ETR}$$

P : pluviométrie
R : ruissellement
D : drainage
ETR : évapotranspiration

Pour mesurer la pluviométrie, un pluviomètre et un pluviographe étaient disposés à moins de cinquante mètres de la parcelle la plus éloignée.

Le ruissellement a été supprimé sur les parcelles étudiées en les entourant d'une tôle métallique enfoncée de quelques centimètres dans le sol. Cette simplification du bilan est justifiée ici. En effet, les études d'infiltration à l'aide de la simulation de pluie ont montré que du ruissellement apparaissait sur les zones cultivées en raison de la formation de réorganisations superficielles au cours des pluies (PLEUVRET, 1989 ; POSS *et al.*, 1989-1990). Dans les zones en pente le phénomène peut être important ; des problèmes de ruissellement et d'érosion apparaissent effectivement sur certains versants. Mais sur tous les plateaux à pente très faible qui constituent la majeure partie des terres de Barre, le ruissellement ne provoque qu'une concentration des eaux dans des zones déprimées, sur une échelle qui ne dépasse pas quelques dizaines de mètres. Ce ruissellement très faible est d'ailleurs attesté par la quasi-absence de réseau de drainage dans toute la région. Supprimer le ruissellement sur les parcelles revenait donc à concentrer sur une petite

surface un phénomène qui existe à une échelle légèrement supérieure et donc à évaluer des flux moyens qui sont spatialement plus hétérogènes dans le milieu naturel.

Les variations de stock hydrique ont été mesurées à l'aide d'un humidimètre à neutrons sur 4 tubes par parcelle (chapitre III). La détermination des teneurs en eau et des stocks à l'aide des humidimètres à neutrons pose de délicats problèmes d'étalonnage et de calcul qui conditionnent largement la fiabilité des résultats obtenus : une estimation de la précision de la méthode est donc indispensable.

L'évaluation du drainage au champ est délicate. Lorsque le sol ne doit pas être perturbé, ce qui est le cas de l'essai étudié ici, la seule méthode utilisable repose sur l'utilisation de la loi de Darcy, qui relie par une formule proche de celle de la loi d'Ohm les flux et les gradients de charge hydraulique. La différence entre la loi de Darcy et la loi d'Ohm provient des variations de la résistance du sol en fonction de son état hydrique ; c'est pourquoi la caractérisation des paramètres de la relation est délicate et les résultats obtenus sont affectés d'une incertitude élevée.

Le seul paramètre qui ne soit pas déterminé expérimentalement est l'évapotranspiration. Elle ne peut être connue que par différence entre tous les autres termes ; la précision de son évaluation dépend donc de la précision obtenue sur tous les autres. L'importance de la précision des mesures sur la fiabilité des résultats est telle qu'un chapitre complet lui est consacré (chapitre V).

Une étude sur quelques années permet de préciser des mécanismes et des ordres de grandeur, mais elle ne permet pas d'extrapoler, ni dans le temps, ni dans l'espace. C'est pourquoi une deuxième méthode a été utilisée : la simulation du bilan hydrique. Dans un premier temps, les résultats expérimentaux ont été utilisés pour caler un modèle de simulation du bilan hydrique. Ce modèle a ensuite permis de simuler les bilans sur de longues périodes de temps et dans différents lieux. Parmi les différentes utilisations d'un tel outil, deux seulement sont développées ici. La première est l'évaluation du fonctionnement du sol sur une longue période, en précisant en particulier les flux de drainage dont la connaissance est nécessaire pour estimer les flux minéraux. La seconde concerne les recommandations agronomiques qu'il permet de formuler, à propos du choix des variétés et des dates de semis.

Le chapitre V est consacré à l'étude de la précision des mesures de stocks hydriques et de drainage. L'étude des transferts de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère est abordée dans le chapitre VI en intégrant les données sur la croissance de la plante (chapitre IV), ce qui permet d'établir le bilan hydrique (chapitre VII).

LA PRÉCISION DES MESURES RÉALISÉES A L'AIDE DES HUMIDIMÈTRES A NEUTRONS ET DES TENSIOMÈTRES

1. INTRODUCTION

Pour caractériser l'hydrodynamique dans les sols, deux paramètres sont délicats à évaluer : l'humidité dans les différents horizons, dont sont déduits les stocks hydriques, et les quantités drainées à la base du sol.

Au cours de cette étude, l'évolution de l'humidité du sol au cours du temps a été suivie à l'aide d'humidimètres à neutrons. L'objectif étant de mettre en évidence des différences de comportement hydrique entre trois parcelles, il était nécessaire d'obtenir une précision sur les variations de stocks hydriques de l'ordre de 1 mm.j^{-1} . Or, sur la profondeur colonisée par les racines du maïs, le stock hydrique est d'environ 300 mm. Il était donc nécessaire de mettre en évidence des variations quotidiennes de stock largement inférieures à 1 % du stock total.

C'est un défi, car les mesures effectuées à l'aide d'humidimètres à neutrons sont soumises à de nombreuses sources d'erreurs. Les erreurs proviennent de l'appareil lui-même : émission aléatoire des neutrons, précision de l'électronique et du positionnement dans le sol. Elles proviennent de la nécessité d'utiliser une droite d'étalonnage pour convertir les comptages neutroniques mesurés en humidités volumiques. Elles proviennent également de la méthode d'intégration utilisée pour calculer les stocks hydriques dans un profil de sol à partir de mesures discrètes d'humidités. Elles proviennent enfin de la difficulté d'intégrer la variabilité spatiale des teneurs en eau et de leurs variations à l'aide de quelques tubes d'accès.

De nombreux auteurs ont étudié ces différentes sources d'erreurs, en particulier celles liées à l'utilisation de droite d'étalonnage. Une première synthèse, réalisée par SINCLAIR & WILLIAMS (1979), a permis d'améliorer l'estimation des erreurs et d'augmenter l'efficacité des réseaux de mesure (GREACEN, 1981). Une étude plus complète a ensuite fait l'objet des publications de HAVERKAMP *et al.*, 1984 et VAUCLIN *et al.*, 1984. Ces articles, sur lesquels s'appuient les expérimentations actuelles, proposent une méthode d'approche permettant d'estimer la plupart des erreurs affectant la détermination des valeurs de teneurs en

eau et de stocks hydriques. Mais l'estimation des erreurs sur les variations des teneurs et des stocks, partiellement développée dans l'article de SINCLAIR & WILLIAMS (1979), n'y a pas été reprise.

Les paragraphes n°2 à 7 de ce chapitre sont consacrés à l'évaluation, à partir de la méthode déjà publiée, des erreurs affectant les mesures des teneurs en eau et des stocks hydriques et au développement de nouveaux calculs statistiques pour estimer les erreurs sur leurs variations.

Pour déterminer *in situ* les quantités qui percolent à une profondeur donnée dans le sols, les premières expérimentations ont reposé sur l'utilisation des lysimètres. Leur usage s'est largement répandu en Afrique de l'Ouest, en particulier sous l'impulsion de ROOSE (ROOSE, 1981). Fiables, économiques et relativement simples d'emploi, ils permettent d'obtenir une estimation des flux hydriques. Ils présentent cependant l'inconvénient de ne collecter que l'eau gravitaire. En effet, comme il n'existe pas de lien capillaire entre l'eau contenue dans le lysimètre et le sol environnant, les transferts d'eau sous tension sont stoppés et le drainage sous-évalué.

Lorsque l'humidimètre à neutrons a permis de réaliser des mesures non destructives de l'humidité du sol, il a été possible d'appliquer la loi de Darcy généralisée pour évaluer le drainage à une cote donnée dans un sol non saturé (ROSE *et al.*, 1965). HILLEL *et al.* (1972) ont ensuite défini un protocole de mesure de la conductivité hydraulique lorsqu'il n'existe aucun flux d'évaporation à la surface du sol (méthode du "drainage interne") ; VACHAUD *et al.* (1978) ont fait de même dans le cas où il existe un flux d'évaporation lorsque le niveau du plan de flux nul dans le sol peut être déterminé (méthode du "bilan naturel"). En vue d'alléger les calculs, LIBARDI *et al.* (1980) ont montré que, dans certains cas, la décroissance de l'humidité volumique du sol et la décroissance du stock hydrique à la suite d'un apport d'eau étaient proportionnelles au logarithme du temps. Cette relation entre l'humidité (ou le stock) et le logarithme du temps a ensuite été retrouvée dans de nombreux cas (VACHAUD *et al.*, 1981 ; VIEILLEFON, 1983...) et le principe de dépouillement défini par LIBARDI *et al.* est maintenant d'utilisation courante.

Ces méthodes reposent toutes sur l'évaluation des conductivités à une date donnée en fonction de l'humidité volumique à la profondeur à laquelle le drainage doit être estimé. Dans le cas de sols argileux, comme les terres de Barre à 150 cm (45 % d'argile), de faibles variations d'humidité peuvent conduire à des variations de conductivités hydrauliques de plusieurs ordres de grandeur (POSS & SARAGONI, 1987). Il peut alors être préférable de déduire les valeurs de conductivité en utilisant les valeurs des tensions (relations $K(h)$), comme l'avait fait RICHARDS (1931) dans sa première publication sur l'application de l'équation de Darcy aux milieux non saturés. Cette méthode pose cependant le problème de l'hystérèse des valeurs de tension : elle ne peut s'appliquer que dans les cas où elle est négligeable, ce qui est souvent le cas pour les niveaux argileux.

Nous allons donc chercher, dans le 8ème paragraphe de ce chapitre, à quantifier la précision des valeurs de quantité d'eau drainée que l'on obtient en utilisant la loi de Darcy, le coefficient de conductivité hydraulique étant déduit soit des valeurs d'humidité volumique, soit des valeurs de tension.

2. LES DROITES D'ÉTALONNAGE DES HUMIDIMETRES ET LEUR PRÉCISION

2.1. Théorie

Pour la plupart des humidimètres à neutrons et pour un matériau pédologique donné, le comptage neutronique et l'humidité volumique des sols sont reliés par une relation linéaire (GARDNER & KIRKHAM, 1952). Il faut donc évaluer cette relation pour chaque matériau, la relation étant ensuite utilisée pour déduire les valeurs d'humidité à partir des comptages.

La droite d'étalonnage est classiquement représentée par l'équation suivante :

$$\theta = a_0 + a_1 n + e$$

θ : humidité volumique

n : rapport de comptage (rapport de p mesures dans le sol et de q mesures dans un milieu standard, généralement de l'eau)

a_0 et a_1 : ordonnée à l'origine et pente de la droite de régression entre les humidités volumiques et les rapports de comptage

e : erreur aléatoire de distribution normale et d'espérance mathématique nulle

L'évaluation des paramètres a_0 et a_1 pose le problème du type de régression à utiliser. Pour effectuer une régression linéaire entre deux variables X et Y , si une des variables est connue sans erreur, elle doit être choisie comme variable indépendante ; c'est donc la variable connue sans erreur qui détermine le sens de la régression :

- si X est connue sans erreur

$$a_1 = \frac{s(X,Y)}{s^2(X)}$$

$$Y = a_0 + a_1 X$$

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X}$$

- si Y est connue sans erreur

$$a'_1 = \frac{s(Y,X)}{s^2(Y)}$$

$$X = a'_0 + a'_1 Y$$

$$a'_0 = \bar{X} - a'_1 \bar{Y}$$

- les variables marquées en gras sont les estimateurs des valeurs vraies.

- $s(X,Y)$: estimateur de la covariance de X et Y

- $s^2(X)$: estimateur de la variance de X

- $s^2(Y)$: estimateur de la variance de Y

- \bar{Y} : moyenne des Y (estimateur de la moyenne)

- \bar{X} : moyenne des X (estimateur de la moyenne)

La relation $X = f(Y)$ peut ensuite être utilisée comme droite d'étalonnage en $Y = f(X)$. Cette méthode est utilisée en particulier pour les appareils de mesure qui sont étalonnés pour des valeurs connues d'une variable (une concentration en un élément, par exemple).

Lorsqu'aucune des deux variables X et Y n'est connue sans erreur (cas de l'humidité volumique θ et des rapports de comptage n), les équations précédentes ne sont pas utilisables : les coefficients qu'elles permettent de calculer sont biaisés (SNEDECOR & COCHRAN, 1971 ; GREACEN, 1981 ; WEBSTER, 1989). Une approche permettant une estimation non biaisée des différents paramètres et de leurs erreurs associées a été développée par HAVERKAMP *et al.* (1984). Les calculs des coefficients des droites d'étalonnage ont été réalisés à partir des formules présentées dans cette publication.

2.1.1. MODELE

$$\begin{aligned} n &= n + u && - n \text{ et } \theta : \text{estimateurs de } n \text{ et } \theta \\ \theta &= \theta + v && - u \text{ et } v : \text{erreurs de mesure de } n \text{ et } \theta, \text{ d'espérance mathématique} \\ \theta &= a_0 + a_1 n && \text{nulle, de distribution normale et de variance estimée } s^2(u) \text{ et } s^2(v) \end{aligned}$$

2.1.2. ESTIMATEURS DES PARAMETRES D'ÉTALONNAGE

$$a_1 = \frac{s(n, \theta)}{s^2(n) - \frac{m-2}{m-1} s^2(u)} \quad \begin{aligned} &- s(n, \theta) : \text{estimateur de la covariance de } n \text{ et } \theta \\ &- s^2(n) : \text{estimateur de la variance de } n \\ &- m : \text{nombre de couple de mesures} \end{aligned}$$

$$a_0 = \bar{\theta} - a_1 \bar{n} \quad \begin{aligned} &- \bar{\theta} \text{ et } \bar{n} : \text{moyennes des } \theta \text{ et des } n \end{aligned}$$

2.1.3. VARIANCES ASSOCIÉES AUX PARAMETRES D'ÉTALONNAGE

$$s^2(e) = \frac{m-1}{m-2} [s^2(\theta) - a_1 s(n, \theta)] - s^2(v) \quad \begin{aligned} &- s^2(e) : \text{variance résiduelle} \\ &- s^2(a_1) \text{ et } s^2(a_0) : \text{variance estimée de} \\ &\quad a_1 \text{ et } a_0 \end{aligned}$$

$$s^2(a_1) = \frac{s^2(e)}{(m-1) s^2(n) - (m-2) s^2(u)} \quad \begin{aligned} &- s(a_0, a_1) : \text{covariance estimée de } a_0 \text{ et} \\ &\quad a_1 \end{aligned}$$

$$s^2(a_0) = \frac{1}{m} \sum n^2 s^2(a_1)$$

$$s(a_0, a_1) = - \frac{1}{m} \sum n s^2(a_1)$$

2.2. Méthode utilisée

Les couples de valeurs de comptage neutronique et d'humidité volumique ont été obtenus au champ (étalonnage gravimétrique). Pour les différents sites, des prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés à la mise en place de tubes d'accès pour toutes les profondeurs (2 échantillons par niveau) et leur humidité déterminée par passage à l'étuve à 105 °C pendant plusieurs jours. Dès que le trou de tarière était terminé, le tube était mis en place et des mesures à l'humidimètre effectuées (3 mesures en "temps long" à chaque niveau). Le ressuyage du sol a ensuite été suivi après une campagne de simulation de pluie qui avait humidifié le profil jusqu'à plus de 2 mètres. Les mesures ont été réalisées pendant une semaine, avec un espacement entre mesures approximativement logarithmique, afin d'obtenir des valeurs d'humidité régulièrement espacées (l'évolution des humidités suit généralement une loi logarithmique en fonction du temps). Les échantillons de terre ont été prélevés à la tarière dans un rayon de quelques mètres autour du tube d'accès. Des couples de valeurs dans la gamme des faibles humidités ont été obtenus en démontant le dispositif en fin de saison sèche. Après une dernière mesure à l'humidimètre, les tubes ont été retirés et une fosse a été ouverte le long du tube afin de prélever des échantillons de sol à proximité immédiate de l'emplacement du tube. La périodicité des mesures généralement retenue pour établir les droites d'étalonnage figure dans le tableau V.1.

TABLEAU V.1
Périodicité des mesures de couple (w,n)

	Temps après la fin des pluies simulées						
Pose	0	15 mn	30 mn	1 heure	6 heures	7 jours	extraction

Les valeurs d'humidité massique w ont ensuite été transformées en humidités volumiques θ à l'aide des valeurs de densité apparente de chaque niveau ($\theta = w \cdot da$) déterminées à l'aide de cylindres de 250 cm³ (chapitre I). Pour chaque niveau, les couples (θ , n) ont été représentés graphiquement. Par superposition de graphes, des ensembles homogènes de profondeurs ont été définis.

Sur chacun des ensembles, les paramètres de la droite d'étalonnage spécifique $\theta = a_0 + a_1 n$ ont été calculés à l'aide de trois méthodes :

- la régression linéaire classique $\theta = f(n)$, qui suppose que n est connu sans erreur de mesure.
- la régression linéaire $n = f(\theta)$, ensuite inversée, selon la méthode préconisée par GREACEN, (1981). Cette méthode suppose que θ est connu sans erreur.
- la régression sans biais $\theta = f(n)$ qui prend en compte les erreurs de détermination sur θ et sur n , à l'aide des formules de HAVERKAMP *et al.*, 1984.

Les résultats obtenus à l'aide de la méthode biaisée seront donc comparés à ceux de la méthode non biaisée.

2.3. Résultats et discussion

2.3.1. LES DIFFÉRENTS ENSEMBLES D'HORIZONS

La superposition des nuages de points correspondant aux couples (θ, n) a permis d'aboutir aux résultats suivants :

- les valeurs de l'horizon 0-10 constituent un ensemble bien individualisé avec des pentes fortes (figure V.1) ;
- les valeurs pour tous les niveaux compris entre 10 cm et 2 mètres peuvent être regroupées (figure V.2).

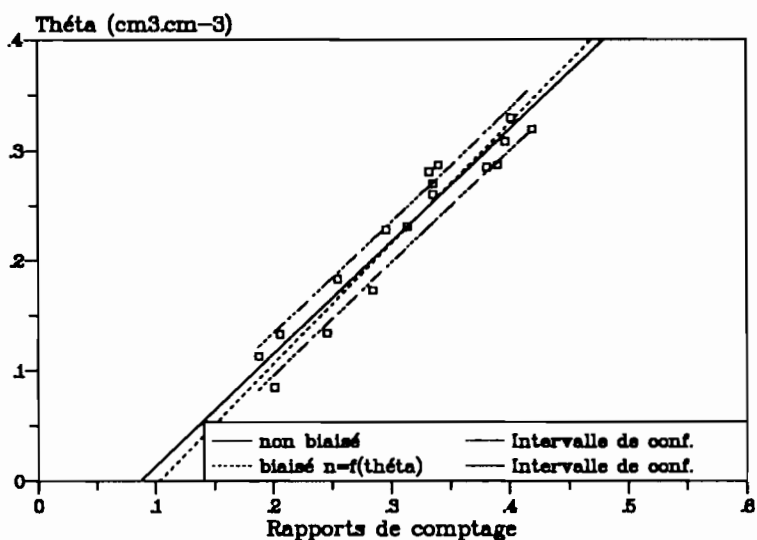


FIGURE V.1
Etalonnage de l'humidimètre pour l'horizon de surface (régression biaisée, régression non biaisée et intervalle de confiance de la régression non biaisée)

Le calcul des paramètres a été également effectué sur la tranche 0-20 cm, en considérant que la valeur réalisée à l'humidimètre à 15 cm était représentative de la tranche 0-20 cm. Dans les calculs ultérieurs les coefficients déterminés sur la tranche 0-10 cm et la tranche 10-200 cm seront toujours utilisés, sauf pour une étude spécifique portant sur l'intérêt de mesures à 5 cm (paragraphe 5.2.2.).

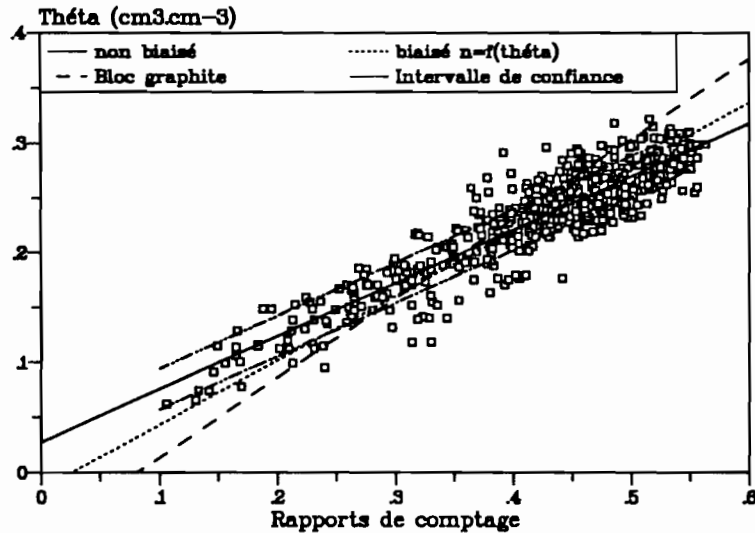


FIGURE V.2

Etalonnage de l'humidimètre pour les horizons de profondeur (régression biaisée, régression non biaisée, étalonnage graphite et intervalle de confiance de la régression non biaisée)

2.3.2. PARAMETRES DES DROITES OBTENUS PAR LA MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE

L'ensemble des paramètres des droites de régression a été reporté dans le tableau V.1. Les points de mesure et les droites biaisées et non biaisées (avec plus ou moins un écart-type sur la détermination d'une valeur de θ) obtenus ont été représentés sur les figures V.1 et V.2.

Pour l'ensemble des horizons étudiés, il n'apparaît pas de différence pour la pente et l'ordonnée à l'origine entre la régression non biaisée et la régression biaisée $\theta = f(n)$. Cela provient de ce que le seul facteur différent dans le calcul de ces paramètres est la variance sur les valeurs du rapport de comptage. Or, le protocole de détermination des comptages neutroniques était conçu pour minimiser cette variance (6 comptages en temps long dans l'eau encadrant chaque série de mesures, 3 comptages en temps long à chaque niveau dans le sol) : dans tous les cas (même pour les valeurs $n = 0,5$), l'écart-type reste inférieur à $2,5 \cdot 10^{-3}$. En revanche, la précision sur la pente de la droite, estimée par la variance de la pente ($s^2(a_1)$), est améliorée d'environ 30 % lorsque la corrélation non biaisée est effectuée.

TABLEAU V.2
Paramètres des droites d'étalonnage en fonction du type de régression utilisé ($\theta = a_0 + a_1 n$, θ en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ et n en rapport de comptage)

Méthodes et prof.	nbre couples	r	régression	a_1	a_0	$10^5 s^2(a_1)$	$10^5 s^2(a_0)$	$10^5 s(a_0, a_1)$	$10^5 s^2(e)$
Gravimétrique 0-10 cm	17	0,966	non biaisée	1,017	-0,088	357	36,8	-112	31,3
			$\theta = f(n)$	1,017	-0,088	498	-	-	-
			$n = f(\theta)$	1,090	-0,112	-	-	-	-
0-20 cm	15	0,941	non biaisée	0,553	0,042	223	21,4	-65,4	33,5
			$\theta = f(n)$	0,553	0,042	304	-	-	-
			$n = f(\theta)$	0,625	0,021	-	-	-	-
10-200 cm	508	0,908	non biaisée	0,484	0,027	7,27	1,33	-3,03	33,6
			$\theta = f(n)$	0,484	0,027	9,88	-	-	-
			$n = f(\theta)$	0,597	-0,015	-	-	-	-
Bloc graphite 25-45 cm 55-85 cm				0,738	-0,066				
				0,738	-0,081				

L'utilisation de la corrélation $n = f(\theta)$ donne une valeur de pente qui n'est pas significativement différente (même au seuil de 20 %) pour le niveau 0-10 cm, où les paramètres d'observation sont peu dispersés, mais qui est différente (au seuil 1 %) pour le niveau jachère 10-200 cm, qui présente une dispersion plus importante. Ces résultats sont des conséquences immédiates des formules de calcul.

Lorsque l'on compare la variance sur la pente ($s^2(a_1)$), sur l'ordonnée à l'origine ($s^2(a_0)$) et sur la covariance ($s(a_0, a_1)$) entre la surface et la profondeur, on constate une diminution d'un facteur de l'ordre de 30 en profondeur (CV sur la pente : 6 % pour 0-10 cm et 2 % pour 10-200 cm), alors que la dispersion des points augmente, car le nombre de couples de mesures apparaît au dénominateur dans les formules de calcul de ces paramètres.

2.3.3. COMPARAISON AVEC LA MÉTHODE DU BLOC GRAPHITE

Une comparaison avec les paramètres obtenus par l'étalonnage au bloc graphite (COUCHAT, 1974 : COUCHAT *et al.*, 1975) a été tentée. Comme les paramètres sont donnés pour des tubes en aluminium et que les tubes utilisés étaient en PVC (diamètre extérieur 45 mm, épaisseur 1,8 mm), il a été nécessaire d'établir une corrélation entre les mesures réalisées avec les deux types de tube. Pour cela, des mesures ont été effectuées au même endroit et aux mêmes profondeurs avec les deux types de tube, en sol sec et humide. Le protocole utilisé comportait 3 mesures en temps long dans l'eau avant et après chaque série de mesures et 2 répétitions en temps long à chaque profondeur. Deux corrélations ont été établies, en effectuant la régression non biaisée prenant en compte la variance sur les deux mesures (variance du comptage et variance de repositionnement, Cf. plus loin) :

- une régression sur les valeurs des comptages (notées N)
- une régression sur les rapports de comptage (notées n, avec $n = \frac{N_{\text{sol}}}{N_{\text{eau}}}$, figure V.3).

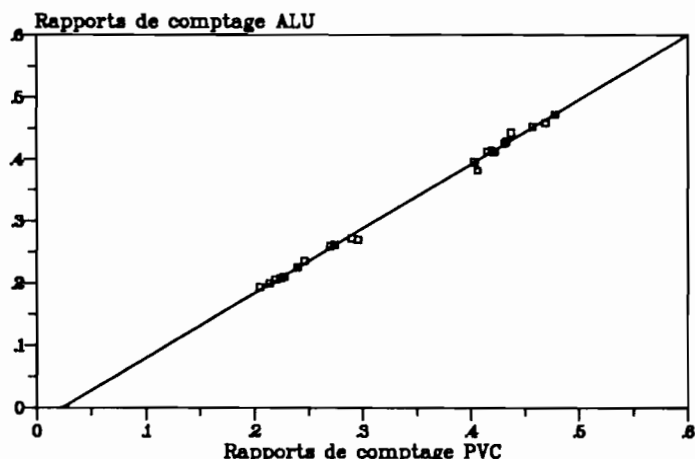


FIGURE V.3

Relation entre les rapports de comptage obtenus dans les tubes en aluminium et dans les tubes en PVC

Les résultats sont les suivants :

$$N_{\text{alu}} = 1,24 N_{\text{pvc}} - 17 \quad (r = 0,999 \quad n = 25)$$

$$n_{\text{alu}} = 1,04 n_{\text{pvc}} - 0,024 \quad (r = 0,998 \quad n = 23)$$

Ces résultats montrent que la diminution du comptage liée à l'absorption par le PVC n'est ni constante, ni proportionnelle aux comptages (tableau V.3). Lorsque les rapports de comptage sont utilisés, les différences de valeur entre les deux types de tube sont plus faibles (tableau V.4).

TABLEAU V.3
Exemple de valeurs de comptage obtenues en tube aluminium et tube PVC

N_{alu}	231	603	975
N_{pvc}	200	500	800
Variation (%)	- 13	- 17	- 22

TABLEAU V.4
Exemple de rapports de comptage obtenus en tube aluminium et tube PVC

n_{alu}	0,184	0,496
n_{pvc}	0,200	0,500
Variation (%)	+ 9	+ 1

Ces valeurs sont liées au type de PVC utilisé, à l'épaisseur de la paroi et au diamètre du tube. Il n'est donc pas possible de généraliser ces résultats. Les équations permettent de transformer les coefficients de la droite d'étalonnage obtenus au bloc graphite au cas de tubes en PVC. Les valeurs ont été reportées dans le tableau V.1 et la droite correspondante tracée sur la figure V.2. Il apparaît que la droite fournie par l'étalonnage au bloc graphite traverse le nuage de points de l'étalonnage gravimétrique, mais que la pente est très différente de celle obtenue sur les valeurs de l'étalonnage gravimétrique à l'aide de la régression non biaisée (+ 52 %). Comme l'étalonnage au bloc graphite a été effectué sur deux échantillons avec des résultats identiques, une erreur de manipulation semble à écarter. Il est donc probable que le modèle utilisé pour passer des paramètres obtenus au bloc graphite aux paramètres de la droite d'étalonnage, qui donne

de bons résultats pour les sols de climats tempérés (VACHAUD *et al.*, 1977), ne s'applique pas aux sols étudiés ici.

2.4. Conclusion : optimisation de la méthode gravimétrique

Comme pour toute courbe d'étalonnage, les couples de valeurs qui servent à déterminer les paramètres doivent couvrir l'ensemble des valeurs qui sont observées sur le terrain. Il est donc indispensable de disposer de mesures en conditions très humides et très sèches. Le suivi du ressuyage du sol à la suite d'un apport d'eau fournit une méthode efficace pour caractériser le sol humide. Différents essais ont montré qu'il était possible d'obtenir ainsi des valeurs dont la dispersion était plus faible que lorsque l'on prélève des échantillons à différentes époques de l'année. Pour obtenir le pôle le plus sec de la gamme d'étalonnage, il est souvent nécessaire d'attendre l'extraction du tube, car il est en général difficile d'effectuer en conditions sèches un trou à la tarière permettant des mesures d'humidité.

Lorsque l'on effectue les calculs de régression, le nombre de couples apparaît au dénominateur de plusieurs paramètres de variance : la précision de l'étalonnage augmente avec le nombre de couples. Une quinzaine de couples semble un minimum, augmenter ce nombre est souhaitable. La méthode la plus simple est de prélever des échantillons à la tarière à plusieurs niveaux. Cette méthode permet en outre de vérifier l'identité des courbes pour les niveaux successifs.

Dans la méthode de régression non biaisée, qui doit être utilisée chaque fois que la détermination des deux paramètres est entachée d'erreurs, les variances sur les deux paramètres jouent un rôle analogue. Il est donc inutile d'améliorer la précision sur un des paramètres si celle sur l'autre ne l'est pas. Dans le cas étudié, la variance sur θ est beaucoup plus élevée que celle sur n . Il aurait donc été préférable d'effectuer moins de répétitions avec l'humidimètre (effectuer une seule répétition au lieu de trois multiplie la variance par trois), et d'augmenter le nombre de prélèvements gravimétriques (un seul prélèvement était effectué, il aurait été préférable d'en faire plus). La variance sur θ est cependant toujours plus élevée que celle sur n , étant donné la différence d'ordre de grandeur.

En conclusion, pour effectuer un étalonnage gravimétrique en optimisant la précision, la meilleure méthode semble d'étudier le ressuyage du sol humide, simultanément à l'aide de mesures neutroniques et de prélèvements gravimétriques à la tarière, ce qui permet de parcourir la gamme des humidités élevées. Une seule mesure à l'humidimètre est suffisante, à condition d'effectuer fréquemment des mesures de point eau pour corriger les éventuelles dérives de l'appareil. Il est souhaitable d'effectuer plusieurs prélèvements gravimétriques correspondant à plusieurs trous de tarière à chaque prélèvement. Pour accéder aux faibles humidités, le plus aisé est généralement de procéder à l'extraction des tubes à la fin d'une période de sécheresse. Lors de cette opération, l'implantation correcte des tubes peut également être vérifiée et les mesures de densités apparentes effectuées à proximité du tube.

3. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE L'HUMIDITÉ A UNE PROFONDEUR ET A UNE DATE DONNÉES

3.1. Cas des mesures sur un seul tube

3.1.1. THÉORIE

Le but de ce paragraphe est d'estimer les variances des teneurs en eau déterminées à l'aide de l'humidimètre à neutrons sur un tube d'accès donné. Pour y parvenir, les résultats de HAVERKAMP *et al.* (1984) doivent être complétés.

L'équation d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons utilisé pour un niveau donné est linéaire et elle peut s'exprimer par :

$$\theta = a_0 + a_1 n + e \quad (1)$$

θ : humidité volumique
 n : rapport de comptage (mesure dans le sol/mesure dans l'eau)
 a_0 et a_1 : ordonnée à l'origine et pente de la droite de régression
 e : erreur aléatoire d'espérance mathématique $E(e) = 0$ et de variance $\text{Var}(e)$ constante (hypothèse d'homoscedasticité, SNEDECOR & COCHRAN, 1971, p. 156)

En pratique, seule une estimation de la droite de corrélation peut être établie :

$$\theta = a_0 + a_1 n \quad (2)$$

a_0 : estimateur de a_0 , tel que $E(a_0) = a_0$
 a_1 : estimateur de a_1 , tel que $E(a_1) = a_1$
 n : estimateur de n , tel que $E(n) = n$
 avec $n = n + u$
 u : erreur aléatoire d'espérance mathématique $E(u) = 0$ et de variance $\text{Var}(u)$ quelconque

Il faut estimer la variance de la valeur estimée de θ (notée θ), correspondant à une mesure à l'humidimètre ayant donné un rapport de comptage n , estimateur de la valeur vraie n .

En soustrayant (1) et (2) :

$$\theta - \theta = a_0 - a_0 + a_1 n - a_1 n + e$$

ou

$$\theta - \theta = a_0 - a_0 + a_1 (n - n) + n (a_1 - a_1) + e \quad (3)$$

Cette formule permet de vérifier que θ est un estimateur sans biais de θ , étant donné que l'espérance mathématique de $E(\theta - \theta)$ est zéro. Pour estimer la variance de θ , il faut calculer $E[(\theta - \theta)^2]$ et en trouver un estimateur.

En élevant (3) au carré :

$$(\theta - \theta)^2 = (a_0 - a_0)^2 + a_1^2 (n - n)^2 + n^2 (a_1 - a_1)^2 + e^2 + 2(a_0 - a_0) a_1 (n - n) + 2(a_0 - a_0) n (a_1 - a_1) + 2e(a_0 - a_0) + 2a_1 (n - n) n (a_1 - a_1) + 2a_1 (n - n) e + 2n(a_1 - a_1) e$$

L'espérance mathématique de $(\theta - \theta)^2$ est la somme des espérances mathématiques de chacun des termes. Comme l'espérance mathématique du produit de deux variables indépendantes est le produit de leurs espérances mathématiques, que e est indépendante de a_0 , a_1 et n et que n est indépendant de a_0 et de a_1 :

$$\begin{aligned} \text{Var}(\theta) = E[(\theta - \theta)^2] &= E[(a_0 - a_0)^2] + E(a_1^2) E[(n - n)^2] + n^2 E[(a_1 - a_1)^2] + E(e^2) \\ &+ 2 E[(a_1)(a_0 - a_0)] E(n - n) + 2 n E[(a_0 - a_0)(a_1 - a_1)] \\ &+ 2 E(e) E(a_0 - a_0) + 2 n E(n - n) E[(a_1 - a_1) a_1] \\ &+ 2 E(e) E(a_1) E(n - n) + 2 E(e) n E(a_1 - a_1) \end{aligned}$$

Comme $E(e) = 0$ et que a_0 , a_1 et n sont des estimateurs non biaisés de a_0 , a_1 et n :

$$\text{Var}(\theta) = \text{Var}(a_0) + E(a_1^2) \text{Var}(n) + n^2 \text{Var}(a_1) + \text{Var}(e) + 2 n \text{Cov}(a_0, a_1)$$

Or :

$$E(a_1^2) = \text{Var}(a_1) + [E(a_1)]^2$$

et

$$E(a_1) = a_1 \tag{4}$$

$$\text{Var}(\theta) = \text{Var}(a_0) + [\text{Var}(a_1) + a_1^2] \text{Var}(n) + n^2 \text{Var}(a_1) + \text{Var}(e) + 2 n \text{Cov}(a_0, a_1) \tag{5}$$

Il faut trouver un estimateur de la variance de θ , $s^2(\theta)$. Pour chacun des termes de la somme, les variances peuvent être remplacées par leurs estimateurs non biaisés notés s^2 . Pour estimer le produit des variances $\text{Var}(a_1) \text{Var}(n)$, les formules de GOODMAN (1960) ont été utilisées :

$$\text{Var}(a_1) \text{Var}(n) = \text{Var}(a_1 n) - [E(a_1)]^2 \text{Var}(n) - [E(n)]^2 \text{Var}(a_1) \tag{6}$$

$$s^2(a_1 n) = a_1^2 s^2(n) + n^2 s^2(a_1) - s^2(n) s^2(a_1) \tag{7}$$

D'où :

$$\text{Var}(\theta) = \text{Var}(a_0) + \text{Var}(a_1 n) + 2 n \text{Cov}(a_0, a_1) + \text{Var}(e)$$

Un estimateur non biaisé de la variance de θ est donc :

$$\boxed{s^2(\theta) = s^2(a_0) + [a_1^2 - s^2(a_1)] s^2(n) + n^2 s^2(a_1) + 2 n s(a_0, a_1) + s^2(e)} \tag{8}$$

Cette formule est identique, aux notations près, à celle fournie par SINCLAIR & WILLIAMS (1979) puis HAVERKAMP *et al.* (1984).

La variance sur les comptages $s^2(n)$ provient de l'émission neutronique (variance notée s_1^2) et de l'erreur de repositionnement de la source dans le sol (notée s_r^2). Il faut estimer cette variance :

$$n = \frac{N_{\text{sol}}}{N_{\text{eau}}} \quad \begin{array}{l} N_{\text{sol}} : \text{comptage dans le sol,} \\ N_{\text{eau}} : \text{comptage dans l'eau.} \end{array}$$

Les formules développées par KENDALL et STUART (1963) permettent d'évaluer la variance d'un rapport :

$$s^2(n) = \left[\frac{N_{\text{sol}}}{N_{\text{eau}}} \right]^2 \left[\frac{s^2(N_{\text{sol}})}{N_{\text{sol}}^2} + \frac{s^2(N_{\text{eau}})}{N_{\text{eau}}^2} \right] \tag{9}$$

Les comptages neutroniques suivent une loi de Poisson en raison de l'émission aléatoire des neutrons (Van BAVEL *et al.*, 1956), ce qui a été vérifié pour l'appareil utilisé (POSS, 1984). La variance est donc

proportionnelle aux comptages. Avec l'humidimètre SOLO 25 Nardeux utilisé en temps long, le constructeur indique que la variance des comptages, liée à l'émission neutronique, est donnée par :

$$s_i^2(N) = \frac{N}{40}$$

Lorsque plusieurs répétitions sont effectuées, la variance est divisée par le nombre de répétitions.

$$s_i^2(N_{\text{eau}}) = \frac{N_{\text{eau}}}{40 q} \quad q : \text{nombre de répétitions dans l'eau.}$$

En remplaçant, dans l'équation (9), $s^2(N_{\text{eau}})$ par sa valeur et $N_{\text{sol}}/N_{\text{eau}}$ par n , la variance du rapport de comptage devient :

$$s^2(n) = \frac{s^2(N_{\text{sol}})}{N_{\text{eau}}^2} + \frac{n^2}{40 q N_{\text{eau}}}$$

Or :

$$s^2(N_{\text{sol}}) = s_i^2(N_{\text{sol}}) + s_r^2 \quad \begin{array}{l} s_i^2(N_{\text{sol}}) : \text{variance instrumentale liée à l'émission neutronique} \\ s_r^2 : \text{variance de repositionnement} \end{array}$$

En remplaçant $s_i^2(N_{\text{sol}})$ par sa valeur :

$$s^2(n) = \frac{1}{40 N_{\text{eau}}} \left[\frac{n}{p} + \frac{n^2}{q} \right] + \frac{s_r^2}{N_{\text{eau}}^2} \quad p : \text{nombre de répétitions dans le sol} \quad (10)$$

En remplaçant les différents membres de l'équation (8) par leurs valeurs, la variance d'une mesure de θ peut donc se décomposer en différents termes :

- la composante instrumentale

$$s_i^2(\theta) = \frac{1}{40 N_{\text{eau}}} \left[a_1^2 - s^2(a_1) \right] \left[\frac{n}{p} + \frac{n^2}{q} \right] \quad (11)$$

- la composante de repositionnement

$$s_r^2(\theta) = \frac{s_r^2}{N_{\text{eau}}^2} [a_1^2 - s^2(a_1)]$$

- la composante liée à l'étalonnage

$$s_c^2 = s^2(a_0) + n^2 s^2(a_1) + 2 n s(a_0, a_1) + s^2(e)$$

$$s^2(\theta) = s_i^2(\theta) + s_r^2(\theta) + s_c^2(\theta) \quad (12)$$

Dans ces équations, les paramètres a_0 , a_1 , $s^2(a_0)$, $s^2(a_1)$, $s(a_0, a_1)$ et $s^2(e)$ sont obtenus lors de calcul de droites d'étalonnage. La valeur N_{eau} est de 880, pour une sonde SOLO 25 et le type de tube PVC qui a été utilisé. La composante de repositionnement doit être évaluée par ailleurs.

3.1.2. MÉTHODE UTILISÉE

La variance sur θ pour chaque niveau de mesure peut être évaluée en appliquant l'équation (12). Tous les paramètres sont connus, à l'exception de la variance de repositionnement $s_r^2(\theta)$. Cette variance peut être estimée en étudiant la dispersion des mesures à un niveau donné à la fin de la saison sèche. Comme l'humidité du sol varie peu, la variance instrumentale liée à l'émission neutronique reste constante. La décomposition de la variance observée sur n en ses deux composantes permet d'évaluer la variance de repositionnement par différence, en utilisant l'équation (10) :

$$s^2(n) = \frac{1}{40 N_{\text{eau}}} \left[\frac{n}{p} + \frac{n^2}{q} \right] + \frac{s_r^2}{N_{\text{eau}}^2}$$

L'étude a été réalisée sur tous les niveaux d'un tube de la parcelle N2 P1 K0 (tube n° 3). Pour chaque niveau, la régression $n = f(t)$ du rapport de comptage en fonction du temps a été calculée. La variance résiduelle de n (somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs estimées par la droite de régression) est la valeur $s^2(n)$. Comme n varie très peu, les termes en n et n^2 peuvent être estimés par leurs valeurs moyennes sur la période d'étude, ce qui permet d'évaluer la variance de repositionnement.

La source radioactive des humidimètres SOLO est annulaire : la variance de repositionnement est liée à la profondeur de la source et non à sa direction dans l'espace. A partir du gradient entre la mesure précédant et la mesure suivant une mesure donnée, il est possible d'exprimer l'écart-type de repositionnement s_r/N_{eau} en centimètres en évaluant l'épaisseur de la tranche de sol à laquelle correspond une différence de rapports de comptages égale à l'écart-type de repositionnement.

3.1.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1.3.1. Evaluation de la variance de repositionnement

La figure V.4 représente l'évaluation des rapports de comptage à 4 niveaux du tube n° 3 (parcelle N2 P1 K0) de décembre 1986 à février 1987 et les droites de régression en fonction du temps calculées avec ces valeurs. Ces courbes permettent de vérifier qu'un ajustement linéaire est bien adapté à ces données. Les équations sont les suivantes :

5 cm	$n = 0,186 - 9,3 \cdot 10^{-5} J$	avec $s^2(n) = 19,6 \cdot 10^{-6}$
15 cm	$n = 0,153 - 12,6 \cdot 10^{-5} J$	avec $s^2(n) = 5,9 \cdot 10^{-6}$
65 cm	$n = 0,390 - 15,0 \cdot 10^{-5} J$	avec $s^2(n) = 10,6 \cdot 10^{-6}$
115 cm	$n = 0,511 - 21,3 \cdot 10^{-5} J$	avec $s^2(n) = 17,56 \cdot 10^{-6}$

La décroissance de n est très faible au cours de la période étudiée : la variance liée au comptage neutronique peut donc être évaluée à l'aide de la valeur moyenne des rapports de comptage.

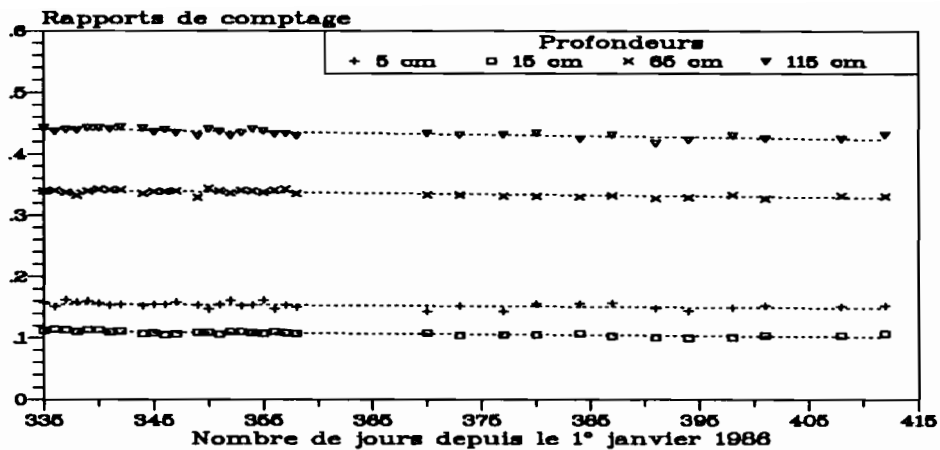


FIGURE V.4
Evolution des rapports de comptage à quelques profondeurs au cours de la grande saison sèche 1986-1987 (parcelle N2 P1 K0, tube n°3)

La variance de repositionnement a été calculée par différence et l'écart-type exprimé en centimètres à l'aide des gradients des rapports de comptage moyens (figure V.5). En raison de la rupture de pente de la courbe des rapports de comptage en fonction de la profondeur (provenant de la thermalisation des neutrons par le réflecteur à proximité de la surface du sol), l'écart-type ne peut pas être exprimé en centimètres sur les 25 premiers centimètres et au-dessous de 175 cm.

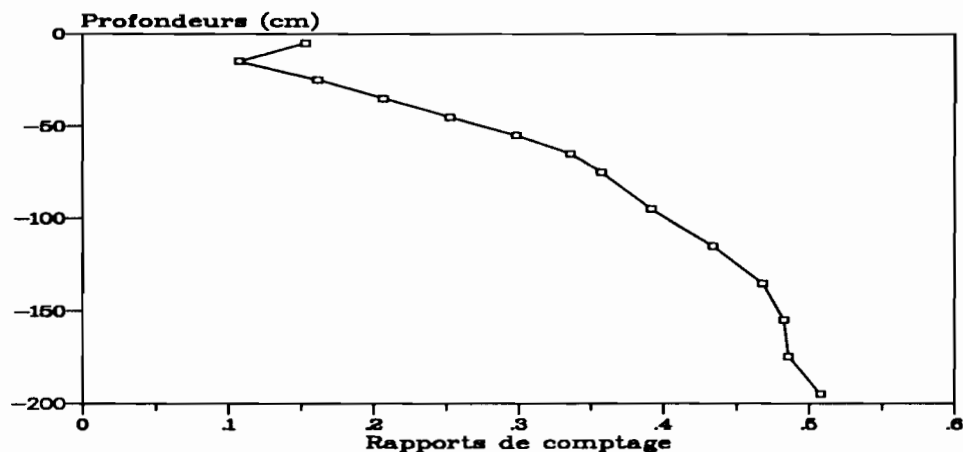


FIGURE V.5
Profil de rapports de comptages moyens au cours de la grande saison sèche 1986-1987 (parcelle N2 P1 K0, tube n°3)

La variance de repositionnement la plus élevée se situe à proximité de la surface du sol (tableau V.5). C'est à faible profondeur que le gradient de rapports de comptage est le plus élevé : une différence de quelques millimètres sur la localisation de la sonde peut produire une différence de comptage importante. Cependant, lorsque l'écart-type est exprimé en centimètres, il augmente avec la profondeur.

TABLEAU V.5
 Variance de repositionnement (sur le rapport de comptage n)

Profondeur (cm)	Variance de repositionnement	Ecart-type exprimé en cm de positionnement
	$10^6 \frac{s_r^2}{N_{\text{eau}}^2}$	
5	17,3	-
15	4,4	-
25	3,3	0,37
35	2,5	0,35
45	5,3	0,50
55	4,5	0,51
65	5,3	0,78
75	6,9	2,41
95	12,8	1,86
115	10,5	1,70
135	2,1	1,79
175	3,7	2,99
195	3,2	-

Dans le protocole utilisé, le dispositif de mesure des profondeurs était remis à zéro alors que la source était stockée dans l'étui. Il est donc normal que les variances soient faibles à proximité de l'étui. Des résultats inverses seraient probablement obtenus si le réglage du dispositif de mesure des profondeurs était effectué alors que la source est au fond du tube : ce protocole ne serait donc absolument pas adapté à des mesures à proximité de la surface. L'erreur de repositionnement est assez importante vers le fond du tube (3 à 5 cm) : le câble qui supporte la sonde reste probablement partiellement torsadé lorsqu'il est déroulé. Il ne s'agit pas d'un manque de fiabilité du dispositif de mesure de la profondeur car le compteur revient à zéro lorsque la sonde est remontée dans l'étui.

Une évaluation précise de la variance de repositionnement à une profondeur donnée devrait faire intervenir le gradient de comptage entre deux mesures successives et la valeur de l'erreur de repositionnement à cette profondeur ; ceci est techniquement possible, mais pose des problèmes pratiques. Le profil hydrique de fin de saison sèche représente un cas où les gradients de comptage sont particulièrement élevés (fort assèchement en surface, alors qu'en profondeur le sol reste humide). Les variances observées sont donc les plus fortes que l'on puisse observer sur le site étudié. Les calculs ont été effectués en prenant une variance de repositionnement constante de $1,0 \cdot 10^{-5}$ entre 15 et 195 cm et de $2,0 \cdot 10^{-5}$ à 5 cm, car ces valeurs maximisent l'erreur (tableau V.5).

3.1.3.2. Evaluation de la variance instrumentale liée à l'émission neutronique.

L'estimation de la composante instrumentale de la variance nécessite d'évaluer l'expression suivante (équation 10) :

$$s_1^2(n) = \frac{1}{40 N_{\text{eau}}} \left[\frac{n}{p} + \frac{n^2}{q} \right]$$

$N_{\text{eau}} : 880$
 $p : \text{nombre de répétitions dans le sol}$
 $q : \text{nombre de répétitions dans l'eau}$

Avec 2 répétitions dans le sol et 6 dans l'eau, la formule s'écrit :

$$s_i^2(n) = 1,42 \cdot 10^{-5} \left(n + \frac{n^2}{3} \right)$$

Au cours des expérimentations, les valeurs extrêmes observées pour n ont été 0,1 et 0,5, ce qui correspond respectivement à des valeurs de $1,4 \cdot 10^{-6}$ et $8,3 \cdot 10^{-6}$ pour $s_i^2(n)$. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que la variance de repositionnement. En conséquence, une étude qui prend en compte la variance instrumentale liée à l'émission neutronique doit également prendre en compte l'erreur de repositionnement. Pour maximiser $s_i^2(n)$, une valeur de $1,0 \cdot 10^{-5}$ a été retenue pour les calculs.

3.1.3.3. Evaluation de la variance totale d'une mesure d'humidité θ

La variance totale est évaluée par la formule (12) :

$$s^2(\theta) = s_i^2(\theta) + s_r^2(\theta) + s_e^2(\theta)$$

Dans les termes $s_i^2(\theta)$ et $s_r^2(\theta)$ intervient le facteur $(a_1)^2 - s^2(a_1)$. Or, a_1 est de l'ordre de l'unité, $s^2(a_1)$ au plus de l'ordre de 10^{-3} (tableau V.1). Le facteur $s^2(a_1)$ est donc négligeable devant a_1 . En regroupant les termes constants et les termes dépendant de la valeur de n , l'équation (8) peut s'écrire :

$$s^2(\theta) = a_1^2 \left[s_i^2(n) + \frac{s_r^2}{N_{\text{eau}}^2} \right] + s^2(a_0) + s^2(e) + 2n s(a_0, a_1) + n^2 s^2(a_1)$$

En remplaçant $s_i^2(n)$ et s_r^2/N_{eau}^2 par leurs valeurs maximisées $1,0 \cdot 10^{-5}$ et les autres paramètres par leurs valeurs résultant du calcul des droites d'étalonnage, il vient :

Tranche 0-10 cm	$s^2(\theta) = 2,0 \cdot 10^{-5} +$	$68,1 \cdot 10^{-5} - 224 \cdot 10^{-5} n$	$+$	$357 \cdot 10^{-5} n^2$
Tranche 0-20 cm	$s^2(\theta) = 0,6 \cdot 10^{-5} +$	$54,9 \cdot 10^{-5} - 130 \cdot 10^{-5} n$	$+$	$223 \cdot 10^{-5} n^2$
Tranche 10-200 cm	$s^2(\theta) = 0,4 \cdot 10^{-5} +$	$34,9 \cdot 10^{-5} - 6,06 \cdot 10^{-5} n$	$+$	$7,27 \cdot 10^{-5} n^2$

Il apparaît que, même maximisées, les erreurs instrumentales et de repositionnement (premier terme de l'équation) sont négligeables dans les trois cas par rapport aux erreurs liées à l'étalonnage (deuxième terme de l'équation, qui correspond à $[s^2(e) + s^2(a_0)]$).

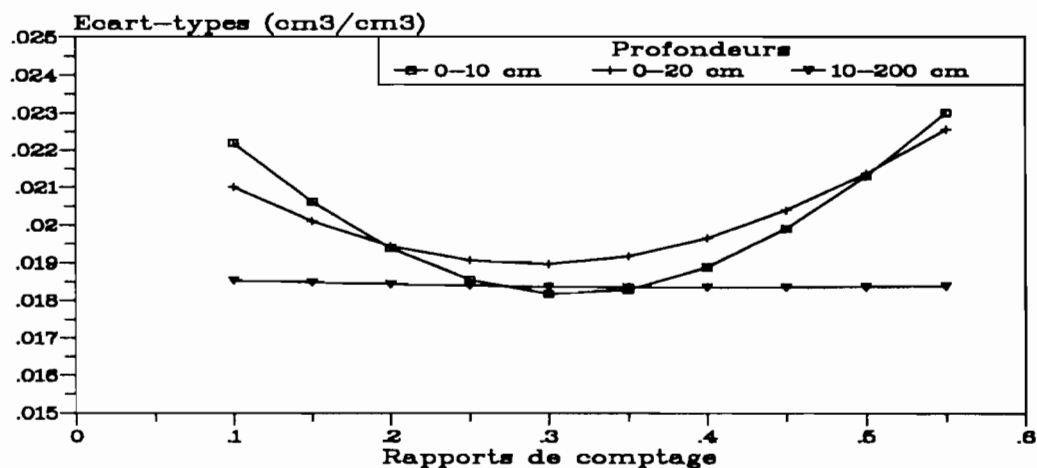


FIGURE V.6
Ecart-type de l'estimation de l'humidité volumique en fonction des rapports de comptage

L'évolution des écart-types en fonction de n a été représentée sur la figure V.6. Pour la tranche 10-200 cm, les écart-types varient très faiblement en fonction de n : la variance se réduit aux termes constants $s^2(e) + s^2(a_0)$, ce qui correspond à un écart-type de $0,019 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Pour l'horizon de surface, en revanche, la variation en fonction de n ne peut pas être négligée, que l'on travaille sur la tranche 0-10 cm ou sur la tranche 0-20 cm, pour avoir une évaluation précise. Pour effectuer les calculs, il est nécessaire d'estimer un majorant de l'écart-type :

- les valeurs de n à 5 cm sont toujours comprises entre 0,14 et 0,35 : l'écart-type est donc maximisé pour $0,021 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;
- les valeurs de n à 15 cm sont toujours comprises entre 0,10 et 0,35 : l'écart-type est donc maximisé pour $0,021 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;

L'écart-type sur θ peut donc être pris égal à $0,021 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ sur 0-10 et 0-20 cm et à $0,019 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ sur 10-200 cm (tableau V.6).

TABLEAU V.6
Précision de la détermination de l'humidité pour un tube donné (intervalle de confiance au seuil 95 %)

Profondeur (cm)	$s(\theta)$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Intervalle de confiance ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	CV moyen (%)
5	0,021	$\pm 0,04$	20
45	0,019	$\pm 0,03$	10
195	0,019	$\pm 0,03$	6

3.2. Cas des mesures sur plusieurs tubes

3.2.1. THÉORIE

Lorsque les mesures d'humidité sont effectuées sur plusieurs tubes pour un même traitement, l'humidité moyenne à un niveau donné est généralement assimilée à la moyenne des humidités mesurées (WARRICK & NIELSEN, 1980). VAUCLIN *et al.* (1984) ont développé une analyse de la variance de cette moyenne, qui sera reprise ici. L'analyse suppose que les mesures sont indépendantes d'un tube à l'autre, hypothèse également retenue.

L'équation d'étalonnage permet d'obtenir la valeur de l'humidité moyenne en fonction des moyennes des rapports de comptage :

$$\langle \theta \rangle = a_0 + a_1 \langle n \rangle$$

$\langle \theta \rangle$ humidité volumique moyenne exacte
 $\langle n \rangle$ moyenne des rapports de comptage exacts
 a_0 et a_1 : coefficients de la droite de régression

Cette équation ne fait pas intervenir l'erreur aléatoire e de l'équation de base $\theta = a_0 + a_1 n + e$ car son espérance mathématique est nulle.

En pratique, seule une estimation de l'humidité moyenne peut être obtenue :

$$\langle \theta \rangle = a_0 + a_1 \langle n \rangle$$

$\langle \theta \rangle$ humidité volumique moyenne estimée
 $\langle n \rangle$ moyenne des rapports de comptage mesurés
 a_0 et a_1 : coefficients de la droite d'étalonnage estimés.

Avec les mêmes règles de calcul que précédemment, l'estimateur de la variance de l'humidité moyenne est la suivante :

$$s^2(\langle \theta \rangle) = \{a_1^2 - s^2(a_1)\} s^2(\langle n \rangle) + s^2(a_0) + \langle n \rangle 2 s^2(a_1) + 2 \langle n \rangle s(a_0, a_1)$$

L'hypothèse d'indépendance des mesures pour différents tubes permet d'écrire :

$$s^2(\langle n \rangle) = \frac{1}{k} s^2(n) \quad k : \text{nombre de tubes}$$

La variance $s^2(n)$ est calculée à l'aide de l'équation :

$$s^2(n) = \frac{s^2(N_{\text{sol}})}{N_{\text{eau}}^2} + \frac{n^2}{40 q N_{\text{eau}}}$$

La variance du comptage provient de l'émission aléatoire des neutrons ($s_i^2(N_{\text{sol}})$), de l'erreur de repositionnement ($s_r^2(N_{\text{sol}})$) et de la variabilité spatiale ($s^2(L)$) :

$$\begin{aligned} s^2(N_{\text{sol}}) &= s_i^2(N_{\text{sol}}) + s_r^2(N_{\text{sol}}) + s^2(L) \\ &= \frac{N_{\text{sol}}}{40 p} + s_r^2(N_{\text{sol}}) + s^2(L) \end{aligned}$$

En reportant ces valeurs dans l'équation d'estimation de la variance de l'humidité moyenne, il vient :

$$\begin{aligned}
s^2(\langle \theta \rangle) = & \frac{1}{k} \{a_1^2 - s^2(a_1)\} \times \frac{1}{40 N_{\text{eau}}} \left[\frac{n}{p} + \frac{n^2}{q} \right] && \text{composante instrumentale} \\
+ & \frac{1}{k N_{\text{eau}}^2} \{a_1^2 - s^2(a_1)\} \times s_r^2(N_{\text{sol}}) && \text{composante de repositionnement} \\
+ & \frac{1}{k N_{\text{eau}}^2} \{a_1^2 - s^2(a_1)\} \times s^2(L) && \text{composante spatiale} \\
+ & s^2(a_0) + \langle n \rangle^2 s^2(a_1) + 2 \langle n \rangle s(a_0, a_1) && \text{composante d'étalonnage}
\end{aligned}$$

3.2.2. MÉTHODE UTILISÉE

Le but recherché est d'estimer la composante spatiale, afin de déterminer le nombre de tubes nécessaires pour obtenir une précision sur $\langle \theta \rangle$ donnée.

La variance totale sur θ peut être estimée à partir de l'échantillon représenté par les quatre tubes de chaque parcelle. Pour chacune des parcelles, la variance à chaque niveau de mesure a été recherchée à partir des résultats obtenus entre le 259ème et le 331ème jour de l'année 1986 (petite saison des pluies et début de la saison sèche).

Un majorant de la variance instrumentale à chaque profondeur est obtenu à l'aide de la valeur maximale observée sur n , la formule de calcul faisant intervenir le facteur $(n + n^2/3)$. Par ailleurs, la valeur de la fonction du second degré en n qui permet de calculer la variance d'étalonnage est maximale pour les faibles valeurs de n . Cette variance est donc maximale pour les plus faibles valeurs de n observées. Enfin, l'étude de la détermination de l'humidité sur un tube a montré qu'un majorant de la variance de repositionnement était $2,0 \cdot 10^{-5}$ au niveau 5 cm et $1,0 \cdot 10^{-5}$ aux autres niveaux.

Un minorant de la variance de la composante spatiale peut donc être obtenu par différence entre la variance totale et celle les autres composantes. Cela permet ensuite d'évaluer la variance sur la moyenne, en fonction du nombre de tubes.

3.2.3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

L'évolution de l'écart-type de θ en fonction du temps est représentée sur les figures V.7, V.8 et V.9 qui caractérisent l'ensemble des situations observées.

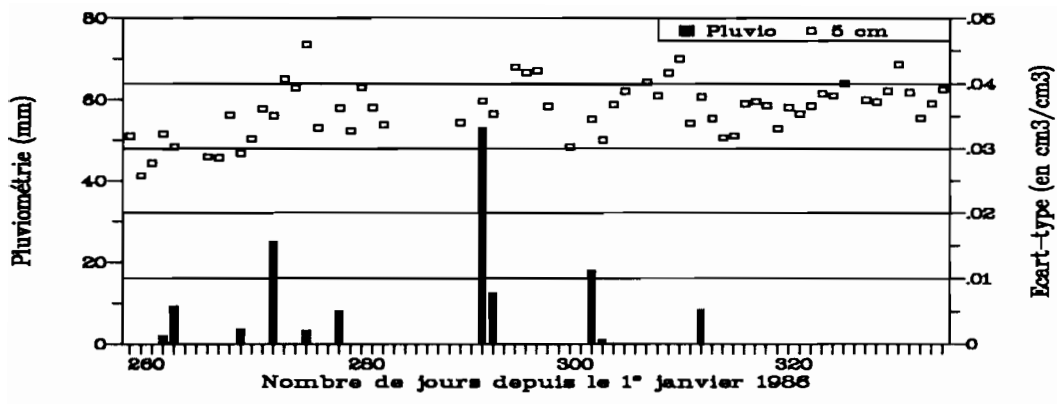


FIGURE IV.7
Evolution des écart-types des mesures d'humidité en fonction du temps à 5 cm (parcelle N2 P1 K0)

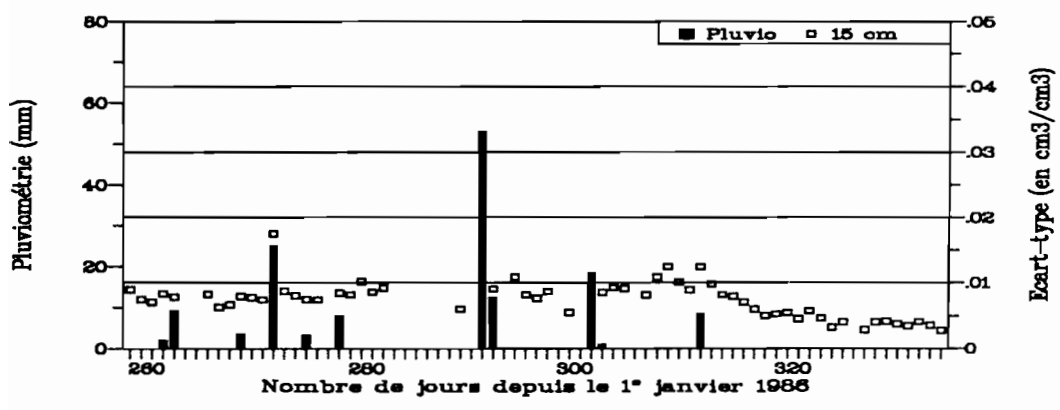


FIGURE IV.8
Evolution des écart-types des mesures d'humidité en fonction du temps à 15 cm (parcelle N2 P1 K0)

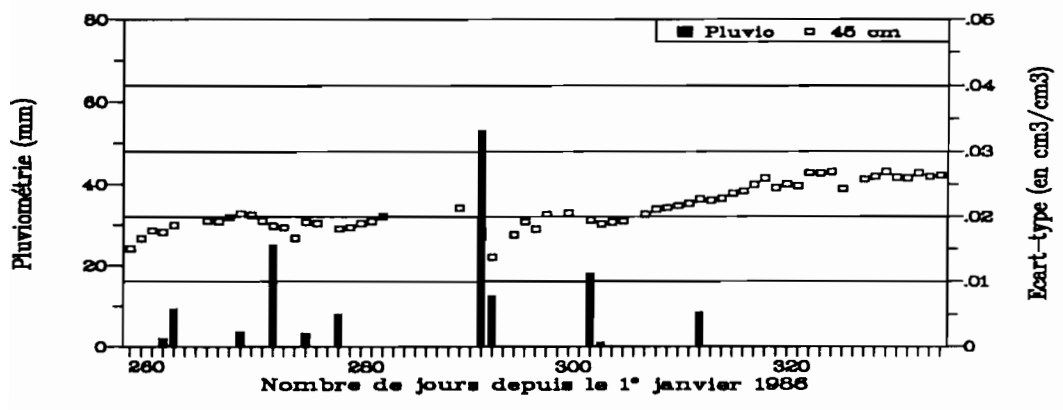


FIGURE IV.9
Evolution des écart-types des mesures d'humidité en fonction du temps à 45 cm (parcelle N2 P1 K0)

Ces figures montrent que la variance évolue au cours du temps, mais différemment selon les horizons : en surface, les variations n'ont pu être corrélées ni aux épisodes pluvieux, ni à l'état d'humectation des sols ; à 15 cm la variance diminue au cours de la saison sèche qui débute en fin d'année ; à 45 cm la variance augmente pendant la saison sèche. La même étude sur l'ensemble des horizons des trois sites montre qu'aucune règle ne peut être définie, l'évolution de la variance en fonction du temps et de l'humidité étant indépendante de la profondeur. En conséquence, seul un majorant de la variance de chaque niveau peut être défini. Ce majorant a été calculé pour chaque niveau de mesure des 3 sites (figure V.10).

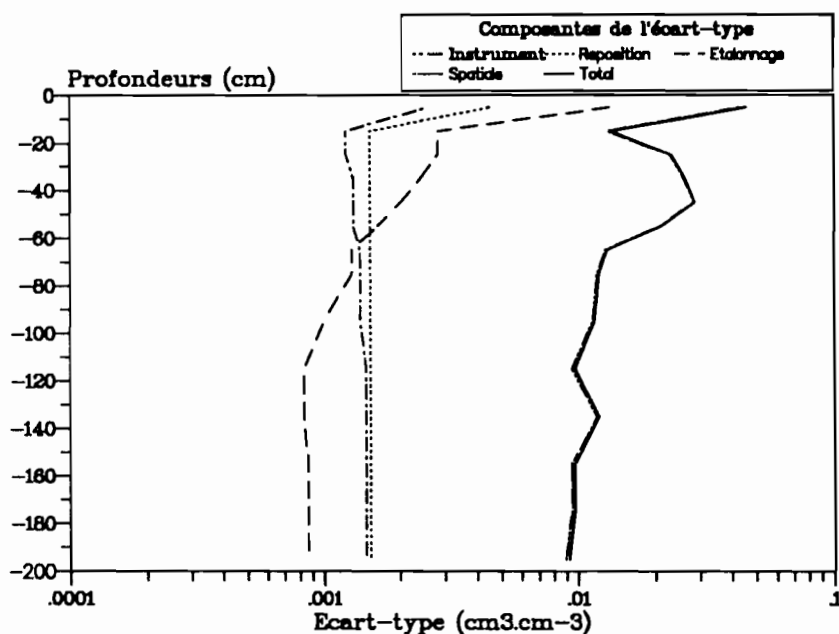


FIGURE V.10
Composantes de l'écart-type de l'humidité aux différentes profondeurs pour la parcelle N2 P1 K0

Les résultats du niveau 5 cm de la parcelle N2 P1 K0 et du niveau 195 cm de la parcelle N2 P1 K2 résument l'ensemble des situations observées (tableau V.7).

TABLEAU V.7
Composantes de la variance de l'humidité d'une parcelle à deux niveaux caractéristiques (pour un seul tube par parcelle).

Parcelle	Profondeurs (cm)	Composante instrumentale	Composante de repositionnement	Composante d'étalonnage	Composante spatiale	Variance totale
N2 P1 K0	5	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
N2 P1 K2	195	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

La variance totale varie selon les niveaux d'un facteur 100, mais dans tous les cas la composante spatiale représente plus de 90 % de la variance totale. *La variance liée à l'utilisation de l'humidimètre est donc très faible par rapport à celle due à l'hétérogénéité spatiale.* La figure V.10 montre que la variance présente deux maxima : un maximum en surface (retrouvé également pour les propriétés physico-chimiques) et un

maximum entre 30 et 80 cm. Le deuxième maximum est probablement lié à des variations de la profondeur du front d'appauvrissement en argile entre les différents emplacements des tubes sur la parcelle. Pour l'ensemble des profondeurs, l'écart-type est compris entre 0,01 et 0,05 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, soit des valeurs qui sont inférieures dans certains cas aux 0,02 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ de l'écart-type sur la détermination de l'humidité à un niveau sur un tube donné. Ceci provient de ce que nous cherchons à caractériser l'humidité moyenne de la parcelle à partir d'un seul tube, alors qu'auparavant nous cherchions à connaître l'humidité d'un tube donné : le terme $s^2(e)$ qui intervenait dans le calcul de la variance sur l'humidité d'un tube donné et qui en constituait numériquement la plus grande part pour tous les horizons sauf le niveau 5 cm, ne figure plus dans le calcul de la variance sur l'humidité moyenne.

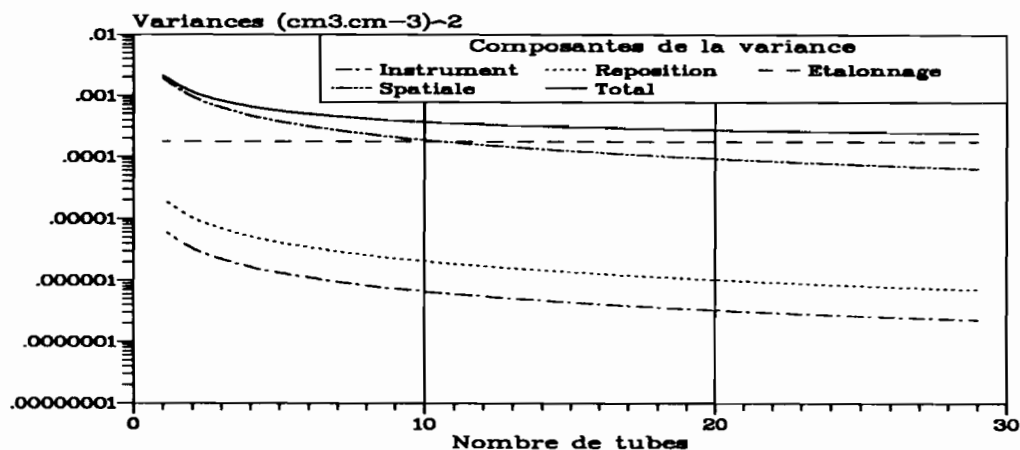


FIGURE V.11
Evolution de la variance sur l'humidité à 5 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K0)

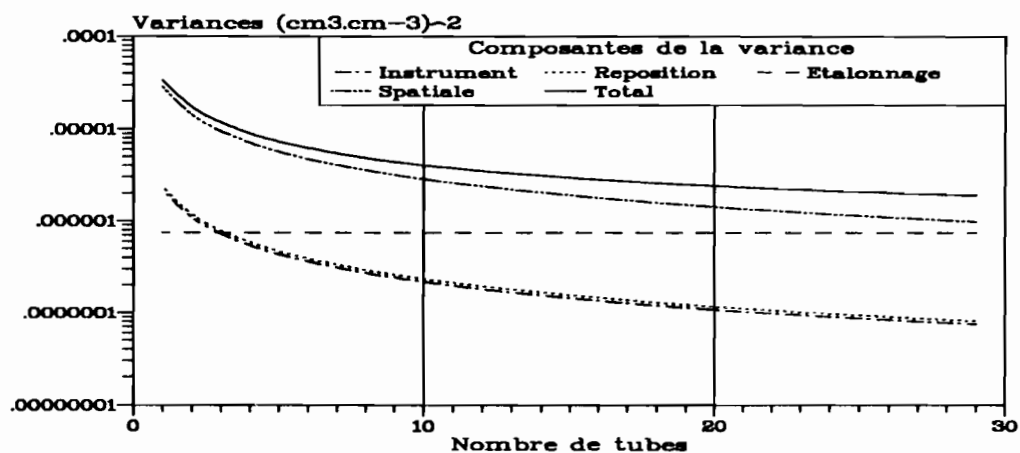


FIGURE V.12
Evolution de la variance sur l'humidité à 195 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K2)

Les figures V.11 et V.12 représentent l'évolution des variances sur l'humidité moyenne en fonction du nombre de tubes utilisés. Etant donné que dans la formule de calcul de la variance la composante liée à l'étalonnage ne dépend pas du nombre de tubes, la variance tend vers une asymptote lorsque le nombre de tubes augmente. Ces courbes sont très proches de celles publiées par HEWLETT *et al.* (1964) (les valeurs obtenues pour le niveau 5 cm sont pratiquement identiques) et par VAUCLIN *et al.* (1984).

Pour calculer l'intervalle de confiance des valeurs d'humidité moyenne par parcelle en fonction du nombre de tubes, la variance a été calculée pour 4 hypothèses (2, 4, 10 et 30 tubes par parcelle).

TABLEAU V.8
Précision de la détermination de l'humidité moyenne d'une parcelle en fonction du nombre de tubes pour 3 profondeurs différentes (Parcelle N2 P1 K0, intervalle de confiance au seuil 95 %)

Nbre de tubes	5 cm			45 cm			195 cm		
	écart-type (cm ³ .cm ⁻³)	Intervalle de confiance (cm ³ .cm ⁻³)	CV moyen (%)	écart-type (cm ³ .cm ⁻³)	Intervalle de confiance (cm ³ .cm ⁻³)	CV moyen (%)	écart-type (cm ³ .cm ⁻³)	Intervalle de confiance (cm ³ .cm ⁻³)	CV moyen (%)
1	0,05	± 0,09	45	0,03	± 0,06	15	0,009	± 0,02	3
4	0,02	± 0,05	25	0,01	± 0,03	8	0,005	± 0,01	2
10	0,02	± 0,04	20	0,01	± 0,02	5	0,003	± 0,01	1
30	0,01	± 0,03	15	0,01	± 0,01	3	0,002	± 0,005	0,6

Ce tableau met en évidence une forte disparité entre les niveaux. En profondeur (195 cm), 4 tubes par parcelle permettent d'obtenir un coefficient de variation de 2 % sur l'humidité, alors qu'il atteint 25 % en surface et 8 % à 45 cm pour le même nombre de tubes. Cela résulte de la conjonction d'une composante spatiale de la variance élevée à proximité de la surface, d'une composante d'étalonnage plus de 100 fois supérieure dans l'horizon 0-10 cm et d'une teneur en eau moyenne plus faible en surface, ce qui augmente le coefficient de variation.

Lorsque la composante de la variance liée à l'étalonnage est assez importante (niveau 5 cm), l'intervalle de confiance et donc le CV restent assez élevés, même pour un grand nombre de tubes : au niveau 5 cm, l'asymptote correspond à un intervalle de confiance de 0,026 cm³.cm⁻³, soit une valeur très proche de celle obtenue avec 30 tubes.

En raison du CV élevé obtenu à 5 cm (25 %), il serait tentant de ne pas utiliser cette valeur pour calculer le stock hydrique. Comme il sera vu plus loin, le calcul de précision sur le stock fait intervenir la variance, qui est beaucoup plus faible que le CV ; la non prise en compte de la mesure à 5 cm introduirait par ailleurs un biais sérieux dans le calcul du stock. Ce biais serait d'autant plus grand qu'il s'agit d'un stock très facilement accessible au système racinaire des plantes.

4. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE LA VARIATION D'HUMIDITÉ A UNE PROFONDEUR DONNÉE ENTRE DEUX DATES.

4.1. Cas des mesures sur un seul tube

4.1.1. THÉORIE

Il faut évaluer la variance d'une variation d'humidité correspondant à deux mesures successives sur le même tube. La variation d'humidité est estimée par $\theta - \theta'$, valeurs calculées à partir des comptages successifs n et n' , estimateurs des valeurs vraies n et n' . Un nouveau développement mathématique a dû être effectué afin de généraliser les résultats de HAVERKAMP *et al.* (1984) et de VAUCLIN *et al.* (1984).

A partir de l'équation (3) (page 93) :

$$\begin{aligned}(\theta - \theta') - (\theta - \theta') &= a_1 [(n - n) - (n' - n')] + (a_1 - a_1)(n - n') \\ &= a_1 (n - n) - a_1 (n' - n') + (a_1 - a_1) n - (a_1 - a_1) n'\end{aligned}$$

Cette équation permet de vérifier que $\theta - \theta'$ est un estimateur non biaisé de $\theta - \theta'$. Pour estimer la variance de $\theta - \theta'$, il faut calculer $E [(\theta - \theta') - (\theta - \theta')]^2$ et en trouver un estimateur.

$$\begin{aligned}[(\theta - \theta') - (\theta - \theta')]^2 &= a_1^2 (n - n)^2 + a_1^2 (n' - n')^2 + (a_1 - a_1)^2 n^2 + (a_1 - a_1)^2 n'^2 \\ &\quad - 2 a_1^2 (n - n) (n' - n') + 2 a_1 (n - n) (a_1 - a_1) n \\ &\quad - 2 a_1 (n - n) (a_1 - a_1) n' - 2 a_1 (n' - n') (a_1 - a_1) n \\ &\quad + 2 a_1 (n' - n') (a_1 - a_1) n' - 2 (a_1 - a_1)^2 n n' \\ &= a_1^2 [(n - n)^2 + (n' - n')^2] + n^2 (a_1 - a_1)^2 + n'^2 (a_1 - a_1)^2 \\ &\quad - 2 a_1^2 (n - n) (n' - n') - 2 n n' (a_1 - a_1)^2\end{aligned}$$

En reprenant les mêmes hypothèses d'indépendance que précédemment, la variance de $\theta - \theta'$ peut être calculée :

$$\begin{aligned}\text{Var}(\theta - \theta') &= E [(\theta - \theta') - (\theta - \theta')]^2 = E (a_1^2) [\text{Var}(n) + \text{Var}(n')] + n^2 \text{Var}(a_1) + n'^2 \text{Var}(a_1) \\ &\quad - 2 E (a_1^2) \text{Cov}(n, n') - 2 n n' \text{Var}(a_1)\end{aligned}$$

En remplaçant $E (a_1^2)$ par sa valeur $\text{Var}(a_1) + a_1^2$ [équation (4)] et en regroupant les termes :

$$\begin{aligned}\text{Var}(\theta - \theta') &= [[\text{Var}(a_1) + a_1^2] \text{Var}(n) + n^2 \text{Var}(a_1)] + [[\text{Var}(a_1) + a_1^2] \text{Var}(n') + n'^2 \text{Var}(a_1)] \\ &\quad - 2 [\text{Var}(a_1) + a_1^2] \text{Cov}(n, n') - 2 n n' \text{Var}(a_1)\end{aligned}$$

L'équation de GOODMAN (équation (6)) permet d'écrire :

$$\text{Var}(\theta - \theta') = \text{Var}(a_1 n) + \text{Var}(a_1 n') - 2 [\text{Var}(a_1) + a_1^2] \text{Cov}(n, n') - 2 n n' \text{Var}(a_1)$$

Or, une des propriétés des covariances est la suivante :

$$n n' = E(n) E(n') = E(n n') - \text{Cov}(n, n')$$

Il vient :

$$\begin{aligned}
\text{Var}(\theta - \theta') &= \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}) + \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}') - 2 \text{Var}(\mathbf{a}_1) \text{Cov}(\mathbf{n}, \mathbf{n}') - 2 \mathbf{a}_1^2 \text{Cov}(\mathbf{n}, \mathbf{n}') - 2 \text{E}(\mathbf{n} \mathbf{n}') \text{Var}(\mathbf{a}_1) \\
&\quad + 2 \text{Cov}(\mathbf{n}, \mathbf{n}') \text{Var}(\mathbf{a}_1) \\
&= \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}) + \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}') - 2 \mathbf{a}_1^2 \text{Cov}(\mathbf{n}, \mathbf{n}') - 2 \text{E}(\mathbf{n} \mathbf{n}') \text{Var}(\mathbf{a}_1) \\
&= \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}) + \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}') - 2 [\text{E}(\mathbf{a}_1^2) - \text{Var}(\mathbf{a}_1)] \text{Cov}(\mathbf{n}, \mathbf{n}') - 2 \text{E}(\mathbf{n} \mathbf{n}') \text{Var}(\mathbf{a}_1)
\end{aligned}$$

Il n'a pas été possible de trouver un estimateur sans biais de cette expression, en raison du terme $\text{Var}(\mathbf{a}_1) \text{Cov}(\mathbf{n}, \mathbf{n}')$. Dans le cas étudié, cette équation peut cependant être simplifiée, car $\text{Var}(\mathbf{a}_1)$ est négligeable devant \mathbf{a}_1^2 ($3 \cdot 10^{-3}$ contre 1 en surface, $1,0 \cdot 10^{-5}$ contre $2,0 \cdot 10^{-1}$ en profondeur, tableau V.1).

$$\text{Var}(\theta - \theta') \approx \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}) + \text{Var}(\mathbf{a}_1 \mathbf{n}') - 2 \text{E}(\mathbf{a}_1^2) \text{Cov}(\mathbf{n}, \mathbf{n}') - 2 \text{E}(\mathbf{n} \mathbf{n}') \text{Var}(\mathbf{a}_1)$$

En utilisant l'équation (7) qui fournit un estimateur de la variance d'un produit et en prenant en compte que $s^2(\mathbf{a}_1)$ est négligeable devant \mathbf{a}_1^2 , un estimateur sans biais de $\text{Var}(\theta - \theta')$ est :

$$\begin{aligned}
s^2(\theta - \theta') &= \mathbf{a}_1^2 [s^2(\mathbf{n}) + s^2(\mathbf{n}')] + [\mathbf{n}^2 + \mathbf{n}'^2] s^2(\mathbf{a}_1) - 2 \mathbf{a}_1^2 s(\mathbf{n}, \mathbf{n}') - 2 \mathbf{n} \mathbf{n}' s^2(\mathbf{a}_1) \\
&= \mathbf{a}_1^2 [s^2(\mathbf{n}) + s^2(\mathbf{n}') - 2 s(\mathbf{n}, \mathbf{n}')] + [\mathbf{n} - \mathbf{n}']^2 s^2(\mathbf{a}_1) \\
&= \mathbf{a}_1^2 s^2(\mathbf{n} - \mathbf{n}') + [\mathbf{n} - \mathbf{n}']^2 s^2(\mathbf{a}_1)
\end{aligned} \tag{13}$$

En remplaçant $s^2(\mathbf{n})$ et $s^2(\mathbf{n}')$ par leurs valeurs, la variance peut se décomposer en différents termes :

- la composante instrumentale

$$s_i^2(\theta - \theta') = \frac{\mathbf{a}_1^2}{40 N_{\text{eau}}} \left[\frac{\mathbf{n} + \mathbf{n}'}{p} + \frac{\mathbf{n}^2 + \mathbf{n}'^2}{q} \right] \quad \begin{array}{l} p : \text{nombre de répétitions dans le sol} \\ q : \text{nombre de répétitions dans l'eau.} \end{array}$$

- la composante de repositionnement

$$s_r^2(\theta - \theta') = 2 \mathbf{a}_1^2 \frac{s_r^2}{N_{\text{eau}}^2}$$

- la composante d'autocorrélation (provenant de la non-indépendance de mesures successives à un niveau donné)

$$s_a^2(\theta - \theta') = -2 \mathbf{a}_1^2 s(\mathbf{n}, \mathbf{n}')$$

- la composante d'étalonnage

$$s_c^2(\theta - \theta') = (\mathbf{n} - \mathbf{n}')^2 s^2(\mathbf{a}_1)$$

$$s^2(\theta - \theta') = s_i^2(\theta - \theta') + s_r^2(\theta - \theta') + s_a^2(\theta - \theta') + s_c^2(\theta - \theta')$$

Par rapport à la variance sur la détermination de l'humidité à une date, les termes liés à l'ordonnée à l'origine \mathbf{a}_0 et ceux liés à l'erreur aléatoire e ont été supprimés, mais il apparaît un nouveau terme lié à l'autocorrélation entre des mesures successives d'humidité à un niveau. Cette équation est en accord avec celle proposée par SINCLAIR & WILLIAMS (1979), dont elle constitue une généralisation et une adaptation aux conditions opératoires utilisées lors de cette expérimentation.

4.1.2. MÉTHODE UTILISÉE

Pour obtenir un majorant de la variance, un majorant de chacun des termes de l'équation précédente sera recherché. La composante instrumentale peut être évaluée à partir de la valeur maximale observée pour n , la composante de repositionnement en reprenant les valeurs du tableau V.5 et la composante d'étalonnage en fonction de la plus grande différence observée entre n et n' .

Les valeurs maximales de n et $(n - n')$ ont été obtenues, pour chaque profondeur de mesure, à partir de l'ensemble des comptages réalisés pendant 4 ans (381 mesures) sur les tubes n°3 (parcelle N2 P1 K0) et n°9 (parcelle N2 P1 K2).

La composante d'autocorrélation a été estimée sur le même ensemble de comptages en fonction du nombre de jours séparant deux mesures successives, à l'aide du logiciel STATGRAPHICS (STSC, Inc.).

4.1.3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les autocorrélogrammes, entre des mesures successives à la même profondeur pendant la saison des pluies, présentent tous des caractéristiques proches de celles de la figure V.13. Les autocorrélations sont toujours positives, traduisant le fait que si un sol est plus humide que la moyenne un jour donné il est encore plus humide que la moyenne lors de la mesure suivante.

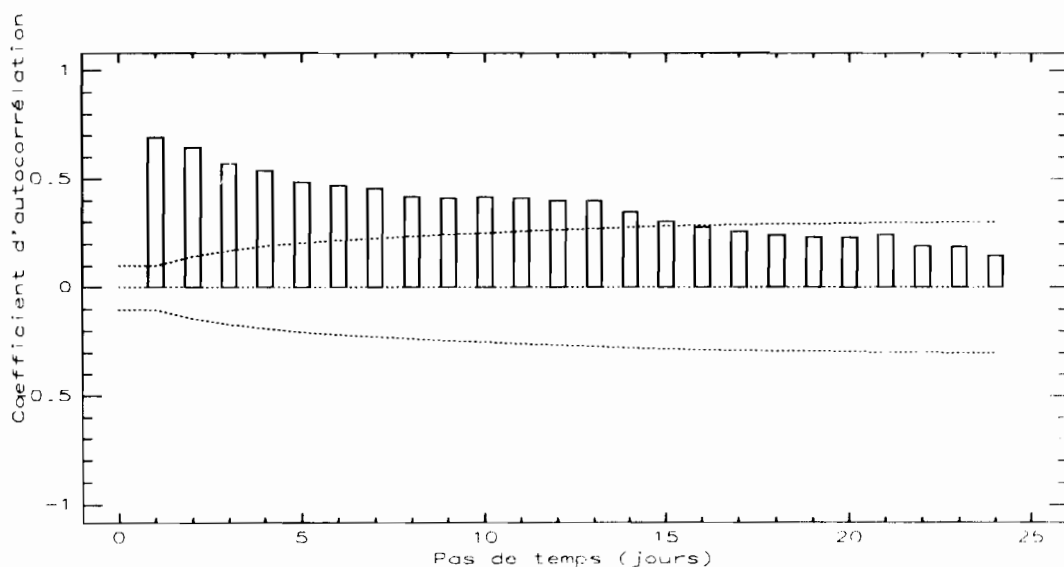


FIGURE V.13
Autocorrélation entre des mesures successives (calculs sur les rapports de comptage, parcelle N2 P1 K0, tube n°3, 15 cm)

Les autocorrélations sont toujours décroissantes en fonction du pas de temps qui sépare deux mesures : l'absence de structure cyclique est à relier au fait que le temps qui sépare deux pluies successives est très variable. La ligne pointillée sur le graphe représente le seuil de signification à 95 %. Pour l'ensemble des niveaux des deux tubes étudiés, les mesures deviennent indépendantes pour un temps de l'ordre de 15 jours

après la pluie. Selon les niveaux de mesure, les coefficients d'autocorrélation maximaux (mesures journalières) varient entre 0,5 et 0,75, les valeurs les plus élevées étant observées sur le premier mètre. Ce résultat est logique car les variations d'humidité les plus fortes sont observées en surface et beaucoup de pluies ne pénètrent pas au-delà de 1 m (plus de 2 pluies sur 3 ont une hauteur inférieure à 20 mm). Enfin, le palier qui apparaît sur le graphe pour un pas de temps de 8 à 13 jours ne se retrouve pas pour les autres profondeurs.

Les différentes composantes de la variance de la différence d'humidité volumique entre deux mesures successives sont regroupées dans le tableau V.9 pour les deux cas extrêmes : pas de temps de 1 jour (autocorrélation maximale) et pas de temps de 15 jours (indépendance des mesures).

TABLEAU V.9
Composantes de la variance de la différence d'humidité volumique entre deux mesures successives (parcelle N2 P1 K0, tube n°3, années 1984 à 1987)

Profondeur (cm)	Pas de temps (jours)	Rapports de comptage		Composante instrumentale	Composante de repositionnement	Composante d'autocorrélation	Composante d'étalonnage	Variance totale
		min	max					
5	1	0,14	0,31	1,01 10 ⁻⁵	3,53 10 ⁻⁵	- 6,1 10 ⁻⁶	1,43 10 ⁻⁴	1,83 10 ⁻⁴
	15			1,01 10 ⁻⁵	3,53 10 ⁻⁵	0	1,43 10 ⁻⁴	1,89 10 ⁻⁴
45	1	0,25	0,40	3,02 10 ⁻⁶	2,48 10 ⁻⁶	- 2,4 10 ⁻⁶	1,64 10 ⁻⁶	4,72 10 ⁻⁶
	15			3,02 10 ⁻⁶	2,48 10 ⁻⁶	0	1,64 10 ⁻⁶	7,13 10 ⁻⁶
195	1	0,48	0,54	4,33 10 ⁻⁶	1,50 10 ⁻⁶	- 2,2 10 ⁻⁶	2,62 10 ⁻⁷	3,89 10 ⁻⁶
	15			4,33 10 ⁻⁶	1,50 10 ⁻⁶	0	2,62 10 ⁻⁷	6,09 10 ⁻⁶

Les variances totales obtenues au niveau 5 cm sont plus de 10 fois supérieures à celles des autres niveaux, en raison d'une composante d'étalonnage plus forte qui est elle-même liée au nombre de couples relativement réduit (17) utilisé pour calculer les coefficients. Dans ce cas, la composante d'autocorrélation est négligeable devant la composante d'étalonnage.

Pour les profondeurs 45 cm et 195 cm, la présence d'une autocorrélation entre les mesures permet de réduire la variance de 35 et 20 % respectivement. Il faut noter cependant que la précision obtenue est alors excellente, qu'il y ait ou non autocorrélation entre les mesures (tableau V.10).

Pratiquement, il est donc possible de maximiser l'intervalle de confiance sur les variations d'humidité dans un tube de mesure par 0,027 cm³.cm⁻³ à 5 cm et 0,005 cm³.cm⁻³ pour toutes les autres profondeurs. Dans le cas où le pas des mesures est inférieur à 15 jours, la précision est meilleure : cette amélioration diminue l'intervalle de confiance d'environ 20 % dans le cas de mesures quotidiennes.

Ces résultats sont à rapprocher de la précision de la détermination de l'humidité pour un tube donné (tableau V.6). Pour toutes les profondeurs, la précision sur la différence d'humidité est meilleure que les précisions sur la détermination de l'humidité à un temps donné. L'écart-type est près de 10 fois plus faible pour toutes les profondeurs, sauf pour le niveau 5 cm. La variance sur la différence d'humidité serait donc considérablement surestimée si elle était prise égale à la somme des variances sur les humidités.

TABLEAU V.10

Précision sur la détermination des différences d'humidité avec (pas de temps de 1 jour) et sans (pas de temps de 15 jours) autocorrélation (parcelle N2 P1 K0, tube n°3, années 1984-1987)

Profondeur (cm)	Pas de temps (jours)	Ecart-type (cm ³ .cm ⁻³)	Intervalle de confiance (seuil 95 %)
5	1	0,0135	± 0,026
	15	0,0137	± 0,027
45	1	0,0022	± 0,004
	15	0,0027	± 0,005
195	1	0,0020	± 0,004
	15	0,0025	± 0,005

4.2. Cas des mesures sur plusieurs tubes

4.2.1. THÉORIE

Comme précédemment pour l'humidité à une date donnée, la différence d'humidité moyenne sur l'ensemble de la parcelle a été prise égale à la moyenne des différences sur chaque tube, en supposant l'indépendance des mesures d'un tube à l'autre.

$$\langle \theta \rangle = a_0 + a_1 \langle n \rangle$$

$$\langle \theta' \rangle = a_0 + a_1 \langle n' \rangle$$

$$\langle (\theta - \theta') - (a_1 \langle n \rangle - a_1 \langle n' \rangle) \rangle = a_1 (\langle n \rangle - \langle n' \rangle) - a_1 (\langle n' \rangle - \langle n' \rangle) + (a_1 - a_1) \langle n \rangle - (a_1 - a_1) \langle n' \rangle$$

En élevant cette expression au carré, en appliquant les mêmes règles de calcul que précédemment et en considérant que $s^2(a_1)$ est négligeable devant a_1 :

$$\begin{aligned} s^2(\langle \theta - \theta' \rangle) &= a_1^2 s^2(\langle n \rangle - \langle n' \rangle) + [\langle n \rangle - \langle n' \rangle]^2 s^2(a_1) \\ &= a_1^2 [s^2(\langle n \rangle) + s^2(\langle n' \rangle) - 2s(\langle n \rangle, \langle n' \rangle)] + [\langle n \rangle - \langle n' \rangle]^2 s^2(a_1) \end{aligned}$$

Comme pour la variance de l'humidité à une date donnée, cette expression peut être décomposée en plusieurs termes.

- Composante instrumentale

$$s_i^2 = \frac{1}{k} a_1^2 \frac{1}{40 N_{\text{eau}}} \left[\frac{n + n'}{p} + \frac{n^2 + n'^2}{q} \right]$$

- Composante de repositionnement

$$s_r^2 = 2 \frac{a_1^2}{k} \frac{s_r^2(N_{\text{sol}})}{N_{\text{eau}}^2}$$

- Composante spatiale

$$s_s^2 = 2 \frac{a_1^2}{k} \frac{s^2(L)}{N_{\text{eau}}^2}$$

- Composante d'autocorrélation

$$s_a^2 = -2 \frac{a_1^2}{k} s(n, n')$$

- Composante d'étalonnage

$$s_c^2 = [< n - n' >]^2 s^2(a_1)$$

N_{sol} et N_{eau} : comptages dans le sol et dans l'eau
 n et n' : rapports de comptages mesurés
 p et q : nombre de répétitions dans le sol et dans l'eau

k : nombre de tubes

a_1 : estimation de la pente de la droite d'étalonnage

$s^2(a_1)$: variance de a_1

$s^2(L)$: variance liée à la variabilité spatiale

$s(n, n')$: covariance entre n et n'

4.2.2. MÉTHODE UTILISÉE

Les différentes composantes de la variance peuvent être calculées directement à partir des valeurs de terrain et des paramètres de la droite d'étalonnage, à l'exception de la composante spatiale. La composante spatiale a été évaluée par différence entre la variance totale, estimée à partir des valeurs de terrain, et les autres composantes.

La variance totale peut être estimée à partir de l'échantillon représenté par les quatre tubes de chaque parcelle. Nous allons rechercher, pour chaque parcelle, la variance de la différence d'humidité à chaque niveau de mesure entre deux dates séparées de 15 jours, afin d'assurer l'indépendance des mesures (composante d'autocorrélation nulle).

Un majorant de la composante instrumentale de la variance à chaque niveau est obtenu en remplaçant n et n' par le rapport de comptage le plus élevé à ce niveau. La composante de repositionnement est évaluée à partir des valeurs du tableau V.5 (page 98). Un majorant de la composante d'étalonnage est obtenu à partir de la valeur maximale obtenue sur n et de la valeur minimale obtenue sur n' .

4.2.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La figure V.14 représente l'évolution de l'écart-type des différences d'humidité au cours de la période étudiée. Comme pour les humidités, aucune relation n'a pu être trouvée avec d'autres variables : un majorant de la variance totale a été retenu pour chaque niveau de mesure.

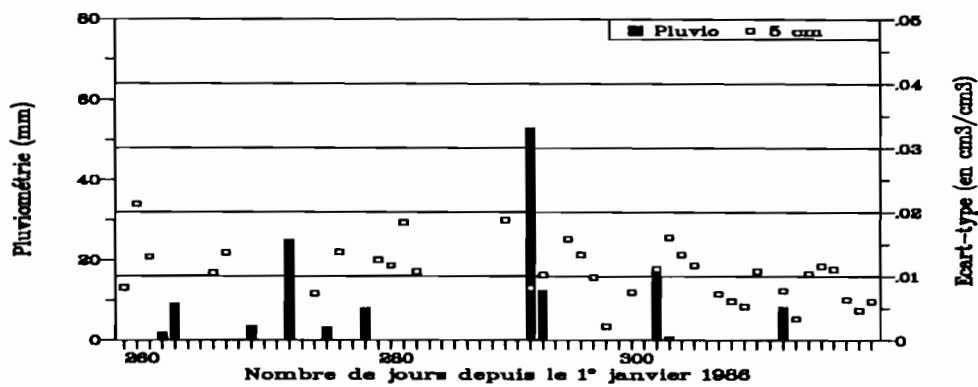


FIGURE V.14
Evolution des écart-types de différences d'humidité entre deux mesures espacées de 15 jours en fonction du temps (parcelle N2 P1 K0, profondeur 5 cm)

Les composantes de la variance des variations d'humidité ont donc été calculées pour les trois parcelles en utilisant le majorant de la variance totale (figure V.15).

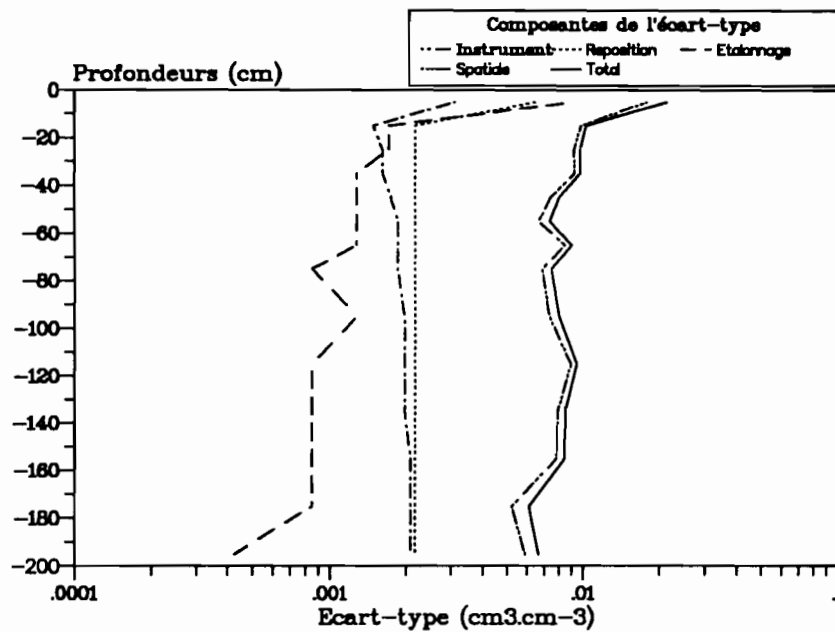


FIGURE V.15
Composantes de l'écart-type des différences d'humidité aux différentes profondeurs pour la parcelle N2 P1 K0

Deux exemples caractérisent les différentes situations rencontrées (tableau V.11).

TABLEAU V.11
Composantes de la variance des variations d'humidité d'une parcelle à deux niveaux caractéristiques (pour un seul tube par parcelle)

Parcelles	Pas de temps	Profondeur (cm)	Composante instrumentale	Composante de repositionnement	Composante d'auto-corrélation	Composante d'étalonnage	Composante spatiale	Variance totale
N2 P1 K0	1 j	5	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$-6 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
	15 j	5	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	0	$8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
N2 P1 K2	1 j	195	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$
	15 j	195	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	0	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$

La composante spatiale représente dans tous les cas la majeure partie de la variance totale, comme elle représentait la composante majeure de la variance sur les valeurs d'humidité. Mais, pour l'ensemble des niveaux des trois parcelles étudiées, *il n'est pas possible de trouver une relation entre la variance des humidités et la variance des différences d'humidité : il est donc nécessaire de calculer soit la variance des humidités, soit la variance des différences d'humidité, selon que l'on s'intéresse à la précision des mesures d'humidité ou à celle des différences d'humidité*. Ce résultat est en accord avec la plupart des résultats récents (SARTZ, 1972; SINCLAIR & WILLIAMS, 1979 ; GREACEN, 1981), mais en opposition avec l'idée souvent admise d'une variabilité des variations d'humidité plus faible que la variabilité des humidités elle-mêmes (HEWLETT *et al.*, 1964).

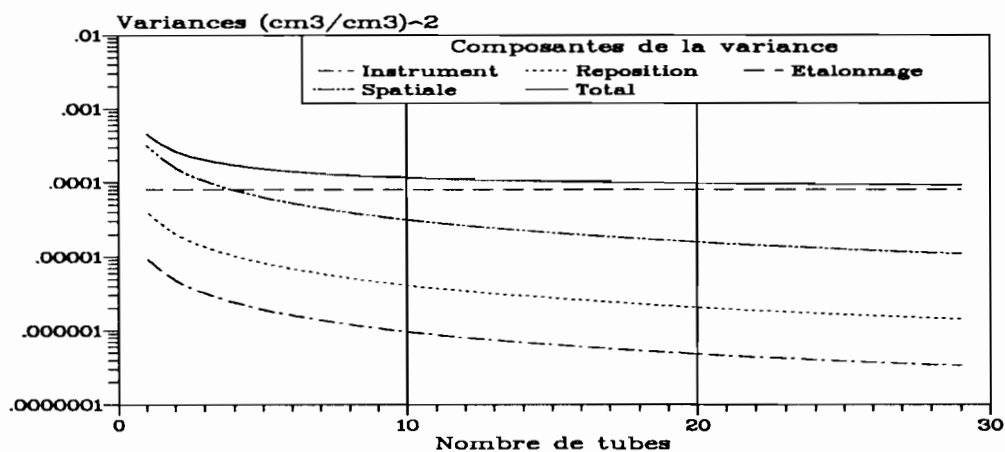


FIGURE V.16
Evolution de la variance sur les différences d'humidité à 5 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K0)

Seule la composante d'étalonnage n'est pas négligeable devant la composante spatiale, et seulement pour le niveau 5 cm. Comme la valeur de la composante d'étalonnage est constante, elle devient la composante majeure de la variance au niveau 5 cm dès que le nombre de tube est égal à 4 (figure V.16). Elle reste par contre négligeable pour toutes les autres profondeurs (figure V.17). Ces résultats sont comparables, tant par leur ordre de grandeur que par les conclusions qu'ils permettent de tirer, de ceux de HEWLETT *et al.* (1964) et de SINCLAIR & WILLIAMS (1979).

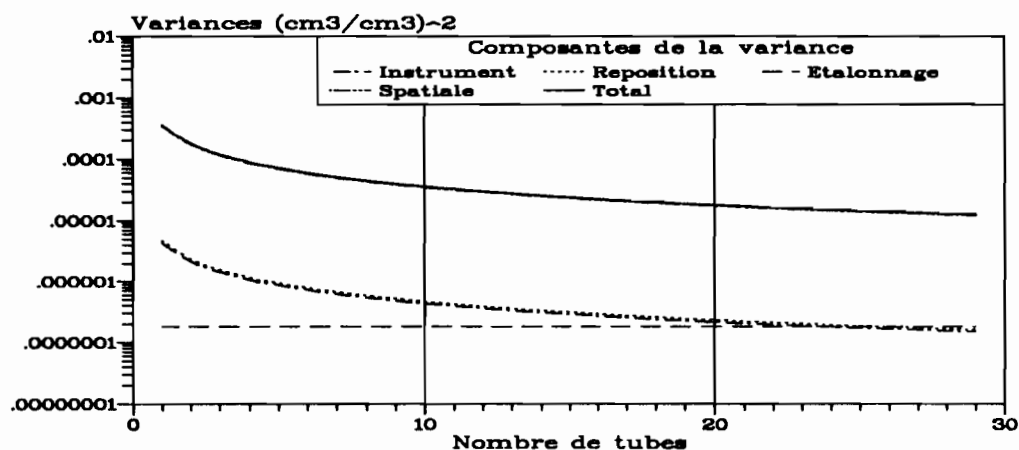


FIGURE V.17
Evolution de la variance sur les différences d'humidité à 195 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K2)

Comme pour les valeurs d'humidité, l'évolution de la précision sur les différences d'humidité en fonction du nombre de tubes est très différente selon le niveau (tableau V.12). La surface (5 cm) présente un intervalle de confiance plus élevé que les autres niveaux pour un seul tube dans le cas pris en exemple (parcelle N2 P1 K0), mais ce n'est pas le cas général : les résultats sont différents selon les parcelles, car ils varient en fonction des valeurs des composantes spatiales de la variance.

TABLEAU V.12
Précision de la détermination des différences d'humidité moyennes d'une parcelle en fonction du nombre de tubes (en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, parcelle N2 P1 K0, intervalle de confiance au seuil 95 %)

Nombre de tubes	5 cm		45 cm		195 cm	
	Ecart-type	Intervalle de confiance	Ecart-type	Intervalle de confiance	Ecart-type	Intervalle de confiance
1	0,02	±0,04	0,008	±0,02	0,006	±0,01
4	0,01	±0,03	0,004	±0,008	0,003	±0,006
10	0,01	±0,02	0,003	±0,005	0,002	±0,004
30	0,01	±0,02	0,002	±0,004	0,001	±0,003

Pour des nombres de tubes supérieurs ou égaux à 4, la précision obtenue sur les niveaux profonds est toujours très supérieure à celle du niveau 5 cm, en raison du facteur constitué par la composante d'étalonnage à 5 cm.

La précision sur les différences d'humidité est inférieure ou supérieure à celle estimée sur les humidités elles-mêmes, selon les valeurs de composante spatiale.

5. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DU STOCK HYDRIQUE A UNE DATE DONNÉE

5.1. Cas de la mesure du stock sur 0-150 cm sur un seul tube

5.1.1. THÉORIE

La valeur vraie du stock entre la surface du sol et la profondeur z est donnée par la formule :

$$S_{0-z} = \int_0^z \theta(z) dz$$

Pratiquement, on ne dispose que de valeurs estimées ponctuelles θ de Θ : seule une estimation S_{0-z} de S_{0-z} peut être calculée à l'aide de techniques numériques. La variance de l'estimateur S_{0-z} du stock est donc la somme de la variance liée à l'estimation de Θ et de la variance liée à la méthode d'intégration :

$$s^2(S) = s_1^2(S) + s_2^2(S) \quad \begin{array}{l} s_1^2(S) = \text{variance liée aux déterminations de } \theta \\ s_2^2(S) = \text{variance liée à la méthode d'intégration.} \end{array}$$

La méthode d'intégration généralement employée, et qui a été retenue pour cette étude, est la méthode des trapèzes. Elle repose sur l'hypothèse d'une variation linéaire de l'humidité entre deux profondeurs de mesures successives. Deux autres méthodes d'intégration peuvent également être utilisées. La méthode de Simpson remplace ces segments de droite par des portions de parabole, la méthode de Newton par des segments de fonctions du 3ème degré. Les méthodes de Simpson et de Newton réduisent la variance liée à l'intégration, mais elles introduisent des contraintes en ce qui concerne le nombre de points de mesures et leur espacement, ce qui rend leur mise en oeuvre délicate. Dans le cas de profils hydriques présentant de forts gradients, HAVERKAMP *et al.* (1984) ont montré que l'utilisation de la méthode de Simpson permettait de réduire significativement la variance sur le stock. Il était donc important d'étudier s'il en était de même dans le cas des terres de Barre.

La méthode des trapèzes permet de calculer le stock sur la tranche 0-150 cm à l'aide de la formule suivante :

$$S_{0-150} = \sum_1^8 \theta_i \Delta z_1 + 50 \times \theta_8 + \sum_9^{11} \theta_i \Delta z_2 + 50 \times \theta_{12}$$

$$\begin{array}{l} S_{0-150} \text{ en mm} \\ \Delta z_1 = 100 \text{ mm} \\ \Delta z_2 = 200 \text{ mm} \end{array}$$

Les termes $50 \times \theta_8$ et $50 \times \theta_{12}$ sont liés au fait que les mesures sont effectuées tous les 10 centimètres jusqu'à 75 cm et tous les 20 cm ensuite : le terme $50 \times \theta_8$ intègre le stock sur 75-80 cm, le terme $50 \times \theta_{12}$ sur la tranche 145-150 cm.

Pour calculer la variance sur le stock $s_1^2(S)$ liée aux déterminations de $\theta(i)$, il faut que les mesures successives sur une même verticale soient indépendantes. C'est l'hypothèse généralement admise avec des mesures réalisées tous les 10 cm.

$$s_1^2(S_{0-150}) = [\sum_1^8 s^2(\theta_i)] \Delta z_1^2 + 0,25 \cdot 10^4 [s^2(\theta_8) + s^2(\theta_{12})] + [\sum_9^{11} s^2(\theta_i)] \Delta z_2^2$$

Il a été démontré mathématiquement que la variance liée à l'intégration à l'aide de la méthode des trapèzes peut être calculée par :

$$s_2^2(S_{0-150}) = \frac{z_1^2 \Delta z_1^4}{144} \left\{ \frac{\partial^2(\theta)}{\partial z^2} \right\}_{\max(0 \text{ à } z_1)}^2 + \frac{z_2^2 \Delta z_2^4}{144} \left\{ \frac{\partial^2(\theta)}{\partial z^2} \right\}_{\max(z_1 \text{ à } z_1+z_2)}^2$$

z_1 = profondeur sur laquelle l'espacement des mesures est Δz_1

z_2 = profondeur sur laquelle l'espacement des mesures est Δz_2

5.1.2. MÉTHODE UTILISÉE

Le calcul de la variance d'intégration nécessite l'évaluation de la courbure maximale $\partial^2(\theta)/\partial z^2$ de la courbe $\theta = f(z)$. Pour évaluer cette courbure, le développement de Taylor a été utilisé :

$$f(z + \Delta z) = f(z) + \Delta z f'(z) + \frac{\Delta z^2}{2} f''(z) + \frac{\Delta z^3}{6} f'''(z) + e_0(\Delta z^4)$$

$$f(z - \Delta z) = f(z) - \Delta z f'(z) + \frac{\Delta z^2}{2} f''(z) - \frac{\Delta z^3}{6} f'''(z) + e_1(\Delta z^4)$$

En additionnant les deux équations :

$$f(z + \Delta z) + f(z - \Delta z) = 2f(z) + \Delta z^2 f''(z) + e_2(\Delta z^4)$$

D'où :

$$f''(z) = \frac{f(z + \Delta z) - 2f(z) + f(z - \Delta z)}{\Delta z^2} + e_3(\Delta z^4)$$

En négligeant le terme du quatrième degré, il est possible d'évaluer la courbure à l'aide de la formule suivante :

$$\frac{\partial^2(\theta)}{\partial z^2} = \frac{\theta(z + \Delta z) - 2\theta(z) + \theta(z - \Delta z)}{\Delta z^2}$$

5.1.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1.3.1. Variance liée à la détermination de θ_1

Les valeurs des variances maximisées évaluées précédemment peuvent être reprises :

$$s^2(\theta_1) = (0,021)^2 = 4,41 \cdot 10^{-4}$$

$$s^2(\theta_2 \text{ à } 12) = (0,019)^2 = 3,61 \cdot 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} s_1^2(S_{0-150}) &= [4,41 \cdot 10^{-4} + 7 \times 3,61 \cdot 10^{-4}] \cdot 10^4 + 0,25 \cdot 10^4 \times 2 \times 3,61 \cdot 10^{-4} + 3 \times 3,61 \cdot 10^{-4} \times 4 \cdot 10^4 \\ &= 29,7 + 1,8 + 43,3 \\ &= 74,8 \end{aligned}$$

5.1.3.2. Variance d'intégration

Le calcul de la courbure maximale de la courbe $\theta = f(z)$ a été effectué pour toutes les dates de mesure de l'année 1986 sur le tube n° 3 de la parcelle N2 P1 K0 et pour toutes les profondeurs comprises entre 5 et

155 cm, à l'exception de la profondeur 75 cm, située à la limite entre la zone où les mesures étaient effectuées tous les 10 cm et celle où elles l'étaient tous les 20 cm (tableau V.13).

TABLEAU V.13
Courbure maximale des profils hydriques (tubes n°3, année 1986)

Profondeurs	15	25	35	45	55	65	95	115	135	155
$\frac{\partial^2(\theta)}{\partial z^2}$ (10 ⁻⁶)	1,2	1,2	2,0	2,0	2,2	1,0	0,7	0,6	0,4	0,2

La courbure maximale correspond à des horizons assez argileux (environ 30 % d'argile) qui se dessèchent en saison sèche et s'humidifient en saison humide, produisant de forts gradients d'humidité tant dans un sens que dans l'autre. Les courbures sont beaucoup plus faibles dans les horizons profonds du fait que les variations d'humidité sont faibles dans ces niveaux et qu'il n'existe pas de contraste textural.

La valeur maximale de la courbure est donc de 2,2 10⁻⁶ jusqu'à 75 cm de profondeur et 0,7 10⁻⁶ sur la tranche 95 - 155 cm.

$$\begin{aligned}
 s_2^2(S_{0-150}) &= \frac{(800)^2 (100)^4}{144} \left\{ \frac{\partial^2(\theta)}{\partial z^2} \right\}_{\max}^2 + \frac{(700)^2 (200)^4}{144} \left\{ \frac{\partial^2(\theta)}{\partial z^2} \right\}_{\max}^2 \\
 &= \frac{64 \times 10^4 \times 10^8}{144} \times 2,2^2 \cdot 10^{-12} + \frac{49 \cdot 10^4 \times 16 \cdot 10^8}{144} \times 0,68^2 \cdot 10^{-12} \\
 &= 2,2 + 2,5 \\
 &= 4,7
 \end{aligned}$$

5.1.3.3. Variance totale du stock

La variance totale sur l'estimation du stock et ses composantes figurent dans le tableau V.14.

TABLEAU V.14
Variance de l'estimation du stock sur la tranche 0-150 cm pour un tube.

	Stock (0-150 cm) (mm)	s ₁ ² (S)	s ₂ ² (S)	s ² (S)	s (S) (mm)	Intervalle de confiance (seuil 95 %) (mm)	CV moyen (%)
Tube 3 en 86	280 à 350	74,8	4,7	79,5	8,9	± 17,4	3

La variance associée à l'erreur d'intégration s₂² (S) est faible par rapport à celle liée à l'erreur sur l'humidité s₁² (S), et beaucoup plus faible que celle publiée par HAVERKAMP *et al.* (1984). Cela provient d'un profil d'humidité assez régulier (d'où des courbures faibles). Il en résulte que, dans notre cas, *il est inutile d'utiliser des méthodes d'intégration plus précises que la méthode des trapèzes pour évaluer le stock sur un tube.*

La variance totale du stock hydrique à une date donnée résulte donc pour la plus grande part de certains paramètres de la droite d'étalonnage : la variance sur l'ordonnée à l'origine et la variance résiduelle. Pour diminuer cette variance, il faudrait améliorer la précision de la détermination de θ par la méthode gravimétrique.

5.2. Cas de la mesure du stock sur 0-20 cm à l'aide d'un seul tube

5.2.1. BUT ET MÉTHODE UTILISÉE

La mesure à 5 cm présentant une variance supérieure à celle des niveaux inférieurs, il peut sembler intéressant de chercher à augmenter la précision sur le stock en n'utilisant que la mesure à 15 cm. Le but de cette étude est de savoir si le stock d'eau contenu dans la tranche 0-20 cm peut être caractérisé par une mesure à 15 cm ou si une mesure plus près de la surface est nécessaire. Les valeurs de stock seront calculées à partir des mêmes données de terrain, en utilisant d'une part la seule mesure neutronique effectuée à 15 cm (méthode appelée biaisée dans le texte) et d'autre part les mesures à 5 cm et à 15 cm (méthode non biaisée). Dans tous les cas, l'humidimètre à neutrons a été utilisé avec un réflecteur de surface. Les paramètres des droites d'étalonnage ont été précédemment calculés pour les cas suivants (tableau V.1) :

- mesures à 15 cm représentant la couche 0-20 cm : corrélation entre les comptages neutroniques à 15 cm et l'humidité moyenne sur la tranche 0-20 cm, mesurée par prélèvement à la tarière et séchage à l'étuve ;
- mesures à 15 cm représentant la couche 10-20 cm : corrélation des comptages avec l'humidité de la tranche 10-20 cm ;
- mesures à 5 cm représentant la couche 0-10 cm : corrélation entre les comptages neutroniques à 5 cm et l'humidité de la tranche 0-10 cm.

L'écart-type sur le stock de la tranche 0-20 cm sera évalué pour les deux méthodes avec les formules exposées précédemment (faisant intervenir la variance sur la détermination des humidités et la variance d'intégration). Cela permettra de préciser la part de la mesure à 5 cm dans l'écart-type total.

Par ailleurs, une mesure à 15 cm est-elle représentative de la tranche 0-20 cm ? En effet, une mesure intègre surtout l'humidité à proximité de la source : il n'est pas certain que l'humidité de la tranche 0-10 cm soit bien prise en compte par une mesure à 15 cm. Les valeurs de stock obtenues avec les deux méthodes sur la tranche 0-20 cm seront donc comparées pour le tube n°3 au cours de l'année 1986.

5.2.2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.2.2.1. Précision sur le stock

+ utilisation des mesures à 5 et 15 cm (méthode non biaisée)

$$\begin{aligned} s^2(S) &= s_1^2(S) + s_2^2(S) \\ s_1^2(S) &= s^2(\theta_5) \Delta z^2 + s^2(\theta_{15}) \Delta z^2 \\ &= 4,41 \cdot 10^{-4} \times 10^4 + 3,61 \cdot 10^{-4} \times 10^4 \\ &= 8,02 \end{aligned}$$

La variance d'intégration peut être évaluée à l'aide de la valeur maximale de la courbure du profil hydrique observée à 15 cm sur ce tube (Cf. précédemment).

$$s_2^2 (S) = \frac{(200)^2 (100)^4}{144} \times 1,2 \cdot 10^{-12}$$

$$= 0,04$$

$$s^2 (S) = 8,02 + 0,04 = 8,06$$

$s (S) = 2,8 \text{ mm}$

+ utilisation de la seule mesure à 15 cm (méthode biaisée)

$$s_1^2 (S) = s^2 (\theta_{15}) \Delta z^2$$

$$= 3,61 \cdot 10^{-4} \times 4 \cdot 10^4$$

$$= 14,44$$

$$s_2^2 (S) = \frac{(200)^2 (200)^4}{144} \times 1,2 \cdot 10^{-12}$$

$$= 0,064$$

$$s^2 (S) = 14,44 + 0,64 = 15,08$$

$s (S) = 3,88 \text{ mm}$

+ Conclusion

Les deux méthodes fournissent donc une précision peu différente. Le fait d'utiliser les deux mesures de 5 cm et 15 cm diminue la variance, bien que la variance liée à θ soit plus importante à 5 cm : effectuer une mesure à 5 cm et une mesure à 15 cm permet donc d'améliorer la précision sur le stock. Ce résultat provient du facteur Δz^2 , multiplié par 4 dans le cas de la méthode biaisée.

5.2.2.2. Comparaison des stocks obtenus

Lorsque l'on représente l'évolution du stock sur la tranche 0-20 cm au cours d'une année (figure V.18), il apparaît entre les deux méthodes de calcul une différence importante.

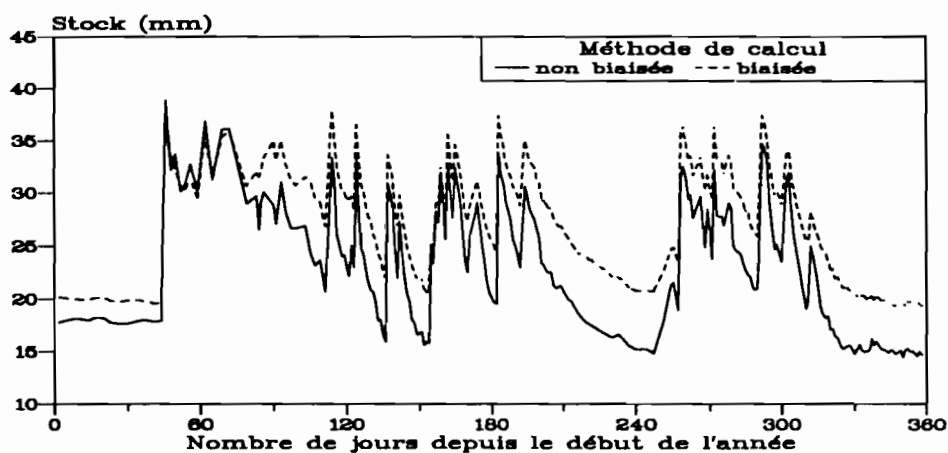


FIGURE V.18

Evolution du stock hydrique de la couche 0-20 cm selon le type d'étalonnage utilisé (biaisé et non biaisé)

Le tableau V.15 est un exemple de deux cas typiques. Dans certains cas, les deux méthodes fournissent donc des résultats très proches, mais la différence entre les deux évaluations peut atteindre 25 %. Cette différence, qui se retrouve pendant toutes les périodes de sécheresse, existe également au cours de certaines périodes humides.

TABLEAU V.15

Exemple d'évaluation du stock sur la tranche 0-20 cm à l'aide de deux méthodes (tube n°3, année 1986).

date (quantième de l'année)	stock méthode biaisée (mm)	stock méthode non biaisée (mm)
65	31,9	31,2
240	21,1	15,2

L'explication de ces différents résultats est la suivante : la mesure à 15 cm intégrant mal l'humidité à proximité de la surface, prendre la valeur à 15 cm comme représentative de la tranche 0-20 cm repose sur l'hypothèse que le gradient d'humidité sur la tranche 0-20 cm qui a été observé lors de l'étalonnage ne varie pas au cours du temps. Or, l'étalonnage a été réalisé lors d'un drainage interne, le sol étant protégé par une bâche : l'humidité de surface est restée plus élevée que dans les conditions naturelles. C'est pourquoi une différence de stock importante apparaît selon la méthode utilisée.

En conclusion, il apparaît préférable d'effectuer la première mesure à proximité de la surface du sol, la variance plus élevée d'une mesure à 5 cm ne pénalisant pas la précision sur le stock total, à la condition que le réglage du zéro du dispositif de mesure de la profondeur soit réalisé dans l'étui et non pas en fond de tube. Si la mesure faite à 15 cm doit refléter l'humidité de la tranche 0-10 cm, il faut réaliser l'étalonnage dans les conditions de gradient d'humidité les plus fréquentes en conditions naturelles, en sachant que dans certaines conditions de gradient les résultats peuvent être biaisés. Dans ce cas, il faut proscrire le suivi d'un ressuyage sous sol bâché qui maintient des humidités élevées dans l'horizon de surface.

5.3. Cas de la mesure du stock sur 0-150 cm sur plusieurs tubes

5.3.1. THÉORIE

La théorie développée pour un seul tube s'applique également au cas de plusieurs tubes, mais en utilisant la variance sur l'humidité moyenne à chaque niveau $s^2(\langle\theta\rangle)$ à la place de la variance sur θ . La variance sur le stock moyen $s^2(\langle S \rangle)$ est également composée de deux termes :

$$s^2(\langle S \rangle) = s_1^2(\langle S \rangle) + s_2^2(\langle S \rangle) \quad \begin{array}{l} s_1^2(\langle S \rangle) = \text{variance liée à la détermination de } \langle\theta\rangle \\ s_2^2(\langle S \rangle) = \text{variance liée à la méthode d'intégration} \end{array}$$

5.3.2. MÉTHODE UTILISÉE

Pour chaque profondeur des trois parcelles étudiées, la variance sur l'humidité moyenne a été calculée, pour un nombre de tubes compris entre 1 et 30, à partir des formules développées précédemment. Ces valeurs ont permis de calculer la variance liée à la détermination de $\langle\theta\rangle$ pour chaque parcelle et pour chaque nombre de tubes.

La variance liée à la méthode d'intégration fait intervenir la courbure maximale des profils hydriques moyens. Cette courbure a été prise égale à celle observée sur les profils hydriques de chaque tube : la courbure est ainsi maximisée, car le profil hydrique moyen est plus régulier que les profils hydriques de chaque tube.

5.3.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'évaluation de l'écart-type sur la valeur du stock en fonction du nombre de tubes est représentée sur la figure V.19. La décroissance est rapide entre 1 et 4 tubes : l'écart-type est divisé par un facteur 2 environ. Elle est plus faible ensuite, pour tendre vers une asymptote à 2,6 mm. Cette asymptote provient de la variance liée à l'étalonnage et de la variance d'intégration.

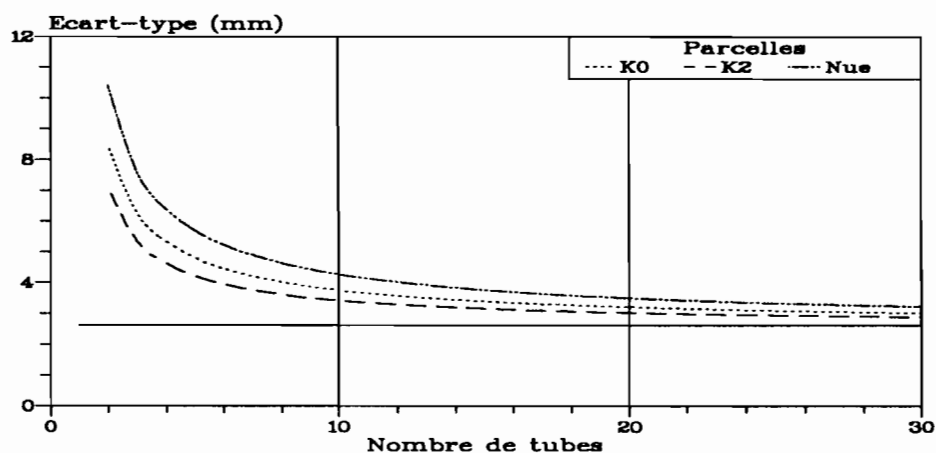


FIGURE V.19
Evolution de l'écart-type sur le stock en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (tranche 0-150 cm)

Les écart-types des différentes parcelles ne diffèrent que de moins de 1,5 mm dès que le nombre de tubes atteint 4, ce qui traduit une hétérogénéité spatiale comparable sur les trois parcelles. La précision sur le stock pour 4 nombres différents de tubes a été calculée pour les trois parcelles (tableau V.16).

TABLEAU V.16
Précision de la détermination du stock moyen (0-150 cm) d'une parcelle en fonction du nombre de tubes (intervalle de confiance au seuil 95 %).

Nombre de tubes	Parcelle N2 P1 K0			Parcelle N2 P1 K2			Parcelle nue		
	écart-type (mm)	Intervalle de confiance (mm)	CV moyen (%)	écart-type (mm)	Intervalle de confiance (mm)	CV moyen (%)	écart-type (mm)	Intervalle de confiance (mm)	CV moyen (%)
1	8,4	± 16	3	7,1	± 14	2	10,4	± 20	3
4	4,7	± 9	2	4,3	± 8	1	5,7	± 11	2
10	3,6	± 7	1	3,3	± 6	1	4,1	± 8	1
30	3,0	± 6	1	2,9	± 6	1	3,2	± 6	1

Ces chiffres montrent qu'avec un protocole utilisant quatre tubes par parcelle, le coefficient de variation du stock d'eau est de l'ordre de 1 à 2 % pour toutes les parcelles. Pour améliorer la précision du résultat, l'utilisation de méthodes d'intégration plus élaborées que la méthode des trapèzes pourrait être envisagée. Les calculs ont été effectués dans le cas de la parcelle N2 P1 K0 pour 4 tubes par parcelle. Dans le cas où l'erreur d'intégration pourrait être entièrement supprimée ($s_2^2 (<S>) = 0$), l'intervalle de confiance sur le stock devient 8 mm, soit 1 mm de moins qu'avec la méthode des trapèzes. *Le recours à des méthodes d'intégration plus élaborées que celle des trapèzes ne se justifie donc pas pour évaluer le stock hydrique moyen.*

6. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE LA VARIATION DU STOCK HYDRIQUE ENTRE DEUX DATES

6.1. Cas des mesures sur un seul tube

6.1.1. THÉORIE

Le développement effectué pour le calcul de la variance sur la mesure du stock S s'applique, en remplaçant les humidités par les différences d'humidité :

$$s^2 (S - S') = s_1^2 (S - S') + s_2^2 (S - S') \quad \begin{array}{l} s_1^2 (S - S') = \text{variance liée aux déterminations de } \theta - \theta' \\ s_2^2 (S - S') = \text{variance liée à la méthode d'intégration} \end{array}$$

La méthode d'intégration retenue pour calculer les variations de stock est la méthode des trapèzes appliquée aux variations d'humidité de chaque niveau :

$$S_{0-150} - S'_{0-150} = \sum_1^8 (\theta - \theta')_i \Delta z_1 + 50 (\theta - \theta')_8 + \sum_9^{11} (\theta - \theta')_i \Delta z_2 + 50 (\theta - \theta')_{12}$$

$$S_{0-150} - S'_{0-150} \text{ en mm}$$

$$\Delta z_1 = 100 \text{ mm}$$

$$\Delta z_2 = 200 \text{ mm}$$

En admettant, comme précédemment, l'indépendance des mesures sur une même verticale, la variance liée aux déterminations de $\theta - \theta'$ peut être estimée par :

$$s_1^2 (S_{0-150} - S'_{0-150}) = [\sum_1^8 s^2(\theta - \theta')_j] \Delta z_1^2 + 0,25 \cdot 10^4 [s^2(\theta - \theta')_8 + s^2(\theta - \theta')_{12}] + [\sum_9^{11} s^2(\theta - \theta')_i] \Delta z_2^2$$

La variance d'intégration peut être estimée à l'aide de la formule utilisée pour la mesure du stock, en remplaçant la courbure maximale du profil hydrique par la courbure maximale du profil de variation d'humidité en fonction de la profondeur.

6.1.2. MÉTHODE UTILISÉE

Le seul paramètre posant des problèmes d'évaluation est la courbure maximale de la courbe de variation d'humidité en fonction de la profondeur. Pour maximiser cette valeur, la courbure a été évaluée à partir de mesures de profils hydriques séparés de 24 heures, avant et après des pluies n'ayant pas humecté tout le profil : d'importantes variations d'humidité affectaient donc une partie du profil, alors que le reste restait à une humidité pratiquement constante. La courbure a été évaluée dans chaque cas à l'aide de la méthode des différences finies présentée précédemment.

6.1.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1.3.1. Variance liée à la détermination de $\theta - \theta'$

Le calcul de la variance totale de $\theta - \theta'$ par niveau de mesure (tableau V.9) permet de définir des valeurs qui maximisent la variance :

$$s^2(\theta - \theta')_1 = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$s^2(\theta - \theta')_{2 \text{ à } 12} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\begin{aligned} s_1^2 (S_{0-150} - S'_{0-150}) &= [2 \cdot 10^{-4} + 7 \times 1 \cdot 10^{-5}] \cdot 10^4 + 0,25 \cdot 10^4 \times 2 \times 1 \cdot 10^{-5} + 3 \times 1 \cdot 10^{-5} \times 4 \cdot 10^4 \\ &= 2,7 + 0,05 + 1,2 \\ &= 3,9 \end{aligned}$$

6.1.3.2. Variance liée à la méthode d'intégration

Le calcul de la courbure maximale des courbes de variation d'humidité en fonction de la profondeur montre qu'une valeur de $3,3 \cdot 10^{-6}$ maximise la courbure sur la tranche 0-75 cm et qu'une valeur de $1,2 \cdot 10^{-6}$ la maximise sur la tranche 95-155 cm. Comme l'humidité des horizons profonds varie peu au cours du temps, la courbure y est plus faible que dans les horizons supérieurs.

$$\begin{aligned} s_1^2 (S_{0-150} - S'_{0-150}) &= \frac{64 \cdot 10^4 \times 10^8}{144} \times (3,3)^2 \cdot 10^{-12} + \frac{49 \cdot 10^4 \times 16 \cdot 10^8}{144} \times 1,2 \times 2 \cdot 10^{-12} \\ &= 4,8 + 7,8 \\ &= 12,6 \end{aligned}$$

6.1.3.3. Variance totale sur la variation de stock

La précision de l'évaluation de la variation de stock entre la surface et 1,5 m ($\pm 8,0$ mm, tableau V.17) est donc meilleure que celle de l'évaluation du stock lui-même ($\pm 17,4$ mm, tableau V.14 page 118).

TABLEAU V.17
Variance de l'estimation d'une variation de stock sur la tranche 0-150 cm pour un tube

	Stock (0-150 cm) (mm)	$s_1^2 (S - S')$	$s_2^2 (S - S')$	$s^2 (S - S')$	$s (S - S')$ (mm)	Intervalle de confiance (seuil 95 %) (mm)
Tube 3	280 à 350	3,9	12,6	16,5	4,1	$\pm 8,0$

Dans le cas de la variation de stock, la variance $s^2 (S - S')$ liée à la méthode d'intégration est la principale composante de la variance totale. Contrairement au calcul des stocks, il serait donc souhaitable d'utiliser des méthodes d'intégration plus élaborées que la méthode des trapèzes pour diminuer la variance totale.

6.2. Cas des mesures sur plusieurs tubes

6.2.1. THÉORIE

La théorie développée pour évaluer la précision sur la valeur du stock moyen sur plusieurs tubes s'applique en utilisant la variance sur la moyenne des différences d'humidité $s^2 (\langle \theta - \theta' \rangle)$ à la place de la variance sur θ . La variance sur la moyenne des variations de stock est donc composée de deux termes :

$$s^2 (\langle S - S' \rangle) = s_1^2 (\langle S - S' \rangle) + s_2^2 (\langle S - S' \rangle)$$

$s_1^2 (\langle S - S' \rangle)$: variance liée à la détermination de $\langle \theta - \theta' \rangle$
 $s_2^2 (\langle S - S' \rangle)$: variance liée à la méthode d'intégration

6.2.2. MÉTHODE UTILISÉE

La variance sur les différences d'humidités moyennes a été calculée pour chaque profondeur, pour un nombre de tubes compris entre 1 et 30, à partir des formules développées dans le paragraphe consacré à la précision sur les différences d'humidité. Ces valeurs ont permis d'évaluer la variance s_1^2 en fonction du nombre de tubes.

La variance d'intégration fait intervenir la courbure maximale des profils des différences d'humidité moyennes. Cette courbure a été calculée, pour chaque parcelle, à partir de mesures de profils hydriques séparées de 24 heures, avant et après des pluies n'ayant pas humecté la totalité du profil. Comme précédemment, la méthode des différences finies a été utilisée.

6.2.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les courbures maximales obtenues sur les profils moyens de différences d'humidité sont du même ordre de grandeur que les courbures maximales obtenues sur les profils de différences d'humidité sur chaque tube. Les variations d'humidité sont donc voisines d'un tube à l'autre. Les valeurs de courbure utilisées précédemment ont donc été retenues : $3,3 \cdot 10^{-6}$ pour la tranche 0-75 cm et $1,2 \cdot 10^{-6}$ pour la tranche 95-

155 cm. La variance d'intégration s^2 ($\langle S-S' \rangle$) a donc la même valeur que dans le cas de mesures sur un seul tube, et ceci quel que soit le nombre de tubes.

Les résultats obtenus sur les trois parcelles sont résumés par la figure V.20. Cette figure est comparable à celle qui concerne les valeurs de stocks : comme la composante spatiale est la principale composante de la variance totale et que les ordres de grandeur des composantes spatiales sur les humidités et sur les différences d'humidité sont les mêmes, ce résultat est logique. Le classement relatif des trois parcelles est cependant différent : la parcelle N2 P1 K2 présentait le plus faible écart-type sur le stock, la parcelle N2 P1 K0 est celle où les résultats sur les différences de stocks sont les plus précis.

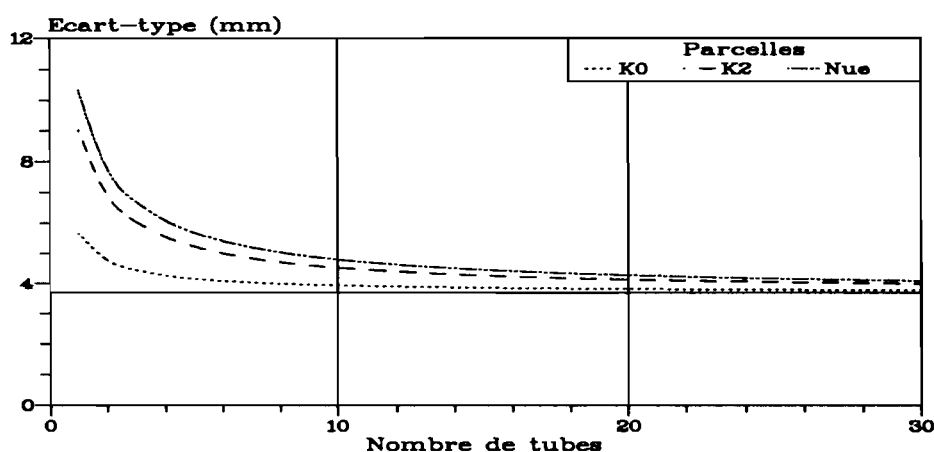


FIGURE V.20
Evolution de l'écart-type des variations de stock en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (tranche 0-150 cm)

La valeur de l'asymptote est plus élevée (de près d'un millimètre) dans le cas des variations de stocks. Cette valeur provient de la composante d'étalonnage et de la variance d'intégration. Cependant, alors que dans le cas du stock la variance d'intégration représente 2,2 mm sur l'écart-type du stock, cette valeur monte à 3,5 mm pour les différences de stock, en raison d'une plus forte courbure des profils de différences d'humidité. Pour 4 tubes par parcelles, l'erreur d'intégration représente donc de 60 à 80 % de l'écart-type. Dans ce cas, il aurait été pleinement justifié d'utiliser des méthodes d'intégration permettant de réduire cette variance. Il faut toutefois souligner que ce résultat provient d'une faible variance d'étalonnage. Avec un étalonnage moins précis, le poids relatif de la variance d'intégration diminuerait.

Avec le protocole employé de 4 tubes par parcelles, l'intervalle de confiance varie entre 8 et 12 mm selon les parcelles (tableau V.18).

TABLEAU V.18
Précision de la détermination de la variation de stock moyenne (0-150 cm) d'une parcelle en fonction du nombre de tubes
(intervalle de confiance au seuil 95 %)

Nombre de tubes	Parcelle N2 P1 K0		Parcelle N2 P1 K2		Parcelle nue	
	Ecart-type (mm)	Intervalle de confiance (mm)	Ecart-type (mm)	Intervalle de confiance (mm)	Ecart-type (mm)	Intervalle de confiance (mm)
1	5,6	± 11	9,0	± 18	10,3	± 20
4	4,3	± 8	5,5	± 11	6,1	± 12
10	3,9	± 8	4,5	± 9	4,8	± 9
30	3,8	± 8	4,0	± 8	4,1	± 8

Etant donné l'intervalle de confiance sur les variations de stocks hydriques, il est illusoire de travailler avec un pas de temps inférieur à 10 jours si l'objet de l'étude est de déterminer l'évapotranspiration du couvert végétal avec une précision de 1 mm.j⁻¹. Augmenter le nombre de tubes par parcelle n'améliorerait pas la précision d'une manière décisive ; le réduire à 1 tube augmente par contre l'écart-type de 40 à 70 %. Le nombre de tubes choisi (4 tubes par parcelle) apparaît donc un compromis raisonnable, compte-tenu du travail de terrain et de la précision que la méthode permet d'atteindre.

Si la variance d'intégration avait pu être réduite à 1,2 (valeur obtenue par HAVERKAMP *et al.* (1984), avec la méthode de Simpson), l'intervalle de confiance aurait été réduit à ± 4 à 7 mm selon les parcelles (pour 4 tubes par parcelle), permettant alors de travailler avec un pas de temps de 7 jours, en gardant la même précision de 1 mm.j⁻¹.

7. CONCLUSION SUR LA PRÉCISION DES MESURES D'HUMIDITÉ ET DE STOCK HYDRIQUE

Les tableaux V.19 et V.20 récapitulent les principaux résultats obtenus sur les écart-types des humidités et des stocks lors de cette étude de la précision de la méthode neutronique.

TABLEAU V.19
Ecart-types moyens sur les humidités et les variations d'humidité selon le protocole utilisé (cm³.cm⁻³)

Protocole	Humidité		Variation d'humidité	
	5 cm	15-195 cm	5 cm	15-195 cm
1 tube isolé	0,021	0,019	0,013	0,003
4 tubes pour une parcelle	0,021	0,009	0,015	0,009
30 tubes pour une parcelle	0,015	0,004	0,010	0,004

TABLEAU V.20
Ecart-types sur les stocks et les variations de stock selon le protocole utilisé (tranche 0-150 cm, en mm d'eau)

Protocole	Stock			Variation de stock		
	N2 P1 K0	N2 P1 K2	nue	N2 P1 K0	N2 P1 K2	nue
1 tube isolé	8,9			4,1		
4 tubes pour une parcelle	4,7	4,3	5,7	4,3	5,5	6,1
30 tubes pour une parcelle	3,0	2,9	3,2	3,8	4,0	4,1

Les formules de la littérature et celles développées au cours de cette étude permettent de déterminer ces écart-types lorsque l'on dispose à la fois des données sur la précision de l'étalonnage utilisé et de tubes d'accès en nombre suffisant pour évaluer la variabilité spatiale. Cependant, l'établissement de ces valeurs nécessite de nombreux calculs qu'il est difficile de réaliser lors de chaque étude : des conclusions générales doivent être dégagées de ce travail.

La précision sur des valeurs moyennes de plusieurs tubes ne peut pas être estimée en divisant la variance obtenue sur un tube par le nombre de tubes. En effet, l'erreur liée à l'étalonnage introduit un facteur indépendant du nombre de tubes utilisés. Le théorème central limite, parfois utilisé pour déterminer le nombre de tubes à implanter pour obtenir une précision donnée, n'est donc utilisable que si l'erreur liée à l'étalonnage est négligeable.

Il n'est pas possible d'estimer la variance des différences par le double de la variance de la valeur. Cela provient de deux facteurs différents : d'une part la variabilité spatiale sur les différences d'humidité est indépendante de celle sur les valeurs elle-mêmes et d'autre part l'erreur d'étalonnage liée à la détermination de l'ordonnée à l'origine n'intervient pas lorsque l'on travaille sur les différences.

Lorsque l'on étudie les différentes composantes de la variance, la composante spatiale est la plus importante dans tous les cas. Ce résultat, en accord avec tous les résultats antérieurs (SINCLAIR & WILLIAMS, 1979 ; GREACEN, 1981 ; HAVERKAMP *et al.*, 1984), montre la nécessité d'adopter un dispositif expérimental qui permette d'évaluer la composante spatiale, en prenant en compte les éventuelles autocorrélations.

L'importance de la composante d'étalonnage est variable selon les horizons : souvent négligeable devant la composante spatiale, elle est du même ordre de grandeur à la profondeur 5 cm. SINCLAIR & WILLIAMS (1979) décrivent également deux exemples où la composante d'étalonnage est du même ordre de grandeur, voire supérieure dans un cas, à la composante spatiale. Si un étalonnage gravimétrique est retenu, le suivi simultané à l'humidimètre et à la tarière d'un ressuyage après un apport d'eau semble permettre d'obtenir les valeurs de coefficients d'étalonnage les plus précises. Comme la précision sur les paramètres d'étalonnage dépend du nombre de couples, il est toujours souhaitable de multiplier les mesures.

La variance instrumentale, la variance de repositionnement et la variance d'autocorrélation entre des mesures successives (dans le cas de l'étude des variations) sont toujours très faibles par rapport à la composante spatiale et sont donc numériquement négligeables. Leur ordre de grandeur est comparable : si l'une est prise en

compte, les autres doivent l'être également. En ce qui concerne les erreurs instrumentales, si la variance est négligeable, il est par contre important de vérifier l'absence de dérive en effectuant régulièrement des mesures dans un milieu standard (l'eau par exemple). Sur l'appareil utilisé, une dérive pouvant atteindre 3 % en valeur relative sur une durée d'un quart d'heure a été observée (POSS, 1984).

*Enfin, lors de calculs de stock et de variation de stock, la méthode d'intégration peut parfois introduire une variance qui n'est pas négligeable devant les autres composantes de la variance totale. Si la méthode des trapèzes, d'une mise en oeuvre simple, est généralement suffisante, les méthodes de Simpson ou de Newton devraient être utilisées lorsque les gradients, en fonction de la profondeur, sont importants, comme c'est le cas, en particulier, pour des sols à fort contraste textural (HAVERKAMP *et al.*, 1984).*

La précision de la détermination des humidités, des stocks et de leurs variations à l'aide de l'humidimètre à neutrons à l'échelle d'une parcelle n'est que très peu limitée par la précision de l'appareil lui-même. *La principale source d'imprécision provient de la difficulté à intégrer la variabilité spatiale lors de deux étapes successives :*

- au moment de l'étalonnage, car il faut prélever des échantillons représentatifs de ce qui est mesuré par l'appareil ;
- au moment de l'établissement du plan d'implantation des tubes de mesure, car chaque tube ne caractérise qu'un cylindre de sol d'environ 20 cm de rayon.

Chercher à améliorer la précision de ces déterminations conduit donc à poser le problème de l'estimation, sur une surface donnée, de valeurs centrales de variables à l'aide de mesures très ponctuelles dans un milieu hétérogène. La connaissance de l'organisation des sols dans l'espace reste donc plus que jamais d'actualité, comme l'a souligné WILDING (1985) lors d'un atelier sur la variabilité spatiale des sols : *"Spatial variability of soil is not an academic question. It is a real landscape attribute: our unwillingness or inability to identify it in no way decreases its magnitude or existence..."*

8. PRÉCISION SUR L'ÉVALUATION DES QUANTITÉS DRAINÉES

8.1. Théorie

Lorsque l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé est vertical, le flux q à un niveau donné peut être évalué à l'aide de l'équation de Darcy généralisée :

$$q = -K \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z}$$

K : coefficient de conductivité hydraulique au niveau considéré
 H_2 et H_1 : charges hydrauliques à deux niveaux situés de part et d'autre de la cote de référence et distants d'une distance verticale ΔZ (axe orienté positivement vers le bas, origine à la surface du sol)

La charge hydraulique H est liée aux tensions h par la relation :

$$H = h - z$$

z : profondeur

L'hypothèse selon laquelle la conductivité hydraulique K et l'humidité volumique θ ou la tension h sont liées par une fonction exponentielle (DAVIDSON *et al.*, 1969) a été utilisée :

$$K(\theta) = \exp(a_1 + b_1 \theta)$$

$$K(h) = \exp(a_2 + b_2 h)$$

Il vient :

$$q = - \exp(a_1 + b_1 \theta) \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z} \quad (14)$$

$$q = - \exp(a_2 + b_2 h) \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z} \quad (15)$$

Pour calculer la précision sur q , il n'est pas possible de développer un calcul statistique analogue à celui réalisé pour les valeurs d'humidité et de stock, en raison de la relation exponentielle utilisée pour calculer q . L'effet des erreurs affectant chaque paramètre des équations sera donc estimé à l'aide de différentielles dq .

Malgré l'abondance des articles consacrés au "problème de la perméabilité", pour reprendre l'expression de GARDNER (1974), peu d'attention a été apportée jusqu'à présent à la précision des valeurs estimées de conductivité. FLUHLER *et al.* (1976) ont développé des calculs applicables à un dépouillement des profils instantanés, avec lissage des gradients hydrauliques, qui ne s'appliquent pas à la méthode de dépouillement retenue ici. Les erreurs relatives sur la conductivité hydraulique K étaient dans ce cas de 20 % à plus de 100 %. Seuls VAUCLIN & VACHAUD (1987) ont développé des calculs d'erreur sur K . L'approche par différenciation qu'ils ont utilisée sera reprise ici. Mais les calculs diffèrent cependant, car la forme mathématique de l'équation retenue pour K par ces auteurs est une fonction puissance (CHONG *et al.*, 1981), et non une fonction exponentielle. Par ailleurs, les publications de FLUHLER *et al.* (1976) et de VAUCLIN & VACHAUD (1987) visaient à définir la précision sur la conductivité hydraulique en tant que telle ; les erreurs qui en résultent sur l'évaluation des quantités drainées à un niveau donné n'ont pas été calculées. Un calcul de précision sur le drainage à la cote de référence choisie (150 cm) sera donc développé. Les résultats de cette étude seront ensuite utilisés pour définir la méthode de traitement des données permettant d'obtenir la précision la plus élevée possible sur le bilan hydrique.

$$dq = -\frac{1}{\Delta Z} [(H_2 - H_1) dK + K d(H_2 - H_1)]$$

$$dq = -\exp(a_1 + b_1 \theta) \left[\frac{H_2 - H_1}{\Delta Z} (da_1 + \theta db_1 + b_1 d\theta) + \frac{1}{\Delta Z} (dH_2 - dH_1) \right]$$

$$dq = -\exp(a_2 + b_2 h) \left[\frac{H_2 - H_1}{\Delta Z} (da_2 + h db_2 + b_2 dh) + \frac{1}{\Delta Z} (dH_2 - dH_1) \right]$$

Les erreurs absolues $|\Delta q|$ sont inférieures à la somme des valeurs absolues des erreurs sur chaque terme. En remplaçant dH par sa valeur dh , il vient :

$$|\Delta q| \leq \exp(a_1 + b_1 \theta) \left[\left| \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z} \right| (|\Delta a_1| + |\theta \Delta b_1| + |b_1 \Delta \theta|) + 2 \frac{|\Delta h|}{\Delta Z} \right]$$

$$|\Delta q| \leq \exp(a_2 + b_2 h) \left[\left| \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z} \right| (|\Delta a_2| + |h \Delta b_2| + |b_2 \Delta h|) + 2 \frac{|\Delta h|}{\Delta Z} \right]$$

Dans cette expression, la première partie, qui comprend le gradient de charge hydraulique $(H_2 - H_1) / \Delta Z$ en facteur, ne comporte que des termes relatifs au coefficient de conductivité : elle indique donc la part d'erreur qui provient de la détermination de ce coefficient. La seconde partie de l'expression résulte uniquement de l'erreur sur la détermination du gradient de charge hydraulique.

Les valeurs relatives aux différents paramètres peuvent être estimées par leurs écart-types (JOHNSTON, 1963 ; VAUCLIN *et al.*, 1983 ; VAUCLIN & VACHAUD, 1987). Les écarts-types sur les coefficients a_1 , a_2 , b_1 et b_2 sont déterminés lors de l'établissement des régressions. Cette méthode de calcul des erreurs est cependant beaucoup moins puissante que celle qui a été développée pour les humidités et les stocks, car elle ne permet pas de préciser les seuils de probabilité pour lesquels ces erreurs sont atteintes.

Pour calculer les écart-types des coefficients des régressions, la méthode de détermination de ces régressions doit être précisée. Les deux équations $K(\theta) = \exp(a_1 + b_1 \theta)$ et $K(h) = \exp(a_2 + b_2 h)$ sont d'abord transformées en :

$$\text{Ln}[K(\theta)] = a_1 + b_1 \theta \quad \text{et} \quad \text{Ln}[K(h)] = a_2 + b_2 h.$$

Les coefficients sont donc déterminés en effectuant une régression linéaire non biaisée entre des couples de valeurs $(\text{Ln}(K), \theta)$ ou $(\text{Ln}(K), h)$, permettant de calculer les écart-types sur la valeur des coefficients de corrélation.

Pour obtenir ces couples de valeurs, il faut suivre le ressuyage du sol après un apport d'eau, soit par la méthode du drainage interne, soit par celle du "bilan naturel". Il est ainsi possible de connaître, à chaque

instant, le stock hydrique contenu dans la tranche de sol comprise entre le plan de flux nul (surface dans le cas du "drainage interne", profondeur à déterminer dans le cas du "bilan naturel") et la cote de référence.

L'hypothèse d'une évolution du stock hydrique S proportionnelle au logarithme du temps durant le ressuyage du sol a été retenue (hypothèse résultant en partie de la forme exponentielle des relations K (θ) et K (h), LIBARDI *et al.*, 1980) :

$$S = a' + b' \ln(t) \quad \text{d'où} \quad \frac{dS}{dt} = \frac{b'}{t}$$

Comme il n'y a aucun flux à la partie supérieure de la tranche de sol considérée, toute diminution du stock provient du drainage :

$$q = \frac{dS}{dt} = -K \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z} \quad \text{d'où} \quad \frac{b'}{t} = -K \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z}$$

$$\boxed{K = - \frac{b'}{t} \times \frac{\Delta Z}{H_2 - H_1}} \quad (16)$$

Pour chaque temps t pour lequel les valeurs de h ou de θ sont disponibles, il est ainsi possible d'évaluer K et donc d'obtenir des couples (Ln(K), h) ou (Ln(K), θ) pour lesquels une régression linéaire peut être établie. Afin d'effectuer une régression non biaisée, il faut évaluer l'erreur sur les valeurs de Ln(K). Les valeurs de K sont déduites de la relation :

$$\frac{b'}{t} = -K \frac{H_2 - H_1}{\Delta Z}$$

En prenant la différentielle, il vient :

$$\frac{dK}{K} = - \frac{db'}{b'} - \frac{d(H_2 - H_1)}{H_2 - H_1}$$

Or, la différentielle dy de la variable y = Ln (K) est recherchée :

$$dy = \frac{dK}{K}$$

L'erreur d(Ln(K)) pour toutes les valeurs de K peut donc être évaluée par l'expression suivante :

$$\boxed{\Delta \ln(K) \leq \frac{|\Delta b'|}{|b'|} + 2 \frac{|\Delta h|}{|H_2 - H_1|}} \quad (17)$$

Pour un gradient de charge donné, l'erreur sur Ln(K) est donc constante, quelle que soit la valeur de K.

8.2. Méthode utilisée

Comme deux des trois parcelles étudiées (N2 P1 K0 et N2 P1 K2) font partie d'un dispositif agronomique de longue durée, il était important de ne pas modifier leur régime hydrique naturel. La méthode du "drainage interne" ne pouvait donc être utilisée, en raison de l'apport d'eau qu'elle nécessite : la méthode du "bilan naturel" a donc été retenue.

Dans un premier temps, de longues périodes sans pluie suivant une pluie ayant humecté tout le profil jusqu'à 150 cm ont été recherchées sur les années 1986 et 1987. Nous avons choisi la période la plus longue au cours de laquelle le système racinaire du maïs n'atteignait pas le niveau du plan de flux nul, déterminé à partir de mesures tensiométriques (tensiomètres implantés tous les 10 cm jusqu'à 75 cm de profondeur).

Pour chaque date de mesure de profil hydrique, le stock d'eau compris entre la profondeur du plan de flux nul et 150 cm fut calculé à l'aide du logiciel BHYSON (POSS, 1987). Une régression linéaire entre la valeur du stock et le logarithme du temps a alors permis de calculer les coefficients de la droite et leurs écarts-types.

Par ailleurs, le gradient de charge hydraulique $(H_2 - H_1) / \Delta Z$ fut calculé pour chaque date de mesure, à l'aide de tensiomètres implantés à 130 et 170 cm. Le coefficient de conductivité a pu être calculé à ces dates.

Les régressions non biaisées entre K et θ et entre K et h ont alors été calculées pour les trois parcelles. Les écarts-types sur les coefficients de la régression ont finalement permis d'évaluer les erreurs sur le drainage.

8.3. Résultats et discussions

8.3.1. LA TENSION DE L'EAU DANS LE SOL

8.3.1.1. Précision des mesures

Les évolutions des tensions sont très voisines au cours des trois premières semaines pour 4 événements pluvieux différents (figure V.21), à l'exception des deux premiers jours après la pluie, car le front d'humectation peut mettre plusieurs jours pour parvenir à 155 cm lorsque la quantité précipitée n'est pas importante.

Au cours des 4 premiers jours après la pluie, l'évolution de la tension est rapide : environ 10 hPa entre le 2ème et le 3ème jour, 5 hPa entre le 3ème et le 4ème jour. Les variations ne sont plus que de quelques hPa ensuite. Cette évolution rapide soulève le problème du pas de temps entre deux mesures successives. Avec le pas journalier retenu (mesures tous les matins à 7 heures), la précision de la mesure est de l'ordre de ± 10 hPa le deuxième jour et ± 5 hPa le troisième (figure V.21).

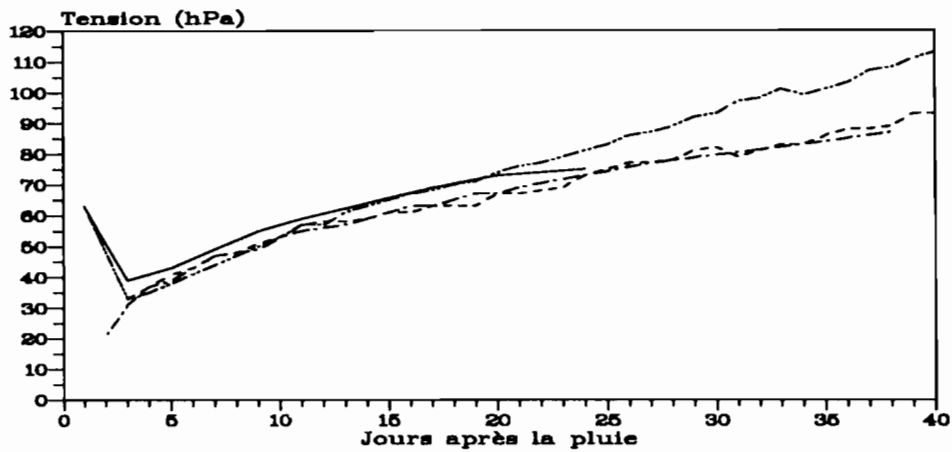


FIGURE V.21

Evolution des tensions de l'eau dans le sol après 4 pluies différentes (profondeur 155 cm, parcelle N2 P1 K0)

Pour évaluer la précision des mesures pour les temps plus longs, une méthode analogue à celle utilisée pour étudier la précision des comptages neutroniques a été retenue. Trois périodes pendant lesquelles la croissance des tensions en fonction du temps était linéaire ont été identifiées pour la parcelle N2 P1 K0. Les tensions observées au cours de ces périodes couvrent la plus grande partie de la gamme des valeurs rencontrées en phase de drainage (de 45 à 200 hPa). Une régression linéaire des tensions en fonction du temps a été réalisée. Les graphes et les écart-types résiduels montrent qu'un ajustement linéaire était justifié (figure V.22) : les écarts-types résiduels, qui expriment la variabilité des mesures de tension, sont de 3,3 ; 1,7 et 2,2 hPa, sans liaison entre ces valeurs et la gamme de variation des tensions.

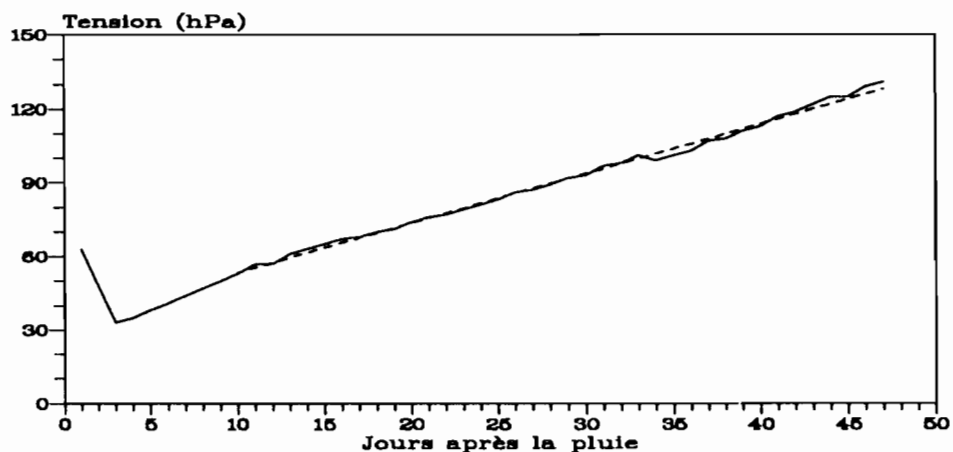


FIGURE V.22

Ajustement linéaire de l'évolution des tensions de l'eau dans le sol à partir de 10 jours après une pluie (parcelle N2 P1 K0)

Une valeur de 10 hPa a été retenue comme écart-type pour le deuxième jour après la pluie, 5 hPa pour le troisième jour et 3,3 hPa pour les jours suivants.

Cette méthode n'a pas permis de prendre en compte la variabilité spatiale des valeurs de tension. En effet, un seul tensiomètre était implanté par niveau car les tensiomètres n'étaient destinés à l'origine qu'à mesurer le gradient de charge. Il aurait été préférable d'implanter plusieurs tensiomètres à la cote où le drainage devait être estimé, aussi bien pour évaluer la variabilité spatiale que pour parer à toute défaillance du matériel. Dans leur étude de précision des mesures de conductivité hydraulique, FLUHLER *et al.* (1976) indiquent cependant une faible variabilité spatiale des mesures de tension, avec des valeurs d'écart-type comprises entre 2 et 8 hPa.

8.3.1.2. Relations humidité volumique-tension

La démarche retenue pour évaluer les différents termes du bilan hydrique n'impose pas d'étudier les relations humidité volumique-tension. Nous allons voir que ces relations expliquent cependant que le même type de loi de variation peut être appliqué à $K(\theta)$ et à $K(h)$.

Sur les figures V.23 et V.24 ont été représentées toutes les valeurs d'humidité volumique (moyenne de 4 tubes) et de tension relevées au cours de l'année 1986 sur la parcelle N2 P1 K0 à 15 cm et à 155 cm (235 relevés). A 15 cm, où la teneur en argile est de l'ordre de 20 %, une courbe de forme classique a été retrouvée : l'humidité diminue de $0,06 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ de la saturation à pF 2 (100 hPa), mais seulement de moins de $0,03 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ entre pF 2 et pF 3 (1000 hPa). A 155 cm, la gamme de variation des tensions est plus limitée (de 20 à 200 hPa) : dans cette zone climatique, le front d'assèchement du sol par évaporation ne parvient pas à cette profondeur, même en fin de saison sèche, et le drainage a été estimé à cette profondeur car les racines n'y parviennent pas. La gamme de variation des humidités, dans cet horizon à 45 % d'argile, est encore plus réduite : moins de $0,02 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Par ailleurs, pour une valeur donnée de tension, la dispersion des valeurs d'humidité est comparable à la précision des mesures ($0,009 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) : l'hystérésis, toujours limitée dans ce type de matériau, est négligeable dans le cas étudié (ce qui n'est pas le cas à 15 cm, figure V.23).

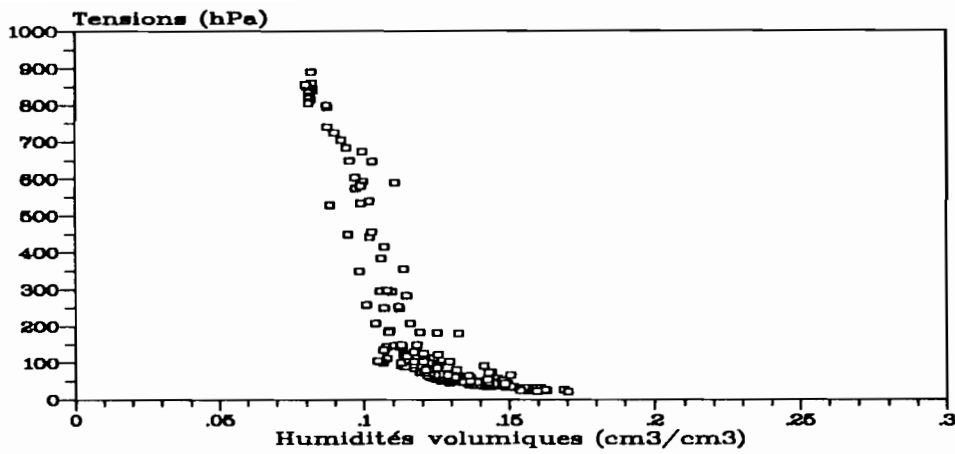


FIGURE V.23
Relation entre humidité volumique et tension de l'eau dans le sol à 15 cm (parcelle N2 P1 K0, valeurs mesurées in situ)

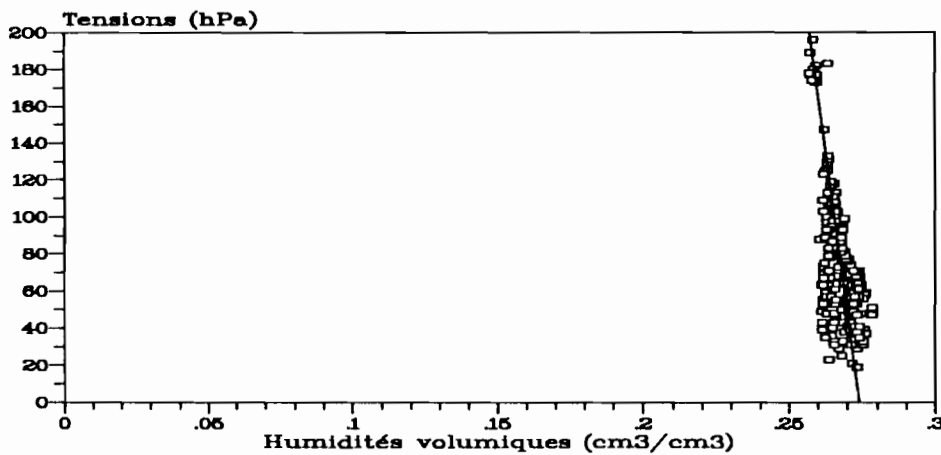


FIGURE V.24
Relation entre humidité volumique et tension de l'eau dans le sol à 155 cm (parcelle N2 P1 K0, valeurs mesurées in situ)

Il apparaît que dans la gamme des valeurs observées, la relation $h(\theta)$ à la cote retenue pour l'évaluation du drainage (155 cm) peut être représentée par une droite :

$$h = 3339 - 12195 \theta \quad h \text{ en hPa, } \theta \text{ en cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$r = 0,65 \text{ pour } n = 235$$

La pente de la droite a une valeur élevée : pour une variation d'humidité de $0,01 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, la variation de tension est de 122 hPa. Il est donc possible de passer des tensions aux humidités par une transformation linéaire :

$$h = a - b \theta$$

Si $K(\theta)$ est de la forme $K(\theta) = a_1 \exp(b_1 \theta)$, K peut être exprimé en fonction de h en remplaçant θ par son expression en fonction de h dans la formule :

$$K(h) = a_1 \exp[b_1/b(a - h)]$$

C'est donc en raison de la relation linéaire entre les humidités et les tensions que le même type de loi mathématique peut être utilisé pour $K(\theta)$ et pour $K(h)$ à 155 cm.

8.3.2. ESTIMATION DE L'ÉVOLUTION DU STOCK AU COURS DU RESSUYAGE

La profondeur du plan de flux nul a été déterminée pour chaque temps de mesure, à partir des profils de charge hydraulique relevés au cours de la période étudiée (figure V.25). Le stock d'eau compris entre le plan de flux nul et 150 cm a ensuite été calculé. Il apparaît qu'un modèle linéaire peut rendre compte de l'évolution du stock en fonction du logarithme du temps (figure V.26 pour la parcelle N2 P1 K0). Les régressions linéaires $[S = a' + b' \ln(t)]$ ont donc été calculées pour les 3 parcelles :

Parcelle N2 P1 K0	$S = 300 - 6,39 \ln(t)$	$[s(a') = 59, s(b') = 0,48]$	$r = 0,99$ pour $n = 11$
Parcelle N2 P1 K2	$S = 272 - 5,05 \ln(t)$	$[s(a') = 68, s(b') = 0,61]$	$r = 0,99$ pour $n = 11$
Parcelle nue	$S = 288 - 9,71 \ln(t)$	$[s(a') = 63, s(b') = 1,04]$	$r = 0,97$ pour $n = 23$

(S en mm d'eau, t en nombre de jours après la pluie).

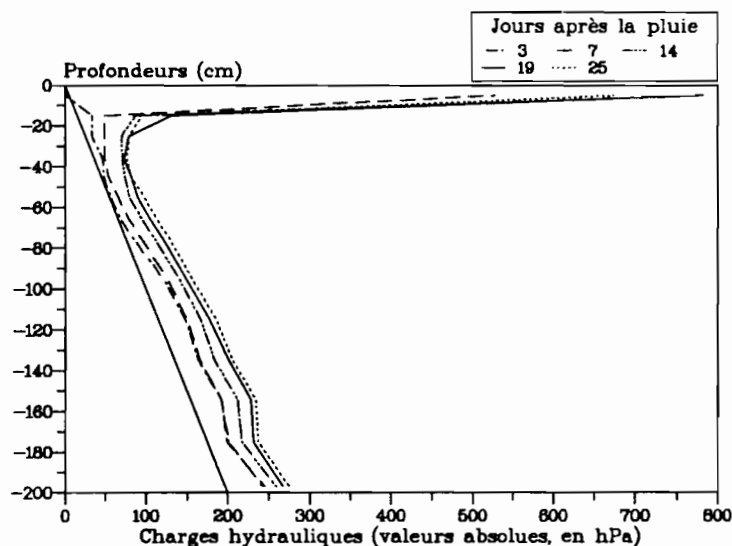


FIGURE V.25
Evolution des profils de charge hydraulique H après une pluie (parcelle nue)

Les valeurs du coefficient b' et du gradient de charge hydraulique permettent de calculer la valeur du coefficient de conductivité à chaque date (formule 16 page 132). L'ensemble des valeurs obtenues pour h , θ , t et K figurent dans le tableau V.21.

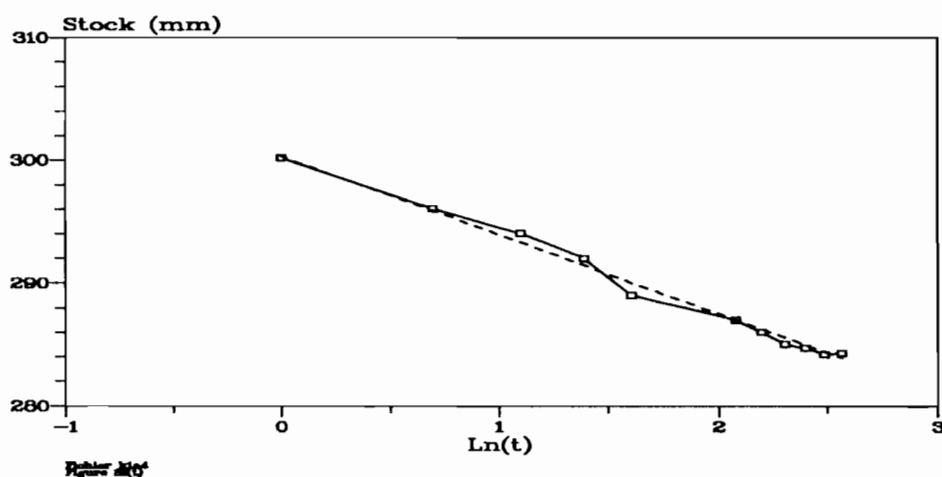


FIGURE V.26
Evolution du stock hydrique entre le plan de flux nul et 150 cm en fonction du temps (parcelle N2 P1 K0, moyenne de 4 tubes d'accès neutronique)

TABLEAU V.21
Valeurs utilisées pour le calcul des relations $K(\theta)$ et $K(h)$

Parcelle N2 P1 K0					Parcelle N2 P1 K2					Parcelle nue				
jours	h (hPa)	θ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	$\Delta H/\Delta Z$	K (mm.j^{-1})	jours	h (hPa)	θ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	$\Delta H/\Delta Z$	K (mm.j^{-1})	jours	h (hPa)	θ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	$\Delta H/\Delta Z$	K (mm.j^{-1})
1	19	0,273	0,99	6,47	1	22	0,264	1,08	4,65	3	38	0,250	1,27	2,54
2	31	0,275	0,87	3,66	2	35	0,264	1,03	2,44	4	42	0,251	1,15	2,12
3	37	0,276	0,87	2,44	3	42	0,263	1,02	1,65	5	44	0,249	1,13	1,72
4	37	0,274	0,90	1,78	4	44	0,261	0,98	1,28	6	44	0,248	1,15	1,41
5	41	0,273	0,88	1,44	5	50	0,262	0,95	1,06	7	38	0,248	1,27	1,09
8	49	0,272	0,86	0,93	8	55	0,262	0,97	0,65	8	50	0,249	1,11	1,09
9	51	0,271	0,83	0,85	9	59	0,261	0,97	0,58	9	48	0,249	1,19	0,90
10	53	0,273	0,83	0,77	10	60	0,259	0,95	0,53	10	50	0,245	1,05	0,93
11	55	0,271	0,83	0,70	11	60	0,260	0,92	0,50	11	54	0,248	0,98	0,90
12	57	0,270	0,81	0,66	12	65	0,260	0,90	0,47	12	58	0,243	1,05	0,77
13	58	0,272	0,79	0,62	13	66	0,259	0,90	0,43	13	53	0,244	1,21	0,62
										14	58	0,246	1,21	0,57
										15	66	0,246	1,08	0,60
										16	69	0,246	1,05	0,58
										17	68	0,243	1,15	0,50
										18	70	0,242	1,11	0,48
										19	74	0,245	1,06	0,48
										20	66	0,247	1,21	0,40
										21	73	0,245	1,15	0,40
										22	78	0,243	1,05	0,42
										23	78	0,244	1,11	0,38
										24	78	0,243	1,06	0,38
										25	80	0,243	1,11	0,35

Or (formule 17 page 132) :

$$\Delta \text{Ln}(K) \leq \frac{|\Delta b'|}{|b'|} + 2 \frac{|\Delta h|}{|H_2 - H_1|}$$

Avec un Δh de 10 hPa les deux premiers jours, de 5 hPa le troisième et de 3,3 hPa les jours suivants, et en prenant un gradient unitaire, les erreurs sur $\text{Ln}(K)$ peuvent être estimées (tableau V.22).

TABLEAU V.22
Erreurs maximales sur les valeurs de $\text{Ln}K$ estimées à partir de la méthode du plan de flux nul (K en mm.j^{-1})

	Parcelle N2 P1 K0	Parcelle N2 P1 K2	Parcelle nue
Deux premiers jours de ressuyage	0,53	0,55	0,55
Troisième jour	0,28	0,30	0,30
Jours suivants	0,22	0,22	0,22

Par ailleurs, l'écart-type sur l'humidité à 150 cm est de $0,009 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Il est donc possible de calculer les relations $K(\theta)$ et $K(h)$ à l'aide de régressions non biaisées faisant intervenir les erreurs sur θ , h et $\text{Ln}(K)$.

8.3.3. LES RELATIONS $K(\theta)$ ET $K(h)$. PRÉCISION DES ESTIMATIONS DE DRAINAGE

Les données du tableau V.23 permettent de calculer le coefficient de conductivité hydraulique K à 150 cm.

TABLEAU V.23
Relation $K(\theta)$ et $K(h)$ à 150 cm sur les trois parcelles étudiées et paramètres statistiques des régressions (K en mm.j^{-1} , H en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, h en hPa)

	Parcelle N2 P1 K0		Parcelle N2 P1 K2		Parcelle nue	
	$\text{Ln}(K) = a_1 + b_1.H$	$\text{Ln}(K) = a_2 + b_2.h$	$\text{Ln}(K) = a_1 + b_1.H$	$\text{Ln}(K) = a_2 + b_2.h$	$\text{Ln}(K) = a_1 + b_1.H$	$\text{Ln}(K) = a_2 + b_2.h$
a_j	- 76,99	3,30	- 109,08	2,93	- 44,16	2,09
b_j	282,8	- 0,0681	417,44	- 0,0593	178,33	- 0,0405
$s(a_j)$	0,10	$3,2 \times 10^{-2}$	0,11	$2,4 \times 10^{-2}$	0,12	$4,8 \times 10^{-2}$
$s(b_j)$	50,5	$2,9 \times 10^{-3}$	63,9	$2,0 \times 10^{-3}$	27,6	$3,5 \times 10^{-3}$
$s(e)$	0,29	11×10^{-2}	0,34	$8,6 \times 10^{-2}$	0,34	$2,3 \times 10^{-2}$
r	0,89	0,99	0,91	0,99	0,82	0,92
n	10	10	11	11	23	23

La quantité drainée peut donc être calculée, à l'aide des équations 14 et 15, en fonction des valeurs de gradient de charge hydraulique et des valeurs d'humidité volumique ou de tension. Mais quelle est la précision de cette évaluation ?

Pour évaluer cette précision, le drainage (et son erreur associée) a été calculé pour différentes valeurs de θ et de h , en supposant le gradient de charge $(H_2 - H_1) / \Delta Z$ unitaire (tableau V.24). Cette hypothèse est réaliste : en période humide, le gradient de charge est proche de l'unité ; il ne diminue qu'en période sèche, lorsque le drainage est très faible.

TABLEAU V.24

Valeurs journalières de drainage (q) estimées à partir des relations K(θ) et K(h) et précision (dq et dq/q) de l'évaluation (le nombre de jours indiqué est le nombre approximatif après un événement pluvieux)

Utilisation des relations K (θ)														
Parcelle N2 P1 K0					Parcelle N2 P1 K2					Parcelle nue				
θ	Nbre jours	q (mm)	dq (mm)	dq/q (%)	θ	Nbre jours	q (mm)	dq (mm)	dq/q (%)	θ	Nbre jours	q (mm)	dq (mm)	dq/q (%)
0,264		0,1	1,6	1614	0,256		0,1	2,2	2039	0,238		0,2	1,5	846
0,266		0,2	2,8	1624	0,258	15	0,2	5,0	2051	0,240		0,3	2,2	851
0,268		0,3	4,9	1634	0,260	10	0,6	11,6	2064	0,242		0,4	3,1	857
0,270	15	0,5	8,7	1645	0,262	5	1,3	26,9	2077	0,244	15	0,5	4,5	862
0,272	9	0,9	15,4	1655	0,264	1	3,0	62,4	2090	0,246	10	0,7	6,5	868
0,274	2	1,6	27,2	1665						0,248	6	1,1	9,4	873
0,276	1	2,9	48,3	1675						0,250	3	1,5	13,4	879
0,278		5,1	85,5	1685						0,252		2,2	19,3	885
										0,254		3,1	27,8	890

Utilisation des relations K (h)														
Parcelle N2 P1 K0					Parcelle N2 P1 K2					Parcelle nue				
h (hPa)	Nbre jours	q (mm)	dq (mm)	dq/q (%)	h (hPa)	Nbre jours	q (mm)	dq (mm)	dq/q (%)	h (hPa)	Nbre jours	q (mm)	dq (mm)	dq/q (%)
20	1	6,9	6,5	94	20	1	5,7	4,7	82	20	1	3,6	2,5	68
30	2	3,5	2,4	69	30	2	3,2	1,9	60	30	2	2,4	1,3	56
40	5	1,8	1,0	54	40	3	1,7	0,8	46	40	3	1,6	0,8	49
50	9	0,9	0,5	57	50	5	1,0	0,5	48	50	8	1,1	0,6	52
60	13	0,5	0,3	60	60	10	0,5	0,3	50	60	14	0,7	0,4	56
70		0,2	0,1	62	70		0,3	0,2	52	70	18	0,5	0,3	59
80		0,1	0,1	65	80		0,2	0,1	54	80	25	0,3	0,2	63
90		0,1	0,0	68	90		0,1	0,1	56	90		0,2	0,1	66

Une très forte différence de précision entre les deux méthodes d'évaluation du drainage apparaît : la précision relative obtenue à l'aide des relations K(h) est comprise entre 40 et 100 %, celle résultant des relations K(θ) entre 800 et 2000 %. Cette mauvaise précision obtenue lors de l'utilisation des relations K(θ) rend la méthode inutilisable sur le plan pratique. Quelles sont les composantes de l'erreur et est-il possible de les diminuer ?

L'erreur Δq sur q (donc sur $\Delta q/q$) peut se décomposer en une composante résultant de l'erreur sur le coefficient de conductivité hydraulique et une composante provenant de la détermination du gradient de charge hydraulique. En prenant un gradient de charge hydraulique égal à 1, ces composantes sont :

- composante de la conductivité hydraulique :

$$\text{pour } K(\theta) : \Delta a_1 + \theta \Delta b_1 + b_1 \Delta \theta$$

$$\text{pour } K(h) : \Delta a_2 + h \Delta b_2 + b_2 \Delta h$$

- composante du gradient de charge hydraulique :

$$\text{dans les deux cas : } 2 \Delta h / \Delta Z$$

Le calcul a été effectué dans un cas moyen : 10 jours après une pluie sur la parcelle N2 P1 K2.

TABLEAU V.25
Composantes de l'erreur d'évaluation du drainage journalier à l'aide des relations $K(\theta)$ et $K(h)$ dans un cas moyen (gradient unitaire, 10 jours après une pluie, parcelle N2 P1 K2)

	Utilisation de $K(\theta)$	Utilisation de $K(h)$
Drainage journalier (mm)	0,56	0,53
Erreur sur le drainage (mm)	11,6	0,27
Erreur relative sur le drainage (%)	2064	50
Composante liée à K		
Totale en %	2048	34
liée à Δa (%)	10	2
liée à $\theta \Delta b_1$ ou $h \Delta b_2$ (%)	1662	12
liée à $b_1 \Delta \theta$ ou $b_2 \Delta h$ (%)	376	20
Composante liée à $\Delta H / \Delta Z$ (%) ($2 \Delta h / \Delta Z$)	16	16

Dans le cas de l'utilisation de $K(\theta)$, les deux composantes principales sont celles liées à $\theta \Delta b_1$ et $b_1 \Delta \theta$. Les valeurs de ces composantes résultent des faibles variations d'humidité observées lors de l'expérimentation, donc de la forte pente de la relation $h(\theta)$. Les variations d'humidité observées sont en effet du même ordre de grandeur que l'écart-type de l'erreur ($0,02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ contre $0,009 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). Lors de l'établissement des régressions, l'imprécision sur les paramètres est importante (figure V.27) en particulier sur la pente (Δb_1), qui constitue la plus grande part de l'erreur. Par ailleurs, comme les variations d'humidité sont faibles, la pente b_1 est forte, ce qui produit une forte erreur, même avec un $\Delta \theta$ faible.

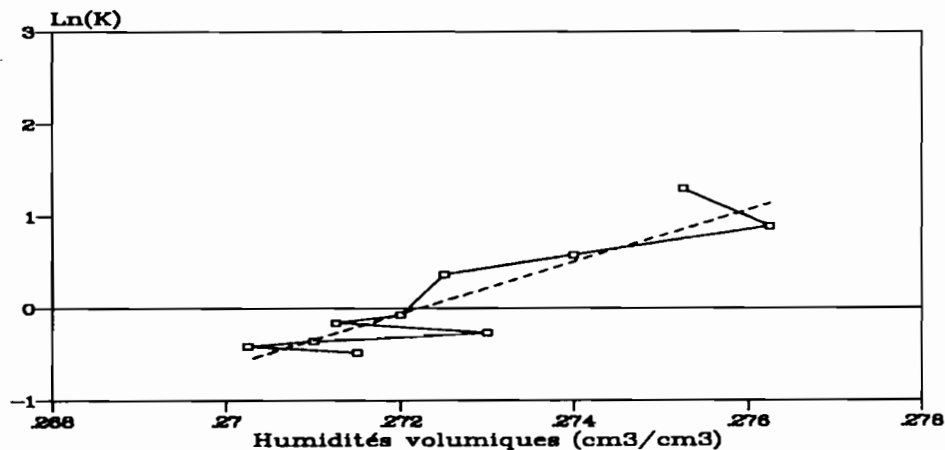


FIGURE V.27
Relation entre conductivité hydraulique K et humidité volumique (parcelle N2 P1 K0, moyenne de 4 tubes, profondeur 150 cm)

Le fait que la relation $K(\theta)$ n'est pas utilisable pratiquement n'est pas un cas particulier : il s'agit d'un problème général qui se posera dans les milieux argileux chaque fois que les relations $h(\theta)$ indiqueront de faibles variations d'humidité dans la gamme des tensions où se produit le drainage.

Dans le cas de l'utilisation de $K(h)$, les sources d'erreur sur le drainage proviennent de trois points d'importance comparable. L'erreur liée à $h \Delta b_2$ (qui intervient pour 12 %) peut être diminuée en travaillant

sur des valeurs lissées de tension lors du calcul de la relation $K(h)$, mais cette solution n'a pas été retenue ici car elle interdit toute évaluation ultérieure des erreurs. Les erreurs liées à $b_2 \Delta h$ (20 %) et à $2 \Delta h / \Delta Z$ (16 %) proviennent uniquement de la précision sur la mesure des tensions aux dates auxquelles le drainage doit être évalué (b_2 ne peut être modifié et ΔZ ne peut être trop augmenté sous peine d'obtenir un gradient de charge non représentatif de la cote étudiée). Avec le matériel actuellement disponible, le seul moyen pour réduire Δh consiste à réaliser un lissage des valeurs de h . Ce lissage est difficilement automatisable, en raison des variations brutales de tension lors des pluies. Un lissage manuel semble donc préférable, mais il est impossible de prévoir l'amélioration de précision résultante.

Dans le cas étudié, la seule méthode utilisable pour évaluer le drainage au champ repose donc sur l'utilisation des relations $K(h)$. La précision relative obtenue sur les valeurs de drainage à partir du troisième jour qui suit les averses est de l'ordre de 50 % (tableau V.24 page 140). Cette précision est du même ordre que celle obtenue par FLUHLER *et al.* (1976) en utilisant les relations $K(\theta)$: 20 à 30 % sur les valeurs de K , erreur à laquelle il convient d'ajouter 10 à 40 % d'erreur sur l'estimation du gradient de charge hydraulique, en fonction des valeurs d'écart-type indiquées pour les tensions. Les deux premiers jours, les erreurs augmentent considérablement : avec une précision n'excédant pas 2,5 à 6,5 mm sur le drainage journalier, la méthode n'est pas utilisable pour estimer une ETR de l'ordre de 4 mm.j^{-1} . De plus, la méthode ne permet pas d'évaluer le drainage lors des pluies, en particulier celui qui se produit dans des voies de circulations préférentielles.

*Cette étude des erreurs montre donc que l'utilisation des relations $K(h)$ permet d'évaluer le drainage à partir du troisième jour suivant une pluie avec une erreur relative de l'ordre de 50 %, mais qu'elle ne permet pas de l'estimer avec une précision suffisante les deux premiers jours. Comme le soulignent FLUHLER *et al.* (1976), "les estimations d'erreur ne condamnent pas la méthode à l'échec, mais elles aident à apprécier ses limitations". Il est à craindre cependant que la précision ne puisse pas être améliorée tant qu'une nouvelle méthode d'évaluation du drainage au champ ne sera pas imaginée.*

9. CONCLUSION

La méthode tensio-neutronique ne permet pas de réaliser des études agronomiques sur un pas de temps journalier : même en l'absence de drainage, l'incertitude sur les variations de stocks hydriques entraîne une erreur sur l'ETR qui dépasse la demande climatique quotidienne. En prenant des pas de temps plus longs, il est en revanche possible d'obtenir des intervalles de confiance sur les variations de stocks inférieurs à 1 mm.j^{-1} , valeurs utilisables pour les études agronomiques. La précision des mesures conditionne donc le pas de temps à adopter.

La précision sur les variations de stocks hydriques ne dépend que peu de l'appareil lui-même. La principale incertitude provient en effet de la variabilité spatiale des variations de stocks, donc du nombre de tubes d'accès

utilisés et de leur localisation. La seconde source d'imprécision est liée à l'utilisation des droites d'étalonnage, mais ce facteur est souvent beaucoup moins important que le premier. Les autres sources d'erreurs sont généralement négligeables par rapport aux deux premières. Cependant, l'importance relative de chaque facteur varie en fonction des conditions expérimentales et du milieu. La précision des résultats doit donc être évaluée cas par cas.

Lorsque de l'eau draine à la base du profil, l'évaluation des quantités drainées à l'aide de la loi de Darcy introduit dans le calcul de l'ETR une forte incertitude. Dans le cas étudié, elle est supérieure à celle provenant de l'évaluation des variations de stocks : environ 50 % des quantités drainées. Comme l'incertitude est proportionnelle aux quantités drainées, la précision ne peut pas être améliorée en augmentant le pas de temps. *La précision des valeurs d'ETR est donc variable au cours de l'expérimentation en fonction de la quantité d'eau drainée.*

Pour un cycle annuel, l'incertitude sur les résultats obtenus à l'aide de la méthode tensio-neutronique au cours de cette expérimentation provient donc principalement de l'estimation du drainage et, dans une moindre mesure, de la variabilité spatiale des variations de stocks hydriques.

CHAPITRE VI

LA DYNAMIQUE DE L'EAU

La dynamique de l'eau dans le système sol-plante a été étudiée à partir des résultats d'humidités volumiques et de tensions de l'eau dans le sol obtenus dans les parcelles d'essai. La méthode utilisée est précisée dans le premier paragraphe du chapitre. Dans le deuxième et le troisième paragraphe, les résultats obtenus dans la parcelle nue et dans les parcelles cultivées sont présentés et discutés en fonction de l'état hydrique du sol et du développement de la plante. Les conclusions du chapitre (quatrième paragraphe) portent sur la méthode utilisée, le fonctionnement hydrique du sol et les besoins en eau du maïs.

1. MÉTHODE

1.1. Mesure des charges hydrauliques et des tensions de l'eau dans le sol et détermination des quantités drainées

Les données tensiométriques ont été utilisées selon deux voies différentes. La première a consisté à étudier l'évolution des profils de tension de l'eau dans le sol en fonction du temps. Les tensions définissent la liaison entre l'eau capillaire et le sol, ce qui permet d'estimer la disponibilité de l'eau pour les plantes et de préciser les horizons affectés par les prélèvements radiaires, ainsi qu'il sera vu ultérieurement. Pour des raisons de commodité de calcul et de représentation graphique, les traitements des données ont été effectués sur les valeurs absolues des tensions :

$$|h| = |H| - z$$

h : tension de l'eau dans le sol (en hPa)

H : charge hydraulique (en hPa)

z : pression hydrostatique correspondant à la profondeur du tensiomètre (en hPa)

Les données ont d'abord été représentées sous forme de profils de tension en fonction de la profondeur ou de courbes d'évolution des tensions au cours du temps pour une profondeur donnée. Ces courbes ne

permettent cependant pas de visualiser l'ensemble des évolutions au cours d'un cycle annuel ou d'un cycle cultural. Une représentation sous forme de bloc-diagramme a donc été réalisée à l'aide du logiciel SURFER (Golden Software, Inc.). Ce logiciel a été conçu pour réaliser des blocs-diagrammes à partir de données topographiques spatialement dispersées, repérées en abscisse, ordonnée et altitude. Il est maintenant largement utilisé en science des sols et en agronomie pour représenter l'évolution de la répartition dans le sol d'un paramètre en fonction du temps.

Pour parvenir à ce type de représentation, le traitement des données doit être effectué en trois phases successives. Dans un premier temps, les données sont discrétisées aux noeuds d'une grille définie par l'utilisateur. Il est possible de choisir la méthode d'interpolation, en particulier le nombre de points de mesure à prendre en compte pour définir un noeud et la relation mathématique à utiliser. L'évaluation de la valeur à chaque noeud a été effectuée à partir de 10 points de mesure dont le poids dans les calculs était proportionnel à l'inverse du carré de leur distance au noeud. Pour un noeud situé entre deux profondeurs de mesure, l'évaluation portait donc sur au moins 5 dates aux deux profondeurs, avec un poids supérieur accordé à la date la plus proche. Dans un second temps, cette grille de base, dont l'élaboration peut demander des temps de calcul assez longs, est lissée à l'aide d'une fonction spline pour améliorer le rendu du relief, en ajoutant une ou deux lignes supplémentaires entre chaque ligne de la grille initiale. Ces valeurs lissées sont finalement représentées sous forme de blocs-diagrammes pouvant être visualisés sous différents angles.

La deuxième voie d'utilisation des données de charge hydraulique a été le calcul des quantités drainées à l'aide de la loi de Darcy généralisée :

$$D = -K(h) \times \Delta H / \Delta z$$

D : drainage (mm.j⁻¹)
K(h) : coefficient de conductivité hydraulique (mm.j⁻¹)
ΔH/Δz : gradient de charge hydraulique

Les valeurs de la charge hydraulique à 150 cm ont été représentées en fonction du temps pour chaque parcelle et les valeurs quotidiennes de charge ont été définies à l'aide d'un lissage manuel destiné à améliorer la précision, conformément à ce qui a été vu au chapitre V. Les valeurs quotidiennes de conductivité ont ensuite été calculées à l'aide des formules K(h) de type exponentiel définies sur les mêmes parcelles. Les valeurs de charge observées sur les deux tensiomètres situés à 130 et 170 cm ont été utilisées pour connaître le gradient de charge hydraulique. Les valeurs quotidiennes de drainage en ont été déduites, sauf pendant les trois premiers jours qui suivaient des pluies ayant provoqué du drainage. Comme il a été vu précédemment, la méthode ne s'applique pas juste après les pluies, en raison des variations rapides de charge hydraulique au début du ressuyage. La relation de conservation de la masse a donc été utilisée, le drainage étant évalué en supposant une valeur d'évapotranspiration de 5 mm.j⁻¹. Cette valeur fixe permet de limiter les erreurs : comme nous le verrons par la suite, l'évaporation du sol nu est de cet ordre de grandeur juste après les pluies et c'est également l'ordre de grandeur de l'évapotranspiration d'un couvert de maïs bien développé. L'erreur sur l'estimation du drainage à l'aide de cette évaluation est d'environ 2 mm.j⁻¹,

alors qu'elle pourrait dépasser 10 mm.j^{-1} si la loi de Darcy était appliquée. Les calculs développés dans le chapitre V conduisent à adopter une erreur au cours de tous les autres jours égale à 50 % du drainage estimé.

1.2. Calcul des variations de stocks hydriques

Sur chaque parcelle, les humidités volumiques ont été estimées à l'aide de 4 tubes d'accès neutronique (chapitre III). Les comptages neutroniques mesurés sur le terrain ont été saisis et traités à l'aide du logiciel BHYSON (POSS, 1987). Les données de chaque profondeur ont été contrôlées pour chaque tube en utilisant les courbes d'évolution des rapports de comptage en fonction du temps. Les humidités volumiques ont alors pu être représentées soit sous forme de profils hydriques, soit sous forme de blocs-diagrammes élaborés à l'aide de SURFER. Les valeurs de stock hydrique et leurs variations ont été calculées par BHYSON en effectuant une intégration des humidités volumiques par la méthode des trapèzes. Les valeurs journalières moyennes obtenues à partir des 4 tubes par parcelle ont finalement été traitées à l'aide d'un tableur, afin de calculer des moyennes décadaires glissantes.

1.3. Evaluation de l'évapotranspiration

Les valeurs d'évapotranspiration moyenne par parcelle ont été évaluées quotidiennement pendant les saisons de culture et deux fois par semaine le reste du temps, en appliquant la relation de conservation de la masse. L'erreur sur l'évapotranspiration (ETR) est la somme des erreurs sur la variation de stock et sur le drainage. Or, si l'erreur sur la variation de stock est constante, celle sur le drainage est d'autant plus élevée que le drainage est important. L'intervalle de confiance sur l'ETR est donc variable ; il est minimum pour les périodes au cours desquelles il n'y a aucun drainage (chapitre V).

2. LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LA PARCELLE NUE

2.1. Evolution de la tension de l'eau et de la charge hydraulique

La représentation sous forme de bloc-diagramme de l'évolution des profils de tensions au cours d'un cycle annuel permet de visualiser le fonctionnement hydrique du sol. La figure VI.1 représente l'évolution des tensions sur la parcelle nue entre mars 1986 et avril 1987 vue à partir de la surface du sol, alors que la figure VI.2 la visualise vue à partir de la base du profil. L'un ou l'autre type de représentation sera utilisé dans la suite du texte afin de permettre la meilleure visualisation possible des phénomènes. Sur la figure VI.1 le temps est croissant sur l'axe des abscisses : la partie de graphe la plus éloignée correspond à la fin de la période représentée. Sur la figure VI.2 le temps est décroissant : la partie du graphe la plus éloignée correspond au début de la période représentée.

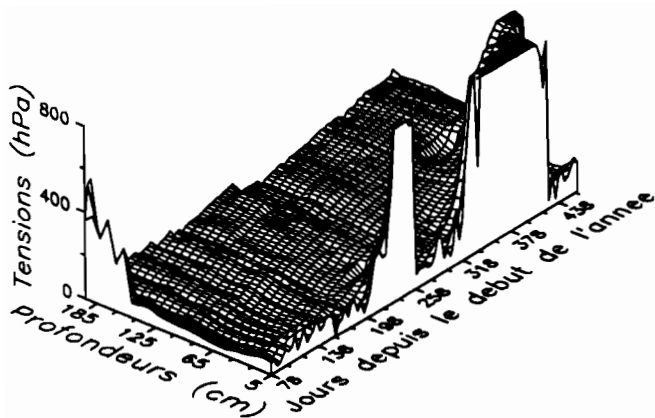


FIGURE VI.1

Evolution des profils de tensions sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (vue à partir de la surface)

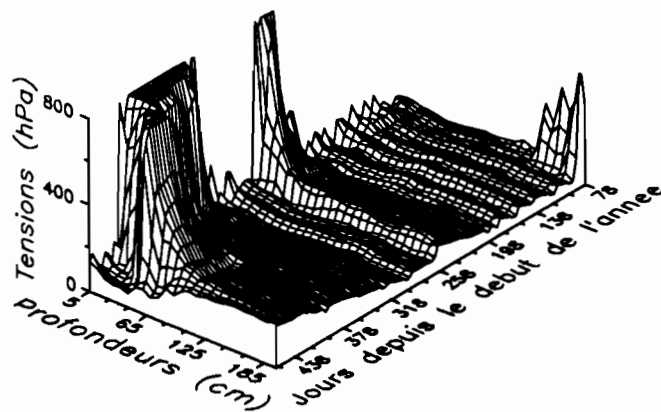


FIGURE VI.2

Evolution des profils de tensions sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (vue à partir de la base du profil)

L'étude de la parcelle nue a commencé le 19 mars 1986 (78ème jour de l'année), alors qu'une jachère herbacée venait juste d'être coupée. La première saison des pluies avait déjà débuté : dans le mois précédant le début de l'étude, la pluviométrie fut de 173 mm. Au 78ème jour, le profil tensiométrique indique des tensions de l'ordre de 50 hPa jusqu'à 150 cm ; elles croissent ensuite brutalement à 300 hPa. Or, au cours de toute l'expérimentation sous sol nu de 1986 à 1988, les tensions à la base du profil n'ont jamais dépassé 200 hPa (figure VI.2) : les tensions observées en profondeur sont donc le témoin de l'effet du prélèvement racinaire de la jachère au cours de la saison sèche. Au début des mesures, les premières averses de la saison des pluies avaient humecté 1,5 mètre de sol, mais aucun drainage n'était apparu en-dessous de 2 mètres de profondeur. Deux pluies successives (21 mm le 89ème jour et 51 mm le 91ème) ont alors été suffisantes pour humecter la base du profil et produire du drainage. Celui-ci apparaît sous forme d'un sillon en direction de la profondeur sur la figure VI.2. Plusieurs cycles identiques se succèdent jusqu'au 17 juillet (198ème jour). Les tensions croissent sur l'ensemble du profil dans les jours qui suivent chaque pluie produisant du drainage, mais la croissance est plus importante en surface qu'en profondeur. Quelques jours après une pluie, les tensions les plus fortes sont observées en surface, avec une décroissance rapide sur les premiers décimètres, l'ensemble des niveaux profonds présentant une tension pratiquement constante.

Au cours de la petite saison sèche qui s'est étendue du 18 juillet (189ème jour) au 13 septembre (256ème jour), la tension croît rapidement en surface et atteint en quelques jours 800 hPa, valeur limite au-dessus de laquelle les tensiètres ne permettent plus les mesures. A la base du profil, en revanche, les tensions restent inférieures à 150 hPa jusqu'à la fin de la petite saison sèche.

La seconde saison des pluies débute par une succession de deux fortes averses (64 mm le 257ème jour et 58 mm le 258ème). Sur un profil qui n'était asséché qu'en surface, ces pluies sont suffisantes pour

réhumecter le sol jusqu'à deux mètres et produire du drainage. Jusqu'au début de la grande saison sèche, vers le 20 octobre (293ème jour), deux phases de drainage principales apparaissent sur le bloc-diagramme.

La grande saison sèche s'étend du 21 octobre 1986 au 8 mars 1987 (432ème jour à partir du 1^{er} janvier 1986). Très rapidement les tensions dépassent 800 hPa en surface ; cet accroissement se propage progressivement en profondeur. A la base du profil, en revanche, la croissance des tensions est lente : après 4 mois de saison sèche, les tensions sont inférieurs à 200 hPa (pF 2,3).

Les premières pluies de la première saison 1987 font chuter les tensions à partir de la surface. La diminution de tension se propage ensuite en profondeur en même temps que le front d'humectation progresse. Le 6 avril 1987 (461ème jour) le front d'humectation est parvenu vers 1 mètre de profondeur (figure VI.2). Le profil tensiométrique est alors proche de ce qu'il était à la même époque un an auparavant.

Cette évolution annuelle s'effectue en fonction des deux mécanismes caractérisant le fonctionnement hydrique du sol nu : l'évaporation à partir de la surface et le drainage profond. L'augmentation rapide des tensions de l'eau dans les horizons de surface dans les jours qui suivent la pluie traduit l'assèchement de la surface du sol au contact de l'atmosphère. Lorsqu'une pluie survient, les tensions diminuent jusqu'à la profondeur du front d'humectation. En profondeur, l'eau s'écoule par drainage à la base du profil. A la fin de l'averse, l'humidité diminue dans tout le profil, produisant une augmentation de toutes les tensions. Mais comme les conductivités hydrauliques diminuent très rapidement avec l'augmentation des tensions (chapitre V), le drainage décroît très vite, ce qui explique que les tensions en profondeur restent toujours faibles.

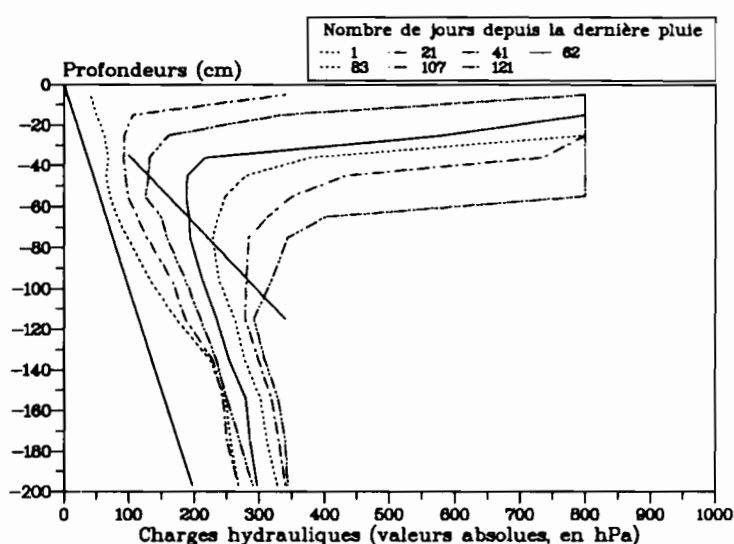


FIGURE VI.3
Evolution du profil de charge hydraulique au cours de la saison sèche 1986-1987 (parcelle nue)

Pour évaluer la profondeur du front de dessiccation à partir de la surface, l'évolution des profils de charges hydrauliques a été suivie au cours de la grande saison sèche (figure VI.3). A chaque date, la profondeur du plan de flux nul est le niveau auquel la tangente au profil de charge hydraulique est parallèle à l'axe des abscisses. Au-dessus de cette cote, le flux est dirigé vers le haut (évaporation), en-dessous il est dirigé vers le bas (drainage). La profondeur du plan de flux nul est représentée sur la figure VI.3 par le segment de droite en trait plein qui recoupe les profils de charge. Le plan de flux nul était situé à 35 cm trois semaines après la dernière pluie et il est parvenu à environ 110 cm après 4 mois. Par ailleurs, les profils de charge en-dessous du plan de flux nul sont pratiquement linéaires et parallèles à la droite de charge unitaire. Pendant toute la grande saison sèche, les horizons situés en-dessous du plan de flux nul sont donc en phase de drainage sous l'effet d'un gradient de charge approximativement unitaire.

Au cours du cycle annuel suivant (la figure VI.4 représente 4700 relevés tensiométriques), les mécanismes ont été légèrement différents. En effet, les pluies de la première saison ont été insuffisantes pour humecter tout le profil et produire du drainage. Au cours de la seconde saison des pluies, en revanche, les tensions furent proches de celles relevées au cours du cycle 1986-1987. Pendant le mois de décembre, une pluie de 30 mm a réhumecté le profil et les premières pluies de 1987 ont débuté en février. C'est pourquoi le front de dessiccation est descendu moins profondément pendant la grande saison sèche 1987-1988 qu'au cours de la précédente. *Le fonctionnement hydrique peut donc être différent selon la pluviométrie de l'année considérée.*

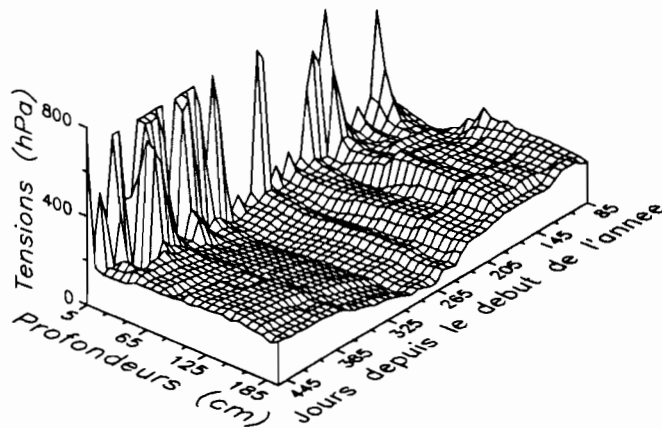


FIGURE VI.4
Evolution des profils de tensions sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (1987-1988)

2.2. Evolution des humidités volumiques

La figure VI.5 représente l'évolution des profils hydriques pendant le cycle annuel 1986-1987. En surface, les variations d'humidité sont importantes : la succession des deux saisons des pluies et des deux saisons sèches apparaît nettement. A l'exception des 10 premiers centimètres, les humidités augmentent systématiquement avec la profondeur. Cette répartition est directement liée au profil textural (environ 10 % d'argile en surface, 45 % en profondeur). Les périodes très arrosées, au cours desquelles s'est produit du drainage, sont visibles par des accroissements d'humidité sur toute la profondeur du sol. Cependant, ces variations ne sont que de l'ordre de $0,02 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ pour des humidités d'environ $0,30 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ à la base du profil. Elles sont donc mal visualisées par cette représentation.

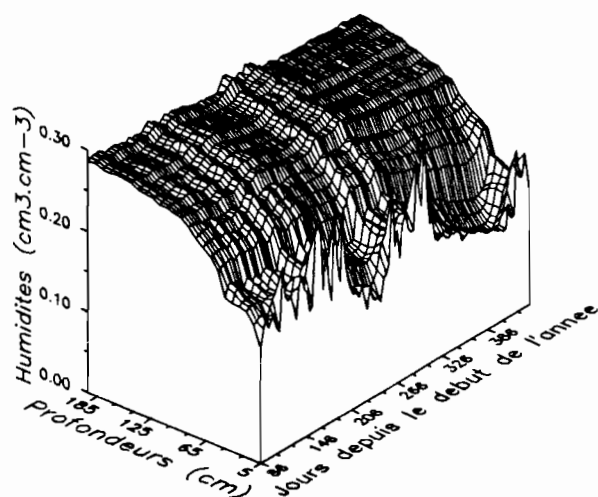


FIGURE VI.5

Evolution des profils hydriques sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (cycle 1986-1987)

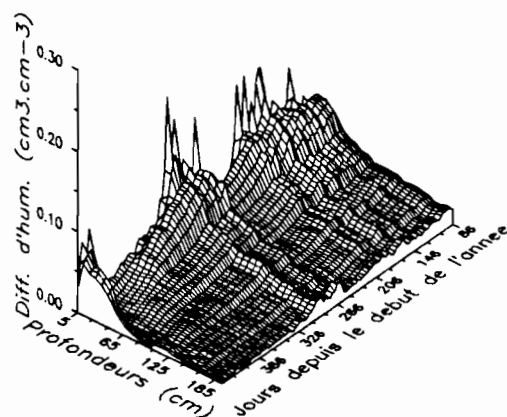


FIGURE VI.6

Variations d'humidités volumiques sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (cycle 1986-1987, différence par rapport au minimum observé sur la période, vue à partir de la base du profil)

Pour mettre en évidence les variations d'humidité, un autre type de représentation a été utilisé : la différence entre l'humidité volumique à un temps donné et l'humidité volumique minimale observée au cours du cycle annuel a été calculée pour chaque profondeur et l'évolution de cette différence a ensuite été représentée en fonction du temps (figure VI.6). Les variations d'humidité sont surtout importantes entre la surface et 40 cm de profondeur et elles sont très faibles dans les horizons profonds. Les faibles variations d'humidité qui avaient été constatées à 150 cm lors de l'étude des relations $K(\theta)$ représentent donc le cas général pour tous les horizons de profondeur.

2.3. Evolution du drainage

Comme l'évaluation du drainage est réalisée sur une base de temps de 24 heures à l'aide des relations $K(h)$, les valeurs quotidiennes de tension doivent être connues. La figure VI.7 représente l'évolution annuelle des tensions à 150 cm. Cette courbe, qui correspond à une coupe à la profondeur 150 cm dans le bloc-diagramme de la figure VI.2, montre des chutes brutales de tension lors de chaque pluie dont la hauteur

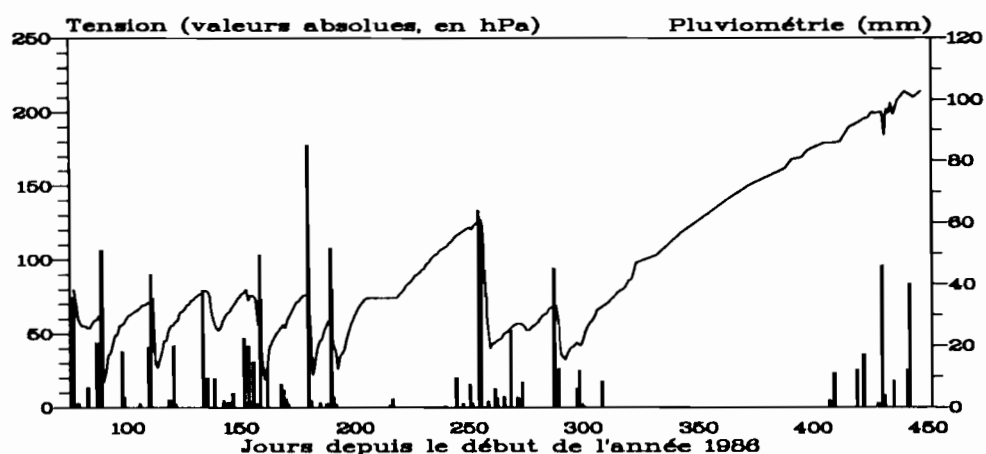


FIGURE VI.7
Evolution de la tension de l'eau dans le sol à 150 cm au cours d'un cycle annuel dans la parcelle nue (cycle 1986-1987)

précipitée est suffisante pour humecter la base du profil. La tension ne s'annule cependant jamais car le sol n'est jamais saturé à cette profondeur. La chute de tension peut être différente selon les pluies : si les valeurs atteintes le lendemain d'une forte pluie sont souvent comprises entre 20 et 30 hPa, la diminution peut être plus faible dans certains cas (140ème et 280ème jour en particulier). La diminution de tension est, en effet, liée à la réhumectation du sol, différente selon la hauteur et l'intensité des pluies.

Au cours de la petite saison sèche qui s'étend du 189ème jour au 256ème, le tensiomètre avait mal fonctionné pendant quelques jours. Les valeurs correspondantes ont été supprimées : la courbe présente un palier à cette période. Ce manque d'observation n'a pas eu de conséquence importante pour l'évolution du bilan car les valeurs de drainage à cette époque étaient faibles ; cet accident souligne bien le peu de fiabilité d'un dispositif qui repose sur un seul tensiomètre. Comme il a été remarqué lors de l'étude sur la précision

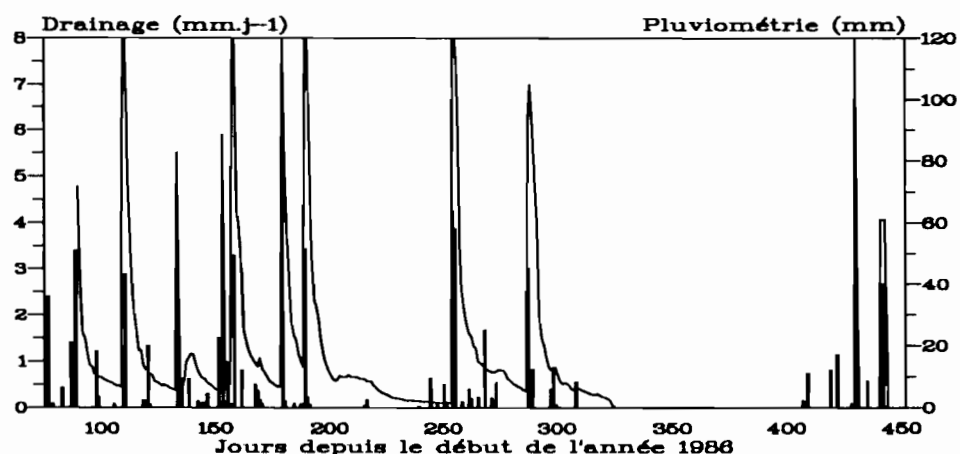


FIGURE VI.8
Evolution du drainage à 150 cm au cours d'un cycle annuel dans la parcelle nue (cycle 1986-1987)

des évaluations de drainage, il aurait été préférable de disposer de plusieurs tensiomètres à la profondeur à laquelle le drainage devait être évalué.

La représentation de l'évolution annuelle du drainage à 150 cm en fonction du temps (figure VI.8) met en évidence que les phases de drainage présentent toujours la même structure. Un pic de drainage pouvant atteindre plusieurs dizaines de millimètres se produit le jour des pluies. Le flux de drainage s'atténue ensuite rapidement : il devient inférieur à 1 mm.j^{-1} une semaine environ après les averses.

2.4. Evaporation du sol nu

Sur la figure VI.9 ont été représentées les moyennes décadaires glissantes de l'évaporation, ainsi que l'intervalle de confiance, tel qu'il résulte des calculs de précision effectués précédemment. Comme l'intervalle de confiance dépend fortement de la valeur du drainage, il varie au cours du temps et est minimum en l'absence de tout drainage.

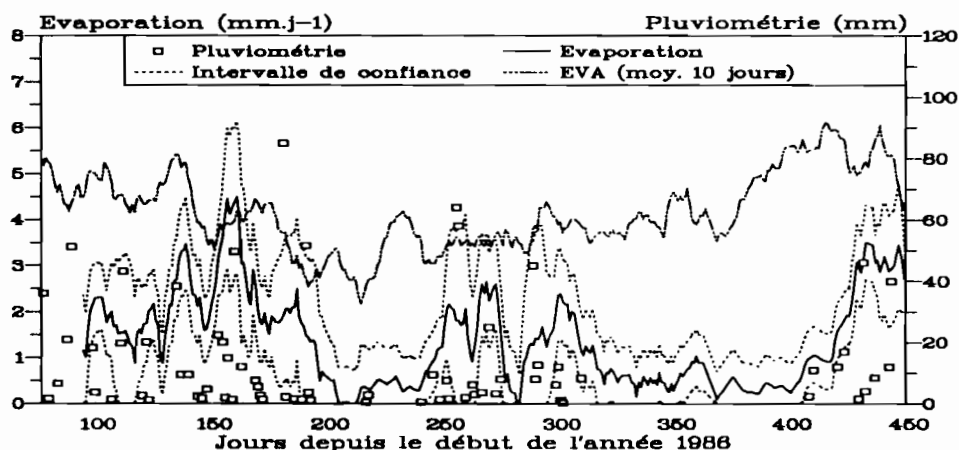


FIGURE VI.9
Evolution de l'évaporation au cours d'un cycle annuel sur la parcelle nue (cycle 1986-1987, moyenne décadaire glissante et intervalle de confiance calculé)

Le graphe fait apparaître une forte variabilité temporelle de l'évaporation. Les périodes où l'évaporation moyenne décadaire est maximale correspondent à celles où les pluies sont les plus nombreuses. Au cours de ces périodes, l'évaporation moyenne décadaire peut atteindre l'évaporation du bac de classe A (notée EVA). L'évaporation diminue fortement pendant les saisons sèches, mais elle est encore de l'ordre de $0,2 \text{ mm.j}^{-1}$ à la fin de la grande saison sèche : le sol continue à s'assécher.

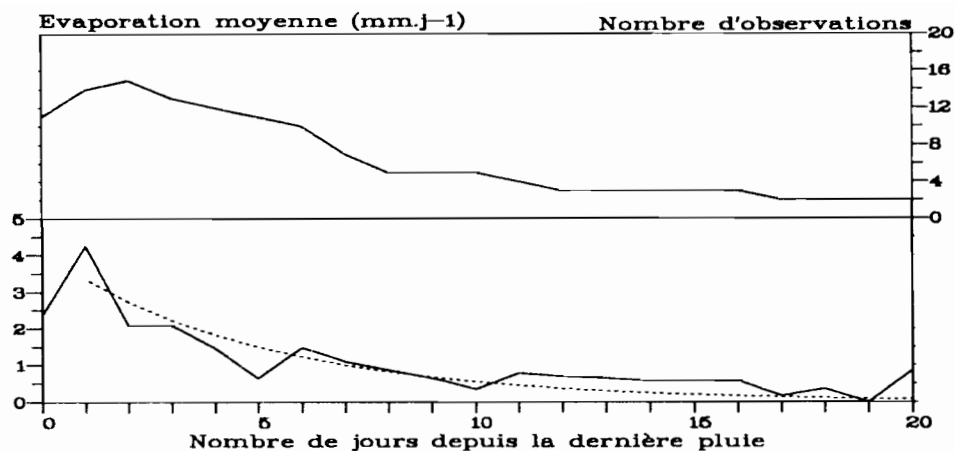


FIGURE VI.10

Evolution de l'évaporation du sol nu en fonction du nombre de jours depuis la dernière pluie (évaporation moyenne et nombre d'évènements observés, parcelle nue, année 1987)

L'évolution de l'évaporation du sol nu en fonction du nombre de jours depuis la dernière pluie a été étudiée à partir des données de l'année 1987. Afin de supprimer les erreurs liées à l'évaluation des quantités drainées, seules ont été retenues les périodes au cours desquelles aucun drainage n'avait eu lieu. Pour un nombre donné de jours après la pluie, l'évaporation moyenne observée au cours de toutes ces périodes a ensuite été calculée (figure VI.10). Pour cette parcelle, l'écart-type sur l'évaporation en l'absence de drainage est de $6,1 \text{ mm.j}^{-1}$ dans le cas de mesures quotidiennes ; effectuer la moyenne entre toutes les périodes d'observation était le seul moyen de le diminuer. La probabilité d'une nouvelle averse croît avec le temps : le nombre de périodes étudiées diminue lorsque le temps augmente. Plus de 10 périodes ont cependant pu être retenues pour caractériser les 7 premiers jours après les pluies.

Le jour même de la pluie, l'évaporation moyenne est d'environ $2,5 \text{ mm.j}^{-1}$, valeur très inférieure à celle du jour suivant la pluie. En effet, toute l'interprétation repose sur des observations effectuées chaque matin entre 6 et 7 heures. La pluie peut donc survenir juste avant le relevé ou 24 heures auparavant. Or, comme les pluies ne sont pas très fréquentes dans cette région, la surface du sol est souvent peu humide avant l'averse : l'évaporation est donc faible. La valeur mesurée le jour même de la pluie intègre ainsi l'évaporation avant la pluie et celle pendant et après la pluie, ce qui explique qu'elle soit peu élevée.

Le lendemain des pluies, l'évaporation est maximale ($4,5 \text{ mm.j}^{-1}$ environ). Cette valeur correspond à celle de l'évaporation moyenne du bac de classe A pendant la même période ($4,4 \text{ mm.j}^{-1}$) : lorsque la surface du sol est très humide, elle évapore autant qu'un bac d'eau libre.

L'évaporation diminue les jours suivants pour atteindre 1 mm.j^{-1} environ après une semaine. Comme il a été vu sur le graphe de l'évolution annuelle, elle faiblit ensuite progressivement sans s'annuler. Cette évolution de l'évaporation peut s'ajuster sur une fonction exponentielle :

$$\text{Evaporation} = 4,08 \times \exp(-0,20 J)$$

$$(r^2 = 0,78 \text{ pour } n = 20)$$

Evaporation en mm.j^{-1}

J : nombre de jours après la pluie

Cet ajustement, représenté en pointillé sur la figure VI.10, peut être utilisé dans des modèles de simulation, mais il n'est pas pleinement satisfaisant car il sous-évalue les valeurs d'évaporation pour les temps les plus longs.

2.5. Conclusion

Les deux mécanismes hydriques principaux qui apparaissent dans le sol nu sont l'évaporation à partir de la surface du sol et le drainage profond. L'évaporation est fortement liée à l'état d'humectation superficielle du sol, qui dépend du nombre de jours après la pluie : elle passe de $4,5 \text{ mm.j}^{-1}$ juste après les pluies (valeur de l'EVA) à environ 1 mm.j^{-1} une semaine après la pluie. Elle se maintient à une valeur proche de $0,2 \text{ mm.j}^{-1}$, même en fin de saison sèche. Cette évaporation s'accompagne d'un assèchement du sol : le plan de flux nul était situé à 1,1 mètre de profondeur au début de l'année 1987.

De nombreuses phases de drainage ont été observées au cours du cycle annuel 1986-1987 avec un gradient de charge qui reste toujours proche de l'unité. Elles présentent toujours la même structure : un pic de drainage le jour même de la pluie suivi d'une diminution dans les jours qui suivent. Le drainage se poursuit cependant sur de longues périodes après les pluies (environ 1 mm.j^{-1} après une semaine). Le négliger conduirait à une sur-évaluation de l'évaporation, puisque celle-ci est calculée par différence entre la variation de stock et le drainage. Au cours du cycle 1987-1988, aucun drainage n'est apparu lors de la première saison des pluies en raison des faibles précipitations : les flux peuvent donc être très variables d'une année à l'autre en fonction des conditions climatiques.

Les variations d'humidité pendant l'année atteignent environ $0,10 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ en surface, mais elles deviennent extrêmement faibles en-dessous de la profondeur atteinte par le plan de flux nul (1,1 mètre). La stabilité des humidités en profondeur provient de la diminution très rapide de la conductivité hydraulique lorsque le sol s'assèche. En effet, la diminution d'humidité dans ces horizons n'est liée qu'au drainage et celui-ci diminue rapidement après les averses.

3. LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LES PARCELLES CULTIVÉES

3.1 Introduction

L'évolution des tensions de l'eau du sol dans la parcelle N2 P1 K2 au cours du même cycle annuel que celui étudié pour la parcelle nue permet de mettre en évidence les convergences et les différences entre les deux parcelles (figures VI.1 et VI.11).

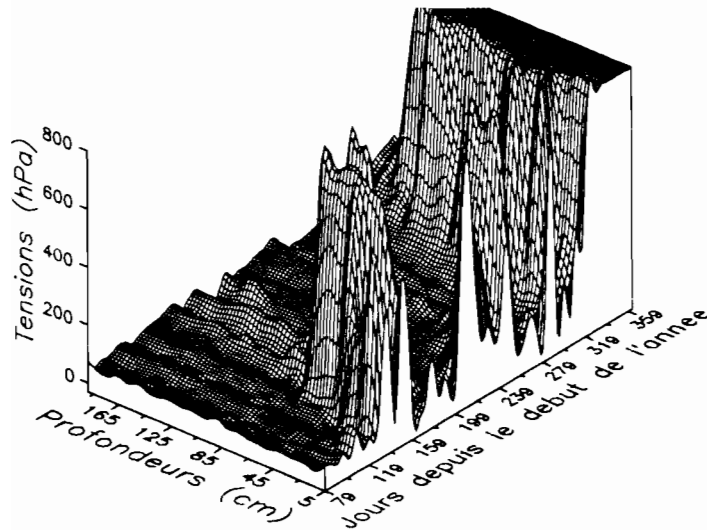


FIGURE VI.11
Evolution des profils de tensions sur la parcelle N2 P1 K2 au
cours d'un cycle annuel (cycle 1986-1987)

Au début de la période étudiée (79^{ème} jour), les tensions sont inférieures à 100 hPa sur tout le profil. Sur la parcelle nue, le profil était très proche de ces valeurs, à l'exception d'une tension plus élevée en profondeur héritée de la jachère herbacée antérieure. Ensuite, jusqu'au 130^{ème} jour environ, l'évolution des profils de tension est très proche sur les deux parcelles. En surface, les tensions fluctuent au rythme des pluies avec des amplitudes faibles. En profondeur les tensions varient peu et seuls quelques sillons indiquent les

périodes de drainage important. Du 130^{ème} au 200^{ème} jour apparaît un pic de tension limité aux 50 premiers centimètres, alors que les tensions en profondeur restent voisines de ce qu'elles sont sur la parcelle nue. Or, le maïs a été planté le 101^{ème} jour et récolté le 213^{ème}. Pendant toute la petite saison sèche (jusqu'au 256^{ème} jour) et au début de la deuxième saison des pluies, les tensions dans la parcelle N2 P1 K2 sont de nouveau très proches de celles relevées dans la parcelle nue. Mais le 300^{ème} jour environ, soit 45 jours après le semis du maïs de deuxième saison, les tensions augmentent rapidement sur la parcelle N2 P1 K2, d'abord en surface puis en profondeur et ce, pratiquement jusqu'à la base du profil.

Les tensions sont donc proches sur la parcelle nue et sur la parcelle N2 P1 K2 en l'absence de culture et pendant un certain laps de temps après le semis du maïs. Elles diffèrent ensuite fortement pendant le reste du cycle cultural. Seules les périodes de culture seront étudiées. L'interprétation repose sur la comparaison des parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 pour une même saison de culture, et sur la comparaison entre les deux saisons de culture pour un niveau de fertilisation donné. L'ordre chronologique n'est pas respecté dans la présentation des résultats obtenus pour les différentes saisons de culture. En effet, chaque saison de culture amène des conclusions complémentaires et l'ordre de présentation a été choisi afin de parvenir progressivement à la compréhension des interactions sol-plante et de l'effet de la fertilisation potassique.

La variété de maïs utilisée a toujours été le NH1 pendant la période où s'est déroulée l'évaluation du bilan hydrique et minéral (chapitre III). Pour chacune des deux saisons de culture, le maïs a reçu les mêmes traitements, en particulier la même fertilisation. La seule différence dans l'itinéraire technique est qu'un labour manuel sur environ 20 cm était effectué en première saison, alors que le maïs était semé sans labour lors de la deuxième saison de culture.

3.2. Premières saisons de culture

3.2.1. PREMIERE SAISON DE CULTURE 1986

Comme il a été vu dans le paragraphe précédent, les profils de tension sous culture sont très proches de ceux observés sous sol nu jusque vers le 25ème jour (figures VI.12 et VI.13). Cela s'explique par le développement réduit du maïs, qui ne mesure qu'environ 25 cm à 14 jours et 70 cm à 28 jours (indices foliaires respectivement de 10 % et de 80 %). La plus grande partie de l'évapotranspiration au cours de cette période provient donc de l'évaporation de la surface du sol.

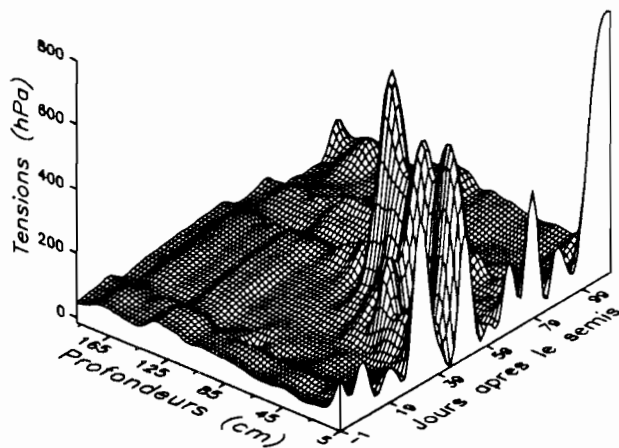


FIGURE VI.12

Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K0 au cours de la première saison de culture 1986

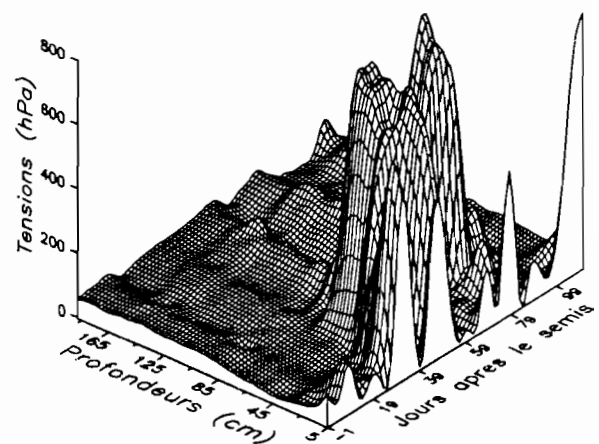


FIGURE VI.13

Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K2 au cours de la première saison de culture 1986

A partir du 25ème jour apparaît un pic de tension en-dessous de la surface du sol. Ce pic n'existe pas sur parcelle nue et il ne peut s'expliquer ni par l'évaporation de la surface du sol, ni par le drainage à la base du profil : il traduit donc la succion exercée par les racines. Cette succion augmente plus rapidement sur la parcelle N2 P1 K2 que sur la parcelle N2 P1 K0 et les valeurs sont plus fortes. La profondeur de sol affectée par la succion, telle qu'elle peut être déduite des profils de tension, n'est cependant que peu affectée par la fertilisation :

- 40 cm pour les deux parcelles le 34ème jour après semis ;
- 70 cm pour N2 P1 K0 et 80 cm pour N2 P1 K2 le 52ème jour.

Ces valeurs sont en accord avec les observations visuelles sur fosse de la profondeur maximale atteinte par les racines (chapitre IV) :

- 25 cm en N2 P1 K0 et 30 cm en N2 P1 K2 le 28ème jour après semis ;
- 80 cm pour les deux parcelles le 48ème jour.

Il est frappant de constater que *les horizons dans lesquels le prélèvement racinaire est le plus important ne sont pas les horizons superficiels, où se trouve plus de la moitié des racines, mais des niveaux dans lesquels la densité racinaire est beaucoup plus faible.* Au niveau physiologique, cette constatation s'explique par le fait que les racines situées à proximité de la surface sont surtout de grosses racines lignifiées (principalement

action de transfert), alors que les racines profondes sont fines et ont une activité de prélèvement plus importante. *Mais cela souligne la difficulté de déduire l'activité du système racinaire de sa répartition dans le sol, comme l'avait déjà précisé ANGE (1984) dans le cas du cotonnier.*

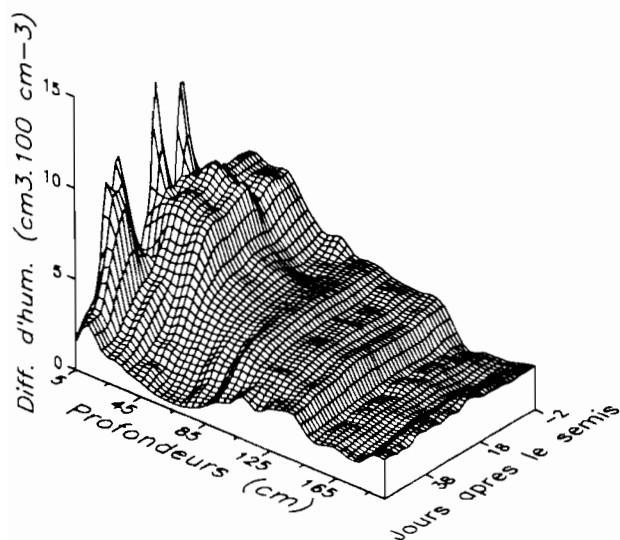


FIGURE VI.14

Evolution des profils d'humidité sur la parcelle N2 P1 K2 de deux jours avant le semis au 53ème jour après le semis (première saison 1986, différence d'humidité volumique par rapport au minimum de l'année)

les racines, la zone d'exploitation maximale étant située vers 60 cm de profondeur le 53ème jour après semis.

Les données des profils d'humidité sont donc en accord avec les données tensiométriques pour caractériser l'effet des racines sur la dynamique de l'eau dans le sol, mais les variations de tensions sont supérieures à celles des humidités. *Le suivi de l'évolution des profils de tension au cours du cycle cultural apparaît donc comme un moyen privilégié d'étude de la succion racinaire.*

Les variations des valeurs décadaires moyennes de l'évapotranspiration (ETR) des différentes parcelles permettent de quantifier l'effet du prélèvement racinaire en fonction de la fertilisation (figure VI.15). Jusqu'à vers le 25ème jour, l'ETR des parcelles cultivées n'est pas différente de l'évaporation de la parcelle nue. Comme la période a été assez pluvieuse, l'ETR est généralement restée comprise entre 1,5 et 3,0 mm.j⁻¹, sauf entre le dixième et le quinzième jour où elle a chuté jusqu'à moins de 1 mm.j⁻¹ pendant une courte période plus sèche. Ces données confirment les observations tensiométriques : jusqu'à vers le 25ème jour, le développement du maïs est insuffisant pour intervenir de manière significative sur le fonctionnement hydrique du sol.

L'effet de la succion racinaire apparaît également, bien que moins nettement, sur l'évolution de l'humidité (figure VI.14). Le bloc-diagramme représente l'évolution des différences d'humidités par rapport à l'humidité minimale observée au cours de l'année. La période choisie couvre de deux jours avant le semis à 53 jours après. Le bloc-diagramme a été arrêté juste avant une forte pluie qui a accru les humidités sur tout le profil. Pendant le premier mois qui suit le semis, les humidités changent peu, sauf en surface. Elles diminuent ensuite fortement dans les horizons exploités par

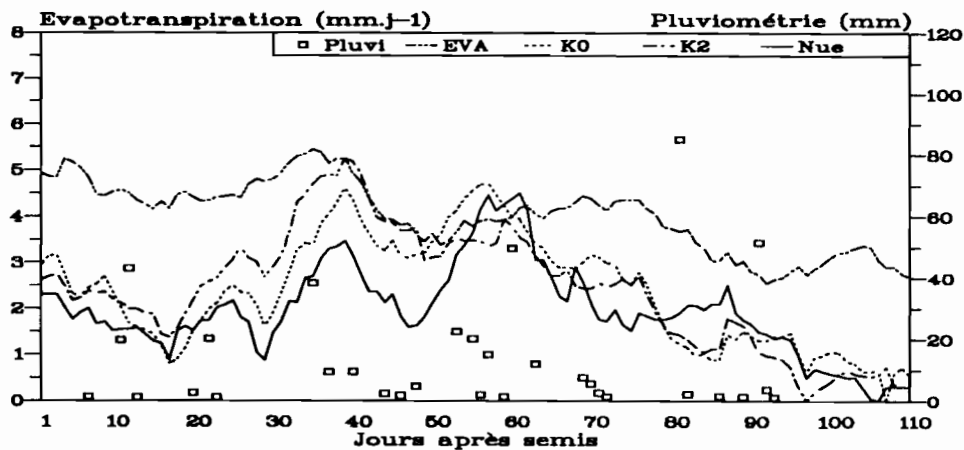


FIGURE VI.15
Evolution des évapotranspirations pendant le premier cycle cultural de maïs en 1986 (toutes parcelles, moyennes décadales glissantes)

A partir du 25ème jour, avec l'apparition de la succion racinaire mise en évidence par les tensiomètres, l'ETR devient supérieure à l'évaporation du sol nu. Vers le 40ème jour, elle devient proche de la demande climatique (évaluée par l'évaporation du bac de classe A, EVA) et du 40ème au 60ème jour ses variations restent parallèles à celles de l'EVA sur les parcelles cultivées.

Est-il possible de mettre en évidence, au cours de cette période, une différence d'ETR liée à la fertilisation ? L'ETR de la parcelle N2 P1 K0 est inférieure à celle de la parcelle N2 P1 K2, mais les différences ne sont pas significatives (écart-type sur l'ETR en l'absence de drainage de $0,43 \text{ mm.j}^{-1}$ pour N2 P1 K0 et $0,55 \text{ mm.j}^{-1}$ pour N2 P1 K2).

Le problème a été abordé en suivant quotidiennement le stock sur la tranche 0-150 cm au cours du cycle cultural (figure VI.16). En raison des différences de texture entre les trois parcelles, les valeurs de stock différent pour une même tension de l'eau dans le sol, rendant impossible une confrontation directe des valeurs. Afin de comparer les évolutions des stocks au cours du cycle de culture, la valeur maximale atteinte sur la parcelle N2 P1 K0 après la pluie du 11ème jour du cycle a été prise comme référence. Une valeur constante a été ajoutée aux stocks des parcelles N2 P1 K2 et nue pour que la valeur de stock soit la même sur les trois parcelles à cette date de référence (+ 14 mm pour la parcelle N2 P1 K2 et + 20 mm pour la parcelle nue). La figure VI.16 montre que les évolutions de stocks sur les trois parcelles sont très voisines pendant les 25 premiers jours et à la fin du cycle cultural (à partir du 95ème jour). Cette convergence peut être interprétée comme le résultat d'une évaporation et d'un drainage du même ordre de grandeur sur les trois parcelles en début et en fin de cycle. Il en résulte que les différences apparaissant en cours de cycle sont dues à l'effet du traitement.

La similitude des évolutions de stocks en début et en fin de cycle conduit à s'interroger sur les calculs de précision qui ont été effectués précédemment. En effet, il a été montré que l'écart-type sur les différences de stock était de 4,3 mm sur la parcelle N2 P1 K0, 5,5 mm sur la parcelle N2 P1 K2 et 6,1 mm sur la parcelle nue. Or, les différences qui apparaissent entre les courbes des trois parcelles sont bien inférieures à ces

valeurs : la précision obtenue sur les variations de stocks est supérieure à ce que les calculs laissent prévoir. Deux explications peuvent être avancées : d'une part, les calculs de précision n'ont pas été effectués pour connaître l'erreur sur la différence de stock entre deux parcelles, mais pour évaluer les erreurs sur une seule parcelle ; d'autre part, l'évaluation des erreurs a été effectuée en maximisant certaines composantes, en particulier la composante spatiale qui constitue la plus grande part de l'erreur.

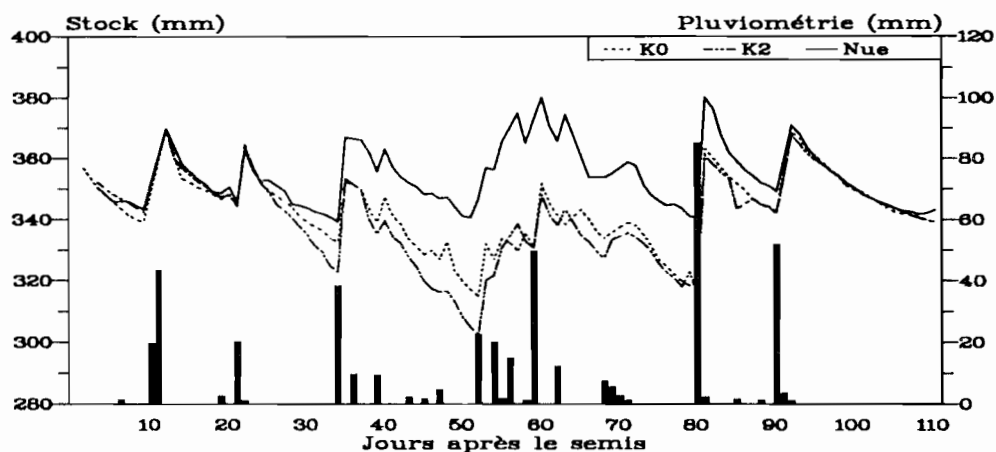


FIGURE VI.16

Evolution du stock hydrique pendant le premier cycle cultural de maïs en 1986 (toutes parcelles, valeurs quotidiennes)

Pendant toute la période sans pluie qui s'étend du 23ème au 34ème jour, la diminution de stock est plus importante sur la parcelle N2 P1 K2 que sur la parcelle N2 P1 K0 : à la fin de la période, la parcelle N2 P1 K2 a perdu 10 mm d'eau de plus que la parcelle N2 P1 K0. La pluie de 38 mm du 35ème jour rétablit l'égalité des stocks hydriques. Le même phénomène se produit ensuite au cours de la phase peu pluvieuse qui s'étend du 36ème au 53ème jour, la différence de stock entre les deux parcelles étant de 12 mm le 53ème jour. Au cours de la période qui s'étend du 23ème au 53ème jour, la différence totale de stock qui est apparue entre les deux parcelles est de 22 mm. Cette différence correspond à une moyenne de $0,7 \text{ mm.j}^{-1}$, valeur trop faible pour être quantifiée au niveau de l'ETR par la méthode employée. Aucune différence n'est visible ensuite pendant la fin du cycle cultural.

Au cours de toute la période qui s'étend du début de la montaison (25ème jour) à la floraison mâle (55ème jour), la quantité d'eau transpirée par le maïs est diminuée par la carence en potassium, même en conditions d'alimentation en eau non limitantes, alors que la surface évaporante n'est pas significativement différente entre les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2. *Le potassium augmente donc la transpiration foliaire, mais l'expérimentation n'a pas permis de chiffrer le phénomène.*

A partir du 60ème jour (fin de la floraison femelle), l'ETR des deux parcelles diminue rapidement (figure VI.15), quoique le sol soit bien pourvu en eau. Aucune différence entre les deux parcelles cultivées ne peut être mise en évidence. L'évapotranspiration des parcelles cultivées comporte cependant toujours

une composante liée à la transpiration des feuilles. En effet, l'évapotranspiration des parcelles cultivées et l'évaporation du sol nu sont très proches au moment des fortes pluies du 60ème et 63ème jour (valeurs proches de celle de l'EVA), mais elles diffèrent au cours de la phase de dessiccation qui précède la pluie du 81ème jour. Les différences qui apparaissent ensuite ne sont plus interprétables, car les pluies du 81ème et du 91ème jour ont produit un pic de drainage qui accroît l'intervalle de confiance. *Bien que les conditions hydriques n'aient pas été limitantes pour la plante, l'évapotranspiration du maïs a donc diminué fortement à partir du 60ème jour, pour atteindre une valeur de l'ordre de 60 % de l'EVA entre le 65ème et le 75ème jour.*

A partir du 85ème jour (fin du cycle), les valeurs d'évaporation et d'évapotranspiration sont faibles et très proches (figure VI.15). Ce résultat est en accord avec l'évolution physiologique de la plante. En effet, au cours de la maturation, l'indice foliaire diminue : il passe de 162 % le 86ème jour à 40 % le 100ème. La transpiration est donc ralentie et les feuilles desséchées permettent une évaporation directe de la surface du sol.

Les fortes pluies des 60ème, 81ème et 91ème jour permettent de suivre *la reconstitution du stock hydrique au moment des pluies*. La pluie du 60ème jour (49 mm) a fait apparaître du drainage sur les deux parcelles cultivées. Pourtant, le stock d'eau dans le sol n'a augmenté que de 15 mm environ, n'atteignant que 350 mm, contre 370 mm le 11ème jour après le semis. A la suite de la même pluie, le stock hydrique de la parcelle nue est parvenu à 380 mm. Après la pluie du 81ème jour (85 mm), le drainage a été important sur les trois parcelles. Cependant, si le stock de la parcelle nue est parvenu de nouveau à 380 mm, celui des parcelles cultivées n'a été que de 360 mm. Ce n'est qu'à la suite de la pluie du 91ème jour que le stock initial observé le 11ème jour du cycle a été retrouvé sur les trois parcelles. Lorsqu'une pluie survient sur un sol asséché, du drainage peut donc se produire sans que tout le sol soit entièrement réhumecté. Cette constatation est corroborée par les observations de terrain : il a été constaté, lors d'une expérimentation de drainage interne, que pour parvenir à réhumecter tout le profil en fin de saison sèche il était nécessaire d'effectuer deux irrigations séparées de plusieurs jours. *L'infiltration n'est donc pas monodimensionnelle dans le sol étudié. Des circulations très rapides se produisent le long de certains chemins préférentiels (la plus grande partie du drainage se produit au cours des 24 premières heures), mais la masse du sol ne s'humecte que lentement. Ce fonctionnement pourrait s'expliquer par l'organisation structurale qui a été constatée : la structure est massive sur l'ensemble du profil, avec quelques fentes étroites apparaissant à faible profondeur et se poursuivant jusque vers 1,5 mètre et la présence de galeries de termites jusqu'à plus de deux mètres de profondeur. Les fentes et les galeries fauniques sont probablement le siège des circulations rapides, l'humectation de la masse du sol s'effectuant simultanément à partir de la surface et à partir des parois des pores.*

3.2.2. PREMIERE SAISON DE CULTURE 1985

Le début de la saison de culture a été très pluvieux (128 mm dans les dix jours qui ont précédé le semis, 81 mm dans les cinq premiers jours après semis) : le sol est donc humecté sur toute sa profondeur en début de cycle (figures VI.17 et VI.18). Jusqu'au 25ème jour, l'évolution des tensions est identique à celle d'un sol

nu : en surface, augmentation rapide des tensions entre les pluies et chute lors des averses ; en profondeur, chute lors de la pluie du 27ème jour, mais croissance lente des tensions en profondeur entre les pluies. Ce comportement est confirmé par l'étude de l'ETR (figure VI.19) : lorsque la surface du sol est sèche (vers le 15ème jour), l'évaporation est faible. Elle augmente fortement, jusqu'à rejoindre la valeur de l'EVA, lorsque la surface du sol est humide. L'étude de cette phase du cycle amène cependant à souligner l'effet que produit l'utilisation de moyennes décadaires glissantes : l'évaporation augmente à partir du 15ème jour, alors que les pluies n'ont commencé à se produire que le 22ème jour. Ce type de représentation fait apparaître des valeurs qui semblent anticiper les événements climatiques.

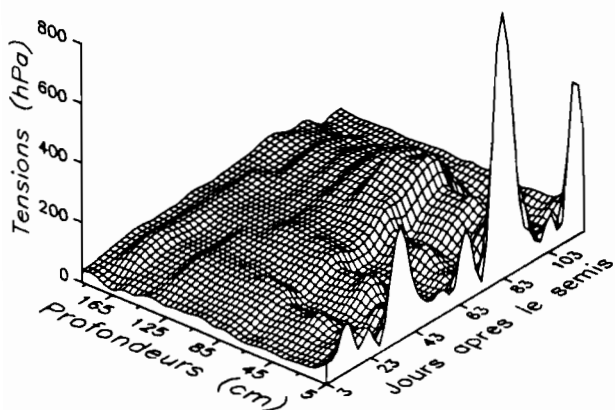


FIGURE VI.17
Evolution des profils de tensions sur la parcelle N2 P1 K0 au cours de la première saison de culture 1985

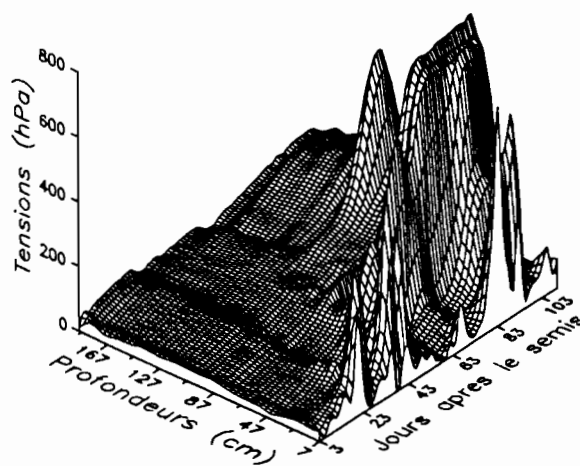


FIGURE VI.18
Evolution des profils de tensions sur la parcelle N2 P1 K2 au cours de la première saison de culture 1985

A partir du 25ème jour, une tension apparaît dans le sol jusqu'à 50 cm environ (figures VI.17 et VI.18) : l'effet du prélèvement racinaire devient sensible. Cette tension est plus élevée dans le cas de la parcelle N2 P1 K2 que dans celui de la parcelle N2 P1 K0, mais elles ne dépassent pas 400 hPa entre le 25ème et le 60ème jour, même sur la parcelle N2 P1 K2, . La croissance des tensions est moins importante que lors de la première saison 1986, car les pluies furent abondantes et bien réparties. L'évolution de l'ETR reflète donc les besoins en eau d'un couvert de maïs qui se développe sans stress hydrique. Au cours de cette période, ni les valeurs d'ETR, ni l'évolution des stocks ne permettent de différencier les deux traitements.

Le suivi du développement végétatif de la culture a été réalisé pendant cette saison de culture (chapitre IV). Il a montré que la hauteur moyenne des plants de maïs est 19 % plus faible sur la parcelle N2 P1 K0, mais que le nombre de feuilles, donc la surface évaporante, n'est pas significativement différent. En ce qui concerne l'enracinement, peu de différences ont pu être mises en évidence. Les profondeurs atteintes ainsi que les densités observées sont identiques, sauf au niveau du front de pénétration racinaire, où les racines semblent un peu plus abondantes en N2 P1 K2. Dans ces conditions optimales de développement, il n'est

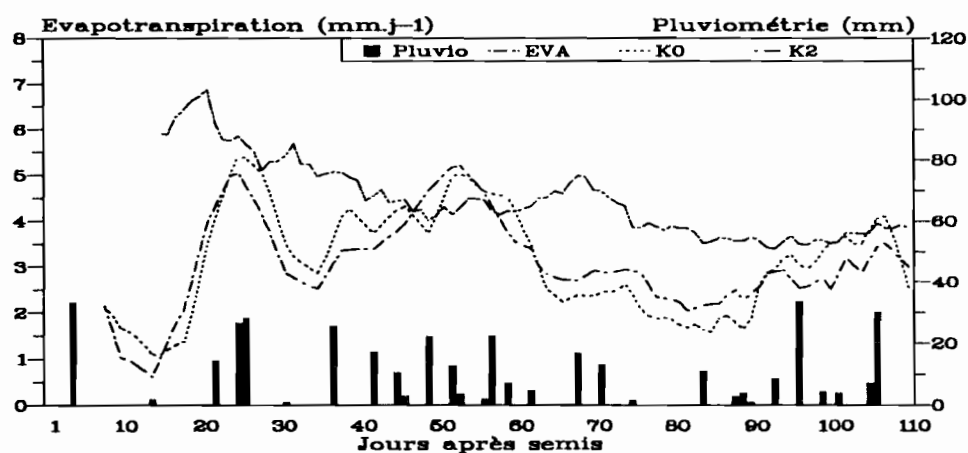


FIGURE VI.19
 Evolution des évapotranspirations pendant le premier cycle cultural de maïs en 1985 (parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2, moyennes décadaires glissantes)

donc pas apparu de différence entre les deux traitements, à l'exception d'une hauteur des plants plus élevée et d'un prélèvement racinaire légèrement plus fort en N2 P1 K2.

Du 30ème au 45ème jour, l'ETR augmente (figure VI.19) jusqu'à dépasser l'EVA à partir du 45ème jour environ. Au maximum, vers 50-55 jours, l'ETR représente 110 % de l'EVA. L'ETR décroît ensuite rapidement à partir du 60ème jour pour prendre une valeur de l'ordre de 60 % de l'EVA entre le 65ème et le 75ème jour. Cette évolution est identique à celle de la première saison 1986. Du 75ème au 85ème jour, l'ETR décroît encore jusqu'à environ 50 % de l'EVA.

Entre le 65ème et le 85ème jour, les valeurs d'ETR de la parcelle N2 P1 K2 restent systématiquement supérieures à celles de la parcelle N2 P1 K0, sans que la différence soit significative pour un jour donné. Cette différence provient d'une diminution de stock plus rapide sur la parcelle N2 P1 K2. La différence entre les deux parcelles atteint 20 mm le 85ème jour. Cette évolution des stocks est conforme à l'évolution des tensions (figures VI.17 et VI.18). Les tensions restent très faibles sur la parcelle N2 P1 K0, alors qu'elles augmentent jusqu'à une profondeur 1,3 mètre sur la parcelle N2 P1 K2, les valeurs à 60 cm de profondeur atteignant 800 hPa.

A la fin du cycle (du 85ème au 110ème jour), l'ETR croît de nouveau et sa valeur devient proche de celle de l'EVA. Cette évolution est très différente de celle observée en 1986 (diminution en fin de cycle). L'interprétation reste cependant la même : comme les plants de maïs présentent alors des feuilles desséchées, la plus grande part de l'évapotranspiration provient de l'évaporation du sol. Lorsqu'il ne pleut pas, comme en 1986, l'évaporation est faible, mais lorsque les pluies sont abondantes, comme en 1985, l'évaporation peut approcher l'EVA.

3.2.3. CONCLUSION DE L'ÉTUDE DES PREMIERES SAISONS DE CULTURE

La comparaison des deux saisons de culture étudiées permet de définir les besoins en eau du maïs NH1 au cours de son cycle cultural.

- Du semis au début de la montaison (25ème jour), la transpiration de la plante n'est pas sensible en terme de bilan hydrique : l'évapotranspiration est dominée par l'évaporation de la surface du sol qui dépend de la fréquence des pluies.
- Pendant la montaison (25-45ème jour), la transpiration du maïs augmente rapidement. L'évapotranspiration parvient au niveau de l'EVA vers 35-40 jours et la dépasse ensuite.
- Durant la période qui s'étend du début de l'épiaison mâle à la floraison femelle (entre le 45ème et le 60ème jour), les besoins en eau sont maximaux, le pic d'ETR atteignant 120 % de l'EVA. A la fin de la floraison femelle (60ème jour), l'ETR diminue rapidement. Elle se stabilise au stade grain laiteux (65-75ème jours) à environ 60 % de l'EVA, puis à 50 % de l'EVA au stade grain pâteux (75-85ème jours).
- Après le 85ème jour, les feuilles commencent à se dessécher et la transpiration de la plante diminue : l'évapotranspiration est de nouveau dominée par l'évaporation du sol.

Ces résultats, qui montrent une liaison stricte entre les phases physiologiques et les besoins de la plante, sont conformes aux travaux antérieurs sur le maïs. Bien que selon les années un décalage de quelques jours puisse apparaître entre les phases physiologiques, les besoins en eau du maïs NH1 au Togo méridional peuvent être résumés par le tableau VI.1. Les valeurs sont très proches de celles publiées antérieurement par FRETEAUD *et al.* (1987). Avec une évaporation du bac de classe A de 4 mm.j^{-1} , les besoins sont de 200 mm répartis au cours des deux mois compris entre le 25ème et le 85ème jour après le semis. Avant le 25ème jour, l'abondance des pluies est peu importante si le sol est humide au semis.

TABLEAU VI.1
Coefficients culturaux K'c du maïs NH1 au Togo méridional (valeurs pentadaires, $ETM = K'c \cdot EVA$)

Stades physio.	Levée		Montaison				Floraison			Maturation				
Jours après le semis	0-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-110
K'c	-	0,50	0,65	0,90	1,00	1,10	1,15	1,10	0,80	0,60	0,60	0,50	0,50	-

La comparaison des parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 a montré que les besoins en eau varient peu avec la fertilisation pour cette saison de culture. La tension de l'eau dans la zone d'extraction racinaire est systématiquement plus élevée dans la parcelle N2 P1 K2 que dans la parcelle N2 P1 K0, mais les différences d'ETR, de l'ordre de 10 à 30 mm sur le cycle d'après les valeurs de stock (5 à 10 % du total du cycle), sont trop faibles pour être quantifiées précisément par le dispositif utilisé. Comme le rendement des parcelles non fertilisées en potassium est inférieur de 30 à 40 % à celui des parcelles fertilisées (SARAGONI *et al.*, 1991), c'est donc que le potassium a un effet sur le rendement, indépendamment de tout effet notable sur la transpiration.

3.3. Deuxièmes saisons de culture

3.3.1. DEUXIEME SAISON DE CULTURE 1985

Jusqu'au 60ème jour environ, les pluies ont été abondantes : plusieurs sillons indiquent la présence de drainage profond et les tensions restent faibles, en surface comme en profondeur (figures VI.20 et VI.21). Par ailleurs, les conditions climatiques des deux premiers mois après le semis ont été très proches de celles de la première saison 1985 (tableau VI.2).

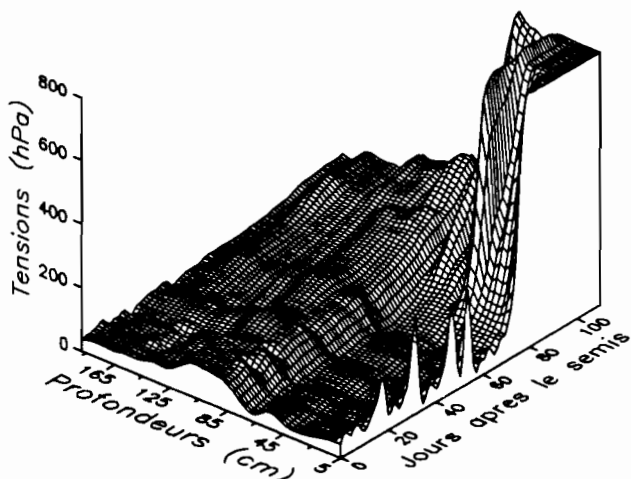


FIGURE VI.20
Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K0
au cours de la deuxième saison de culture 1985

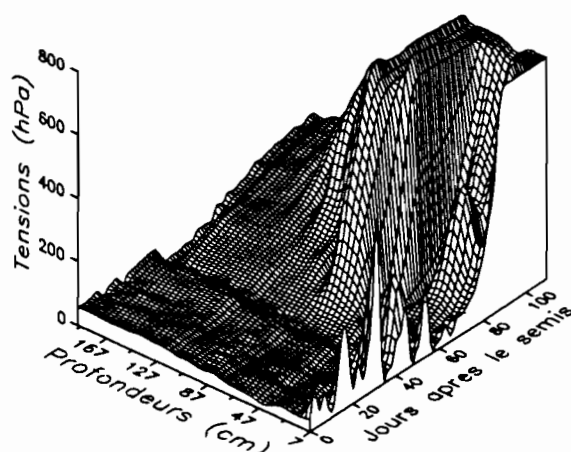


FIGURE VI.21
Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K2
au cours de la deuxième saison de culture 1985

Avec la même variété, les mêmes conditions climatiques, la même fertilisation et des itinéraires techniques qui ne diffèrent que par l'absence de labour en deuxième saison culturale, il était probable d'observer un développement végétatif et des besoins en eau comparables au cours des deux saisons. Il n'en a rien été.

TABLEAU VI.2
Principaux paramètres climatiques des deux premiers mois de la première et de la deuxième saison de culture 1985 (moyennes mensuelles)

Saison de culture	Mois	Température			Hygrométrie			Rayonnement		
		min °C	max °C	moy °C	min %	max %	moy %	ETo mm.j ⁻¹	EVA mm.j ⁻¹	Rg J.cm ⁻² .j ⁻¹
Première saison	Avril	23,4	34,1	28,7	46	98	73	3,9	6,7	1830
	Mai	22,8	31,4	27,1	57	98	78	3,8	4,8	1610
Deuxième saison	Septembre	22,0	30,8	26,4	59	97	78	3,4	4,2	1632
	Octobre	22,0	31,8	26,8	53	96	75	3,6	3,9	1731

Pour la parcelle N2 P1 K2, aucune différence significative n'apparaît entre les deux saisons au début de la montaison (mesures réalisées le 28ème jour en première saison et le 24ème jour en deuxième saison), les 4 jours supplémentaires pouvant expliquer les écarts observés (tableau VI.3). Mais une différence de près de 40 cm sur la hauteur et de 2 feuilles se manifeste lors de la floraison (mesure le 56ème jour en première saison et le 51ème en deuxième). Pour la parcelle N2 P1 K0, dont le développement végétatif était proche

de celui de la parcelle N2 P1 K2 en première saison, la diminution de croissance lors de la deuxième saison est beaucoup plus marquée. Le phénomène, déjà sensible lors de la première mesure, devient spectaculaire à la floraison (différence de hauteur de 79 cm entre les deux saisons).

TABLEAU VI.3
 Comparaison du développement végétatif en fonction de la saison de culture et de la fertilisation potassique (année 1985)

Stade physio.	Paramètre	Parcelle N2 P1 K0		Parcelle N2 P1 K2	
		Première saison	Deuxième saison	Première saison	Deuxième saison
Début montaison	Hauteur totale (cm)	61	35	79	64
	Nombre de feuilles	8,2	5,4	9,4	7,1
Début floraison	Hauteur totale (cm)	200	121	253	214
	Nombre de feuilles	13,3	10,0	13,8	12,1

Le début du cycle a été affecté par un drainage important. Etant donnée l'erreur sur l'évaluation du drainage, les différences d'ETR qui apparaissent en début de cycle (figure VI.22) entre le semis et le 25ème jour ne sont pas significatives. L'ETR augmente ensuite et devient égale à l'EVA vers le 35ème jour. Jusqu'au 35ème jour, l'évolution de l'ETR est donc conforme à ce qui a été constaté en première saison. Pour la parcelle N2 P1 K2, l'évolution de l'ETR entre le 35ème jour et le 60ème est identique à ce qu'elle était en première saison : elle est supérieure à l'EVA entre le 45ème et le 60ème jour. Mais l'évolution de l'ETR de la parcelle N2 P1 K0 est différente : elle reste inférieure à l'EVA jusque vers le 50ème jour et ne la dépasse qu'entre le 50ème et le 60ème jour. Que s'est-il passé ?

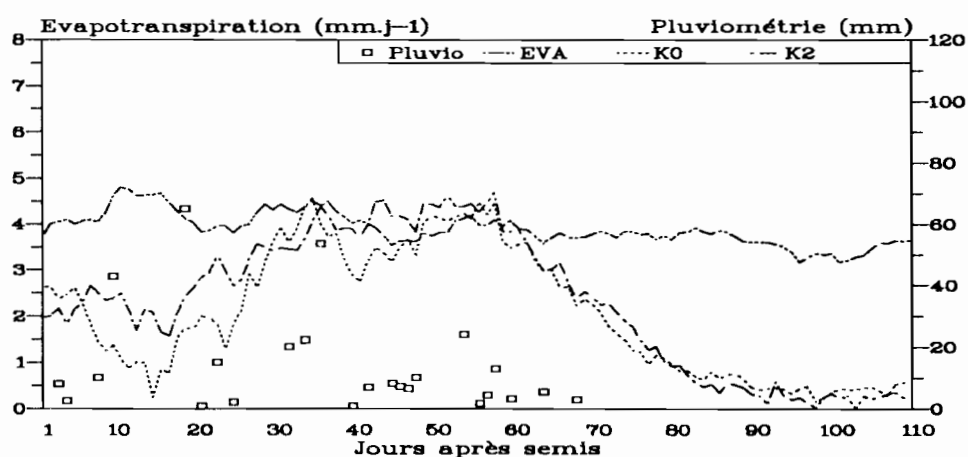


FIGURE VI.22
 Evolution des évapotranspirations pendant le deuxième cycle cultural du maïs en 1985 (parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2, moyennes décadales glissantes)

Le problème a été abordé à l'aide des profils de tension réalisés le 48ème jour, soit à une époque du cycle où les besoins sont maximaux (figure VI.23). La tension relevée dans la parcelle N2 P1 K2 en première saison a été utilisée comme référence. Pour une répartition voisine des pluies, la zone de prélèvement racinaire dans la parcelle N2 P1 K2 est plus superficielle en deuxième saison qu'en première et la tension est plus faible. Dans la parcelle N2 P1 K0, l'effet du prélèvement racinaire est à peine sensible.

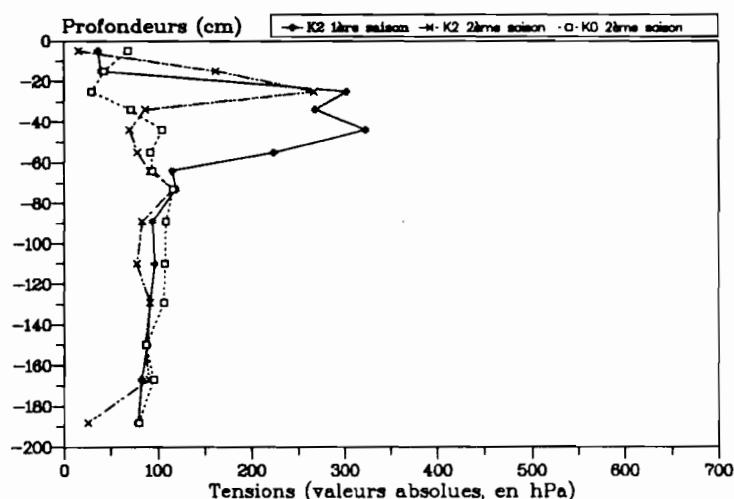


FIGURE VI.23
Profils de tension le 48ème jour après semis (année 1985, première et deuxième saison de culture)

En deuxième saison, le développement végétatif est ralenti dès le début de la croissance et le prélèvement d'eau par le système racinaire est plus faible au début de la floraison qu'en première saison. Or, le seul facteur différent entre les deux saisons de culture est l'absence de labour en deuxième saison. L'interprétation des différences semble donc devoir impliquer le développement du système racinaire, qui seul peut expliquer leur apparition aussi précoce au début du cycle et le prélèvement racinaire plus superficiel en deuxième saison. Par ailleurs, les terres de Barre ont une stabilité structurale très faible lorsqu'elles sont mises en culture ($I_s = 1,9$ sur l'horizon 0-4 cm) et la porosité créée par le labour disparaît rapidement. De plus, tous les travaux agronomiques réalisés sur ces sols ont montré l'importance du labour sur le rendement (MARQUETTE *et al.*, 1982 ; MARQUETTE, 1986 ; SARAGONI *et al.*, 1991). La faible porosité des sols pendant le deuxième cycle de culture provoquerait donc un développement racinaire plus réduit que pendant le premier cycle. En deuxième saison 1985, où la pluviométrie a été suffisante, l'ETR n'a pas été diminuée sur la parcelle N2 P1 K2. Le développement racinaire estimé par les tensions parvient à 40 cm le 48ème jour après le semis. Sur la parcelle N2 P1 K0, en revanche, la carence en potassium jointe à la faible porosité semble avoir considérablement réduit le développement des racines. Aucune observation directe du système racinaire ne permet cependant de confirmer cette interprétation.

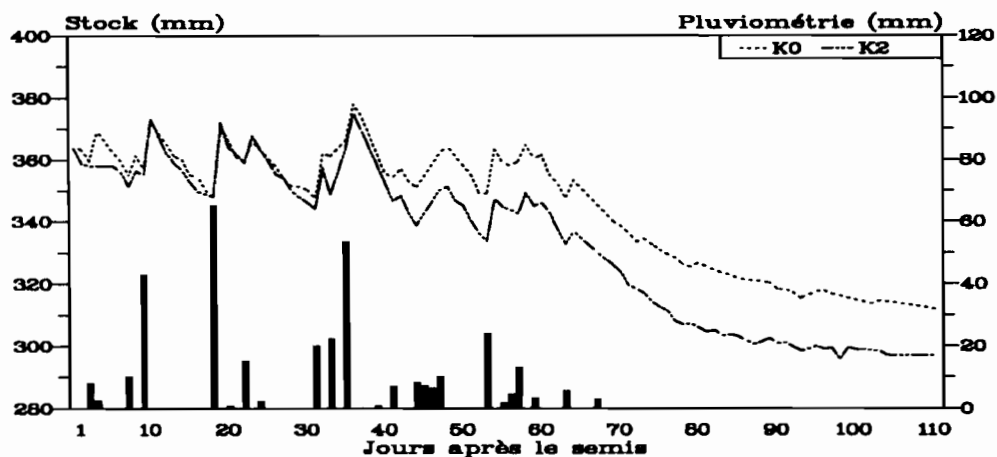


FIGURE VI.24

Evolution des stocks hydriques au cours de la deuxième saison 1985 (tranche 0-150 cm, parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2)

Dès le 60ème jour, l'ETR décroît ; elle devient inférieure à 1 mm.j^{-1} à partir du 75ème jour (figure VI.22). L'évolution des stocks (figure VI.24) et des tensions (figures VI.20 et VI.21) permettent de proposer une interprétation. A partir du 60ème jour après semis, les pluies s'arrêtent et le stock hydrique diminue rapidement. Cette diminution de stock s'accompagne d'une augmentation des tensions, beaucoup plus prononcée sur la parcelle N2 P1 K2 que sur la parcelle N2 P1 K0 : au moment de la récolte, l'effet des racines est sensible jusqu'à 140 cm en N2 P1 K2, contre 100 cm à peine en N2 P1 K0. La différence de stock entre les parcelles N2 P1 K2 et N2 P1 K0 atteint 15 mm à la récolte du maïs ; cette différence, n'apparaissant que progressivement, ne se traduit pas par des différences d'ETR.

3.3.2. DEUXIEME SAISON DE CULTURE 1986

Les pluies sont régulières entre le semis et le 50ème jour (sauf pendant une période sèche de 15 jours entre le 22ème et le 36ème jour), mais elles s'arrêtent ensuite. Les profils (figures VI.25 et VI.26) montrent que les tensions restent très faibles sur toute la profondeur du sol jusqu'au 50ème jour environ, sauf pendant la période sèche, au cours de laquelle les tensions ont augmenté en surface. Jusqu'au début de la floraison, le sol contient donc de l'eau utilisable par le maïs, comme pendant la deuxième saison 1985.

Jusqu'au 25ème jour, les trois parcelles présentent une évaporation du même ordre de grandeur (2 mm.j^{-1}), en raison de plusieurs petites pluies (figure VI.27). Ensuite, l'effet de la transpiration du maïs se manifeste par un accroissement progressif de l'ETR. Sur la parcelle N2 P1 K2, l'ETR parvient à l'EVA vers le 35ème jour, mais diminue ensuite rapidement à une valeur un peu plus faible où elle se maintient jusque vers le 60ème jour. Sur la parcelle N2 P1 K0, l'ETR est à peine supérieure à l'évaporation de la parcelle nue, sauf après le 55ème jour, où elle rejoint l'ETR de la parcelle N2 P1 K2. L'indice foliaire est probablement responsable de ces faibles valeurs d'ETR : il n'a pas été mesuré en 1986, mais en 1990 il n'était, au 60ème jour, que de 0,89 en N2 P1 K2 et de 0,16 en N2 P1 K0, contre plus de 2 pour les deux parcelles en première saison.

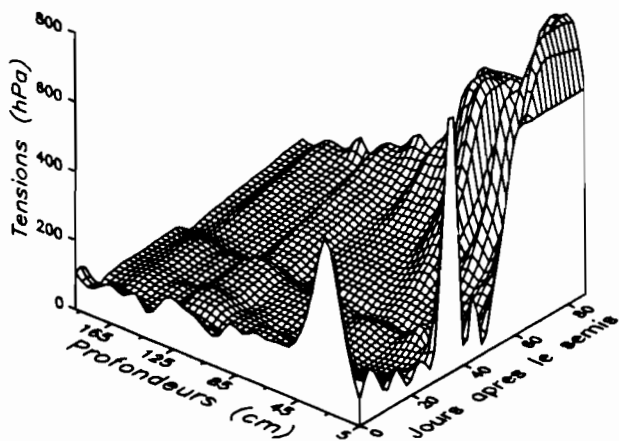


FIGURE VI.25
Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K0
au cours de la deuxième saison de culture 1986

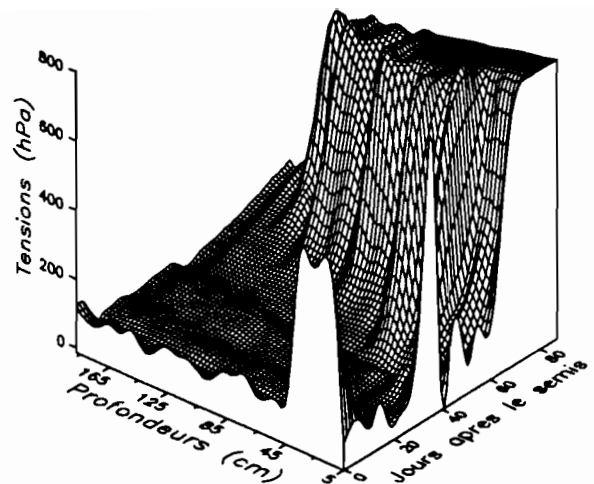


FIGURE VI.26
Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K2
au cours de la deuxième saison de culture 1986

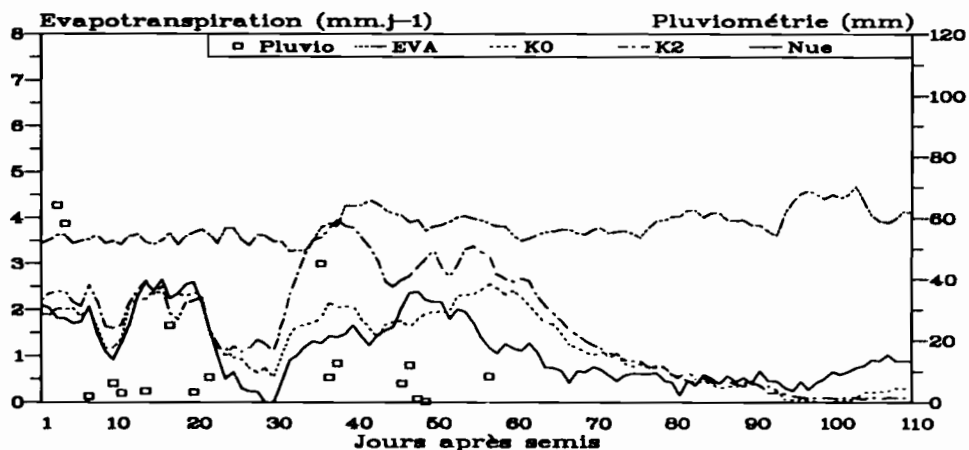


FIGURE VI.27
Evolution des évapotranspirations pendant le deuxième cycle cultural de maïs en 1986 (parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2,
moyennes décadaires glissantes)

La répartition des pluies peu différente en première et en deuxième saison 1986 jusqu'au 50ème jour, les tensions observées le 52ème jour du cycle peuvent être comparées (figure VI.28). Les tensions relevées au cours de la deuxième saison 1986 sont beaucoup plus faibles que celles de la première et l'augmentation des tensions liée à l'activité racinaire y est moins profonde. L'action des racines est à peine perceptible pour la parcelle N2 P1 K0. Ces observations sont en accord avec ce qui a été vu lors de l'étude de la deuxième saison 1985. Cependant, contrairement à la deuxième saison 1985 où seule l'ETR de la parcelle N2 P1 K0 était diminuée, c'est l'ETR des deux parcelles qui reste très inférieure à l'EVA au cours de la deuxième saison 1986, même au moment de la floraison. Bien qu'aucune preuve ne puisse être avancée (ni le développement des parties aériennes, ni le développement des racines n'ont été suivis au cours de cette saison de culture), il est possible que les faibles ETR proviennent d'un tassement du sol qui est apparu au moment de la levée. En effet, deux fortes pluies (64 mm et 58 mm) se sont produites dans les jours qui ont

suivi le semis. Il est possible que ces pluies, en frappant le sol nu, aient produit un tassement de la terre meuble située au-dessus des graines (ameublissement résultant du trou de plantation) et aient ainsi perturbé, un peu plus qu'en 1985, le développement de la culture.

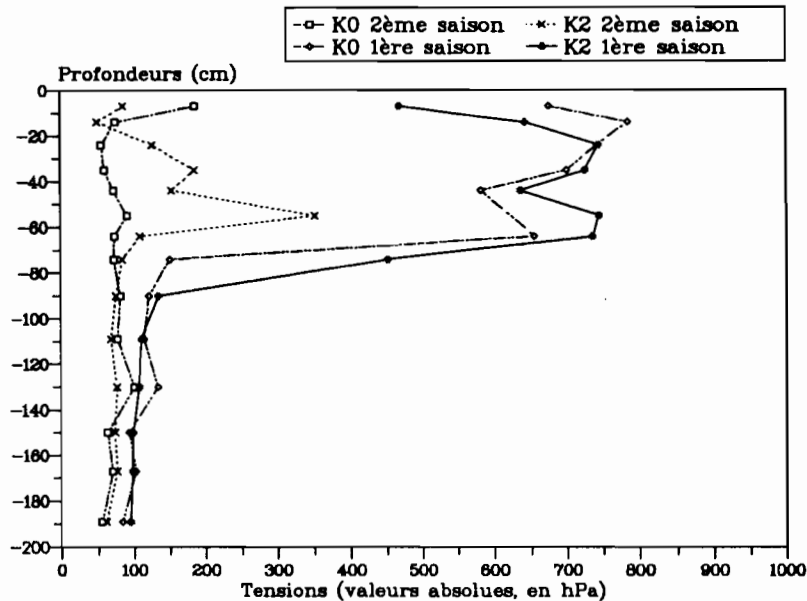


FIGURE VI.28
Profils de tensions le 53ème jour après le semis (année 1986, première et deuxième saison de culture)

A partir du 60ème jour, les ETR des deux parcelles décroissent rapidement (figure VI.27). Elles rejoignent l'évaporation de la parcelle nue à partir du 85ème jour. Cette diminution est liée à celle du stock hydrique. La figure VI.29 représente l'évolution du stock hydrique des trois parcelles au cours d'un cycle annuel. Au moment de la récolte du maïs de deuxième saison (341ème jour), les stocks hydriques des parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 étaient pratiquement parvenus à leurs minimums. La différence de stock entre les deux parcelles est de nouveau de l'ordre de 15 mm, ce qui est trop peu pour être quantifié au niveau de l'ETR.

Quel est l'état hydrique du sol à la fin de la deuxième saison de culture ? Le stock le plus faible est observé en N2 P1 K2 et le plus fort en N2 P1 K0 (figure VI.29). Mais à quelle profondeur dans le sol se situent les différences ? Pour les mettre en évidence, la différence entre l'humidité maximale de la deuxième saison de culture 1986 et l'humidité à la récolte a été représentée en fonction de la profondeur (figure VI.30). Cette représentation fait apparaître que la culture a prélevé de l'eau jusque vers 110 cm en N2 P1 K0 et vers 150 cm en N2 P1 K2, ce qui est conforme aux données fournies par les tensiomètres : une vue des blocs-diagrammes des figures VI.25 et VI.26 par la base du profil indique des prélèvements racinaires jusqu'à 95 cm en N2 P1 K0 et jusqu'à 150 cm en N2 P1 K2.

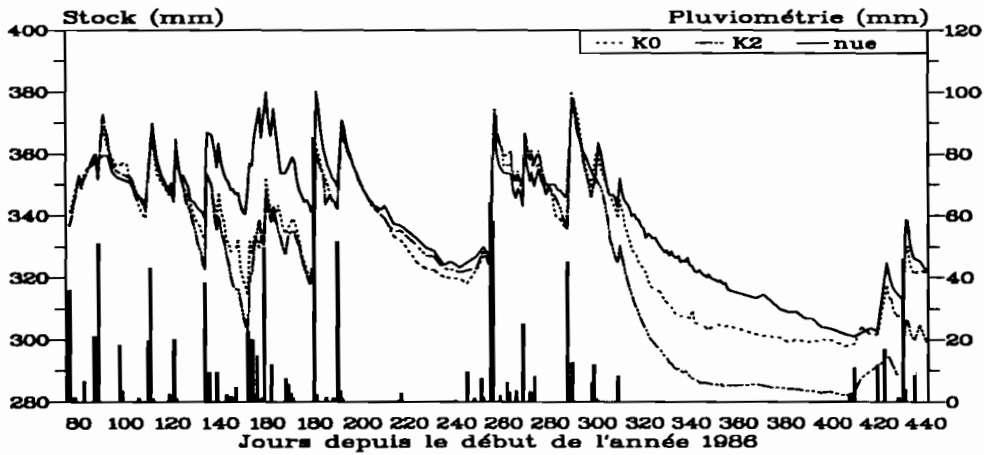


FIGURE VI.29
Evolution des stocks hydriques au cours du cycle annuel 1986-1987 (tranche 0-150 cm, toutes parcelles)

Pendant les deux mois de saison sèche après la récolte du maïs, les humidités des parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 changent peu (figure VI.31). En revanche, le sol nu continue à s'assécher : en fin de saison sèche, son profil d'humidité est très proche de celui de la parcelle N2 P1 K0, sauf en surface où il est plus sec. La différence en surface est probablement à imputer aux résidus de culture laissés sur les parcelles cultivées, alors que la parcelle nue est soumise à l'insolation directe.

Les profils d'humidité volumique à la fin de la grande saison sèche permettent de juger de l'état d'assèchement par rapport au pF 4,2 (figure VI.32). Comme l'humidité à pF 4,2 est une valeur moyenne

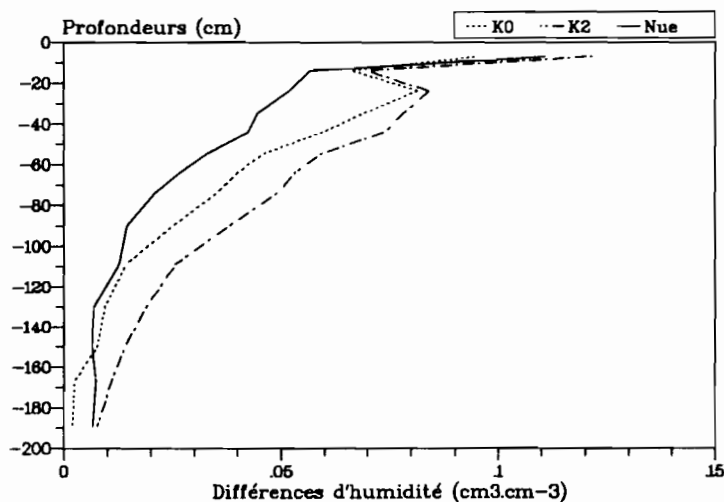


FIGURE VI.30
Différence entre l'humidité maximale de la deuxième saison de culture 1986 et l'humidité à la récolte (toutes parcelles)

entre 14 prélèvements différents, il n'est pas possible d'effectuer une comparaison fine avec les humidités de chaque parcelle. Cependant, le sol est parvenu en fin de saison sèche à un pF de l'ordre de 4,2 sur les cinquante premiers centimètres, mais en-dessous il reste de l'eau qui aurait pu être utilisée par les plantes. Une savane naturelle exploite certainement beaucoup mieux les réserves profondes grâce à son système racinaire plus développé.

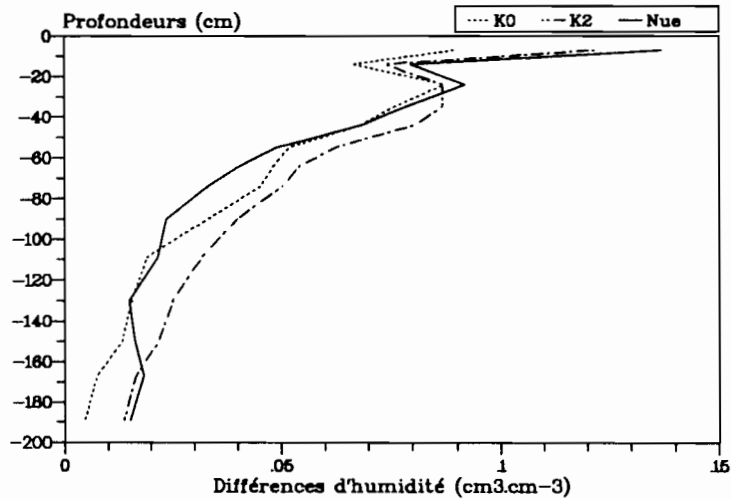


FIGURE VI.31
Différence entre l'humidité maximale de la deuxième saison de culture 1986 et l'humidité à la fin de la grande saison sèche (toutes parcelles)

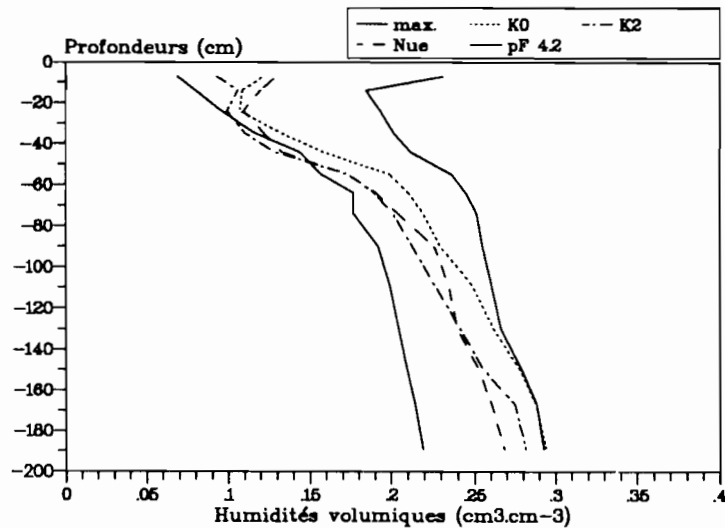


FIGURE VI.32
Humidités volumiques à la fin de la grande saison sèche 1986-1987 (toutes parcelles)

La différence entre le stock au maximum d'humidité (294^{ème} jour) et le stock à la récolte (341^{ème} jour) fournit une valeur approchée de la réserve utile pour cette saison de culture. La valeur n'est pas la même sur les deux parcelles : 80 mm pour la parcelle N2 P1 K0 et 95 mm pour la parcelle N2 P1 K2. Cette différence reflète le comportement différent des deux parcelles en ce qui concerne la profondeur atteinte par les racines et l'exploitation des réserves hydriques à une profondeur donnée. Ces valeurs correspondent bien aux calculs de réserve utile effectués à partir du stock présent dans le sol 24 heures après une irrigation et du stock à pF 4,2 (première partie) : avec ce mode de calcul, la réserve utile sur 150 cm (profondeur atteinte par les racines sur la parcelle N2 P1 K2) est de 116 mm et la réserve utile sur 100 cm est de 77 mm. Cependant, cette valeur de réserve utile correspond à un dessèchement total de la plante : la plante souffre de stress hydrique bien avant d'avoir exploité ces réserves. Il a été vu, lors de l'étude de la première saison 1986, que les tensions étaient élevées dans toute la zone d'extraction racinaire (figure VI.13) le 53^{ème} jour du cycle (154^{ème} jour de l'année, floraison), ce qui correspond à un épuisement presque total des réserves dans cette zone (figure VI.14), mais autorise le maintien d'une ETR proche de l'EVA (figure VI.15). Le stock à cette date permet donc d'évaluer une réserve facilement utilisable : 70 mm en N2 P1 K0 et 80 mm en N2 P1 K2. Ces valeurs seront utilisées pour simuler le bilan hydrique de la culture.

3.3.3. CONCLUSION DE L'ÉTUDE DES DEUXIÈMES SAISONS DE CULTURE

Lors de la deuxième saison de culture, le développement végétatif du maïs est moindre qu'en première saison. La différence est particulièrement marquée pour la parcelle N2 P1 K0. Dans les cas les plus favorables (parcelle N2 P1 K2 en 1985), l'ETR reste proche de sa valeur en première saison, mais le plus souvent elle est fortement diminuée, en particulier au moment sensible de la floraison. Alors que les ETR des deux parcelles étaient toujours voisines en première saison, elles diffèrent nettement en deuxième saison au moment de la floraison. Comme la seule différence entre les deux saisons de culture est l'absence de labour lors de la deuxième saison, que le développement végétatif est plus faible en deuxième saison dès les premiers stades après le semis et que les profils de tension indiquent un prélèvement racinaire beaucoup plus réduit en deuxième saison qu'en première, *il est probable que les différences observées entre les deux saisons de culture proviennent d'un problème d'enracinement lié à cette absence de labour. Sur la parcelle N2 P1 K0, il semble que le stress résultant du cumul de la carence potassique et de la compacité du sol dépasse un seuil au-delà duquel le développement racinaire est très limité.*

Dans les deux cas étudiés, représentatifs des conditions climatiques habituelles, les pluies se sont arrêtées vers le 60^{ème} jour du cycle. Les réserves hydriques du sol sont rapidement insuffisantes pour permettre une alimentation hydrique satisfaisante de la plante. L'ETR diminue alors rapidement et la plante se dessèche. Il en résulte une chute importante des rendements, même pour la parcelle N2 P1 K2 en 1985 (18,0 q.ha⁻¹ contre 27,9 q.ha⁻¹ en moyenne en première saison), pour laquelle l'ETR a pourtant été comparable à celle de la première saison sèche jusqu'au 60^{ème} jour.

Les profils d'humidité et de tension en fin de cycle permettent de caractériser les différences de prélèvement racinaire au cours de la deuxième saison de culture : les profondeurs atteintes sont d'environ 1 mètre pour N2 P1 K0 contre 1,4 mètre pour N2 P1 K2, et l'exploitation des réserves hydriques du premier mètre est plus poussée dans le cas de N2 P1 K2 que dans celui de N2 P1 K0. Il en résulte des réserves utiles estimées à 80 mm en N2 P1 K0 et 100 mm en N2 P1 K2 et des réserves facilement utilisables estimées respectivement à 70 mm et 80 mm.

Au cours de la grande saison sèche qui suit la récolte du maïs, l'humidité des parcelles cultivées varie peu. La parcelle nue continue en revanche à se dessécher, en raison d'une part de la présence d'eau retenue à faible tension à proximité de la surface du sol et, d'autre part, probablement de l'absence de la protection constituée par les résidus de récolte sur les parcelles cultivées. A la fin de la grande saison sèche, l'humidité correspond à un pF de l'ordre de 4,2 sur les cinquante premiers centimètres du sol. Elle est plus élevée en profondeur, où de l'eau utilisable par les végétaux reste disponible.

3.4. Discussion

3.4.1. EFFICIENCE DE L'EAU

Le calcul de l'efficacité de l'eau à partir de l'ETR totale sur le cycle et du rendement fournit un indice pour l'ensemble de la culture. Dans les conditions optimales de croissance (N2 P1 K2 en première saison), un litre d'eau est évapotranspiré pour produire un gramme de grains (tableau VI.4). En l'absence de fertilisation, la quantité de grains formée est diminuée de 60 % pour la même évapotranspiration. *La fertilisation potassique permet donc une meilleure valorisation de l'eau.* Cette observation est en accord avec les données déjà publiées (VIETS, 1962 ; BLACK, 1965).

TABLEAU VI.4
Efficacité de l'eau selon la saison de culture et la fertilisation (moyenne 1985-1986)

		Première saison		Deuxième saison	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
ETR (mm)	Totalité du cycle	303	306	183	222
	ETR entre le 25ème et le 85ème jour	200	201	132	161
Production de matière sèche (kg.ha ⁻¹)	Rendement en grains	1250	3000	490	1610
	Prod. m.s. entre le 25ème et le 85ème jour	3600	5900	1100	3600
Efficacité de l'eau (g ms.l d'eau ⁻¹)	Rdt en grains/ETR cycle	0,4	1,0	0,3	0,7
	(m.s. formée/ETR) entre le 25ème et le 85ème jour	1,8	2,9	0,8	2,2

Le calcul de l'efficacité de l'eau sur l'ensemble du cycle intègre la période au cours de laquelle le sol est nu en début de cycle. La valeur obtenue ne traduit donc qu'imparfaitement la transpiration de la plante. Par ailleurs, le rendement en grains peut être affecté par des périodes de sécheresse de courte durée. La valeur

n'est donc pas représentative d'une efficacité moyenne sur le cycle. C'est pourquoi l'efficacité de l'eau a été calculée à partir de la quantité totale de matière sèche formée au cours de la phase de croissance maximale (25^{ème} au 85^{ème} jour). Pendant cette période, l'indice foliaire est maximal : il est possible de faire l'hypothèse que la plus grande partie de l'eau évapotranspirée provient de la transpiration de la plante. La quantité de matière sèche formée par litre d'eau évapotranspiré atteint 2,9 g ms.l⁻¹ dans la parcelle N2 P1 K2 en première saison. Cette valeur est proche de la valeur de 3,4 g ms.l⁻¹ indiquée par BEGG & TURNER (1976) pour les dicotylédones à cycle en C₄. L'absence de fertilisation potassique (N2 P1 K0 en première saison) comme une alimentation hydrique limitante (deuxième saison) diminuent l'efficacité de l'eau : plus les contraintes augmentent, plus la quantité d'eau évapotranspirée sans produire de matière sèche augmente.

3.4.2. RELATIONS ENTRE LA TRANSPIRATION ET LE FONCTIONNEMENT PHYSIOLOGIQUE DU MAÏS

Le développement des plants n'a pas été perturbé par des stress hydriques au cours de la **première saison des pluies**. Même en conditions de bonne alimentation hydrique, les données tensiométriques et de stock montrent qu'au cours de la montaison (25^{ème} au 45^{ème} jour), *la parcelle N2 P1 K2 présente un flux d'évapotranspiration légèrement plus élevé que la parcelle N2 P1 K0, avec un nombre de feuilles, donc une surface évaporante, très proches*. Par ailleurs, les travaux de PEASLEE & MOSS (1968) et de KOCH & ESTES (1975) ont montré que le nombre de stomates par unité de surface n'était pas modifié par l'alimentation potassique. La réduction de la transpiration sur la parcelle N2 P1 K0 peut donc provenir, soit d'une succion racinaire plus faible, soit d'une résistance stomatique plus forte. Si la diminution de la transpiration sur la parcelle N2 P1 K0 provenait d'une succion racinaire plus faible résultant d'une faible tension osmotique au niveau des racines, la plante devrait flétrir rapidement. Or, il n'a pas été constaté sur le terrain un flétrissement plus précoce des plantes carencées en potassium. Cette observation est en accord avec les mesures réalisées par PEASLEE & MOSS (1968) sur des fragments de feuilles. Par ailleurs, ces deux auteurs montrent des photographies de stomates prises dans des conditions "proches de l'optimum" prouvant qu'en présence de carence potassique les stomates ne sont que faiblement ouverts. A la suite de ces travaux, KOCH & ESTES (1975) ont mesuré la résistance stomatique des feuilles, qu'ils ont trouvée environ 30 % plus forte dans le cas des feuilles carencées. Ces résultats sont en accord avec ceux de MOTTRAM (1985) qui a montré, par des mesures de potentiel foliaire, que des plants de maïs bien alimentés en potassium réagissaient à un stress par une fermeture immédiate des stomates, alors que pour des plants carencés la fermeture est lente et inefficace. *Il semble donc que le mécanisme principal qui intervient pour réduire l'évaporation sur la parcelle N2 P1 K0 en première saison de culture soit une ouverture incomplète des stomates, s'expliquant par un déficit en potassium dans les cellules de garde*. Si, comme il a été avancé en introduction, les stomates sont mal fermés sur la parcelle N2 P1 K0 au cours de la nuit en raison d'une perte de turgescence des cellules voisines, cet effet semble négligeable devant l'effet sur l'ouverture en cours de journée.

La diminution de transpiration sur la parcelle N2 P1 K0 par rapport à la parcelle N2 P1 K2 reste faible en première saison de culture (10 à 30 mm sur un total de l'ordre de 300 mm). D'où proviennent les différences de rendement de 30 à 40 % trouvées entre les deux traitements ? Un élément d'interprétation est fourni par KOCH & ESTES (1975). Ces auteurs ont montré que *l'augmentation de la résistance stomatique provenant de la carence en potassium n'intervenait pas sur la fixation du CO₂ jusqu'à la floraison, mais qu'ensuite elle la diminuait de près de 70 %*. Cette observation pourrait expliquer que dans la parcelle N2 P1 K0 le poids de matière sèche formé avant la floraison en première saison soit inférieur de 31 % à celui mesuré en N2 P1 K2, mais que le rendement soit inférieur de 58 %.

Pendant la **deuxième saison de culture**, le développement végétatif du maïs est plus faible qu'en première saison, particulièrement pour la parcelle N2 P1 K0 (indice foliaire de 0,16 en deuxième saison 1990). Cette différence a été interprétée, d'après les données tensiométriques, par un *développement plus réduit du système racinaire en deuxième saison*, particulièrement pour la parcelle N2 P1 K0 où la succion racinaire n'était pratiquement pas sensible. La cause en est très probablement la compacité du sol, non labouré en deuxième saison. Le fait que les racines se développent beaucoup moins bien sur la parcelle N2 P1 K0 pourrait provenir de la *diminution de la turgescence des cellules méristématiques*. En effet, le potassium intervient directement sur la croissance des cellules par simple effet osmotique (MARSCHNER, 1986). En sol labouré, la croissance racinaire serait assurée, mais en sol non labouré la pression de turgescence ne serait plus suffisante pour permettre à la racine de pénétrer le sol. Cette interprétation est en accord avec une expérimentation conduite sur Ray-grass (BLANCHET *et al.*, 1962) : en l'absence de tout stress, le développement des racines est peu différent, quelle que soit la fertilisation potassique ; lorsqu'un stress hydrique est appliqué, le développement du système racinaire est réduit par la carence potassique.

4. CONCLUSIONS

4.1. Conclusions sur la méthode utilisée

L'un des objectifs de l'étude était de caractériser le fonctionnement hydrique du sol en fonction de son utilisation. Cette caractérisation a principalement reposé sur *l'interprétation des données tensiométriques*, soit sous forme de charges hydrauliques, soit sous forme de tensions. La représentation sous forme de blocs-diagrammes s'est révélée bien adaptée à la représentation de l'évolution des tensions au cours du temps. Ces données ont permis de caractériser l'état de l'eau dans le système et la direction des flux. Elles ont également permis de préciser les profondeurs atteintes par les racines, ainsi que leur action sur le prélèvement de l'eau du sol. Il s'agit là d'une *approche qui semble mieux caractériser la succion du système racinaire des plantes que les études de répartition des racines dans le profil*.

En ce qui concerne l'étude de l'évaporation du sol nu et de l'évapotranspiration des cultures de maïs, le fait d'observer toujours la même évolution, en fonction de l'état d'humectation de la surface du sol pour le sol

nu, en fonction des phases physiologiques du maïs pour les parcelles cultivées, atteste la *fiabilité de la méthode*. Il a été souligné que les calculs de précision développés dans le chapitre V fournissent une évaluation pessimiste de la précision, probablement en raison de la maximisation des erreurs.

Pour interpréter le fonctionnement hydrique du couvert de maïs, les données tensiométriques et les résultats d'ETR se complètent. En effet, l'ETR est le résultat d'une demande de la plante en fonction des conditions climatiques et d'une disponibilité de l'eau du sol dans la zone prospectée par les racines. Cette complémentarité des données constitue une voie intéressante pour étudier les relations eau-sol-plante.

La précision des résultats sur l'ETR est moins bonne en présence de drainage qu'en son absence (chapitre V). La méthode sera donc d'autant plus précise qu'elle sera appliquée sous des climats secs ou lors de campagnes de mesure relativement peu pluvieuses. Si le front d'humectation ne dépasse pas une profondeur connue dans le sol, il sera toujours préférable d'effectuer les mesures neutroniques au moins jusqu'à cette profondeur.

4.2. Conclusions sur le fonctionnement hydrique en fonction de l'utilisation agricole

En sol nu, l'intensité de l'évaporation dépend de l'humidité de la surface du sol. De l'ordre de l'EVA le lendemain de la pluie, elle diminue ensuite rapidement et devient inférieure à 1 mm.j^{-1} après une semaine. L'évaporation se poursuit cependant jusqu'à la fin de la saison sèche, soit pendant plus de 4 mois. Le plan de flux nul atteint alors 1,1 mètre de profondeur. Les phases de drainage présentent généralement une structure caractéristique. Le flux de drainage est élevé le jour même de la pluie : la lame d'eau drainée, liée à l'intensité de l'averse, peut atteindre plusieurs dizaines de millimètres. Ce phénomène semble correspondre à des circulations rapides dans des chemins préférentiels. Le drainage peut d'ailleurs apparaître dans un sol qui n'est que partiellement réhumecté. Ces mécanismes doivent correspondre à une organisation porale qui n'a pas été mise en évidence lors de ce travail. Dans les jours qui suivent les averses, le flux de drainage devient rapidement faible (moins de 1 mm.j^{-1} après une semaine). Les circulations s'effectuent alors sous l'effet de gradients de charge qui peuvent être mesurés à l'aide des tensiomètres. Les transferts peuvent alors être modélisés par la loi de Darcy.

Les variations d'humidité dans le sol nu au cours d'un cycle annuel sont surtout importantes en surface (environ $0,14 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Elles ne sont que de $0,05 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ à 50 cm de profondeur et deviennent non mesurables en-dessous de 1 mètre. En fin de grande saison sèche, la profondeur à laquelle le sol est à un pF au moins égal à pF 4,2 est 60 cm, mais il n'a pas été possible de préciser le pF atteint en surface.

La mise en culture du sol nu n'introduit de différence dans le fonctionnement du sol qu'à partir du 25^{ème} jour après semis. La transpiration de la plante produit alors un prélèvement d'eau dans le sol qui reste principalement localisé dans les 60 premiers centimètres de sol jusqu'au 60^{ème} jour (floraison femelle 50 %). Du 60^{ème} au 85^{ème} jour, lorsque la pluviométrie est déficitaire, le prélèvement racinaire est sensible jusqu'à 1,0 mètre en N2 P1 K0 et 1,4 mètre en N2 P1 K2. Après le 85^{ème} jour, la transpiration du

maïs devient faible devant l'évaporation du sol et le fonctionnement hydrique du sol cultivé redevient proche de celui du sol nu. L'assèchement de profondeur qui résulte de l'effet du prélèvement racinaire reste toutefois sensible pendant toute la saison sèche suivant la récolte du maïs. En fin de saison sèche, l'humidité du sol nu est égale à celle de la parcelle N2 P1 K0, mais reste supérieure à celle de la parcelle N2 P1 K2 : *une parcelle bien fertilisée utilise donc mieux les réserves hydriques du sol.*

4.3. Conclusions sur les besoins en eau du maïs

Du semis jusqu'au début de la montaison (0-25ème jour), la part de la transpiration du maïs est négligeable dans le bilan hydrique, car le développement des plants est faible. Des périodes sans pluie d'une quinzaine de jours peuvent se produire sans compromettre le développement végétatif ultérieur de la plante. Les blocs-diagrammes ont montré qu'en début de cycle la tension de l'eau restait toujours faible, sauf en surface : les jeunes plantules utilisent l'eau de la "pluie de semis" au moment de la germination, puis l'eau de l'horizon de surface (0-20 cm) lors des premiers stades de développement. Dans cette région climatique, lorsque le maïs est semé après labour et une "pluie de semis" de l'ordre de 15 mm, les plants se dessèchent rarement pendant les trois premières semaines après le semis.

Lors de la montaison et de la floraison (25-60ème jour), les besoins en eau augmentent fortement (tableau VI.1). C'est la période critique au cours de laquelle le développement végétatif est le plus rapide : en conditions d'alimentation minérale non limitantes, les plants croissent de 1,1 mètre en 14 jours (environ 8 cm.j^{-1} , chapitre IV) et l'efficacité de l'eau est maximale. Une carence potassique diminue l'évapotranspiration au cours de cette période. Au cours de la première saison des pluies, la diminution, probablement liée à une ouverture incomplète des stomates, est faible. En deuxième saison, en revanche, la diminution est marquée : elle proviendrait d'une réduction du développement du système racinaire du maïs. Il est probable que la turgescence des apex racinaires est insuffisante, en présence de carence potassique, pour permettre aux racines d'exploiter des horizons superficiels compactés par une saison de culture. Il en résulte une diminution marquée de l'efficacité de l'eau.

Après la floraison femelle (fin de la floraison femelle le 60ème jour), les consommations en eau diminuent en quelques jours d'une valeur de l'ordre de l'EVA à environ 60 % de l'EVA. Cette diminution est étroitement liée à la sénescence du feuillage : l'indice foliaire est passé, lors de la première saison de culture 1987, de 222 % le 58ème jour à 162 % le 86ème. Après le 85ème jour, la transpiration redevient faible devant l'évaporation du sol.

Avec une évaporation moyenne du bac de classe A de 4 mm.j^{-1} pendant les saisons de culture, les besoins peuvent être évalués à 200 mm au cours des deux mois compris entre le 25ème jour après le semis et le 85ème jour. Mais ce total constitue un minimum, car il suppose une répartition des pluies égale à la demande au cours de chaque période physiologique.

4.4 Conséquences agronomiques

L'étude de la dynamique de l'eau réalisée à Davié a montré que des phases de stress hydrique se produisaient fréquemment au cours de la première et, surtout, de la deuxième saison de culture. Un labour favorise la pénétration des racines en profondeur et augmente donc la réserve utile racinaire. *Augmenter la réserve utile racinaire est un facteur important de la résistance aux stress hydriques*, car la réserve utile par tranche de sol est faible dans les terres de Barre (77 mm d'eau par mètre de sol). Il s'agit là d'un effet qui est d'autant plus important que les sols sont cultivés depuis longtemps, car la structure des horizons superficiels devient progressivement massive lorsque les sols sont mis en culture après une jachère. L'effet du travail du sol s'estompe rapidement dans les terres de Barre, car la stabilité structurale du sol est faible après quelques années de culture : un labour à intervalles de temps réguliers est indispensable.

Au Togo, l'effet du travail du sol a été étudié dans le cadre d'un "essai d'amélioration de la fertilité des sols" conduit simultanément sur des sols dégradés et des sols non dégradés. Pour une rotation maïs-légumineuse avec fertilisation minérale, l'absence de labour produit une diminution de 50 % des rendements en sol non dégradé et de 70 % en sol dégradé, après 5 ans de culture continue (MARQUETTE *et al.*, 1982). Une importante action de "régénération des terres de Barre" a été conduite dans le sud-est du Togo entre 1974 et 1982 avec l'appui de la Banque Mondiale. Parmi d'autres techniques, l'effet d'un seul labour au tracteur a été testé. Selon les responsables du projet, ce labour a eu une action spectaculaire sur les rendements la première année, mais les rendements ont fortement diminué les années suivantes. Sur la station d'Hinvi au Bénin, l'effet du travail à la charrue a été estimé "particulièrement significatif" par rapport à un labour à la houe (RAUNET, 1973).

Une augmentation de la production agricole sur les sols dégradés nécessite donc un travail du sol. Comment les agriculteurs peuvent-ils le réaliser ? Dans les conditions socio-économiques de la région, l'emploi du tracteur n'est pas rentable pour les agriculteurs et la culture attelée ne se développe que très lentement en raison du climat et du contexte social peu propice ; le travail s'effectue donc manuellement. Le labour manuel d'un hectare nécessite environ 45 jours de travail pour une personne. Il peut donc être réalisé au début du premier cycle de culture, mais pas au début du deuxième cycle, car le temps est insuffisant entre la récolte du maïs et la mise en place de la culture qui suit. Par ailleurs, la récolte de l'arachide et du manioc peut être assimilée à un labour incomplet. C'est pourquoi MARQUETTE *et al.* (1982) ont proposé de vulgariser un labour à la houe tous les deux ou trois ans en début de premier cycle.

L'analyse du fonctionnement du sol a permis de caractériser son comportement en fonction du type de mise en valeur et de proposer des interprétations aux différences observées. Nous allons maintenant étudier comment ces différences se traduisent au niveau du bilan en essayant de définir des relations entre les bilans hydriques et les rendements du maïs.

CHAPITRE VII

LE BILAN HYDRIQUE : ÉVALUATION ET MODÉLISATION

Les mesures de stock d'eau du sol et l'évaluation des pertes par lixiviation réalisées au cours de la période d'étude permettent de dresser le bilan hydrique des différentes parcelles étudiées (premier paragraphe du chapitre). La généralisation dans le temps et l'espace est ensuite effectuée à l'aide d'un modèle de simulation du bilan hydrique (deuxième paragraphe) : après l'avoir validé à partir des résultats de terrain obtenus, il est utilisé pour déterminer les dates de semis, pour réaliser un zonage agro-pédo-climatique et pour évaluer le drainage profond sur une période de 51 ans.

1. ÉVALUATION DU BILAN AU COURS DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE

1.1. Introduction

Pour effectuer un bilan annuel, il faut définir une date à laquelle les conditions hydriques sont identiques tous les ans. A la fin de la grande saison sèche, le stock d'eau dans le sol passe par un minimum peu variable quelle que soit l'année. Les bilans ont donc été établis entre la première pluie de la première saison des pluies de l'année n et la fin de la grande saison sèche de l'année $n + 1$. Le même découpage annuel avait déjà été utilisé par HUMBEL au Cameroun (introduction de la deuxième partie). La date n'est pas fixe d'une année à l'autre, bien qu'elle se situe toujours dans la deuxième quinzaine de février. Cette variation de date est de peu d'importance pour l'établissement du bilan, car en fin de grande saison sèche il n'y a pas de drainage et l'ETR est très réduite : les variations de stock sont donc faibles.

L'année a été découpée en fonction des saisons des pluies et des saisons de culture. **Le début de la première saison des pluies** est la période comprise entre la première pluie et la date de semis du maïs (deuxième quinzaine de février - première quinzaine d'avril). **La première saison de culture** s'étend du semis du maïs au jour de la récolte, indépendamment de la longueur théorique du cycle (première quinzaine d'avril -

première quinzaine d'août). La **petite saison sèche** a été prise entre le jour de la récolte du maïs de première saison et le semis du maïs de deuxième saison (première quinzaine d'août - première quinzaine de septembre). Ce découpage est discutable, car la petite saison sèche débute souvent avant la récolte du maïs. Cependant, d'une part il est souvent difficile de définir une date de début de la saison sèche en raison de petites pluies en fin de la première saison des pluies, d'autre part l'étude était orientée vers l'étude des besoins en eau du maïs, donc un découpage fondé sur le cycle de la plante était souhaitable. La fin de la petite saison sèche ne pose en revanche pas de difficultés, car le maïs est généralement semé lors de la première pluie. La **deuxième saison de culture** couvre tout le cycle cultural du maïs de second cycle (première quinzaine de septembre - deuxième quinzaine de décembre). La **grande saison sèche** s'étend de la date de récolte du maïs à la première pluie importante de la première saison des pluies suivante. La grande saison sèche est tronquée par ce découpage, car les pluies pouvaient s'arrêter brutalement au 60ème jour du cycle du maïs (chapitre II).

1.2. Cycle annuel 1986-1987

Les différents termes du bilan pour chacune des périodes du cycle annuel 1986-1987 ont été reportés dans le tableau VII.1. Ce cycle est le seul pour lequel les mesures ont été réalisées sur les trois parcelles.

TABLEAU VII.1
Bilan annuel du cycle 1986 -1987 (toutes parcelles)

Période de l'année	Paramètres	Parcelle K0	Parcelle K2	Parcelle nue
Début première saison des pluies 1986 (14 fév. - 10 avr.) Pluviométrie 308 mm	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	152 ± 39 88 ± 35 +68 ± 4	171 ± 28 55 ± 22 +82 ± 6	- - -
Première saison de culture 1986 (11 avr. - 1 août) Pluviométrie 441 mm	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm) Rendement (q.ha ⁻¹)	269 ± 61 201 ± 57 -28 ± 4 13	273 ± 64 197 ± 58 -29 ± 6 30	219 ± 83 244 ± 77 -22 ± 6 -
Petite saison sèche 1986 (2 août - 10 sept.) Pluviométrie 22 mm	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	29 ± 6 3 ± 2 -11 ± 4	26 ± 8 5 ± 2 -9 ± 6	12 ± 12 12 ± 6 -12 ± 6
Deuxième saison de culture 1986 (11 sept. - 24 déc.) Pluviométrie 267 mm	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm) Rendement (q.ha ⁻¹)	142 ± 51 144 ± 47 -19 ± 4 2	189 ± 39 119 ± 33 -41 ± 6 14	122 ± 51 154 ± 45 -9 ± 6 -
Grande saison sèche 86-87 (25 déc. - 25 fév.) Pluviométrie 13 mm	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	22 ± 4 0 -9 ± 4	13 ± 6 0 0 ± 6	25 ± 6 0 -11 ± 6
Total cycle 1986-1987 (14 fév. 86 - 25 fév. 87) Pluviométrie tot. 1051 mm	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	614 ± 161 436 ± 141 +1 ± 4	672 ± 145 376 ± 115 +3 ± 6	(378 ± 152) (410 ± 128) (-54 ± 6)

La pluviométrie de l'année (1051 mm) est représentative de la moyenne (1042 mm sur la période 1934-1986). Pour chaque saison de culture, la hauteur précipitée est également proche de la moyenne

(SARAGONI *et al.*, 1990) : 441 mm en première saison de culture 1986 contre 493 mm en moyenne, 267 mm en deuxième saison des pluies contre 299 mm en moyenne. L'étude s'est donc déroulée au cours d'une année représentative en ce qui concerne les hauteurs précipitées. Par ailleurs, la répartition des pluies, bien que plus difficile à analyser, a été proche d'une situation moyenne.

De fortes pluies se sont produites au début de la première saison des pluies. Ces pluies ont rechargé le stock hydrique avant le début de la saison de culture et ont même été suffisantes pour produire du drainage. L'évapotranspiration totale du maïs sur le cycle est très proche sur les deux parcelles cultivées, confirmant l'absence de différence significative signalée lors de l'étude des flux. Au cours de la petite saison sèche, l'évaporation a été peu différente entre les parcelles, en moyenne inférieure à 1 mm.j^{-1} . Un faible drainage s'est produit, à la suite des fortes pluies de la fin du cycle précédent.

Pendant la deuxième saison de culture, les ETR sont différentes entre la parcelle N2 P1 K2 et la parcelle nue. Elles sont en revanche très proches sur la parcelle N2 P1 K0 et la parcelle nue. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus lors de l'étude des flux : il a été vu que, dans la parcelle N2 P1 K0, la succion exercée par les racines était à peine sensible, ce qui explique que les ETR soient proches de celles de la parcelle nue. Les rendements suivent l'évolution des ETR :

- sur la parcelle N2 P1 K2, avec 80 mm de moins sur le cycle, le rendement a été divisé par deux (14 contre 30 q.ha^{-1}) ;
- sur la parcelle N2 P1 K0, le rendement n'atteint que 2 q.ha^{-1} .

Aucune pluie n'étant survenue en fin de cycle, la variation de stock reflète l'effet du prélèvement racinaire : elle est maximale sur la parcelle N2 P1 K2 et minimale sur la parcelle nue. L'effet de la culture est moins net sur le drainage, en raison de l'imprécision sur ce paramètre. Pendant la grande saison sèche, l'ETR est très faible pour toutes les parcelles. Le stock hydrique diminue peu, car le sol est déjà asséché pendant les cinquante jours sans pluie de la fin du cycle du maïs.

Pour interpréter les chiffres de l'ensemble du cycle annuel 1986-1987, il faut tenir compte du fait que les mesures n'ont commencé sur la parcelle nue qu'au moment du semis du maïs de première saison. Comme l'évaporation du sol nu est très proche sur toutes les parcelles, l'évaporation de la parcelle nue au début de la première saison des pluies peut être estimée, par analogie avec les deux autres parcelles, à 160 mm et la variation de stock à +70 mm. Il en résulte que les variations de stock annuelles sont d'environ +16 mm sur la parcelle nue, +1 mm sur la parcelle N2 P1 K0 et +3 mm sur la parcelle N2 P1 K2. *Etablir un bilan à partir de la fin de la saison sèche permet donc bien de boucler un cycle annuel.*

En raison de l'imprécision sur le drainage, la différence d'ETR annuelles est significative entre parcelle nue et parcelles cultivées, mais ne l'est pas entre les deux parcelles cultivées. Pourtant l'analyse des flux a montré des variations de stock en cours de campagne plus importantes sur la parcelle N2 P1 K2 que sur la parcelle N2 P1 K0, donc des ETR plus fortes. L'erreur sur le drainage est donc probablement surévaluée. Le drainage est plus faible sur la parcelle N2 P1 K2 (376 mm) que sur la parcelle N2 P1 K0 (436 mm) : la

fertilisation permet donc de valoriser les pluies en limitant les pertes par drainage. Le plus fort drainage apparaît sur la parcelle nue (environ 500 mm), conséquence de la plus faible évaporation que sur les autres parcelles.

1.3. Cycle annuel 1985-1986

L'étude du cycle 1985-1986 (tableau VII.2) n'a été réalisée que sur les parcelles cultivées (les mesures sur la parcelle nue n'ont débuté qu'en 1986). Par ailleurs, le cycle est incomplet, car les mesures avaient été interrompues pendant la grande saison sèche 1984-1985 et le début de la première saison des pluies 1985. Compte-tenu d'un total pluviométrique de 157 mm entre le 13 février et le 5 avril, le total pluviométrique de ce cycle annuel (1045 mm) est proche de la moyenne (1042 mm), comme en 1986-1987. La répartition fut cependant différente : seulement 377 mm en première saison de culture (moyenne de 493 mm), mais des pluies assez abondantes en petite saison sèche (174 mm en un peu plus d'un mois). La deuxième saison a reçu 337 mm, valeur proche de la moyenne (299 mm), mais les pluies ont été surtout abondantes pendant les 35 premiers jours du cycle du maïs et elles se sont arrêtées avant le 60ème jour.

Comme en première saison 1986, les ETR des deux parcelles au cours de la première saison de culture 1985 ont été très proches, mais les rendements différents. En ce qui concerne la parcelle N2 P1 K2, une différence d'ETR de 66 mm entre la première saison 1985 et la première saison 1986 n'a eu aucune influence sur le rendement (30 q.ha⁻¹ dans les deux cas). L'augmentation de stock au cours de la campagne culturale résulte de fortes pluies en fin de cycle. Le drainage n'est que de 30 mm environ, contre près de 200 mm en première saison 1986. Pendant la petite saison sèche, l'évaporation reste assez forte en 1985 en raison de l'abondance des pluies et le drainage ne tarit pas.

TABLEAU VII.2
Bilan annuel du cycle 1985 - 1986 (parcelles cultivées)

Période de l'année	Paramètres	Parcelle K0	Parcelle K2
Première saison de culture 1985 (5 avr. - 2 août) <i>Pluviométrie 377 mm</i>	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm) Rendement (q.ha ⁻¹)	337 ± 20 31 ± 16 +40 ± 4 12	339 ± 25 37 ± 19 +35 ± 6 30
Petite saison sèche 1985 (3 août - 9 sept.) <i>Pluviométrie 174 mm</i>	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	122 ± 15 29 ± 11 +23 ± 4	138 ± 12 13 ± 6 +24 ± 6
Deuxième saison de culture 1985 (10 sept. - 24 déc.) <i>Pluviométrie 337 mm</i>	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm) Rendement (q.ha ⁻¹)	225 ± 50 179 ± 46 -68 ± 4 8	255 ± 42 153 ± 36 -70 ± 6 18
Grande saison sèche 85-86 (25 déc. - 13 fév.) <i>Pluviométrie 0 mm</i>	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	9 ± 4 0 -9 ± 4	10 ± 6 0 -10 ± 6
Total cycle 1985-1986 (5 avr. 85 - 13 fév. 86) <i>Pluviométrie tot. 888 mm</i>	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	693 ± 77 239 ± 73 -14 ± 4	742 ± 67 203 ± 61 -21 ± 6

Au cours de la deuxième saison de culture, les différences d'ETR entre N2 P1 K0 et N2 P1 K2 sont moindres en 1985 qu'en 1986. L'ETR de la parcelle N2 P1 K2 est très proche de ce qu'elle est pendant la grande saison 1986, mais le rendement n'est que de 18 q.ha⁻¹ (contre 30 q.ha⁻¹). Comme en deuxième saison 1986, le stock hydrique est plus faible en fin de campagne. Aucune différence de variation de stock n'apparaît entre les parcelles au cours de cette saison, malgré une diminution de stock plus importante sur la parcelle N2 P1 K2 en fin de cycle (chapitre VI). L'origine en est un stock plus élevé sur la parcelle N2 P1 K0 en début de cycle. Pendant la grande saison sèche 85-86, enfin, l'évaporation fut en moyenne d'environ 0,2 mm.j⁻¹, plus faible encore que l'année précédente, car aucune pluie n'est tombée jusqu'au 14 février.

Au total, durant un cycle annuel, l'ETR fut supérieure de plus de 100 mm au cycle 1986-1987, en raison d'une répartition des pluies différentes qui a entraîné un drainage plus faible. La variation annuelle de stock n'est pas nulle, car le début de la première saison des pluies n'a pas été pris en compte.

1.4. Cycle annuel 1987-1988

L'étude du cycle annuel 1987-1988 n'a été tentée que sur la parcelle nue (tableau VII.3). En raison de pannes des humidimètres à neutrons, les mesures ont été stoppées pendant deux mois (fin de la petite saison sèche et début de la deuxième saison de culture). Il n'est donc pas possible d'établir un bilan.

TABLEAU VII.3
Bilan annuel du cycle 1987-1988 (parcelle nue)

Période de l'année	Paramètres	Parcelle nue
Début première saison des pluies 1987 (26 fév. - 18 mars) <i>Pluviométrie 89 mm</i>	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	53 ± 8 15 ± 2 +21 ± 6
Première saison de culture 1987 (19 mars - 11 août) <i>Pluviométrie 449 mm</i>	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	327 ± 26 93 ± 20 +29 ± 6
Petite saison sèche 1987 (12 août - 27 août) <i>Pluviométrie 138 mm</i>	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	- - -
Deuxième saison de culture 1987 (28 août - 14 déc.) <i>Pluviométrie 581 mm</i>	Evapotranspiration (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	- - -
Grande saison sèche 87-88 (15 déc. - 28 fév.) <i>Pluviométrie 89 mm</i>	Evaporation (mm) Drainage (mm) Variation de stock (mm)	76 ± 12 20 ± 6 -7 ± 6

Comme pour les deux autres cycles étudiés, le stock hydrique augmente dans le sol au début de la première saison des pluies, avant le semis du maïs effectué sur les parcelles voisines. Pendant la première saison de culture, le drainage a été beaucoup plus faible qu'en 1986 (93 mm contre 244 mm) pour un total pluviométrique voisin, en raison d'un étalement plus important des pluies. Pendant la grande saison sèche,

l'ETR est moins réduite que pour les deux autres cycles étudiés (environ 1 mm.j^{-1}), en raison d'une forte pluie en janvier ("pluie des mangues"). Les chiffres disponibles pour ce cycle confirment donc les mécanismes et les ordres de grandeur observés sur les deux autres cycles annuels.

1.5. Conclusion

La quantité d'eau qui draine en profondeur représente entre 25 % (parcelle N2 P1 K0 en 1985) et 50 % (parcelle nue en 1986) de la pluviométrie annuelle en année moyenne (1986-1987). Ces valeurs ne sont cependant que des exemples correspondant à quelques années de mesure, car pour obtenir une évaluation du drainage sur une plus longue durée il est nécessaire de recourir à la simulation du bilan hydrique. Les valeurs de drainage ne sont évaluées qu'avec une forte imprécision : l'erreur sur le drainage représente la plus grande part de l'imprécision totale.

La comparaison de la parcelle nue et des parcelles cultivées révèle des différences de bilan importantes. Avec la transpiration supplémentaire induite par la culture, *les parcelles cultivées ont évaporé environ 200 mm de plus que la parcelle nue sur un cycle annuel. En conséquence le drainage a été plus faible. La culture permet donc de limiter les pertes par drainage.* Les différences de comportement entre les deux parcelles fertilisées se traduisent par une ETR en N2 P1 K2 supérieure de 49 mm en 1985-1986 et de 76 mm en 1986-1987 à celle de N2 P1 K0. La fertilisation potassique améliore donc l'utilisation des ressources hydriques. Comme la quantité de matière sèche produite par litre d'eau évaporée est bien supérieure en N2 P1 K2 (chapitre VI), *la fertilisation potassique permet de valoriser les ressources hydriques limitées de la région.*

Dans le cas de la parcelle N2 P1 K2, les différences de rendement entre les saisons et les années sont principalement dues à des différences d'alimentation hydrique. *Si des ETR faibles entraînent toujours des rendements réduits, des ETR supérieures à 250 mm n'assurent pas avec certitude des rendements élevés : pour une même ETR, les rendements peuvent être différents selon la répartition des pluies.* Cependant, cette étude montre bien qu'un travail de terrain de deux années ne permet pas d'aborder le problème de l'effet de la répartition des pluies sur le rendement.

Le drainage est très différent d'une année à l'autre : il n'est pas possible de définir, à partir des mesures réalisées, les valeurs moyennes de drainage nécessaires pour évaluer la lixiviation sur une longue période. Par ailleurs, dans le cas de la parcelle N2 P1 K2, l'étude a montré que les rendements sont liés aux termes du bilan hydrique, mais il n'a pas été possible de préciser l'influence des stress hydriques, au cours d'une période donnée, sur le rendement final. Ces limitations proviennent en grande partie de la durée du travail de terrain. Pour contourner cette difficulté, le bilan hydrique du système sol-plante a été simulé à l'aide d'un modèle, afin d'extrapoler les résultats obtenus sur une période plus longue et de tenter une généralisation au niveau régional.

2. MODÉLISATION DU BILAN

2.1. Modèle utilisé

2.1.1. INTRODUCTION

La modélisation du bilan hydrique des terres de Barre a fait l'objet de deux publications (FRETEAUD *et al.*, 1987 et POSS *et al.*, 1988). Le développement qui suit reprend la plupart des résultats exposés dans ces publications, en développant seulement certains points.

Le maïs est sensible à un manque d'eau au moment de la floraison et la quantité de matière sèche produite, même parfois le rendement en grains, sont fortement corrélés à l'évapotranspiration du couvert végétal (DENMEAD & SHOW, 1960 ; THEVENET & COUVREUR, 1978 ; ROBELIN, 1984 ; DECKERS *et al.*, 1985). C'est pourquoi une relation de type statistique a été recherchée entre les rendements mesurés pendant toute la durée de l'essai (1976-1986) en conditions de bonne alimentation minérale et certains paramètres hydriques obtenus en simulant le bilan hydrique à partir des données pluviométriques.

De nombreux modèles mécanistes ont été élaborés depuis longtemps (RITCHIE, 1972 ; KEULEN, 1975 ; BELMANS *et al.*, 1983 ; SIMOTA *et al.*, 1986). Leur concordance avec les données de terrain est souvent satisfaisante, mais leur utilisation nécessite l'évaluation de nombreux paramètres souvent difficiles à apprécier (coefficients de conductivité hydraulique du sol, densités racinaires...), rendant leur emploi délicat pour les études régionales et pour la simulation sur de longues séries climatiques.

Le modèle utilisé pour ce travail est un modèle empirique développé depuis 1977 par l'IRAT à partir de la publication initiale de FRANQUIN et FOREST (1977). Ce type de modèle tend à se répandre rapidement (REDDY, 1983 ; HENRICKSEN & DURKIN, 1985 ; PELLERIN, 1986 ; CHOPART & VAUCLIN, 1990), en raison du bon accord entre les résultats de la simulation et les mesures *in situ*. Ce développement a par ailleurs bénéficié de la généralisation de la micro-informatique qui a permis à de nombreux chercheurs d'explorer cette voie. Grâce à la prise en compte de paramètres facilement déterminables, le modèle développé par l'IRAT fournit une estimation des différents termes du bilan hydrique à une échelle régionale. Il a déjà permis de proposer des indices standards de classification des situations pédo-climatiques (FOREST & KALMS, 1984 ; FOREST & REYNIERS, 1986).

Avant d'utiliser le modèle dans les conditions pédo-climatiques du sud-Togo, les résultats obtenus à l'aide du modèle ont été comparés à ceux des mesures réalisées *in situ*, ce qui a conduit à proposer et à tester certaines modifications.

2.1.2. LE MODELE ORIGINEL (BIP 4)

2.1.2.1. Présentation générale

Le modèle BIP 4 (FOREST, 1984) est fondé sur l'équation de conservation de la masse à une échelle de temps pentadaire ou décadaire :

$P = \text{Variation de stock} + D + \text{ETR}$

P : pluviométrie
 D : drainage
 ETR : évapotranspiration

2.1.2.2. Principe de fonctionnement du sol en tant que réservoir

Le sol est assimilé à un réservoir d'eau dans lequel les plantes puisent d'autant plus facilement que la disponibilité de l'eau est élevée. Les flux entrant et sortant sont la pluie d'une part, l'évapotranspiration et le drainage d'autre part.

Pour une profondeur donnée, le volume du réservoir est assimilé à la réserve utile dans la tranche de sol comprise entre la surface du sol et la profondeur considérée. Au début de la simulation, le réservoir est vide, ce qui correspond aux conditions de la première saison de culture (fin d'une longue saison sèche), mais peut ne pas être adapté à la deuxième saison, où un stock hydrique hérité de la saison de culture précédente s'est parfois maintenu. Sous l'effet des pluies, ce réservoir se remplit progressivement par "effet piston", ce qui se traduit par un front d'humectation à la base. Le principe de calcul de la profondeur du front d'humectation est le suivant : si la somme des apports pluviométriques et du stock d'eau préexistant dépasse la capacité de stockage de la tranche de sol comprise entre la surface et le front d'humectation, celui-ci progresse. A ce moment, le réservoir est saturé de la surface jusqu'au front d'humectation. Lorsque le front d'humectation parvient à la base du profil (définie par la réserve utile totale du sol RU), le drainage commence : c'est la différence entre l'offre totale en eau (pluie plus stock préexistant) et la réserve utile du sol.

Cette modélisation ne constitue qu'une approche grossière du fonctionnement du sol, car elle ne prend pas en compte de nombreux mécanismes abordés lors de l'étude des flux et des bilans (circulations dans les voies préférentielles, humectation irrégulière des profils, circulations en conditions non saturantes sous l'effet des gradients de charges, etc.). Sa rusticité permet en revanche une utilisation aisée dans d'autres situations. Il est donc important d'étudier sa validation.

2.1.2.3. Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est liée à la demande climatique, aux caractéristiques de la culture et à la quantité d'eau disponible dans le sol.

La demande climatique peut être estimée, dans le cas étudié, par l'évaporation du bac de classe A (chapitre II). L'évapotranspiration du couvert végétal peut alors être calculée à l'aide des coefficients culturaux :

$$ETM = K'c \times EVA$$

ETM : évapotranspiration maximale de la culture ;
 K'c : coefficient cultural de la culture à un stade donné ;
 EVA : évaporation du bac de classe A.

EAGLEMAN (1971) a proposé, à partir de différentes expérimentations sur les besoins en eau, une relation empirique entre l'évapotranspiration réelle, les besoins en eau d'une culture (ETM) et l'humidité relative du sol :

$$\text{ETR/ETM} = a + b \text{HR} + c \text{HR}^2 + d \text{HR}^3$$

HR : stock d'eau disponible divisé par la réserve utile de la tranche de sol comprise entre la surface du sol et le front d'humectation ;
a, b, c et d : paramètres d'ajustement.

Cette équation, qui traduit la difficulté croissante pour la culture à satisfaire ses besoins en eau à mesure que le sol s'assèche, est la base de la simulation.

2.1.2.4. Sorties du modèle

Les résultats peuvent être édités à trois échelles de temps différentes :

- à l'échelle pentadaire (ou décadaire) ;
- à l'échelle du cycle cultural ;
- à l'échelle pluriannuelle.

Le calcul des termes du bilan hydrique a été réalisé au pas de temps pentadaire. Les principaux paramètres calculés sont le drainage, l'évapotranspiration réelle, le taux de satisfaction des besoins en eau de la plante (ETR/ETM) et la profondeur atteinte par le front d'humectation. Les taux de satisfaction en eau (ETR/ETM) peuvent être calculés pour chacune des phases physiologiques de la culture par cumul des valeurs pentadaires sur la période. Un tableau récapitulatif fournit le taux de satisfaction des besoins en eau pour les différentes phases végétatives et pour l'ensemble du cycle. Dans le cas de simulations portant sur des années successives, un fichier de sortie récapitule les termes du bilan hydrique, année par année, pour chaque phase du cycle de culture et présente les moyennes interannuelles.

2.1.3. LES AMÉLIORATIONS APPORTÉES

2.1.3.1. Présentation générale

Le modèle d'origine présentait deux limitations :

- la formulation d'EAGLEMAN ne prend pas en compte l'évaporation du sol nu en début de cycle ;
- au cours du cycle, la réserve en eau utile pour la culture est liée à la profondeur du front d'humectation. Or, le front d'avancée racinaire est généralement situé au-dessus de cette limite, ce qui, en l'absence de remontées capillaires, entraîne une surestimation de la réserve utile racinaire (RUR).

Pour une meilleure adaptation du modèle, ces deux phénomènes ont été pris en compte.

2.1.3.2. Prise en compte de l'évaporation du sol nu

Lors de l'étude des flux sur la parcelle nue (chapitre VI), il a été montré que le flux d'évaporation dépend du nombre de jours depuis la dernière pluie. Le jour même de la pluie, l'évaporation est en moyenne de 2,5 mm. Elle passe par un maximum le lendemain (4,5 mm), sa valeur atteignant alors celle de l'EVA moyenne. Elle décroît ensuite rapidement, selon une loi approximativement exponentielle, pour devenir inférieure à 1 mm.j⁻¹ une semaine après la pluie.

Pour la modélisation, effectuée avant le dépouillement des mesures réalisées sur la parcelle nue, des hypothèses simplificatrices ont été retenues.

- Le jour de la pluie et le lendemain, l'évaporation est prise égale à celle du bac de classe A si le total pluviométrique le permet. Cette relation conduit à une surestimation de 2 mm le jour de la pluie, ce qui est négligeable par rapport aux erreurs sur l'évaluation de la hauteur précipitée dans une zone donnée (des différences de plus de 10 mm ont été constatées, pour une pluie donnée, dans des pluviomètres distants de 200 mètres). Cette approximation est par ailleurs en accord avec les résultats obtenus par différents auteurs (HIDE, 1954 ; LEMON, 1956).

- Les jours suivants et jusqu'à épuisement de la réserve, l'évaporation est considérée égale à $1,5 \text{ mm.j}^{-1}$. Il a été choisi d'introduire cette valeur moyenne dans le modèle, car le dépouillement des données de terrain concernant l'évaporation du sol nu n'était pas achevée lors de la modification du modèle. Avec cette simplification, l'évaporation journalière au cours de la première semaine après les pluies est estimée avec moins de 1 mm.j^{-1} d'erreur, mais le flux d'évaporation est surestimé ensuite, ce qui conduit à un épuisement plus rapide des réserves hydriques du sol que ce qui a été réellement mesuré.

Le passage d'un régime d'évaporation du sol nu à un régime d'évapotranspiration d'un couvert de maïs a été modélisé en s'appuyant sur les mesures d'indice foliaire (chapitre IV). Lorsque l'indice foliaire dépasse 1, il a été admis que l'évapotranspiration ne provenait que du couvert. Auparavant, les parts respectives de l'évaporation du couvert et du sol évoluent parallèlement à l'indice foliaire (figure VII.1) :

- du semis au 20ème jour, $\text{ETR} = \text{ESN}$ (évaporation du sol nu) ;
- du 21ème au 35ème jour, $\text{ETR} = 0,50 \text{ ESN} + 0,50 \text{ ETR}$ (évalué par l'équation d'EAGLEMAN) ;
- du 36ème au 40ème jour, $\text{ETR} = 0,25 \text{ ESN} + 0,75 \text{ ETR}$ EAGLEMAN ;
- après le 41ème jour, $\text{ETR} = \text{ETR}$ EAGLEMAN.

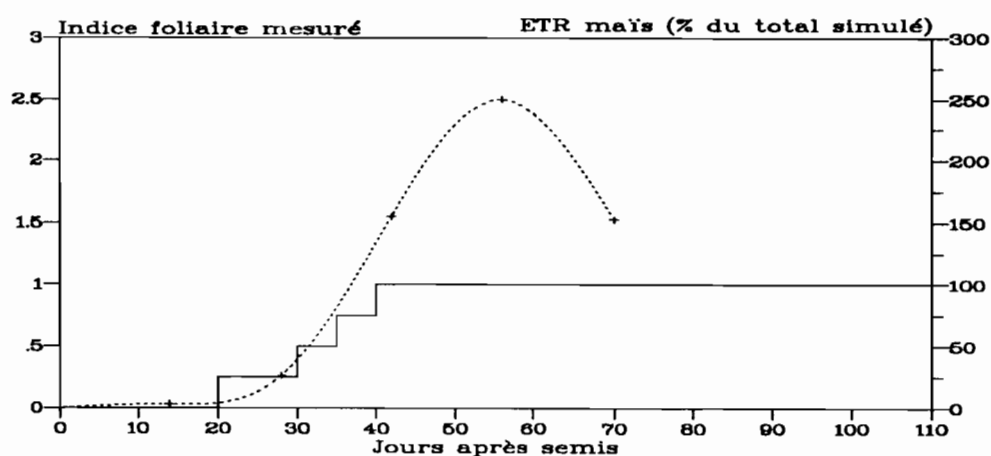


FIGURE VII.1
Evolution de l'indice foliaire au cours du cycle cultural du maïs NH1 et modélisation de l'évapotranspiration (parcelle N2 P1 K2, deuxième saison 1987)

2.1.3.3. Introduction d'une réserve utile racinaire

Pour la simulation, il a été estimé que la tranche de sol utilisable par les racines du maïs était celle dans laquelle se trouve plus de 90 % du total des racines, en fonction de l'estimation sur le terrain. La croissance des racines est liée aux phases physiologiques (chapitre IV) :

- levée du semis au 30ème jour ;
- montaison et floraison du 30ème au 70ème jour ;
- maturation du 70ème au 110ème jour.

La réserve utile a été évaluée à la fin de chacune des périodes par différence entre le stock hydrique à la capacité de rétention (estimé par l'humidité 24 heures après un apport d'eau) et le stock hydrique à pF 4,2 (moyenne de 13 échantillons prélevés indépendamment). Sur chacune des périodes, des relations linéaires ont été introduites dans le modèle afin d'estimer le stock d'eau disponible pour les racines (figure VII.2). C'est cette valeur de réserve utile racinaire (RUR) qui est prise en compte pour le calcul du terme HR de l'équation d'EAGLEMAN utilisée par le modèle :

$$HR = \text{Stock d'eau disponible} / RUR$$

Dans le modèle BIP 4, la réserve utile est considérée comme constante (égale à 77 mm pour les terres de Barre). Dans le modèle BIP Togo, en revanche, la réserve utile varie de 0 mm au semis à 77 mm à la récolte en fonction du développement des racines observé sur le terrain.

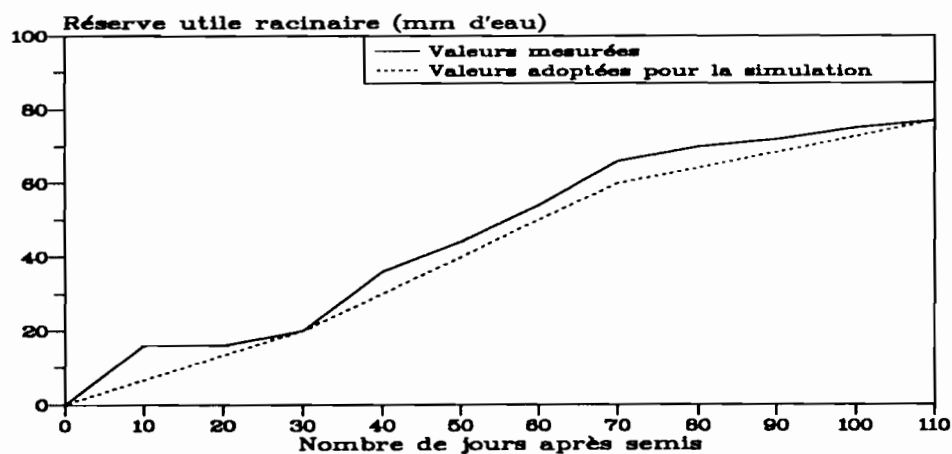


FIGURE VII.2
Evolution de la réserve utile racinaire dans les terres de Barre sous culture de maïs (variété NH1)

2.1.4. LA VALIDATION DU MODELE POUR LA PARCELLE N2 P1 K2

2.1.4.1. Données agroclimatiques utilisées

La validation du modèle a été réalisée à partir de trois saisons de culture pour lesquelles des résultats de mesures tensio-neutroniques étaient disponibles : première saison de culture 1984, première et deuxième

saisons de culture 1985. Les valeurs d'évaporation du bac de classe A ont été obtenues sur un poste climatologique situé à 10 km de Davié de janvier 1984 à mars 1985, puis sur la station même à partir d'avril 1985. Les coefficients culturaux adoptés pour la simulation (tableau VII.4) sont très proches de ceux déterminés lors de l'étude des flux (chapitre VI), mais ils ne sont pas identiques, car la modélisation a été réalisée avant l'interprétation des chiffres de terrain. Les chiffres obtenus lors de l'étude des flux indiquent principalement une demande en eau un peu plus élevée en fin de montaison que celle retenue pour la simulation. En revanche, les coefficients culturaux au moment de la floraison sont identiques.

TABLEAU VII.4

Coefficients culturaux K'c du maïs NH1 au Togo méridional adoptés pour la modélisation (valeurs pentadaires, ETM = K'c . EVA)

Stades physio.	Levée		Montaison				Floraison			Maturation				
Jours après le semis	0-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	80-110
K'c	-	0,48	0,52	0,60	0,65	0,80	1,10	1,15	1,10	0,80	0,70	0,65	0,62	0,60

2.1.4.2. Comparaison entre valeurs mesurées et valeurs simulées au cours du cycle cultural

Les valeurs mesurées sur la parcelle N2 P1 K2 ont été comparées aux valeurs simulées à l'aide du modèle d'origine (BIP 4) et du modèle modifié (BIP Togo) pour les trois cycles de culture (figures VII.3, VII.4 et VII.5).

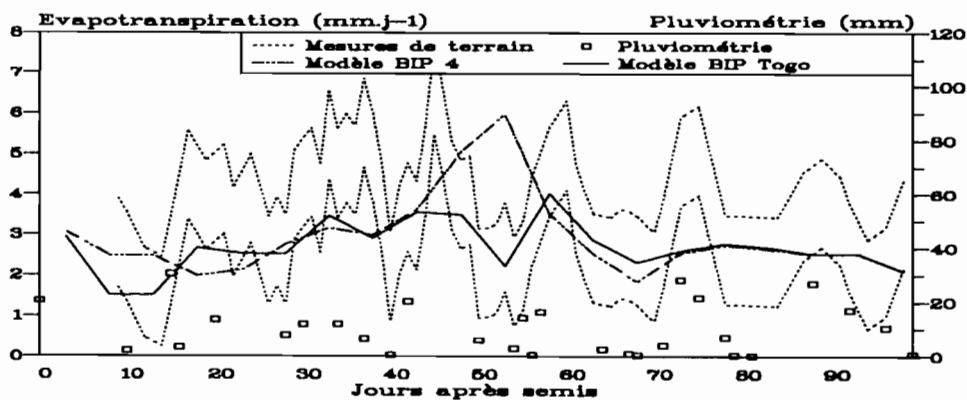


FIGURE VII.3

Evolution, au cours du cycle cultural, des évapotranspirations mesurées et simulées (première saison 1984, moyenne glissante pentadaire des mesures de terrain plus ou moins un écart-type en pointillé)

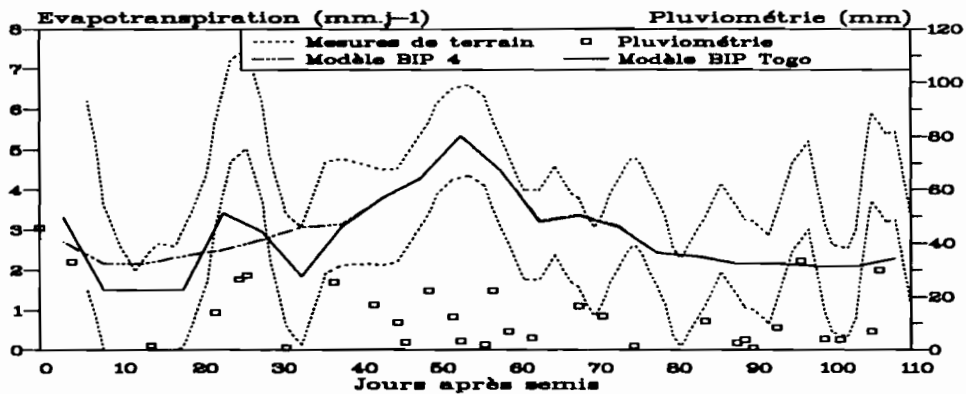


FIGURE VII.4

Evolution, au cours du cycle cultural, des évapotranspirations mesurées et simulées (première saison 1985, moyenne glissante pentadaire des mesures de terrain plus ou moins un écart-type en pointillé)

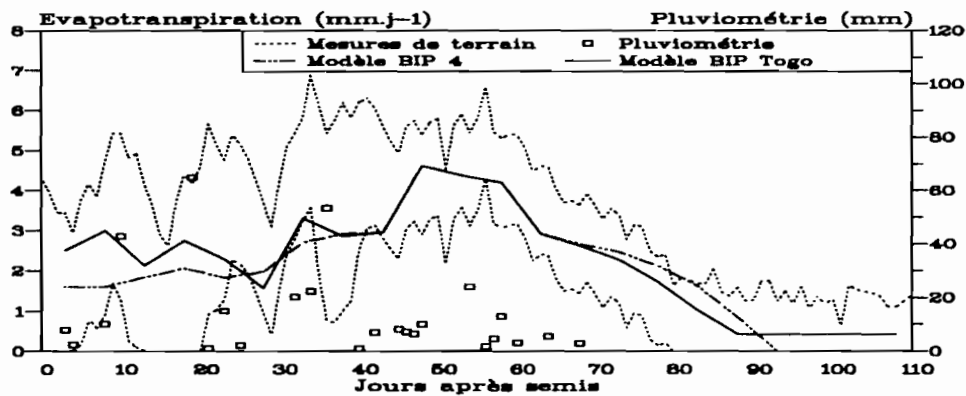


FIGURE VII.5

Evolution, au cours du cycle cultural, des évapotranspirations mesurées et simulées (deuxième saison 1985, moyenne glissante pentadaire des mesures de terrain plus ou moins un écart-type en pointillé)

Le modèle BIP Togo rend compte des variations pentadaires d'évapotranspiration, notamment des phases sèches observées vers le 55ème et le 70ème jour en 1984 et à la fin du cycle de la deuxième saison de culture 1985. Les valeurs simulées sont généralement comprises dans l'intervalle de confiance des mesures de terrain. Pour l'ensemble des trois saisons testées, l'ajustement est meilleur pour les deux saisons 1985 (figures VII.4 et VII.5) que pour la première saison 1984 (figure VII.3). Les différences observées en 1984 semblent provenir des difficultés de mise en place et de mesure au cours de cette saison (humectation du sol pour mettre en place le matériel en début de campagne, mauvaise levée, faible périodicité des mesures neutroniques). Il est difficile d'atteindre une meilleure précision, du fait des erreurs tant sur les mesures de terrain (chapitre V) que sur les données d'entrée du modèle, en particulier sur les coefficients culturaux (DANCETTE, 1983).

Les modifications apportées au modèle d'origine apparaissent sur les figures VII.3, VII.4 et VII.5. En début de cycle, le modèle BIP Togo permet de mieux rendre compte de l'évolution de l'évaporation à partir du sol

nu en fonction des pluies que le modèle initial, en particulier au début de la première saison 1985 (figure VII.4). Pour la fin du cycle, la différence entre les deux modèles ne concerne que l'évaluation de la réserve utile. La prise en compte de l'avancée du front racinaire a permis, pour la première saison 1984, d'expliquer la chute d'ETR entre le 50ème et le 60ème jour : au cours de cette période, il existait des réserves hydriques profondes considérées comme utilisables par le modèle BIP 4, mais qui étaient situées en-dessous du front de pénétration racinaire. Le même phénomène apparaît également en fin de deuxième saison 1985, bien que très atténué. En effet, le modèle BIP Togo indique un épuisement moins rapide des réserves que le modèle BIP 4, car l'ETR est limitée par l'avancée du front racinaire. L'avancée des racines met à la disposition de la plante de nouvelles réserves en eau, mais en faible quantité. Les observations et les mesures de terrain confirment donc l'intérêt des modifications apportées au modèle d'origine. Ces modifications ont d'ailleurs été intégrées dans les nouvelles versions du modèle BIP diffusées par l'IRAT.

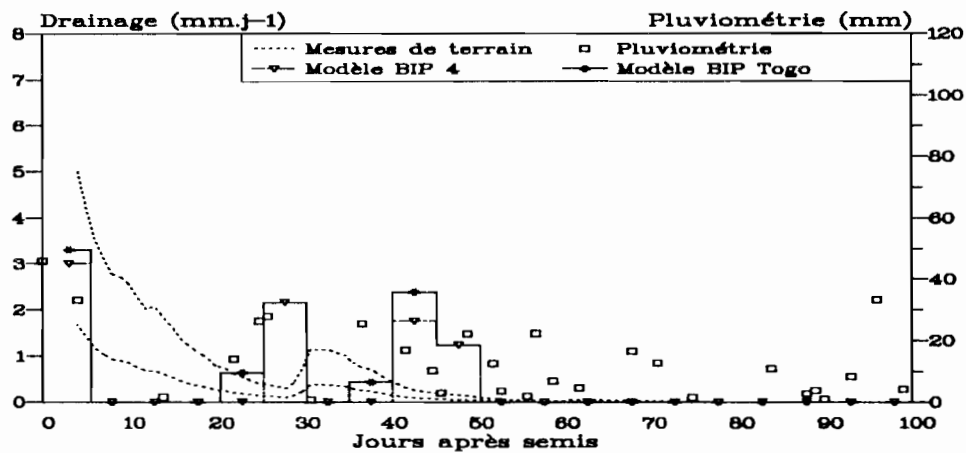


FIGURE VII.6
Evolution au cours du cycle cultural des valeurs de drainage mesurées et simulées (mesures quotidiennes, simulation par pentade, première saison 1985)

En comparant les valeurs pentadaires mesurées et simulées du drainage à 1,5 mètre (figures VII.6 et VII.7), il apparaît que les phases importantes de drainage coïncident ; le drainage se poursuit cependant longtemps après une pluie, ce que la simulation n'indique pas. Cette différence s'explique par le mécanisme retenu pour simuler les transferts hydriques dans le sol : l'effet piston ne rend pas compte des transferts d'eau non saturante.

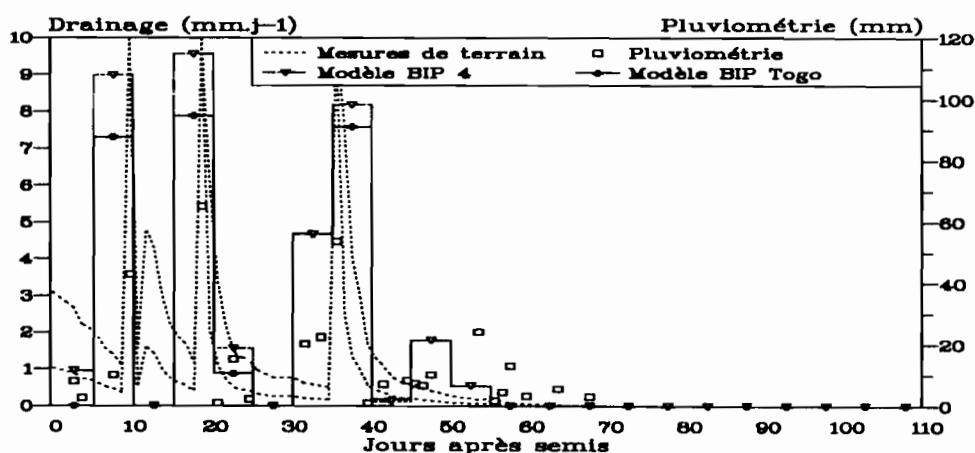


FIGURE VII.7
Evolution au cours du cycle cultural des valeurs de drainage mesurées et simulées (mesures quotidiennes, simulation par pentade, deuxième saison 1985)

2.1.4.3. Comparaison entre valeurs mesurées et valeurs simulées pour l'ensemble du cycle cultural

Les valeurs d'évaporation et de drainage mesurées sur le terrain ont été comparées aux chiffres obtenus à l'aide du modèle BIP Togo (tableau VII.5). Les différences d'évapotranspiration sont toujours inférieures à 20 % entre les deux méthodes, quel que soit le niveau de fertilisation. Le modèle est donc utilisable en conditions de culture paysanne traditionnelle, à condition qu'un labour soit effectué. De plus, la bonne correspondance des résultats permet d'utiliser le modèle pour réaliser une extension spatiale des chiffres obtenus à Davié.

TABLEAU VII.5
Valeurs d'ETR et de drainage mesurées et simulées sur les parcelles cultivées pour l'ensemble du cycle cultural (modèle BIP Togo)

Année	Saison de culture	ETR sur le cycle (mm)			Drainage à 1,5 m (mm)		
		Valeurs mesurées		Valeurs simulées	Valeurs mesurées		Valeurs simulées
		Parcelle K0	Parcelle K2	-	Parcelle K0	Parcelle K2	-
1984	Première saison	330 ± 20	345 ± 25	292	0	0	0
1985	Première saison	337 ± 20	339 ± 25	311	31 ± 16	37 ± 19	48
	Deuxième saison	225 ± 50	255 ± 42	246	179 ± 46	153 ± 36	154

2.1.5. LA VALIDATION DU MODELE POUR LA PARCELLE NUE

La validation du modèle pour la parcelle nue a été réalisée pour la période comprise entre la fin mars 1986 (début des mesures) et la fin juillet 1987 (panne de l'humidimètre). La simulation a été effectuée en prenant les mêmes règles de calcul que pour les parcelles cultivées, avant que la transpiration du maïs ne devienne

notable : évaporation égale à celle du bac de classe A le jour de la pluie et le lendemain (lorsque le total le permettait) ; évaporation de 1,5 mm.j⁻¹ les jours suivants jusqu'à épuisement de la réserve. La réserve utile du sol a été prise égale à 60 mm, ce qui correspond à la différence de stock observée entre l'humidité maximale et l'état hydrique à la fin de la grande saison sèche.

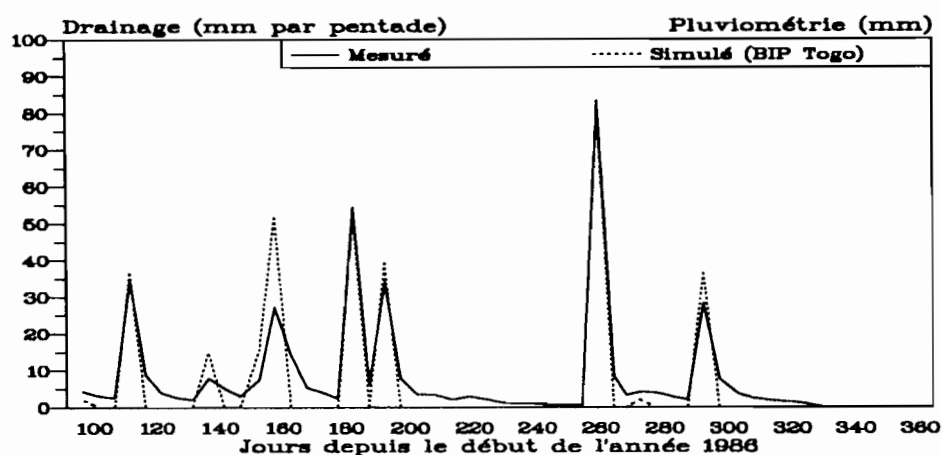


FIGURE VII.8
Evolution des valeurs pentadaires de drainage mesurées et simulées (parcelle nue, année 1986)

La figure VII.8 montre l'évolution du drainage à 1,5 mètre au cours de l'année 1986 par périodes de 5 jours. Comme pour la parcelle cultivée, les périodes de drainage et les quantités drainées coïncident, mais le drainage se poursuit plus longtemps sur le terrain que ne l'indique le modèle. En ce qui concerne les bilans semestriels (tableau VII.6), le modèle fournit des chiffres moins proches des valeurs de terrain que pour les parcelles cultivées, mais les valeurs simulées sont généralement comprises dans l'intervalle de confiance calculé. Il serait possible d'améliorer la précision en prenant une loi de décroissance de l'évaporation après les pluies qui soit mieux ajustée aux résultats de terrain.

TABLEAU VII.6
Valeurs d'ETR et de drainage mesurées et simulées sur la parcelle nue (modèle BIP Togo)

Année	Période	ETR (mm)		Drainage à 1,5 m (mm)	
		Valeurs mesurées	Valeurs simulées	Valeurs mesurées	Valeurs simulées
1986	avril - juillet	224 ± 84	267	248 ± 78	238
	août - décembre	154 ± 57	211	166 ± 51	122
1987	janvier - juillet	360 ± 20	351	74 ± 14	43

2.1.6. CONCLUSION

Malgré la simplicité du modèle, qui ne permet pas de prendre en compte tous les mécanismes intervenant dans le fonctionnement hydrique du sol, malgré les erreurs inhérentes à la méthode tensio-neutronique et les

différences d'échelle de perception, une bonne correspondance a été mise en évidence entre les mesures de terrain et les résultats fournis par le modèle. L'introduction de l'évaporation du sol nu et de la dynamique de l'enracinement augmente la précision des résultats fournis par le modèle initial (BIP 4). Pour les parcelles cultivées, si des différences apparaissent sur des pas de temps courts, les évolutions d'ETR au cours du cycle cultural mesurées sur le terrain et simulées par le modèle sont similaires et les cumuls de l'ETR et du drainage sont très proches. Pour affiner les résultats, soit en précision, soit sur un pas de temps plus court, il serait nécessaire de modéliser plus précisément le fonctionnement physiologique de la plante et l'évaporation du sol nu.

Le modèle BIP Togo permet donc d'étendre dans le temps les résultats obtenus sur quelques années de mesure, en simulant des séries climatiques de longue durée. Il ouvre ainsi la voie à des analyses statistiques sur les termes du bilan hydrique débouchant sur des notions de risque et de potentiel de production. Par ailleurs, la validation du modèle permet de l'utiliser sur d'autres stations climatiques du sud-Togo, où les terres de Barre sont largement répandues, afin d'analyser à l'échelle régionale les contraintes pédoclimatiques liées à la culture du maïs.

2.2. Utilisation du modèle à des fins agronomiques

2.2.1. INTRODUCTION

Avec environ 1000 mm de pluviométrie annuelle pour deux saisons de culture, les périodes de stress hydrique sont fréquentes au cours du cycle cultural du maïs. Avec les variétés traditionnellement cultivées dans la région, les agriculteurs avaient acquis une connaissance de la plante et du climat leur permettant de semer au moment opportun. Mais les variétés sélectionnées qui ont été introduites dans le sud-Togo depuis deux décennies possèdent un cycle cultural d'une durée différente de celui des variétés traditionnelles. Il est donc nécessaire de définir les dates de semis optimales pour ces variétés. C'est ce qui sera tenté dans cette étude pour la variété NH1 (un travail analogue a été réalisé pour la variété La Posta, POSS *et al.*, 1988).

Pour caler les dates de semis, les études agroclimatiques reposent le plus souvent sur l'analyse fréquentielle des pluies (Van DIEPEN & AZONTONDE, 1979 ; LHOMME & MONTENY, 1979). Cette approche tient peu compte des caractéristiques du sol (réserve utile en particulier) et considère les pas de temps de calcul (généralement la pentade ou la décade) comme indépendants entre eux. Pour cette étude, le modèle BIP Togo a été utilisé, le modèle BIP 4 ayant déjà été testé avec succès en Afrique de l'Ouest (FOREST & KALMS, 1984).

Un problème pour le développement agricole est de réussir à définir des recommandations qui ne s'appliquent pas seulement à une station de recherche agronomique, mais qui soient valables pour toute une région agricole. A partir des résultats obtenus à Davié, les relations entre certains paramètres du bilan hydrique et les rendements seront recherchées dans un premier temps. Dans un second temps, une stratégie

de semis qui puisse s'appliquer à toute la région sera définie. Pour finir, le modèle de simulation du bilan hydrique sera utilisé pour préciser les potentiels de production de la région (zonage agropédoclimatique).

2.2.2. RELATIONS ENTRE BILAN HYDRIQUE ET RENDEMENT

2.2.2.1. Introduction

Les relations entre les paramètres hydriques et le rendement des cultures ont été définies à partir des résultats obtenus sur les parcelles N2 P1 K2. Les parcelles N2 P1 K0 ne peuvent être prises en compte, car l'effet de la carence potassique masque souvent les problèmes d'alimentation hydrique.

Pour augmenter le nombre d'observations, le bilan hydrique a été simulé non seulement à Davié, mais également à Agbomédji, où un essai factoriel identique est conduit depuis la même date.

Sur un site donné, le modèle BIP Togo nécessite comme données d'entrée la pluviométrie journalière, les valeurs d'évaporation décadaires mesurées au bac de classe A, les coefficients culturaux pentadaires et la réserve utile racinaire. Les paramètres climatiques ont été mesurés sur les deux stations ou à proximité. Les coefficients culturaux déterminés à Davié ont été supposés s'appliquer à toute la région. Enfin, l'évolution de la réserve utile racinaire au cours du cycle cultural a été prise identique à Davié et à Agbomédji, les deux stations étant situées sur des sols peu différents.

2.2.2.2. Relations entre l'ETR sur le cycle et le rendement observé

Le bilan hydrique a été simulé à Davié et à Agbomédji pour la période 1976-1986, en respectant les dates de semis adoptées sur l'essai factoriel. Il apparaît une liaison entre l'ETR totale sur le cycle et le rendement en grains (figure VII.9).

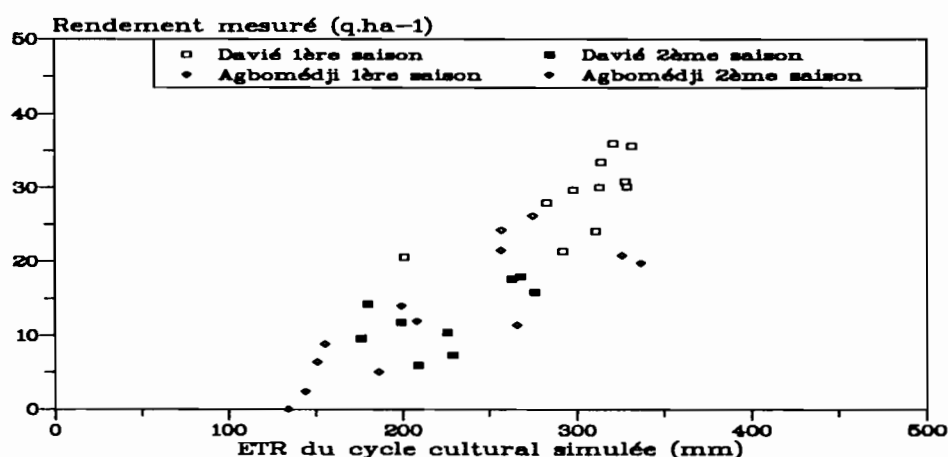


FIGURE VII.9

Relation entre l'ETR simulée du cycle cultural et le rendement mesuré (parcelles N2 P1 K2, années 1976-1986)

Une régression linéaire a donc été calculée en première comme en deuxième saison :

- Davié (sols non dégradés)

$$\text{rendement (q.ha}^{-1}\text{)} = 0,16(\pm 0,02) \times (\text{ETR} - 131 \pm 32) \quad r = 0,86 \text{ pour } n = 20$$

(intervalle de confiance : \pm un écart-type)

- Agbomédji (sols dégradés)

$$\text{rendement (q.ha}^{-1}\text{)} = 0,10(\pm 0,02) \times (\text{ETR} - 100 \pm 50) \quad r = 0,83 \text{ pour } n = 13$$

L'importance de l'alimentation hydrique dans l'élaboration du rendement, soulignée dans l'introduction de cette partie mais qui n'avait pas été constatée lors de l'étude détaillée des cinq saisons de culture, est ainsi mise en évidence.

Au-dessus du seuil d'ETR pour lequel le rendement est nul, la réponse à l'eau à Davié (16 kg.ha⁻¹ pour 1 mm) est bien meilleure qu'à Agbomédji (10 kg.ha⁻¹). Pour une évapotranspiration de 300 mm (habituelle en première saison), les rendements moyens sont de 27 q.ha⁻¹ à Davié et de 20 q.ha⁻¹ à Agbomédji. *A fertilisation identique, les sols non dégradés de Davié valorisent donc mieux l'eau que les sols dégradés d'Agbomédji.* La compatibilité statistique des deux régressions précédentes (figure VII.9) autorise le regroupement des deux sites. En première saison, les rendements d'Agbomédji sont plus faibles que ceux de Davié, mais la différence n'est pas sensible en deuxième saison. Il semble donc que, lorsque les conditions hydriques sont peu contraignantes (première saison), le potentiel de fertilité du sol influence les rendements. En revanche un déficit hydrique important (deuxième saison) joue un rôle prépondérant dans l'élaboration du rendement et la déficience de fertilité du sol est masquée.

2.2.2.3. Relation entre le rapport ETR/ETM à la floraison et le rendement en grains

La figure VII.10 illustre la relation entre les rendements et la valeur des coefficients de satisfaction en eau (ETR/ETM) au moment de la floraison (du 45ème au 60ème jour après semis).

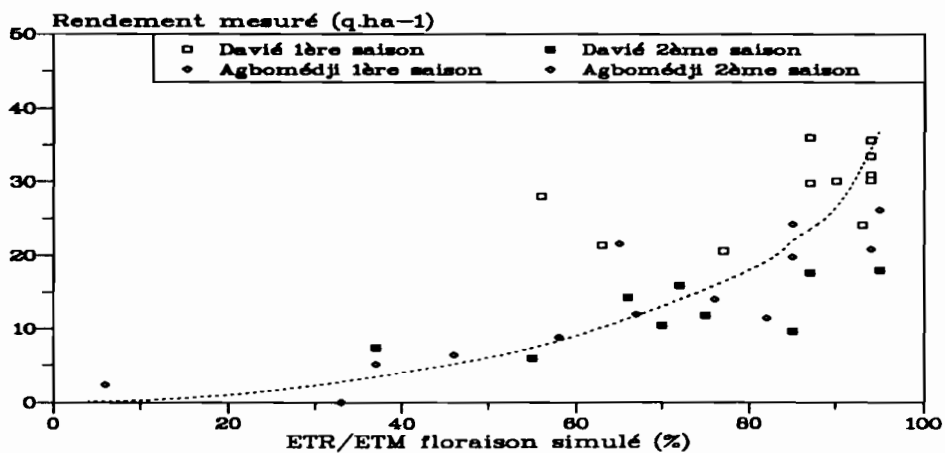


FIGURE VII.10
Relation entre le rapport ETR/ETM à la floraison et le rendement mesuré (parcelles N2 P1 K2, années 1976-1986)

Tant que le coefficient de satisfaction estimé est supérieur à 70 %, les rendements sont variables mais ils peuvent être élevés. En revanche, lorsqu'il est inférieur à cette valeur, les rendements sont généralement faibles (moins de 8 q.ha⁻¹). Cette sensibilité au moment de la floraison, relevée par tous les auteurs ayant travaillé sur le maïs, peut être interprétée en termes de facteur de risque : la définition d'une stratégie agricole doit viser à obtenir la meilleure satisfaction possible des besoins en eau de la plante au cours de cette période.

2.2.3. DÉTERMINATION DES DATES DE SEMIS

2.2.3.1. Introduction

Pour le calage des dates de semis, le modèle permet de choisir :

- une date de début de simulation, à partir de laquelle il calcule l'évaporation du sol nu ;
- une date de semis "au plus tôt", la plus précoce à laquelle le semis peut être réalisé. Après cette date, le modèle simule le semis dès que le seuil de "pluie de semis" est atteint ;
- un seuil de "pluie de semis", qui fixe la décision de semer, donc la date à partir de laquelle le bilan hydrique de la culture est simulé. En choisissant une "pluie de semis" nulle, il est possible d'imposer le semis à la date de semis "au plus tôt".

Pour généraliser les résultats obtenus à Davié, les hypothèses suivantes ont été faites :

- sur les terres de Barre, la réserve utile racinaire ne varie pas, du fait de l'homogénéité latérale de ces sols. Sur le cordon littoral, où la texture est sableuse à sables très grossiers, la réserve utile racinaire a été estimée à 25 mm en fin de cycle ;
- l'évaporation du bac de classe A peut être estimée à un endroit donné par interpolation linéaire entre les deux stations climatiques les plus proches ;
- le cycle cultural du maïs ne varie pas en fonction du lieu et des conditions climatiques. Il s'agit là d'une approximation acceptable, les variations de longueur de cycle constatées dans cette région ne dépassant 10 jours.

2.2.3.2. Analyse de quatre stations représentatives

Quatre stations climatiques, sur lesquelles les relevés ont été effectués depuis plusieurs décennies, ont été choisies pour caractériser l'ensemble du sud-Togo : Lomé et Aklakou pour le littoral, Tsévié (5 km de Davié) et Tabligbo pour le nord de la zone.

Pour déterminer la date optimale de semis, l'évapotranspiration sur l'ensemble du cycle et la satisfaction des besoins au moment de la floraison ont été calculées à l'aide du modèle en fonction de la date de semis. Des semis effectués tous les 15 jours ont été simulés sur l'ensemble de l'année pour la période 1965-1985 (période au cours de laquelle les relevés pluviométriques ont été effectués sur les quatre stations). Les résultats sont reportés sur la figure VII.11. Les périodes favorables au semis correspondent aux maximums des courbes d'ETR sur le cycle et d'ETR/ETM à la floraison.

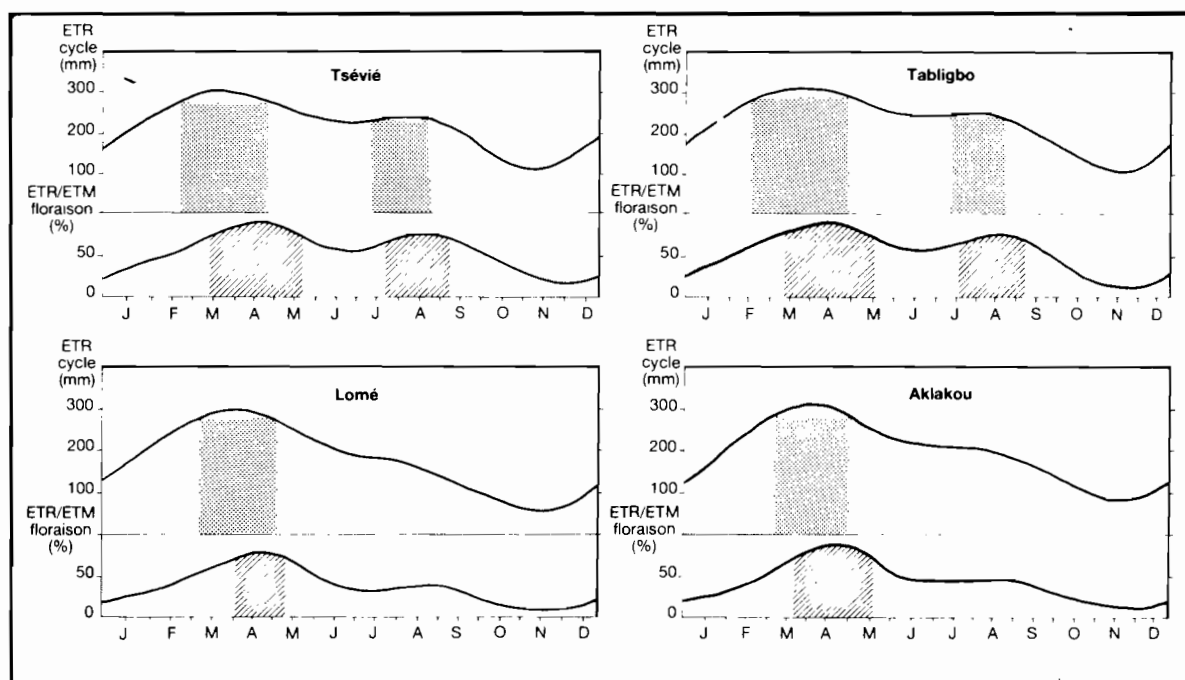


FIGURE VII.11

Evolution de l'ETR sur le cycle et du rapport ETR/ETM à la floraison pour différentes dates de semis sur 4 stations climatiques (moyennes 1965-1985, modèle BIP Togo)

En première saison de culture, les maximums des deux courbes sont décalés : un semis début mars permet d'obtenir des ETR élevées, mais les risques au moment de la floraison sont alors importants. La figure VII.10 permet de préciser qu'il ne faut pas descendre en-dessous de 70 % de satisfaction des besoins au moment de la floraison. Ce seuil permet de fixer des dates extrêmes de semis pour chaque station. La période de semis est d'autant plus étalée que la station est plus arrosée : dans le nord de la zone (Tsévié, Tabligbo), les semis sont possibles entre le 15 mars et le 20 mai, alors qu'au sud la période favorable ne s'étend que du 5 avril au 10 mai à Lomé et du 20 mars au 15 mai à Aklakou.

En deuxième saison de culture, la différence entre le nord et le sud de la zone s'accroît. Si un deuxième pic d'ETR cycle apparaît lors de la deuxième saison des pluies à Tsévié et à Tabligbo, les valeurs restent faibles pendant toute la fin de l'année à Lomé et à Aklakou, sans qu'aucune période favorable ne soit visible. Les taux de satisfaction à la floraison, déjà peu élevés à Tabligbo (80 % pour un semis à la fin du mois d'août), ne dépassent pas 45 % à Aklakou et 35 % à Lomé. Pour Tsévié et Tabligbo, il est donc possible de définir les dates de semis extrêmes (du 20 juillet au 10 septembre). Dans ce cas, il faut éviter de semer après le 10 septembre, car les deux courbes d'alimentation en eau décroissent ensuite rapidement en raison de la diminution brutale de la pluviométrie à la fin du mois d'octobre. Dans le sud de la zone, la notion de date de semis extrême ne s'applique pas : les résultats montrent que la pluviométrie n'est pas suffisante pour assurer une culture de maïs dans des conditions satisfaisantes. Si du maïs est semé, les rendements seront toutefois d'autant moins médiocres que le semis aura été effectué plus précocement.

Ces résultats ont été obtenus avec des dates de semis prédéfinies, dont l'impact a été analysé en termes de valeur moyenne. En réalité, la décision de semer est fondée sur deux critères : la date considérée et la hauteur des précipitations antérieures. Les essais agronomiques ont permis de préciser qu'il est nécessaire que la hauteur cumulée des pluies sur une période de 5 jours soit supérieure à 20 mm pour pouvoir effectuer le semis dans de bonnes conditions. Comme nous le verrons, cette valeur est réaliste par rapport à la pluviométrie en première saison de culture. En deuxième saison, en revanche, elle est trop élevée, car il est fréquent qu'aucune période ne satisfasse à ce critère au cours de l'ensemble de sa saison des pluies. Il a donc été nécessaire de ramener le total à 15 mm en 5 jours.

De nouvelles simulations ont été effectuées en faisant varier la date de semis "au plus tôt" entre le 5 mars et le 25 avril avec un seuil de 20 mm en première saison et entre le 20 juillet et le 15 septembre avec un seuil de 15 mm en deuxième saison. Les principaux résultats obtenus sont reportés dans le tableau VII.7.

TABLEAU VII.7
Principaux résultats de simulation du bilan hydrique en fonction de la date de semis "au plus tôt" (période 1965-1985, seuil pluviométrique sur 5 jours de 20 mm en première saison et de 15 mm en deuxième)

Mais NH1 F1	Date de semis au plus tôt	Aklakou			Lomé			Tabligbo			Tsévié		
		Date de semis moyenne	ETR/ETM floraison (%)	ETR cycle (mm)	Date de semis moyenne	ETR/ETM floraison (%)	ETR cycle (mm)	Date de semis moyenne	ETR/ETM floraison (%)	ETR cycle (mm)	Date de semis moyenne	ETR/ETM floraison (%)	ETR cycle (mm)
Première saison	5-03	22-03	70	302	18-03	65	299	19-03	74	315	17-03	74	308
	15-03	01-04	75	306	02-04	71	305	24-03	75	315	24-03	77	307
	25-03	12-04	80	311	09-04	77	307	02-04	81	311	02-04	78	305
	05-04	15-04	80	310	17-04	80	300	12-04	84	308	14-04	84	298
	15-04	23-04	82	303	23-04	82	290	21-04	88	298	22-04	86	289
	25-04	04-05	70	284	04-05	77	270	30-04	87	286	01-05	87	282
Deuxième saison	20-07	01-09	41	199	01-09	23	161	19-08	75	243	17-08	70	240
	30-07	03-09	41	197	04-09	24	157	24-08	73	238	24-08	73	240
	10-08	07-09	40	190	10-09	28	148	28-08	71	238	24-08	71	239
	20-08	16-09	37	176	16-09	27	141	05-09	69	227	04-09	70	230
	30-08	18-09	36	171	19-09	27	134	10-09	67	216	10-09	68	223
	10-09	24-09	29	160	24-09	22	130	17-09	58	198	15-09	62	211

En première saison de culture, il est possible de définir pour chaque station une date de semis "au plus tôt" permettant d'obtenir le meilleur compromis entre la maximisation de l'ETR sur le cycle (potentiel de production maximal de la culture) et l'ETR à la floraison (risque minimal). Cette date est par exemple le 12 avril à Tabligbo. Mais cette optimisation pour chaque station n'a pas de sens dans le cadre d'une politique agricole régionale où la même date doit pouvoir être appliquée pour l'ensemble de la région. La date de semis "au plus tôt" réalisant le meilleur compromis pour les quatre stations est le 1er avril. A partir de cette date, il faut semer dès que le seuil pluviométrique de 20 mm sur 5 jours est atteint.

En deuxième saison, le problème est différent, car les pluies sont rares en juillet et en août (petite saison sèche) : le paysan dispose alors peu de latitude pour semer. La simulation montre que les indices varient peu du 20 juillet au 15 août et qu'ils diminuent ensuite fortement. Par ailleurs, le maïs de première saison est généralement récolté au cours de la première quinzaine d'août. La meilleure date de semis "au plus tôt"

est le 10 août pour l'ensemble de la région. Si le paysan choisit de semer du maïs en deuxième saison, les meilleurs résultats seront finalement obtenus s'il est prêt à semer le 10 août. Le tableau VII.8 résume l'ensemble de ces recommandations.

TABLEAU VII.8
Dates de semis optimales du maïs NH1 au sud-Togo

Première saison des pluies			Deuxième saison des pluies		
Semis le plus tôt	Semis le plus tard	Optimum : semis lorsque les pluies dépassent 20 mm après le	Semis le plus tôt	Semis le plus tard	Optimum : semis lorsque les pluies dépassent 15 mm après le
20 mars	15 mai	1er avril	15 juillet	15 septembre	10 août

Ces recommandations ont été testées à l'aide du modèle sur les différentes stations climatiques de la région pour savoir quelle date de semis en résultait. Pour la première saison de culture (tableau VII.9), la date moyenne de semis est toujours située dans la première quinzaine d'avril pour les 21 années sur lesquelles le bilan a été simulé. Elle est un peu plus précoce pour les stations du nord de la zone que pour celles du sud, car la pluviométrie y est plus élevée. A la fréquence observée de quatre années sur cinq, le semis peut être réalisé avant le premier mai sur toutes les stations. Dans tous les cas, le semis est possible entre le 1er avril et le 15 mai. En première saison, les recommandations proposées sont donc applicables sur l'ensemble de la région, quelle que soit la pluviométrie de l'année.

TABLEAU VII.9
Dates de semis, bilan hydrique et rendements potentiels simulés du maïs NH1 en première saison

Station	Date de semis		ETR/ETM floraison (%)	ETR cycle (mm)			Rendement potentiel (q · ha ⁻¹)					
							Sols non épuisés			Sols épuisés		
	Moyenne	1 an/5		Moyenne	4 ans/5	1 an/5	Moyenne	4 ans/5	1 an/5	Moyenne	4 ans/5	1 an/5
Aklakou	14-04	01-05	80	312	296	337	28	27	32	22	22	25
Akoumapé	14-04	01-05	78	295	263	327	26	21	31	21	17	24
Alokouegbé	08-04	20-04	83	306	292	330	28	26	32	22	20	24
Anecho	10-04	20-04	53	247	216	280	18	14	24	16	12	19
Assahoun	06-04	20-04	83	313	293	340	29	26	33	23	20	25
Atitogon	08-04	20-04	79	301	270	325	27	22	31	21	18	24
Baguida	12-04	25-04	53	242	200	284	18	11	24	15	11	20
Ganavé	12-04	20-04	80	307	280	337	28	24	33	22	19	25
Kouvé	05-04	15-04	76	299	278	325	27	23	31	21	19	24
Lomé	14-04	01-05	54	233	185	277	16	9	23	14	9	19
Mission Tové	10-04	20-04	77	291	275	313	25	23	29	20	19	23
Sanguéra	14-04	25-04	77	295	270	325	26	22	31	21	18	24
Tabligbo	08-04	25-04	82	310	300	333	28	27	32	22	21	25
Tchekpo	07-04	20-04	77	297	270	319	26	22	30	21	18	23
Tsévié	12-04	01-05	82	298	280	315	26	24	29	21	19	23
Davié (1972-1988)	05-04	10-04	77	303	-	-	27	-	-	22	-	-
Agbomédji (1977-1986)	05-04	-	83	316	-	-	29	-	-	23	-	-

En deuxième saison, en revanche (tableau VII.10), les dates de semis sont très étalées. Selon les stations, la date moyenne de semis varie entre le 19 août et le 11 septembre. Sur certaines stations, les semis sont

réalisés une année sur cinq après le 1er octobre. Comme il ne faut pas semer après le 10 septembre, les semis ne peuvent pas être assurés de manière satisfaisante plus d'une année sur deux dans la zone méridionale et quatre années sur cinq dans les zones les plus arrosées. Le paysan qui souhaite cultiver du maïs en deuxième saison doit donc être prêt à semer dès le 10 août et réaliser le semis dès que le total pluviométrique sur une période de 5 jours dépasse 15 mm. Si les pluies ne sont pas favorables en août, il lui est possible d'attendre jusqu'au 10 septembre. Passée cette date, les chances de réussite du maïs sont très faibles et il est préférable de mettre en place des cultures à cycle plus court et moins exigeantes en eau.

TABLEAU VII.10
Dates de semis, bilan hydrique et rendements potentiels simulés du maïs NH1 en deuxième saison

Station	Date de semis		ETR/ETM floraison (%)	Cycle : ETR (mm)			Rendement potentiel (q · ha ⁻¹)		
	Moyenne	1 an/5		Moyenne	4 ans/5	1 an/5	Moyenne	4 ans/5	1 an/5
Aklakou	06-09	01-10	40	190	126	261	10	1	20
Akoumapé	11-09	01-10	40	200	118	257	11	0	19
Alokouegbé	25-08	15-09	67	227	167	283	15	7	23
Anécho	08-09	01-10	21	133	92	169	2	0	7
Assahoun	25-08	15-09	79	249	215	268	18	13	21
Atitogon	29-08	10-09	52	212	148	260	13	4	20
Baguida	11-09	05-10	16	108	44	170	0	0	7
Ganavé	08-09	01-10	21	164	91	242	6	0	17
Kouvé	23-08	10-09	73	236	203	275	16	12	22
Lomé	10-09	05-10	20	115	56	148	0	0	4
Mission Tové	31-08	20-09	71	230	203	270	16	12	21
Sanguéra	30-08	15-09	49	213	155	265	13	5	20
Tabligbo	19-08	20-09	71	238	177	289	17	8	23
Tchekpo	05-09	01-10	67	225	163	291	15	6	24
Tsévié	26-08	20-09	71	239	200	292	17	11	24
Davié (1972-1986)	01-09	20-09	65	224	185	278	15	9	22
Agbomédji (1977-1986)	31-08	-	68	194	-	-	11	-	-

2.2.3.3. Conclusion sur les dates de semis

La simulation du bilan hydrique en fonction de différentes dates de semis a donc permis d'élaborer une stratégie optimale de semis, qui maximise, en termes statistiques, le potentiel de rendement (évalué par l'ETR sur le cycle) et minimise le risque à la floraison (ETR/ETM à la floraison). La figure VII.12 montre comment le cycle cultural préconisé se situe par rapport à la pluviométrie en année moyenne. En première saison de culture, le semis est réalisé le 14 avril. Il n'est pas effectué lors des premières pluies, qui peuvent donc être mises à profit pour réaliser le labour. La floraison du maïs correspond bien au maximum de pluviométrie et la récolte s'effectue au moment où les pluies sont les plus faibles, pendant la petite saison sèche. En année moyenne, le calage préconisé permet donc de retrouver un calage simple en fonction de l'analyse factorielle des pluies. De plus, la stratégie choisie n'est pas seulement adaptée aux années moyennes, mais elle constitue le meilleur choix sur une période de 21 ans.

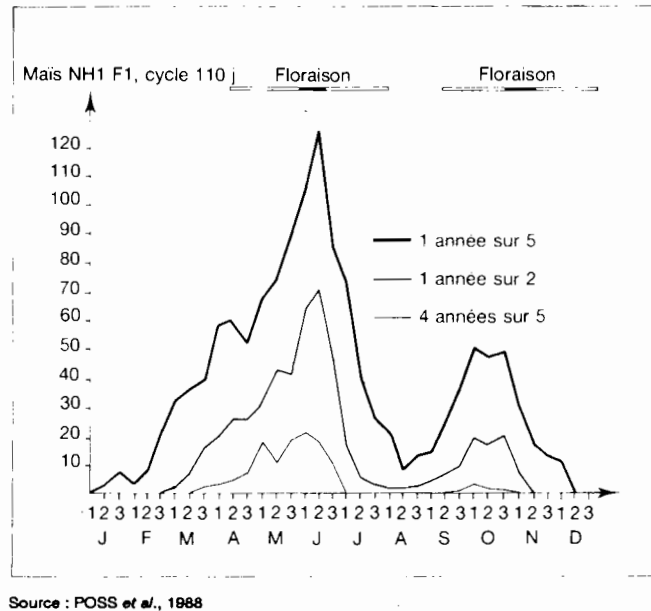


FIGURE VII.1212
Calage optimal du cycle cultural du maïs par rapport à l'analyse fréquentielle
décadaire (Lomé, 1934-1985)

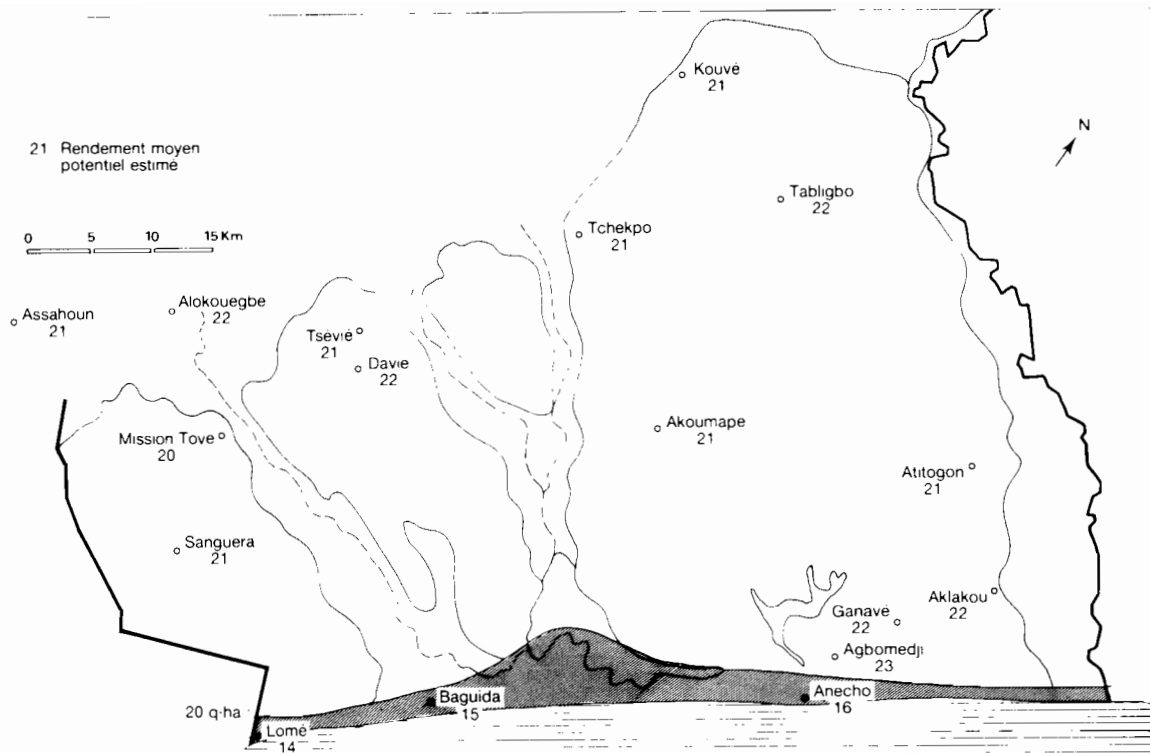
En deuxième saison de semis, la floraison est décalée par rapport au maximum des pluies et elle se produit à une époque où celles-ci se raréfient rapidement. Ce décalage, qui a été adopté à Davié pour les deuxièmes saisons 1985 et 1986 étudiées précédemment, provient de la difficulté à réaliser le semis dans des conditions satisfaisantes en raison de la faiblesse de la pluviométrie en début de deuxième cycle.

Il faut toutefois souligner que les critères de décision et les recommandations proposés ne sont fondés que sur l'optimisation du bilan hydrique et des rendements. Ils doivent être évalués en fonction des schémas d'organisation du travail au sein des exploitations, en particulier des contraintes de temps au moment des sarclages, avant d'être vulgarisés. Par ailleurs, ces recommandations ne sont pas valables pour les sols de bas-fond pour lesquels le bilan hydrique est totalement différent.

2.2.4. ZONAGE AGROPÉDOCLIMATIQUE

A partir des relations entre l'ETR et le rendement (page 199), il est possible d'évaluer dans toute la région les potentiels résultant de l'application des stratégies de semis proposées.

Pour la première saison de culture, il faut distinguer les sols dégradés des sols non dégradés et la réponse correspondante du maïs à l'eau. A partir des ETR simulées sur chaque poste pluviométrique, les rendements potentiels moyens en sols dégradés et non dégradés ont été estimés, ainsi que les rendements potentiels aux fréquences de une année sur cinq et quatre années sur cinq (tableau VII.9). La représentation cartographique des résultats pour les sols dégradés (figure VII.13) révèle un potentiel de production plus faible sur les sols sableux du littoral. L'analyse des données d'entrée du modèle montre que cela provient de leur faible réserve en eau. Sur toutes les stations situées sur terres de Barre, les rendements potentiels moyens ne diffèrent que de $4 \text{ q} \cdot \text{ha}^{-1}$. A fertilité égale du sol, il n'y a donc pas de différences régionales de



Source : POSS et al., 1988

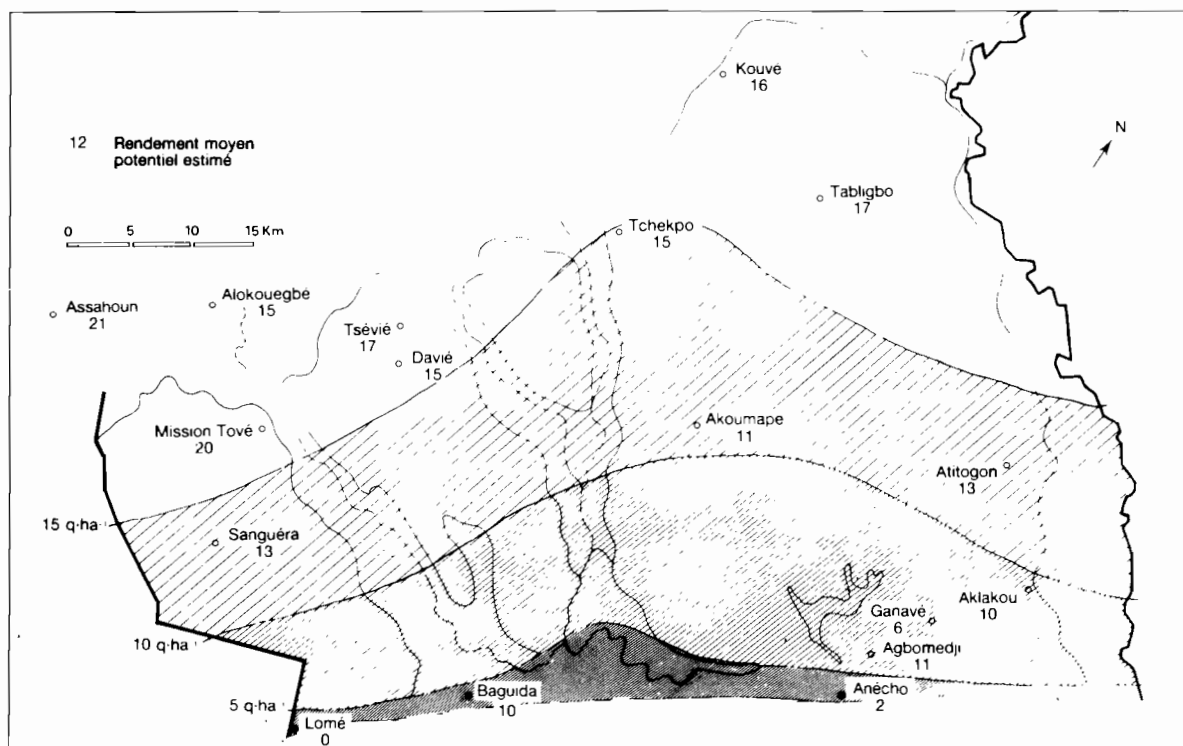
FIGURE VII.13
Rendement potentiel moyen en première saison de culture sur sols dégradés (q.ha⁻¹)

productivité en première saison de culture. Les différences de rendement entre années quinquennales sèches et humides ne sont par ailleurs (tableau VII.9) que de l'ordre de 3 q.ha⁻¹. *La variabilité interannuelle de première saison de culture est donc faible et la production pratiquement assurée.*

En deuxième saison, les rendements potentiels moyens sont faibles (pratiquement nuls sur le littoral) et présentent une très importante variabilité interannuelle (tableau VII.10) : en année quinquennale sèche ou humide, le rendement varie de plus de 50 % par rapport à la moyenne. La carte des rendements potentiels moyens (figure VII.14) met en évidence un important gradient de productivité, les stations situées au nord de la zone présentant des rendements deux fois plus élevés que ceux des stations du sud.

En première saison, il est donc possible d'obtenir sur terres de Barre des rendements de l'ordre de 28 q.ha⁻¹ sur les sols non dégradés et de l'ordre de 22 q.ha⁻¹ sur les sols dégradés. Même sur le cordon littoral, des rendements de l'ordre de 15 q.ha⁻¹ peuvent être espérés.

En deuxième saison de culture, en revanche, non seulement les rendements dépassent à peine 15 q.ha⁻¹ dans les zones les plus favorables, mais de plus la variabilité interannuelle est considérable, ce qui n'assure aucune sécurité à la production agricole. Il n'est donc pas souhaitable de cultiver du maïs dans toute la moitié sud de la région. Une réorientation de la production vers des espèces plus résistantes à la sécheresse est indispensable.



Source : POSS *et al.*, 1988

FIGURE VII.14
Rendement potentiel moyen en deuxième saison de culture (q.ha⁻¹)

2.2.5. CONCLUSION

Grâce à l'utilisation du modèle de simulation du bilan hydrique, il a été possible de reconstituer le bilan hydrique des saisons de culture depuis le début de l'essai. Cela a permis de définir deux grandes relations entre le rendement (en conditions de bonne alimentation minérale) et les paramètres hydriques :

- une relation avec l'ETR totale sur le cycle, interprétée en terme de potentiel de production ;
- une relation avec les stress au moment de la floraison, interprétée en termes de risque.

Ces deux relations ont ensuite été utilisées pour rechercher une stratégie de dates de semis destinée à obtenir le meilleur potentiel de production et à minimiser les risques. Grâce à l'étude sur 21 ans des 17 stations pluviométriques de la région, une stratégie unique pour toute la région a pu être définie. En dernier lieu, le potentiel de production des différentes stations a été calculé, réalisant ainsi un zonage agropédoclimatique. En deuxième saison de culture, le potentiel de production du maïs est très faible dans la zone littorale.

2.3. Utilisation du modèle pour évaluer le drainage profond

Afin de calculer les pertes moyennes d'éléments minéraux par lixiviation, il est nécessaire d'évaluer le drainage en-dessous de la zone d'extraction racinaire sur une longue période. C'est pourquoi le modèle a été utilisé pour simuler le bilan hydrique sur la parcelle N2 P1 K2 et sur la parcelle nue entre 1934 (origine de la station) et 1985 à Tsévié (tableau VII.11).

TABLEAU VII.11
Drainage moyen à 1,5 m à Tsévié (modèle BIP Togo, années 1934-1985)

Période	Parcelle N2 P1 K2	Parcelle nue
janvier à juillet août à décembre	179 85	- -
Total de l'année en mm (% du total pluviométrique)	264 (25)	337 (32)

A l'échelle annuelle, le drainage représente le quart (parcelle cultivée), voire le tiers (parcelle nue), du total pluviométrique annuel (1042 mm), ce qui constitue une perte d'eau considérable pour l'agriculture dans cette région où les ressources sont déjà limitées. En moyenne, la transpiration de la culture permet de diminuer le drainage d'environ 70 mm par rapport au sol nu. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par MARTINEZ (1989) sur cuves lysimétriques en climat méditerranéen : la mise en place d'une culture dérobée de ray-grass a permis de réduire le drainage de 80 mm par rapport au sol nu, avec une pluviométrie de 700 mm. Il a été vu lors de l'étude des flux que la parcelle nue ne différait des parcelles cultivées qu'entre le 30ème et le 80ème jour du cycle cultural du maïs, ce qui représente 100 jours par an. La différence constatée correspond donc à une moyenne de $0,7 \text{ mm.j}^{-1}$ à une période pendant laquelle l'ETR du maïs est en moyenne de l'ordre de 3 mm.j^{-1} . Il n'est pas surprenant que l'évaporation du sol nu soit seulement inférieure de 25 % à celle du couvert du maïs, dans la mesure où cette période du cycle du maïs correspond aux pluies les plus abondantes, donc à une époque où le sol nu, humide, présente une forte évaporation. C'est d'ailleurs ce qui avait été observé lors de l'étude de l'ETR de la première saison de culture 1986 (figure VI.15).

La répartition du drainage au cours de l'année a été étudiée pour la parcelle cultivée. Environ les deux tiers du drainage s'effectuent au cours de la première saison des pluies. Cependant, le drainage de deuxième saison des pluies est loin d'être négligeable, puisqu'il représente une part importante d'un total pluviométrique déjà insuffisant pour assurer une production agricole sécurisée (85 mm en moyenne d'août à décembre). Mais les valeurs moyennes masquent la disparité interannuelle. Le drainage ne se produit pas tous les ans : en première saison, du drainage apparaît sous les parcelles cultivées dans 72 % des cas (sur 51 ans), contre 44 % en deuxième saison. Ces chiffres reflètent la variabilité interannuelle de la pluviométrie, la hauteur précipitée au cours de la deuxième saison étant fréquemment très réduite.

Pour cerner plus précisément les périodes de drainage, un dépouillement a été effectué par quinzaine. Deux pics de drainage apparaissent. Lors de la première saison des pluies, du drainage se produit plus d'une année sur quatre entre le 15 avril et le 31 juillet, avec un maximum entre le 1er juin et le 15 juillet (drainage entre le 15 et le 30 juin une année sur deux, avec une moyenne de 69 mm). Pendant la deuxième saison des pluies, le drainage est concentré entre le 15 septembre et le 15 novembre, avec un maximum du 15 septembre au 15 octobre. Entre le 1er et le 15 octobre, du drainage apparaît une année sur trois, avec une moyenne de 44 mm.

Même dans cette région où la pluviométrie est relativement faible, le drainage représente donc une partie importante du total précipité (de 20 à 32 %), avec des variations interannuelles marquées. La principale période de drainage correspond au maximum des pluies (deuxième quinzaine de juin), mais du drainage apparaît également au cours de la deuxième saison de culture, au total pluviométrique déjà faible, en raison de la concentration des pluies sur une courte période. Par rapport au sol nu, une parcelle cultivée en maïs avec une fertilisation équilibrée draine environ 70 mm de moins par an en moyenne sur 51 ans. Il n'a pas été possible d'évaluer le drainage en culture non fertilisée en potassium, car le modèle BIP Togo n'a pas été étalonné pour la parcelle N2 P1 K0 en deuxième saison.

3. CONCLUSION

Le calcul du bilan annuel des différentes parcelles révèle que les parcelles cultivées évaporent environ 200 mm de plus que la parcelle nue, réduisant d'autant les pertes par drainage. Pour les parcelles cultivées, la fertilisation potassique augmente l'ETR du couvert végétal, surtout au cours de la deuxième saison. Mais cette approche de terrain n'a pas permis de dégager l'effet de l'alimentation hydrique sur les rendements. Par ailleurs, les bilans sont très variables selon la pluviométrie de l'année. C'est pourquoi le bilan hydrique a été simulé à l'aide d'un modèle prenant en compte la pluviométrie, la demande climatique, les coefficients culturaux de la plante et la réserve hydrique du sol.

La simulation du bilan hydrique s'est déroulée en trois phases successives :

- calage d'un modèle sur les données de terrain ;
- recherche de relations entre les paramètres hydriques et les rendements ;
- utilisation des relations trouvées dans un but agronomique et pour évaluer le drainage.

Elle a permis de définir des stratégies de semis et un zonage agropédoclimatique, tous deux actuellement utilisés par les organismes de développement agricole, et d'évaluer le drainage sur une longue durée aussi bien pour des parcelles cultivées que pour des parcelles nues.

Cette méthode nécessite un travail important, tant sur le terrain qu'au laboratoire : sa généralisation à d'autres situations agropédoclimatiques se pose avec acuité. Il serait séduisant d'utiliser le modèle sans passer par la longue phase de mesures nécessaire au calage. Il est certain en effet que l'approche par

modélisation permet de dégrossir rapidement les problèmes de risque agricole et de calage de cycle et que le modèle est suffisamment robuste pour pouvoir avoir un champ d'application assez large. Une étude de sensibilité du modèle aux différents paramètres d'entrée serait maintenant à réaliser avant de poursuivre une généralisation sur les régions voisines.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

FONCTIONNEMENT HYDRIQUE DE L'ÉCOSYSTEME

Dans les terres de Barre du sud-Togo, le sol retrouve tous les ans vers le 15 février le même état hydrique en raison d'une grande saison sèche qui s'étend de novembre à mars ; cette situation permet de décrire un cycle hydrique annuel, que ce soit pour le sol nu ou pour le sol cultivé.

Au cours de la première saison des pluies, la progression du front d'humectation n'est pas parallèle à la surface du sol : il existe des voies de circulation préférentielles le long desquelles le sol s'humecte rapidement, alors que la plus grande partie des horizons peut rester relativement sèche. Dans de telles conditions, la loi de Darcy n'est pas utilisable pour modéliser l'humectation. L'évolution du drainage au cours du temps est pratiquement constante d'une pluie à l'autre. Pendant les premières 24 heures après la pluie, le drainage est maximum : il peut alors atteindre plusieurs dizaines de millimètres. Le drainage diminue fortement au cours des jours suivants : les quantités drainées sont faibles (environ 1 mm.j^{-1} après une semaine), mais elles ne sont pas négligeables par rapport à l'ETR des plantes. A l'échelle annuelle, le drainage moyen représente sur 51 ans (simulation sur 1934-1985 à l'aide du modèle BIP Togo) de 25 % (parcelle cultivée en maïs bien fertilisé) à 50 % (parcelle nue) du total pluviométrique. La principale période de drainage correspond au maximum pluviométrique de la première saison (deuxième quinzaine de juin), mais du drainage apparaît également, près d'une année sur deux, au cours de la deuxième saison des pluies, durant laquelle le total pluviométrique moyen n'atteint pourtant que 364 mm.

Sur sol nu, l'évaporation est fortement liée à l'humectation de l'horizon superficiel. Le jour après la pluie, la quantité d'eau évaporée est égale à celle d'un bac d'eau libre. Elle diminue ensuite rapidement, une loi exponentielle rendant assez bien compte de la décroissance en fonction du temps après l'averse. Elle est inférieure à 1 mm.j^{-1} une semaine après la pluie, mais elle se poursuit longtemps après la fin de pluies, puisque des valeurs de $0,2 \text{ mm.j}^{-1}$ ont été mesurées, à la fin de la grande saison sèche, après 4 mois sans

pluie. L'évolution de la profondeur du plan de flux nul permet de suivre l'assèchement du sol lié à l'évaporation de la surface. Pendant la grande saison sèche, le plan de flux nul peut atteindre 1,1 m, mais seuls les 50 premiers centimètres parviennent à une humidité inférieure à celle du pF 4,2. Si les variations de teneurs en eau peuvent atteindre $0,14 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ en surface, elle ne sont que d'environ $0,02 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ en-dessous du plan de flux nul. Au cours d'un cycle annuel, la variation de stock hydrique sur 1,5 m atteint 60 mm.

Sous culture de maïs, la dynamique de l'eau diffère de celle observée sous le sol nu entre le 25ème et le 85ème jour du cycle du maïs en raison de la transpiration de la plante. La quantité d'eau drainée diminue en moyenne de 70 mm par an. Lorsque les précipitations sont suffisantes, le système racinaire exploite surtout les 60 premiers centimètres du sol, mais en conditions hydriques limitantes (en particulier au cours du deuxième cycle de culture), l'effet du prélèvement racinaire sur les charges hydrauliques est mesurable jusqu'à 1,5 m de profondeur. Les quantités d'eau que les plantes peuvent ainsi prélever en profondeur sont faibles, car la réserve utile est très réduite dans les horizons profonds. Les variations d'humidité en profondeur sont donc plus fortes dans le sol cultivé que dans le sol nu : la variation du stock hydrique au cours d'un cycle annuel est d'environ 95 mm pour la parcelle recevant une fertilisation équilibrée et 80 mm pour la parcelle sans fertilisation potassique.

UTILISATION AGRICOLE DE L'EAU

Le suivi de l'ETR du maïs NH1 au cours de plusieurs cycles culturaux a permis de constater que la consommation en eau est maximale entre le 45ème et le 60ème jour après le semis (stade floraison), ce qui est en accord avec les connaissances déjà acquises sur les céréales. L'évapotranspiration du couvert végétal atteint alors 110 à 115 % de l'évaporation d'un bac d'eau libre. En première saison de culture, l'absence de fertilisation potassique entraîne une diminution de la consommation en eau de la plante, surtout visible sur les tensions de l'eau dans le sol et sur l'évolution du stock hydrique du sol. Cette diminution est à la limite de la sensibilité de la méthode en ce qui concerne l'ETR : elle ne représente en effet qu'environ 10 à 30 mm sur une consommation totale d'environ 300 mm sur le cycle. Elle pourrait être expliquée par une ouverture incomplète des stomates sur les plantes carencées en potassium. La chute de rendement d'environ 70 % liée à la carence potassique ne résulte donc pas d'un problème d'alimentation hydrique, mais d'une diminution de l'efficacité de l'eau. En deuxième saison de culture, la diminution d'ETR dans les parcelles ne recevant pas d'engrais potassique est beaucoup plus marquée (30 à 50 mm) : un enracinement plus limité résultant de l'absence de labour en début de deuxième cycle pourrait expliquer cette observation.

Le suivi au champ de quelques cycles culturaux a permis de montrer une relation générale entre l'ETR sur le cycle et les rendements : de faibles ETR produisent des rendements réduits. Mais de fortes ETR n'assurent pas systématiquement des rendements élevés, en raison des accidents d'alimentation hydrique qui

peuvent intervenir en cours de cycle. Une expérimentation en plein champ sans contrôle de la pluviométrie ne permet pas de caractériser ces accidents, en raison des multiples facteurs différents d'une saison culturale à l'autre. C'est pourquoi le bilan hydrique a été simulé sur les 14 années pour lesquelles des rendements étaient disponibles, afin de rechercher des relations statistiques entre les caractéristiques d'alimentation hydrique et les rendements en conditions d'alimentation minérale équilibrée. Cette méthode a permis de définir deux types de relation :

- une relation entre l'ETR totale durant le cycle et le rendement, qui peut être interprétée en termes de potentiel de production ;
- une relation entre l'ETR au moment de la floraison et le rendement, interprétée en termes de facteur de risque.

Ces relations permettent d'optimiser les dates de semis. Les dates de semis ont été définies à l'aide du modèle, afin d'assurer le meilleur compromis possible entre une production élevée et un risque minimum : semis après le 1er avril lorsque la pluie de semis atteint 20 mm (total de cinq jours consécutifs) en première saison de culture, semis après le 10 août après une pluie de semis de 15 mm en deuxième cycle. Le modèle a également permis de réaliser un zonage agropédoclimatique de la région. Ce zonage a montré un potentiel de production homogène sur toute la région en première saison de culture à fertilité du sol égale, mais très hétérogène en deuxième saison : à proximité de la bande côtière les rendements potentiels sont faibles en deuxième saison. Une réorientation des productions agricoles de deuxième cycle vers des productions moins exigeantes en eau que le maïs est souhaitable.

En ce qui concerne le fonctionnement hydrique des sols, la fertilisation potassique permet une meilleure valorisation des ressources hydriques de la région par une production accrue de matière sèche par gramme d'eau évaporée, par une meilleure exploitation du stock d'eau du sol et par une diminution des pertes par drainage profond. Pour la parcelle nue, les pertes par drainage sont plus fortes que pour les parcelles cultivées et les risques de pertes par ruissellement, non pris en compte dans cette étude, constituent un danger dans les zones les plus exploitées où les réorganisations superficielles sont les plus développées. *Couvrir le sol d'une culture recevant une fertilisation équilibrée constitue donc la meilleure valorisation des ressources hydriques, tout en limitant les pertes par drainage et les risques de ruissellement.*

TROISIEME PARTIE
LES TRANSFERTS MINÉRAUX

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE

L'étude de la dynamique des éléments minéraux dans le sol sera abordée dans le but d'obtenir des informations concernant l'alimentation minérale du maïs et la durabilité du système de culture étudié.

Toutes les plantes prélèvent la quasi totalité des éléments minéraux dont elles ont besoin dans la solution du sol. En étudiant la composition chimique de la solution du sol, il est donc possible d'accéder directement au milieu à partir duquel les plantes s'alimentent. Les modes d'alimentation du maïs dans les terres de Barre seront étudiés en comparant les besoins du maïs, évalués par les éléments minéraux qu'il prélève (chapitre IV), et la composition de la solution du sol. L'influence de la fertilisation minérale sur la composition de la solution du sol sera également analysée.

Pour évaluer la durabilité du système, il est nécessaire d'en établir le bilan minéral. Deux méthodes ont été utilisées simultanément : le calcul de la différence entre les apports et les exportations et le bilan des éléments contenus dans le sol. L'établissement du bilan minéral en quantifiant les apports et les exportations est une approche agronomique classique en Afrique (TOURTE *et al.*, 1964 ; SARR, 1981 ; GIGOU, 1982 ; WETSELAAR & GANRY, 1982 ; PIERI, 1986), mais qui est souvent rendue imprécise en raison de la difficulté à apprécier les pertes par lixiviation. L'étude des pertes par lixiviation est souvent abordée à l'aide de lysimètres. Or l'utilisation des lysimètres pose de nombreux problèmes méthodologiques, dont celui de la perturbation qu'ils apportent à la circulation de l'eau non saturante à leur base. C'est pourquoi les capteurs en céramique poreuse à dépression ont été choisis pour caractériser la composition de la solution du sol. L'étude des problèmes méthodologiques que pose l'utilisation des capteurs de solution fait l'objet du chapitre VIII.

Au sein de la solution du sol, les teneurs des différents éléments ne sont pas indépendantes : PIERI (1979) et CHABALIER (1984) ont montré en particulier des relations entre les teneurs en calcium et en magnésium dans des sols du Sénégal et de Côte d'Ivoire. La lixiviation des éléments dépendant en grande

partie des teneurs dans la solution du sol, des telles relations ont été recherchées dans les sols étudiés (chapitre IX). Par ailleurs, les éléments en solution sont en équilibre avec ceux qui sont retenus sur la phase solide. Les relations qui existent entre les éléments en solution et ceux qui sont retenus sur le sol sous forme échangeable ou non échangeable, et l'influence des apports d'engrais sur ces équilibres seront précisés dans le cas du potassium.

Tout bilan minéral non équilibré entraîne une variation des quantités d'éléments minéraux contenus dans le sol. C'est l'évolution de ces quantités qui permet, en dernier ressort, d'estimer si un système de culture est durable. Mais l'estimation de cette évolution est délicate. D'une part il est nécessaire de disposer d'échantillons témoin pour estimer les évolutions. Or il est rare que l'échantillonnage réalisé en début d'expérimentation soit suffisant pour permettre les comparaisons. D'autre part l'évolution des propriétés chimiques des sols affecte une profondeur variable dans le profil, qu'il est nécessaire de préciser pour établir le bilan. Enfin et surtout, il n'existe pas de méthode d'analyse chimique des éléments totaux qui permette l'établissement de bilans minéraux précis (chapitre III). C'est pourquoi les différences de bilans minéraux seront établies à partir des éléments échangeables ou assimilables des deux parcelles cultivées N2 P1 K0 et N2 P1 K2, en limitant les calculs à la tranche de sol dans laquelle existent des différences entre les parcelles et en évaluant la précision des résultats obtenus (chapitre X). Lorsque les bilans établis à partir des analyses de sol et les bilans entre les apports et les exportations donneront des résultats divergents, d'autres analyses chimiques ou cristallographiques seront utilisées pour tenter de fournir des éléments d'explications.

CHAPITRE VIII

L'ÉTUDE DE LA SOLUTION DU SOL A L'AIDE DE BOUGIES POREUSES

L'idée d'utiliser un "tube en porcelaine à grain fin" pour prélever la "solution du sol" par succion date de 1904 (BRIGGS & McCALL), mais la méthode ne s'est répandue qu'au cours des années soixante, après la commercialisation du premier "échantillonneur d'eau du sol" (*soil water sampler*). Comme le montrent les synthèses bibliographiques de CHEVERRY (1983), de LITAOR (1988) et de GROSSMAN & UDLUFT (1991), l'étude des problèmes méthodologiques posés par ce dispositif ne s'est développée qu'après 1970.

Différents types de matériaux ont été testés pour constituer les capteurs : la céramique poreuse, le verre fritté, les fibres creuses et le téflon. La céramique poreuse présente l'inconvénient de perturber la composition de la solution qui la traverse, mais les autres matériaux sont onéreux, fragiles (verre fritté et fibres creuses) ou présentent des pressions d'entrée d'air faibles (téflon). C'est pourquoi les capteurs en céramique restent le dispositif le mieux adapté aux études au champ (SILKWORTH & GRIGAL, 1981 ; LEVIN & JACKSON, 1977). Pour cette étude, le choix s'est porté sur des bougies en céramique poreuse de 4,5 cm de diamètre de marque Soil Moisture (référence 653x1 B2M2) ; ce sont probablement les capteurs les plus utilisés dans le monde.

Comme l'utilisation de capteurs en céramique pose de nombreux problèmes méthodologiques et que les résultats obtenus à l'aide de ces dispositifs dépendent du protocole adopté, il est nécessaire de préciser les différents types de problèmes rencontrés et les solutions qui ont été retenues (premier paragraphe). Le dispositif de prélèvement adopté et les méthodes d'analyses retenues sont exposés dans le deuxième paragraphe, le principe des calculs des quantités d'éléments en solution, des pertes par lixiviation et des quantités transportées par *mass-flow* dans le troisième. Une grande partie des résultats présentés dans ce chapitre a été publiée sous forme d'article (SARAGONI *et al.*, 1991).

1. LES PROBLÈMES POSÉS PAR LE PRÉLEVEMENT DE LA SOLUTION DU SOL A L'AIDE DE BOUGIES POREUSES

1.1. Les problèmes physiques

1.1.1. LE CHOIX DU MATÉRIEL

Une étude comparative entre les capteurs Soil Moisture et des capteurs de marque Nardeux, de même composition mais de diamètre différent (6 cm), a été réalisée. Sur une des parcelles, 8 capteurs Soil Moisture et 6 capteurs Nardeux ont été mis en place à 180 cm ; des prélèvements de solution ont été relevés aux mêmes dates. Dans l'eau, le volume qui traverse la paroi du capteur en 30 mn sous une dépression de 500 hPa est plus élevé dans le cas des capteurs Nardeux que dans celui des capteurs Soil Moisture (2 505 cm³ recueillis contre 162 cm³). Cela provient de la surface plus importante du capteur Nardeux (170 cm² contre 87 cm²), mais surtout d'une conductivité hydraulique plus élevée (8,2 10⁻⁵ m.s⁻¹ contre 1,0 10⁻⁵ m.s⁻¹). Cependant, le volume collecté dans le sol par les deux types de capteurs n'est pas significativement différent : l'humidité du sol est le facteur déterminant (paragraphe suivant). La composition chimique des solutions prélevées est également très voisine (figure VIII.1 pour le calcium). Il s'avère donc que, dans le cas étudié, il aurait été possible d'utiliser indifféremment les deux types de capteurs (SARAGONI *et al.*, 1991).

1.1.2. LA CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE DES CAPTEURS

Les facteurs qui interviennent sur la conductivité hydraulique des bougies ont été étudiés par plusieurs auteurs (dont HANSEN & HARRIS, 1975). Constatant une importante variabilité des volumes prélevés avec un même type de bougie, ces auteurs ont préconisé de tester les bougies au laboratoire avant de les mettre en place au champ. Pour notre expérimentation, la conductivité hydraulique des bougies a été mesurée en les immergeant dans de l'eau distillée et en effectuant une dépression de 500 hPa pendant 30 mn. Le volume moyen recueilli a été de 162 cm³, avec un écart-type de 30 cm³, chiffres comparables à ceux de HANSEN & HARRIS (1975).

Les bougies ont ensuite été placées au champ. Les volumes recueillis (10 à 200 cm³) sont fortement liés à la tension de l'eau dans le sol (figure VIII.2). Ces résultats sont en accord avec ceux de DE JONG (1976). Il s'agit - tous traitements, profondeurs et années confondus - d'une relation du type fonction puissance ($r = -0,84$ pour $n = 176$). Il en découle que la variabilité liée à la conductivité hydraulique des bougies est négligeable devant l'effet de la tension de l'eau dans le sol. Ce résultat est en accord avec ceux de SILKWORTH & GRIGAL (1981), qui soulignent de plus qu'aucune différence de composition chimique n'affecte apparemment les échantillons récoltés à l'aide de capteurs de conductivité hydraulique différente. Il semble donc que l'importance accordée à la valeur de la conductivité hydraulique initiale des capteurs doit être tempérée.

La figure VIII.2 démontre en outre que les volumes sont très faibles (moins de 20 cm³) dès que la tension de l'eau dans le sol dépasse 150 hPa (pF 2,2). Comme les analyses chimiques deviennent délicates lorsque les volumes sont réduits, cette méthode n'est donc utilisable que dans des sols humides.

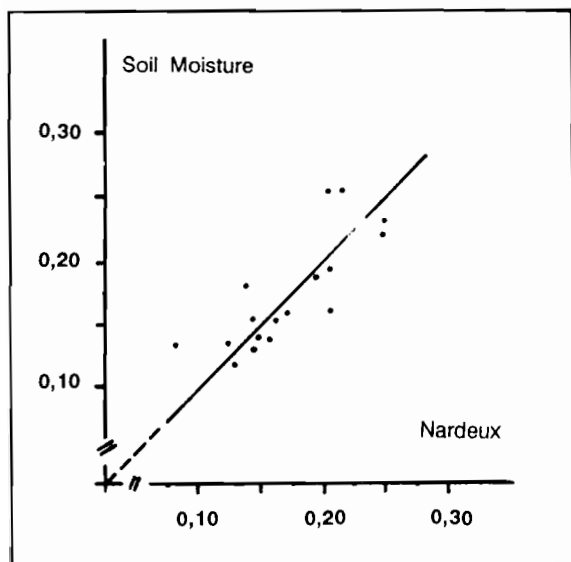


FIGURE VIII.1
Comparaison des teneurs en calcium obtenues au moyen des capteurs Soil Moisture et des capteurs Nardeux (sol nu, 8 répétitions, en mmol.l⁻¹, d'après SARAGONI et al., 1991)

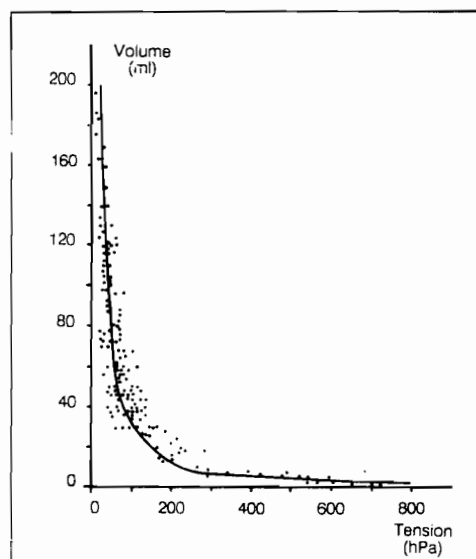


FIGURE VIII.2
Relation entre le volume prélevé et la tension de l'eau dans le sol (dépression de 600 hPa pendant 24 heures, tous traitements et profondeurs confondus, d'après SARAGONI et al., 1991)

1.1.3. LA MISE EN PLACE AU CHAMP

La méthode de mise en place des capteurs peut modifier la quantité de solution prélevée ainsi que sa composition chimique. La plupart des auteurs s'accordent pour recommander d'introduire les capteurs en force dans le sol, sans addition de sable ou de boue destinés à améliorer le contact entre la bougie et le sol. Dans notre expérimentation, l'implantation a été réalisée verticalement, en enfonçant en force les capteurs dans un trou dont le diamètre était de 1 mm inférieur à celui de la bougie. Même ainsi, l'introduction des capteurs peut modifier les caractéristiques porales du sol, par tassement au contact de la bougie et par la création de voies de circulation privilégiées lors de l'aspiration. Au démontage du dispositif utilisé, aucune modification du sol à proximité des bougies n'a cependant pu être observée ni à l'oeil nu, ni au microscope sur une coupe imprégnée, probablement en raison d'une forte résistance du sol à l'écrasement.

1.1.4. LE COLMATAGE

Le colmatage des bougies au champ est important dans certains cas (HANSEN & HARRIS, 1975 ; TALSMA et al., 1979 ; DEBYLE et al., 1988). C'est pourquoi les capteurs ont été rapportés au laboratoire après la première année d'utilisation. Leur conductivité a de nouveau été mesurée par aspiration d'eau distillée : aucune diminution significative de conductivité n'a été mise en évidence. Deux raisons peuvent être invoquées. La première est d'ordre minéralogique : en effet, la phase argileuse du sol étudié est

principalement constituée de kaolinite fortement floculée par les oxydes de fer; elle ne se disperse que très peu, contrairement aux minéraux smectitiques et à la kaolinite des sols ferrugineux tropicaux (faiblement liée aux oxydes de fer). La deuxième est technique : le contact entre les bougies et le sol n'est pas parfait (le contact s'effectuait sur les deux tiers de la surface pour les bougies observées lors du démontage). Or, les zones qui ne sont pas au contact du sol ne sont pas traversées par les solutions pendant les prélèvements. Elles ne se colmatent donc pas, mais peuvent ensuite jouer un rôle important lorsque les bougies sont testées dans l'eau. Cependant, comme ce problème du contact se posait également pour les auteurs qui ont constaté une importante diminution de conductivité, il est probable que la nature minéralogique des argiles joue ici le rôle principal.

1.1.5. LA DÉPRESSION APPLIQUÉE ET LA DURÉE DE MISE EN DÉPRESSION

Le problème de la dépression à appliquer et celui du temps d'aspiration soulèvent des questions de fond sur la représentativité des solutions prélevées avec ces dispositifs. En effet, selon la dépression exercée et le temps pendant lequel elle est appliquée, des eaux retenues par des forces de succion variables sont recueillies et la circulation de l'eau au voisinage du capteur est plus ou moins fortement perturbée. Par ailleurs, de l'eau immobile dans des pores en cul-de-sac peut être mobilisée par les capteurs.

L'expérimentation réalisée à Davié ne permet pas d'aborder le problème des liaisons entre la valeur de la dépression utilisée, le temps d'application et la charge ionique des échantillons collectés. Il s'agit d'un sujet délicat et mal connu (SEVERSON & GRIGAL, 1976). L'influence de la dépression sur la composition chimique de la solution récoltée ne doit toutefois pas être surévaluée. En effet, les succions appliquées (généralement entre 500 et 700 hPa, soit moins de pF 3) ne permettent pas d'accéder à l'eau fortement liée au sol, qui présente les plus fortes minéralisations. Par ailleurs, plus les succions sont élevées, plus les conductivités hydrauliques sont faibles : les solutions retenues par les forces de succion les plus faibles constituent donc la plus grande part des échantillons prélevés. La méthode ne permet donc pas de connaître la composition de la totalité de la solution du sol, mais nous pouvons faire l'hypothèse que les échantillons recueillis sont représentatifs des solutions entraînées par drainage et des solutions absorbées par les végétaux. Une dépression de 600 hPa exercée pendant 24 heures a été retenue dans cette expérimentation. Le même protocole a été utilisé pour tous les prélèvements, afin de diminuer la variabilité des résultats (HANSEN & HARRIS, 1975). Avec cette dépression, environ le tiers du stock hydrique contenu dans le sol après une pluie peut être prélevé par les capteurs.

Des recherches méthodologiques ont permis de définir les perturbations apportées par les capteurs à la répartition des charges hydrauliques dans le sol et de montrer que les échantillons d'eau collectés proviennent d'une sphère dont le diamètre peut atteindre jusqu'à 30 cm, même à des pF de l'ordre de 2,5, lorsque la dépression est maintenue pendant 20 jours (WARRICK & AMOOZEGAR-FARD, 1977 ; VAN DER PLOEG & BEESE, 1977 ; TALSMA *et al.*, 1979). Cette valeur du diamètre de la sphère d'influence semble constituer un maximum, du fait de l'hétérogénéité du sol en place et des temps de dépression

habituellement utilisés (de quelques heures à quelques jours). Il n'en reste pas moins qu'un prélèvement à l'aide d'un capteur intègre un volume de sol qui peut être assez important.

Il est difficile d'estimer la quantité d'eau immobile dans le sol qui est recueillie par les capteurs. Cette quantité a été négligée, en faisant l'hypothèse qu'elle possède la même composition chimique que l'eau mobile contenue dans des pores de dimension analogue. Ce problème n'intervient cependant pas pour évaluer l'alimentation minérale des plantes, la dépression exercée par les racines pouvant être assimilée à celle des capteurs.

1.2. Les problèmes chimiques

Des multiples articles consacrés à l'influence du contact entre la solution extraite et la bougie, deux principaux problèmes ressortent : la libération d'ions par les bougies et l'adsorption de certains ions sur la céramique.

1.2.1. LA LIBÉRATION D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX PAR LES BOUGIES

Lorsque des bougies neuves sont installées, elles peuvent libérer différents ions dont du calcium, du sodium et du potassium. C'est pourquoi GROVER & LAMBORN (1970) ont proposé de faire percoler de l'acide chlorhydrique 1 N à travers les bougies et de les rincer ensuite à l'eau permutée. En opérant de cette façon, la libération ultérieure des ions est considérablement diminuée. Cette méthode permet, de plus, de redonner un comportement de capteurs neufs à des capteurs déjà utilisés au champ (DEBYLE *et al.*, 1988). Elle constitue actuellement la méthode de référence pour la préparation des capteurs en céramique. Tous les capteurs qui ont été utilisés ont séjourné dans l'acide pendant 3 jours, avant d'être rincés à l'eau distillée par aspiration à travers la bougie, jusqu'à égalisation du pH de l'eau recueillie et de l'eau distillée.

1.2.2. L'ADSORPTION DES IONS SUR LA CÉRAMIQUE

1.2.2.1. Cas des nitrates

WAGNER (1962), inventeur du dispositif encore utilisé aujourd'hui, a été le premier à étudier expérimentalement l'adsorption des ions sur les parois des capteurs. En comparant la composition d'une solution de nitrate d'ammonium avant et après le passage à travers la paroi d'un capteur, il a conclu qu'il n'y avait "aucune adsorption mesurable pour l'ion nitrate". Avec une expérimentation voisine, HANSEN & HARRIS (1975), puis ZIMMERMAN *et al.*, (1978) ont confirmé ce résultat. HANSEN & HARRIS (1975) ont tenté une validation au champ, qui a échoué, comme presque toutes celles qui ont suivi, en raison de l'importante variabilité spatiale des teneurs de la solution du sol. JOLIVET & L'HYVER (1980, cités par CHEVERRY, 1983), ont recréé des conditions proches de celles du terrain en implantant des bougies dans du sable pur imprégné de solutions de concentrations connues. Ils conclurent que la composition de la solution récoltée est proche de la solution initiale après l'extraction d'environ 1 litre de solution. CHABALIER (1984), en comparant des résultats obtenus avec des bougies en céramique et avec des

lysimètres, conclut que "la solution prélevée par les capteurs est semblable à celle recueillie dans les lysimètres et peut être considérée comme représentative de la solution de drainage". Ces conclusions s'appliquent également au potassium, au calcium, au magnésium et au sodium.

LEVIN & JACKSON (1977) ont comparé les eaux de drainage, les solutions obtenues à l'aide de fibres creuses et celles obtenues par des capteurs en porcelaine sur des échantillons de sol non perturbés. Les teneurs en nitrates sont plus faibles dans le cas des capteurs ; ils n'en concluent qu'à un "tamisage possible" des nitrates, probablement en raison des concentrations extrêmement faibles des solutions récoltées ($0,005 \text{ mmol.l}^{-1}$). NAGPAL (1982) a ensuite trouvé des concentrations plus faibles en nitrates dans les solutions récoltées, qu'il interprète par un transfert diffusif à une phase immobile le long des parois, donc pas à une réelle adsorption.

ALBERTS *et al.* (1977) sont parvenus à réaliser une validation au champ, en comparant les quantités totales de nitrates sur un profil de sol de 3 mètres d'épaisseur déduites à partir de prélèvements de solution du sol à celles déduites de prélèvements d'échantillons de sol dont les ions nitrates étaient ensuite extraits à l'aide de KCl 1M à la dilution 1/10. Ces auteurs soulignent que la correspondance n'est pas assurée à tous les niveaux de prélèvements, ce qu'ils imputent à la variabilité spatiale. BERNHARD & SCHENK (1986) ont également cherché une correspondance, pour chaque niveau de prélèvement, entre les concentrations en ions nitrates de la solution du sol et celle extraite du sol à l'aide de KCl. Les résultats ont été décevants, en raison d'une dispersion des teneurs également attribuée à la variabilité spatiale. Ils concluent cependant que l'expérimentation "n'a pas permis de déceler un caractère erratique des bougies poreuses".

1.2.2.2. Cas du potassium

TALSMA *et al.* (1979) semblent être les premiers auteurs à avoir étudié le cas du potassium. Dans le cadre d'études pour la fertilisation, ils ont trouvé des teneurs en potassium proches dans les capteurs et dans l'eau du sol lors d'essais au champ. JOLIVET & L'HYVER (*op. cit.*) concluent à une identité des concentrations de potassium après le passage d'environ 1 litre de solution à travers la paroi de la bougie. De même SILKWORTH & GRIGAL (1981), comparant les résultats obtenus au champ avec des capteurs en porcelaine et avec des capteurs en verre fritté, ont obtenu des concentrations de $0,023 \text{ mmol.l}^{-1}$ avec les bougies et de $0,021 \text{ mmol.l}^{-1}$ avec le verre fritté.

Seul NAGPAL (1982) a mis en évidence une adsorption de 0,88 à 1,28 mg K. Lors du premier prélèvement de 250 ml, cette adsorption représente 29 % du potassium qui traverse la bougie pour une concentration initiale de $0,3 \text{ mmol.l}^{-1}$, mais seulement 8 % pour une concentration initiale de $0,8 \text{ mmol.l}^{-1}$. A la quatrième extraction, l'adsorption ne représente respectivement plus que 3 % et 0,6 %.

1.2.2.3. Cas du calcium et du magnésium

Lors de leur étude comparative entre les eaux de drainage, les solutions récoltées à l'aide de fibres creuses et celles obtenues par les capteurs, LEVIN & JACKSON (1977) ont montré une bonne correspondance

entre les trois approches pour des teneurs de $0,12 \text{ mmol.l}^{-1}$ pour le calcium et de $0,04 \text{ mmol.l}^{-1}$ pour le magnésium. SILKWORTH & GRIGAL (1981) ont confirmé ce résultat pour des teneurs respectives de $0,22$ et $0,12 \text{ mmol.l}^{-1}$.

1.2.2.4. Cas de l'ammonium

Dès 1962, WAGNER a montré une fixation d'1 mg d'ammonium sur les parois des bougies. Cette quantité semble uniquement liée aux capteurs : ZIMMERMAN *et al.* (1978) ont montré, à l'aide d'une expérimentation peu différente, une fixation de $0,08 \text{ mmol.l}^{-1}$ d'ammonium pour des concentrations initiales de $0,63$ et $0,31 \text{ mmol.l}^{-1}$.

BERNHARD & SCHENK (1986) ont laissé séjourner des capteurs dans une solution à une concentration donnée. Ils les ont ensuite plongés dans une solution de concentration plus faible et ont appliqué une dépression. Après un prélèvement de 200 ml au cours duquel la concentration de la solution prélevée diminue, la concentration de la solution prélevée se stabilise à une valeur supérieure de $0,03 \text{ mmol.l}^{-1}$ à celle de la solution testée ($0,20 \text{ mmol.l}^{-1}$). Les prélèvements ont été poursuivis jusqu'à un volume de 700 ml. La désorption des ions ammonium semble donc assez lente et les auteurs concluent que la méthode n'est pas adaptée pour étudier l'ion ammonium. A l'inverse de tous ces auteurs, GAUDIN *et al.* (1985), utilisant les capteurs en céramique pour étudier la dynamique de l'ammonium dans des sols de rizière, ne signalent aucun problème méthodologique.

1.2.2.5. Cas du phosphore

GAUDIN *et al.* (1985) notent que la fixation de phosphore sur des bougies en céramique a été indiquée dès 1925 par PARKER. L'étude la plus complète est celle de HANSEN & HARRIS (1975), qui ont montré que jusqu'à 110 mg de phosphore pouvaient s'adsorber sur les capteurs et qu'une désorption ultérieure n'était que partielle. La quantité de phosphore adsorbée est par ailleurs variable selon les conditions opératoires. La différence entre la solution initiale et la solution prélevée est accentuée par un tamisage (*screening*) du phosphore par la bougie. ZIMMERMAN (1978) a obtenu des solutions dont les teneurs étaient de 43 % et 80 % des solutions initiales pour des concentrations initiales de $0,038$ et $0,016 \text{ mmol.l}^{-1}$ de phosphate. NAGPAL a confirmé ces résultats en 1982. L'adsorption du phosphore peut toutefois être atténuée en lavant les capteurs à l'acide avant de les utiliser (GROVER & LAMBORN, 1970).

D'autres auteurs ont obtenu des résultats divergents. LEVIN & JACKSON (1977) ont trouvé une bonne correspondance pour le phosphore entre les eaux de drainage, les solutions collectées à l'aide de fibres creuses et celle prélevées par les bougies en céramique. SILKWORTH & GRIGAL (1981) ont même obtenu des concentrations plus élevées avec des capteurs en céramique qu'avec des capteurs en verre fritté ($0,0023$ contre $0,0014 \text{ mmol.l}^{-1}$).

1.2.2.6. Conclusion sur l'adsorption des ions

Les expérimentations conduites depuis près de trente ans n'ont donc pas permis de mettre en évidence une adsorption des ions nitrate, calcium et magnésium sur les parois en céramique. Pour le potassium, une adsorption d'environ 1 mg semble apparaître avec certains types de bougies. Mais les concentrations des solutions recueillies sont toujours très proches de celles des solutions introduites pour des teneurs supérieures à 0,1 mmol.l⁻¹, du moins après quelques extractions (GROSSMAN & UDLUFT, 1991). Nous ferons donc l'hypothèse que les capteurs de solution permettent de prélever des échantillons représentatifs de la solution du sol pour ces ions.

Des phénomènes d'adsorption importants ont en revanche été démontrés pour le phosphore et l'ion ammonium. C'est pourquoi seule la présence ou l'absence de ces ions dans les solutions récoltées a été recherchée lors de cette étude, sans essayer de réaliser une étude quantitative.

1.3. Conclusion

Le prélèvement de la solution du sol à l'aide de capteurs en céramique semble donc rester actuellement la seule méthode pratique pour étudier la dynamique des éléments minéraux sur le terrain (ALBERTS *et al.*, 1977). Cette méthode ne doit cependant être considérée que comme un moindre mal (CHEVERRY, 1983) et tous les détails du protocole doivent être précisés, en raison de la variabilité des résultats en fonction du mode opératoire (LITAOR, 1988).

2. LE DISPOSITIF DE PRÉLEVEMENT ET LES MÉTHODES D'ANALYSE

2.1. Le dispositif de prélèvement

Les capteurs en céramique poreuse Soil Moisture ont été fixés sur des tubes en PVC à l'aide de résine époxyde selon la méthode décrite par WAGNER (1962). Après lavage à l'acide chlorhydrique, ils ont été conservés dans de l'eau distillée jusqu'à leur mise en place. Sous culture, 64 capteurs ont été implantés entre les lignes de semis, à mi-distance des pieds de maïs ou de niébé, selon le dispositif indiqué dans le chapitre III.

En raison d'une bonne répartition des pluies, les prélèvements ont été réalisés sans interruption pendant 8 à 9 mois consécutifs au cours des deux années d'expérimentation, à raison de deux par mois. Le nombre de prélèvements réussis a été de 19 en 1985 et 17 à 20 (selon la profondeur) en 1986.

Pour le recueil de la solution, deux protocoles ont été successivement utilisés. En première année (1985), une dépression de 600 hPa était appliquée un jour et la solution était récoltée le lendemain. En deuxième année, les modifications suivantes ont été apportées (SARAGONI *et al.*, 1991) :

- mise en dépression l'après-midi (et non le matin) du jour précédant le prélèvement,

- lorsqu'aucune solution ne se trouvait dans le capteur le jour du prélèvement, une nouvelle dépression était appliquée et le recueil de la solution était effectuée le jour même (environ 4 heures plus tard) ou le lendemain.

Le taux de réussite, de 75 % en 1985, a été porté à 90 % en 1986.

2.2. Le dosage des éléments minéraux

2.2.1 LES MÉTHODES UTILISÉES

Après mesure de leur volume au champ, les échantillons recueillis ont été aussitôt transportés au laboratoire et conservés à 4°C. Sur chaque prélèvement, le pH, les teneurs en cations majeurs (Ca^{++} , Mg^{++} et K^+) et en certains anions (NO_3^- et Cl^-) ont été déterminées au laboratoire du Centre ORSTOM de Lomé selon les méthodes exposées chapitre III.

Sur des solutions étalon, les résultats obtenus par le laboratoire de Lomé ont été comparés à ceux du laboratoire IRAT de Montpellier. Les résultats diffèrent de moins de 10 %.

2.2.2 LA VARIABILITÉ DES RÉSULTATS

La précision des analyses réalisées à Lomé a été reportée dans le tableau VIII.1 et les coefficients de variation moyens des teneurs (8 répétitions par traitement et par profondeur) dans le tableau VIII.2 .

TABLEAU VIII.1
Précision analytique moyenne des analyses d'échantillons d'eau (laboratoire ORSTOM de Lomé)

Analyse	Précision analytique moyenne
K^+	$\pm 1\%$ (teneurs $> 0,025 \text{ mmol.l}^{-1}$)
NO_3^-	$\pm 5\%$ (teneurs $> 0,15 \text{ mmol.l}^{-1}$)
Ca^{++} et Mg^{++}	$\pm 15\%$ (appareillage vétuste)
Cl^-	$\pm 2\%$ pour 2 mmol.l^{-1} $\pm 10\%$ pour 1 mmol.l^{-1} (fréquent en profondeur) $\pm 30\%$ pour $< 0,3 \text{ mmol.l}^{-1}$ (fréquent en surface)

Les coefficients de variation de la concentration des différents ions dans la solution sont assez élevés (25 % en moyenne sous culture, 20 % sous sol nu après jachère) et du même ordre de grandeur que les résultats obtenus ailleurs avec une méthodologie comparable (PIERI, 1979 ; GAUDIN *et al.*, 1985). Avec un coefficient de variation de 25 %, il faudrait disposer de 24 capteurs par profondeur pour obtenir une précision de 10 % sur les teneurs au seuil 5 %. Par ailleurs, la variabilité est plus élevée en surface qu'en profondeur et elle est plus forte sur les parcelles cultivées que dans le sol nu après jachère, probablement en raison de l'hétérogénéité introduite par l'apport d'engrais et l'enfouissement des résidus de récolte.

La comparaison pour chaque élément des coefficients de variation et de la précision analytique montre que les erreurs analytiques sont négligeables devant la variabilité spatiale pour K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et NO_3^- , mais qu'elles deviennent importantes pour Cl^- lorsque les teneurs sont faibles.

TABLEAU VIII.2
Coefficients de variation moyens des teneurs des éléments minéraux dans la solution prélevée (en %, 1985 et 1986, tous traitements confondus, d'après SARAGONI et al., 1991)

Profondeurs	NO_3^-		$Ca^{++}-Mg^{++}$		K^+		Cl^-	
	C*	SNJ**	C	SNJ	C	SNJ	C	SNJ
30 cm	31	23	27	18	32	16	22	15
60-120 cm	33	19	29	16	22	16	22	16
180 cm	15	24	20	21	17	23	18	18

* C : Parcelle cultivée (moyenne 1985-1986)

** SNJ : Sol nu après jachère (1986)

3. LE PRINCIPE DES CALCULS

Les teneurs des ions en solution ont été utilisées pour évaluer les quantités d'éléments dans la solution du sol, les pertes par lixiviation et les quantités d'éléments transportées jusqu'aux racines par *mass-flow*.

3.1. Evaluation des quantités d'éléments en solution

Pour évaluer les quantités d'éléments en solution, les teneurs mesurées à 30 cm, 60 cm et 120 cm ont été considérées comme représentatives des teneurs moyennes dans les tranches de sol 0-45 cm, 45-90 cm et 90-150 cm. Les quantités ont été calculés pour chaque date de prélèvement en multipliant ces teneurs par le stock d'eau contenu dans chaque tranche de sol, à partir des mesures réalisées à l'aide des humidimètres à neutrons. Ces quantités ne sont que des évaluations, car les teneurs ne sont pas constantes dans chaque tranche de sol, en particulier en surface, et toute l'eau contenue dans le sol ne présente pas la même teneur.

3.2. Evaluation des pertes par lixiviation

Les pertes par lixiviation à la base du profil (hors de la zone d'extraction racinaire) d'un élément i sont :

$$q_i = -\theta \times D_i \times \frac{\partial C_i}{\partial z} + q_w \times C_i$$

q_i : pertes par lixiviation
 θ : section efficace (fraction du volume du sol occupé par la solution)
 D_i : coefficient de dispersion
 z : profondeur
 q_w : flux hydrique (drainage)
 C_i : teneur de l'élément i

Le premier terme de l'équation correspond à la dispersion hydrodynamique (diffusion moléculaire et dispersion liée à la géométrie des pores), le second à la convection. A la base du profil, les concentrations

varient peu en fonction de la profondeur. Nous ferons l'hypothèse que le terme correspondant à la dispersion hydrodynamique est négligeable devant le terme convectif.

La lixiviation a été prise égale au produit du flux de drainage et des concentrations. Les concentrations retenues sont celles mesurées à 180 cm, considérées représentatives des teneurs à 150 cm. Pour les deux années au cours desquelles des mesures de terrain ont été réalisées, l'estimation des pertes par lixiviation a été effectuée en considérant que les concentrations étaient constantes sur la moitié de l'intervalle de temps qui sépare deux prélèvements successifs. Le drainage a été calculé à partir des valeurs journalières obtenues en utilisant la loi de Darcy. Pour les années au cours desquelles aucune mesure de terrain n'était disponible, le calcul de la lixiviation a été réalisé sur une base de temps annuelle. Le drainage dans la parcelle N2 P1 K2 a été estimé à l'aide du modèle BIPTOGO (chapitre VII). Pour la parcelle N2 P1 K0, le drainage a été estimé par rapport à celui de la parcelle N2 P1 K2 : au cours des années 1985 et 1986, le drainage en N2 P1 K0 a été, pour chaque saison de culture (janvier à juillet et août à décembre), supérieur de 15 à 22 % à celui mesuré en N2 P1 K2. Le drainage moyen en N2 P1 K0 a été pris supérieur de 18 % à celui estimé en N2 P1 K2 pour l'ensemble de la période de l'étude. Les concentrations moyennes annuelles ont été estimées en fonction des valeurs obtenues au cours des deux années d'expérimentation (chapitre IX).

Etant donné l'imprécision sur les mesures de drainage et les approximations effectuées tant sur les teneurs que sur la valeur du drainage en N2 P1 K0, la précision sur l'estimation des quantités d'éléments minéraux perdues par lixiviation est faible.

3.3. Evaluation des quantités d'éléments minéraux transportées jusqu'aux racines par mass-flow

Pour une racine à une profondeur donnée, l'absorption d'un élément i est donné par :

$$\phi_i = -\theta \times D_i \times \frac{\partial C_i}{\partial r} + q_w \times C_i$$

ϕ_i : absorption racinaire
 θ : section efficace (fraction du volume du sol occupé par la solution)
 D_i : coefficient de dispersion
 q_w : flux hydrique vers la racine
 C_i : teneur de l'élément i
 r : distance à la racine

Comme pour la lixiviation, le premier terme correspond à la dispersion hydrodynamique et le second à la convection. Il est difficile d'évaluer le terme dispersif dans le sol, en raison de l'imprécision avec laquelle sont connus les différents paramètres. C'est pourquoi seul le terme convectif a été calculé, le terme dispersif étant évalué par différence. Pour éviter toute confusion avec les transferts d'énergie, les transferts d'éléments par convection ont été appelés *mass-flow*, pour reprendre la terminologie introduite par BARBER (1962).

Pour évaluer le *mass-flow* de chaque ion, il a été admis que les racines de maïs ne prélevaient les éléments minéraux que dans la couche 0-45 cm. C'est une hypothèse simplificatrice imposée par l'impossibilité de quantifier la participation de chaque tranche de sol à l'évapotranspiration du couvert et qui se justifie par la répartition des racines dans le profil et par les profils tensiométriques obtenus. Cette hypothèse conduit à

des évaluations des apports par *mass-flow* par excès, car les teneurs des éléments minéraux diminuent en fonction de la profondeur dans les parcelles cultivées. Il a également été considéré, comme pour le calcul des quantités d'éléments en solution, que la teneur mesurée à 30 cm était représentative de la couche 0-45 cm. Le calcul des quantités d'éléments transportés au contact des racines par *mass-flow* a été effectué en considérant qu'un prélèvement à un temps t_i était représentatif de la concentration moyenne de la solution du sol sur la période comprise entre $(t_i - t_{i-1})/2$ et $(t_i + t_{i+1})/2$. La concentration a été multipliée par la quantité d'eau évaporée par le couvert au cours de cette période. Comme seule la transpiration de la plante doit être prise en compte pour calculer le *mass-flow*, mais qu'il est impossible de faire la part de l'évaporation de la surface du sol et de la transpiration de la plante dans le total évapotranspiré, les calculs ont été réalisés en envisageant deux hypothèses. Dans l'hypothèse appelée maximale, toute l'ETR provient de la transpiration de la plante. Dans l'hypothèse appelée minimale, il a été considéré que le sol continuait à évaporer la même quantité d'eau sous un couvert de maïs que s'il était resté nu : la quantité d'eau transpirée par la plante a été calculée par différence entre l'ETR et l'évaporation du sol nu mesurée sur les parcelles nues. Le calcul des quantités minimales n'a pu être réalisé que pour l'année 1986, au cours de laquelle les parcelles nues et cultivées ont été étudiées simultanément.

L'analyse des problèmes posés par le prélèvement de la solution du sol par les bougies poreuses a permis de définir un protocole pour recueillir des échantillons d'eau qui soient le plus représentatifs possible des solutions qui percolent en profondeur et qui sont au contact des racines du maïs. Le chapitre suivant est consacré à l'étude des transferts des éléments contenus dans ces solutions et à celle des relations qui existent entre les différents éléments en solution.

CHAPITRE IX

LA DYNAMIQUE DES IONS EN SOLUTION

Le premier objectif de ce chapitre est de décrire la dynamique du potassium, des nitrates, du calcium et du magnésium présents dans la solution du sol, en cherchant à comprendre les interactions entre ces ions et la phase solide du sol d'une part, et entre les différents ions d'autre part. Ces points sont abordés par éléments dans les trois premiers paragraphes. Le deuxième objectif est de définir l'importance relative du *mass-flow* et de la diffusion dans le transport des ions au contact des racines. C'est l'objet du quatrième paragraphe. Certains résultats présentés ici ont déjà été publiés (SARAGONI *et al.*, 1991).

1. LA DYNAMIQUE DU POTASSIUM

1.1. Les données des capteurs de solution

Dans les parcelles nues, la quantité de potassium en solution ne varie que de quelques kilogrammes à l'hectare entre le mois d'avril et le mois de décembre (figure IX.1). Elle décroît progressivement au cours de la première saison des pluies et de la petite saison sèche et augmente ensuite d'un peu plus d'un kilogramme à l'hectare au début de la deuxième saison des pluies. Les variations sont ensuite inférieures à 1 kilogramme à l'hectare jusqu'à la fin de l'année. Les quantités de potassium en solution sont très proches dans la parcelle fertilisée en potassium et celle qui ne l'est pas, malgré des apports de 37 kg K.ha⁻¹ sur la parcelle K2 en mars, avril, août et octobre. La pénétration de l'engrais potassique dans le sol est attestée par la croissance des teneurs en chlorures après chaque apport (figure IX.2).

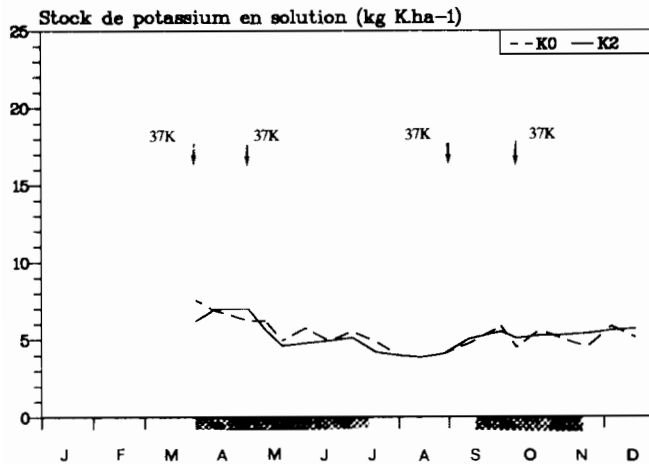


FIGURE IX.1
Evolution de la quantité de potassium en solution au cours du temps dans les parcelles nues (0-150 cm, année 1986, apports en kg K.ha⁻¹)

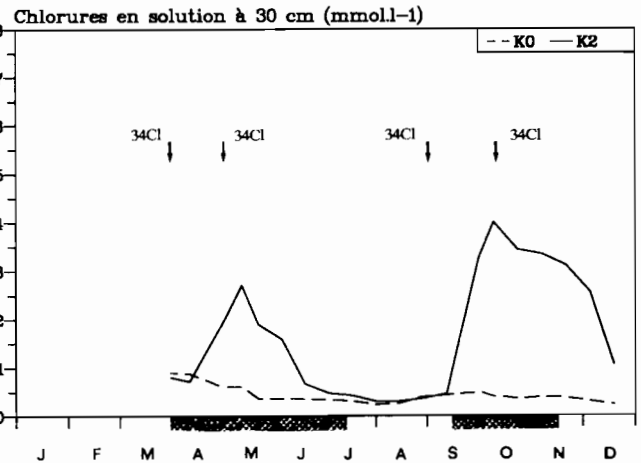


FIGURE IX.2
Evolution des teneurs en chlorures en solution au cours du temps dans les parcelles nues (profondeur 30 cm, année 1986)

Dans la parcelle cultivée sans engrais potassique, la variation de quantité sur les années 1985 et 1986 n'est que de 3,5 kg K.ha⁻¹ (figure IX.3). Les valeurs maximales sont atteintes au début des saisons des pluies en septembre 1985, avril 1986 et septembre-octobre 1986. Dans la parcelle fertilisée en potassium, une augmentation de 5 kg K.ha⁻¹ apparaît également entre décembre 1985 et mars 1986, en l'absence de tout apport d'engrais. Les apports d'engrais produisent une augmentation de la quantité de potassium en solution, mais cette augmentation est beaucoup plus faible que la quantité d'engrais apportée. La différence constatée ne peut être imputée à la consommation du maïs, car en septembre 1985, avril 1986 et septembre 1986 l'apport a été effectué lors du semis du maïs.

Les quantités de potassium contenues à la maturité dans la culture de maïs (110 kg K.ha⁻¹ en première saison et 80 kg K.ha⁻¹ en deuxième pour la parcelle fertilisée) sont beaucoup plus élevées que les variations des quantités de potassium en solution constatées au cours des périodes de croissance de la plante.

A 180 cm, les teneurs en potassium dans les parcelles cultivées sont plus élevées dans la parcelle fertilisée que dans la parcelle sans fertilisation, mais les teneurs sont toujours inférieures à 0,15 mmol.l⁻¹ (figure IX.4). L'apport d'engrais en surface provoque des augmentations de teneurs de faible amplitude en profondeur. En utilisant des données obtenues à l'aide de lysimètres sous des cultures annuelles en milieu tropical, VALENTIN (1980) a également montré que la diminution des quantités de potassium des horizons supérieurs était inférieure à la quantité drainée en profondeur et PIERI (1982), puis GODON, (1985) ont observé que les teneurs en potassium varient peu en-dessous de la zone d'extraction racinaire.

1.2. Les données des isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption ont été établis selon la procédure de BECKETT (1964) par OLIVER (laboratoire IRAT/CIRAD de Montpellier). Les expérimentations ont porté sur les horizons de surface (0-15 cm) de 3 parcelles de l'essai étudié (N0 P0 K0, N2 P2 K0 et N0 P0 K2). Le protocole consiste à réaliser un équilibre sol-solution (rapport 1/10) contenant 1,0 mmol.l⁻¹ de calcium (CaCl₂) et 0,5 mmol.l⁻¹ de magnésium (MgCl₂) en présence de quantités croissantes de potassium (0 à 3,8 mmol.l⁻¹ de K sous forme de KCl). Les concentrations de calcium et de magnésium choisies sont 20 fois plus faibles que celles préconisées par BECKETT afin de se rapprocher des teneurs mesurées dans la solution du sol. La quantité de potassium fixée sur le complexe d'échange ou libérée est déduite de la différence entre les teneurs dans la solution initiale et les teneurs dans la solution à l'équilibre.

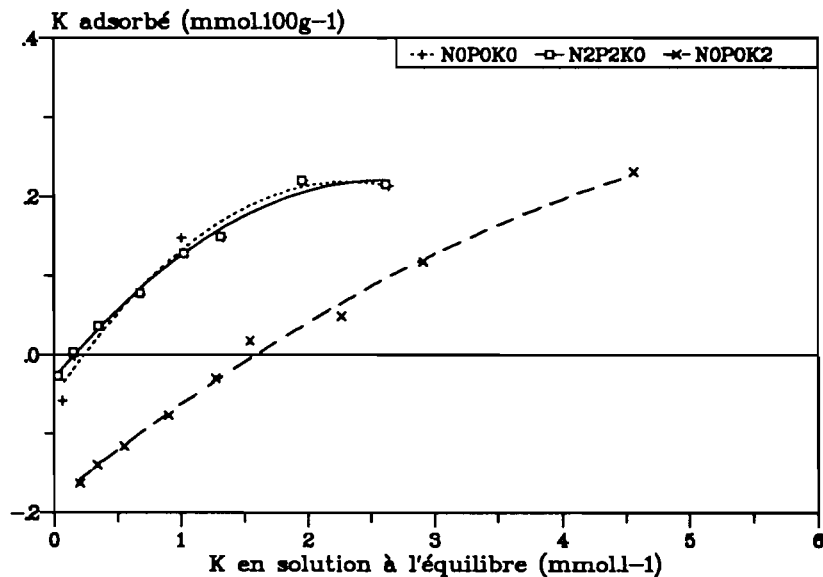


FIGURE IX.5

Isothermes d'adsorption du potassium selon la procédure de BECKETT (analyses R. OLIVER, IRAT/CIRAD)

Les résultats obtenus (figure IX.5) indiquent un comportement identique pour les deux parcelles non fertilisées en potassium. Le point d'équilibre (intersection de la courbe avec l'axe des abscisses) est de 0,16 mmol.l⁻¹ pour le traitement N0 P0 K0 et 0,12 mmol.l⁻¹ pour le traitement N2 P2 K0. Cette valeur du point d'équilibre des horizons de surface des terres de Barre, sans fertilisation potassique, est la plus faible de toutes celles mesurées sur une vingtaine de sols africains différents (PIERI & OLIVER, 1986). Bien que l'expérimentation ait été réalisée en utilisant des concentrations en calcium et magnésium proches de celles de la solution du sol, les teneurs en potassium à l'équilibre sont environ 5 fois plus élevées que les teneurs mesurées dans le sol. Le pouvoir tampon à l'équilibre est proche dans les deux cas : respectivement de 0,28 mmol.100g⁻¹ et de 0,24 mmol.100g⁻¹ par mmol.l⁻¹ de variation pour les parcelles N0 P0 K0 et N2 P2 K0.

Les valeurs mesurées par PIERI & OLIVER (1986) sur d'autres échantillons de terres de Barre se situent dans la moyenne de celles obtenues sur l'ensemble des sols africains étudiés.

La teneur à l'équilibre de l'échantillon de la parcelle fertilisée en potassium (N0 P0 K2) est près de 10 fois plus élevée ($1,5 \text{ mmol.l}^{-1}$) que celle des échantillons des deux autres parcelles. Le pouvoir tampon est légèrement plus faible ($0,12 \text{ mmol.100g}^{-1}$ par mmol.l^{-1} de variation).

1.3. Interprétation

La quantité moyenne de potassium en solution au champ n'est que de quelques kilogrammes à l'hectare, en raison des très faibles teneurs en potassium au point d'équilibre. Lorsque des engrais potassiques sont apportés, la plus grande partie du potassium est fixée sur le complexe (pouvoir tampon) et la concentration de la solution n'est que peu augmentée. Il en résulte que la concentration en potassium de la solution du sol est faible en surface, quelle que soit la fertilisation. Les solutions qui percolent en profondeur ne comportent donc que des teneurs réduites en potassium. Les teneurs à 180 cm sont cependant plus élevées sur la parcelle fertilisée en potassium que sur celle non fertilisée, car les teneurs au point d'équilibre sont plus élevées en présence de fertilisation potassique.

Pour une légère variation de teneur du potassium en solution, des quantités importantes sont fixées ou libérées par le complexe d'échange du sol. Est-il possible, dans ces conditions, de les évaluer en mesurant la composition de la solution du sol et en utilisant la procédure de BECKETT ? Dans l'état actuel des connaissances, cette évaluation ne peut être réalisée pour les raisons suivantes :

- les concentrations dans la solution du sol sont beaucoup plus faibles que celles obtenues à l'aide de la procédure de Beckett, même avec des concentrations en calcium et en magnésium proches de celles mesurées au champ ;
- les isothermes évoluent au cours du temps en fonction des traitements agronomiques ;
- les courbes sont établies pour des teneurs en calcium et en magnésium données, alors que ces teneurs évoluent au cours du temps dans le sol.

Les variations des teneurs du potassium en solution ne permettent donc pas de prévoir les quantités de potassium libérées ou fixées sur le complexe.

Lors des premières pluies, les résidus de la culture précédente se décomposent et libèrent une partie du potassium qu'ils contiennent. Ce mécanisme peut expliquer les augmentations de teneurs en solution qui sont alors observées au début de chaque saison des pluies. Mais il est également possible que du potassium non échangeable passe sous forme échangeable sous l'effet des alternances d'humectation et de dessiccation (chapitre X).

2. LA DYNAMIQUE DES NITRATES

2.1. Les données des capteurs de solution

Les parcelles nues ont été défrichées au cours du mois de mars 1986, juste avant le début de la saison des pluies. Du mois d'avril au mois de juin, la quantité de nitrates en solution augmente de 123 kg N.ha^{-1} . Au cours de la petite saison sèche (juillet, août et début septembre), elle diminue de 57 kg N.ha^{-1} . Cette diminution ne peut être liée à la lixiviation, car le drainage est alors très faible. Dès le début de la deuxième saison des pluies, la quantité de nitrates augmente de nouveau ; elle atteint près de 200 kg N.ha^{-1} en octobre. Les quatre apports d'urée effectués au cours de l'année n'ont apparemment aucun effet sur les quantités de nitrates en solution.

Les teneurs à 120 et 180 cm augmentent pendant toute l'année (figure IX.7). A 120 cm, la teneur évolue de $0,5 \text{ mmol.l}^{-1}$ au moment de la défriche à $5,3 \text{ mmol.l}^{-1}$ à la fin de l'année.

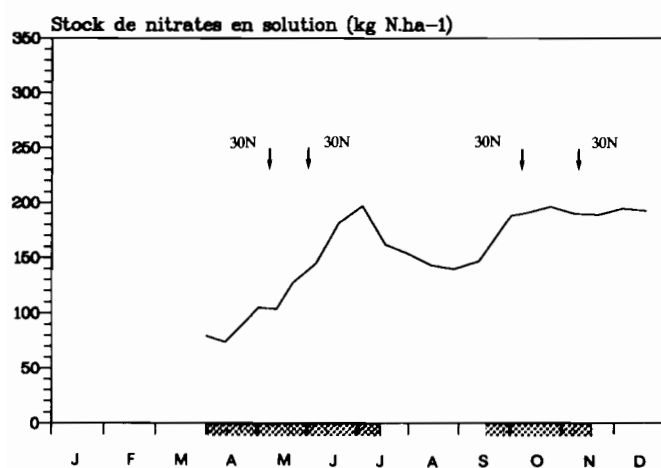


FIGURE IX.6
Evolution de la quantité de nitrates en solution au cours du temps dans les parcelles nues (0-150 cm, année 1986)

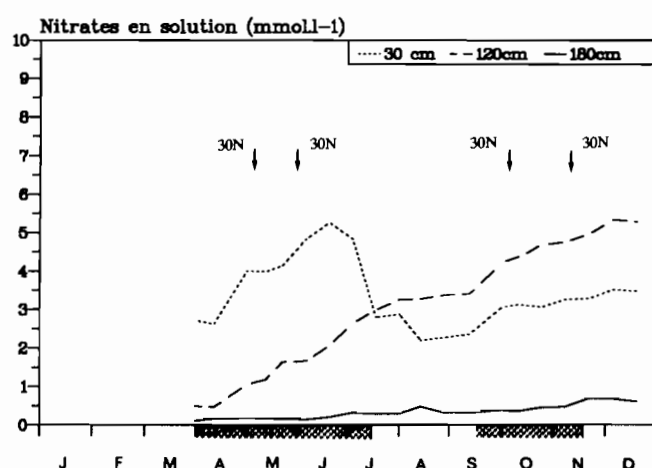


FIGURE IX.7
Evolution des teneurs de nitrates en solution au cours du temps dans les parcelles nues (année 1986)

Dans les parcelles cultivées, les évolutions des quantités de nitrates en solution de la parcelle N2 P1 K0 et de la parcelle N2 P1 K2 présentent de grandes similitudes (figure IX.8). Au cours des deux années étudiées, un accroissement de la quantité de nitrates apparaît au début de chaque saison des pluies (avril et octobre). Cet accroissement est plus marqué lors de la première saison que lors de la deuxième. En 1985, un troisième accroissement est également apparu au mois d'août. Ces augmentations ne semblent pas directement liées aux apports d'urée :

- aucun apport n'a été effectué en août 1985 ;
- l'augmentation d'avril 1986 s'est produite avant tout apport ;
- l'apport de mai 1986 n'a pas produit d'augmentation des quantités de nitrates, alors que le drainage entre deux prélèvements successifs a été inférieur à 10 mm dans les deux parcelles et que le maïs était âgé de moins d'un mois (faible absorption d'azote) ;

- l'apport de novembre 1986 correspond à une diminution de la quantité de nitrates dans les deux parcelles, alors que le drainage est nul et que la consommation du maïs sur la parcelle N2 P1 K0 est seulement de 16 kg N.ha⁻¹ pour l'ensemble du cycle.

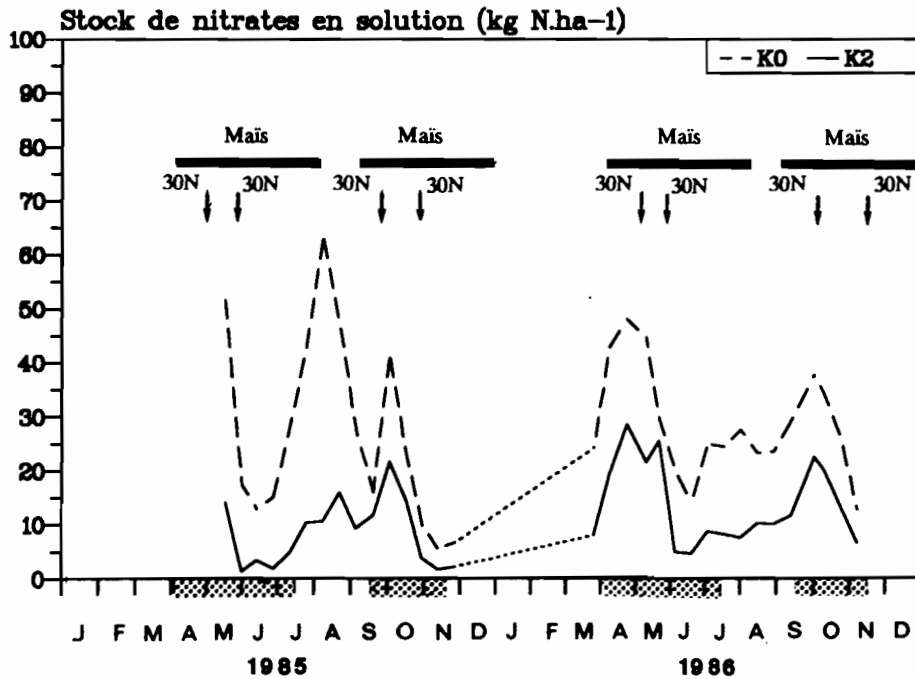


FIGURE IX.8

Evolution de la quantité de nitrates en solution au cours du temps dans les parcelles cultivées (0-90 cm, années 1985 et 1986)

Les quantités les plus faibles sont également apparues aux mêmes époques en 1985 et en 1986 : en juin et en novembre, périodes au cours desquelles le maïs est en fleur. Au cours de ces périodes, la quantité de nitrates dans les horizons prospectés par les racines (0-90 cm) est inférieure à 5 kg N.ha⁻¹ dans la parcelle N2 P1 K2. Elle est alors près de 5 fois plus élevée dans la parcelle N2 P1 K0.

Les teneurs en nitrates diffèrent entre les parcelles cultivées N2 P1 K0 et N2 P1 K2 (figures IX.9 et IX.10). A 30 cm, les teneurs maximales sont environ deux fois plus fortes en N2 P1 K0 qu'en N2 P1 K2. A 180 cm, cet ordre de grandeur subsiste pendant toute la période d'étude. Dans les deux cas, les teneurs moyennes à 180 cm sont proches des valeurs maximales relevées à 30 cm.

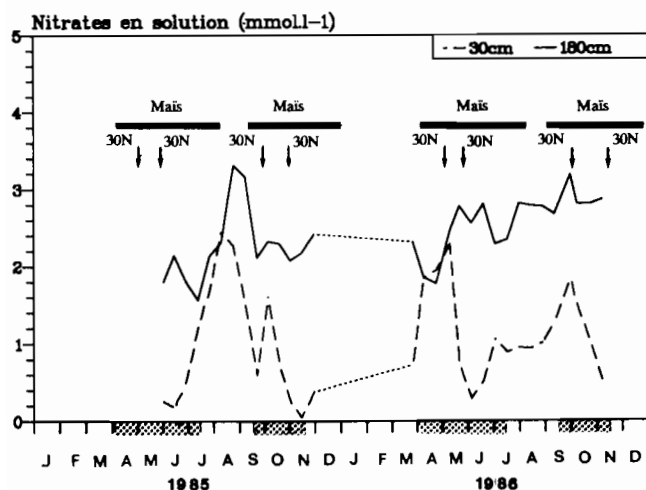


FIGURE IX.9
Evolution des teneurs de nitrates en solution au cours du temps dans la parcelle N2 P1 K0 (années 1985 et 1986)

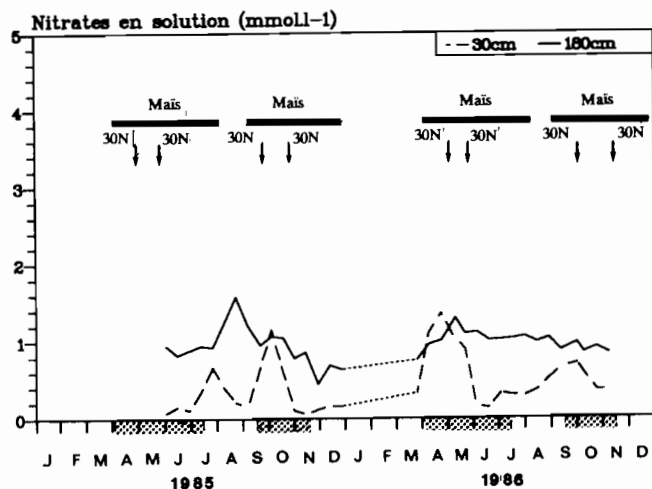


FIGURE IX.10
Evolution des teneurs de nitrates en solution au cours du temps dans la parcelle N2 P1 K2 (années 1985 et 1986)

2.2. Interprétation

L'accroissement de la quantité de nitrates observé en début de saison des pluies correspond au pic de minéralisation qui apparaît systématiquement sous les climats tropicaux (BLONDEL, 1971 ; GIGOU, 1982 ; GIGOU & CHABALIER, 1987 ; GANRY, 1990). Pendant toute la première saison des pluies, l'augmentation de la quantité de nitrates dans les parcelles nues prouve que la minéralisation n'est pas limitée aux premiers jours de la saison des pluies, mais qu'elle se poursuit pendant plusieurs mois. Dans les parcelles cultivées, la quantité de nitrates en solution passe au contraire par un minimum en juin et en octobre. Cette évolution est liée aux prélèvements par le maïs : les besoins de la plante sont maximaux au moment de la floraison. A 30 cm, les prélèvements racinaires abaissent les teneurs jusqu'à moins de 0,1 mmol.l⁻¹, même dans la parcelle N2 P1 K0. Le pic observé en août 1985 sur les parcelles cultivées est probablement dû à une minéralisation liée à des pluies survenues au cours de cette petite saison sèche.

La quantité de nitrates diminuant de près de 50 kg N.ha⁻¹ sur les parcelles nues entre juillet et septembre 1986 alors que le drainage est très faible, la réorganisation des nitrates par les micro-organismes ou la matière organique domine au cours de la petite saison sèche. Le phénomène est moins net dans les parcelles cultivées, car la quantité de nitrates est plus faible.

L'apport d'urée ne semble pas entraîner d'augmentation des nitrates en solution dans la saison des pluies qui suit son application : une partie doit être rapidement organisée par les micro-organismes et une autre partie absorbée par le maïs, dans le cas des parcelles cultivées. Mais l'effet de la fertilisation azotée se manifeste lors du pic de minéralisation de la saison des pluies suivante. En effet, le bilan sur une année entre les apports sous forme d'engrais et les exportations dans les grains est excédentaire de 90 kg N.ha⁻¹ pour la parcelle N2 P1 K0 contre 30 kg N.ha⁻¹ pour la parcelle N2 P1 K2. Ce bilan est un des éléments qui

expliquent les teneurs en nitrates plus élevées dans la parcelle N2 P1 K0 que dans la parcelle N2 P1 K2 lors de chaque pic de minéralisation. La décomposition de plus fortes quantités de résidus végétaux à C/N élevé sur la parcelle N2 P1 K2 que sur la parcelle N2 P1 K0 peut également contribuer à diminuer les teneurs dans la parcelle N2 P1 K2. Ces nitrates sont ensuite entraînés en profondeur, ce qui explique les teneurs plus élevées relevées à 180 cm dans la parcelle N2 P1 K0 par rapport à la parcelle N2 P1 K2. *La carence potassique provoque donc l'augmentation des teneurs en nitrates à 180 cm en réduisant les quantités d'azote exportées par les grains du maïs.*

Dans la parcelle nue, les teneurs en nitrates sont faibles sur tout le profil juste après la défriche, car le système racinaire de la jachère, très développé, exploitait le sol jusqu'à plus de 3 mètres. A la défriche, les nitrates sont entraînés en profondeur, ce qui provoque une augmentation des teneurs dans les horizons profonds. Les teneurs à 120 cm dépassent même les teneurs à 30 cm à la fin de l'année, car les nitrates produits par la décomposition des racines profondes s'ajoutent à ceux qui sont apportés par lixiviation.

3. LA DYNAMIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM

3.1. Les données des capteurs de solution

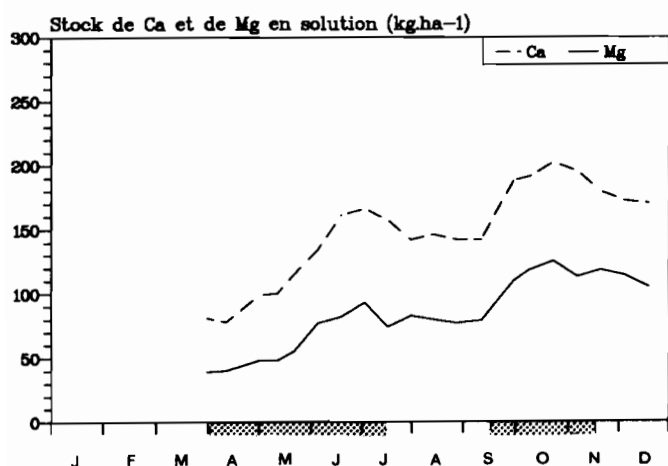


FIGURE IX.11
Evolution des quantités de calcium et de magnésium en solution au cours du temps dans les parcelles nues (0-150 cm, année 1986)

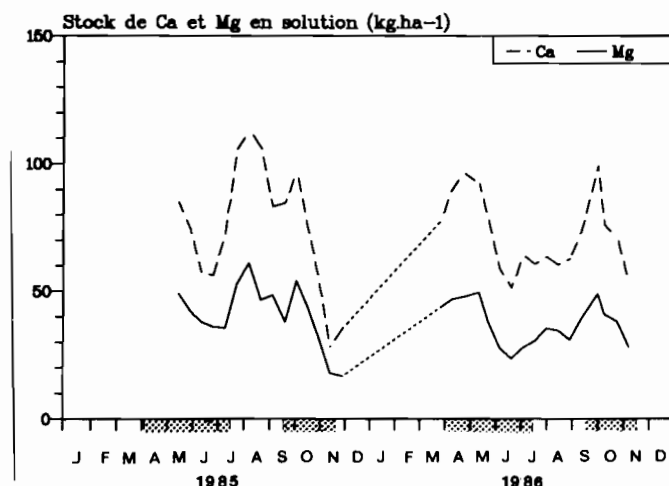


FIGURE IX.12
Evolution des quantités de calcium et de magnésium en solution au cours du temps dans la parcelle cultivée N2 P1 K0 (0-150 cm, années 1985 et 1986)

Après la défriche de la jachère, les quantités de calcium et de magnésium en solution évoluent de manière identique dans les parcelles nues au cours de la première année (figure IX.11). La quantité de calcium en solution augmente de 85 kg Ca·ha⁻¹ et celle de magnésium de 54 kg Mg·ha⁻¹ pendant la première saison des pluies. Au cours de la même période, la quantité de nitrates augmente de 123 kg N·ha⁻¹. Comme la matière

organique contient environ 6 fois plus d'azote que de calcium et 10 fois plus d'azote que de magnésium, les augmentations constatées ne peuvent pas provenir de sa décomposition.

Dans les parcelles cultivées, les quantités de calcium et de magnésium en solution varient de plusieurs dizaines de kilogrammes à l'hectare par an ; le sens des évolutions est identique pour les deux ions (figure IX.12). A la fin de la deuxième saison des pluies de 1985, la quantité de calcium a diminué de 62 kg Ca.ha⁻¹ dans la parcelle N2 P1 K0. Dans le même temps, le prélèvement du maïs a été de 10 kg Ca.ha⁻¹ et la lixiviation de 24 kg Ca.ha⁻¹. Environ 28 kg Ca.ha⁻¹ ont donc été retirés de la solution du sol indépendamment des prélèvements effectués par le maïs et de la lixiviation.

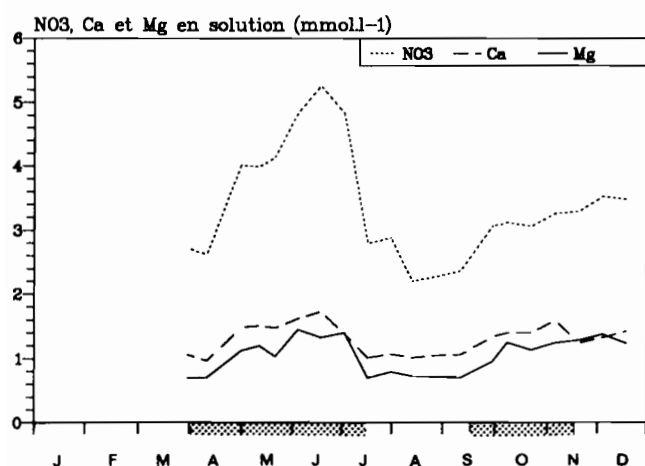


FIGURE IX.13
Evolution des teneurs en calcium, en magnésium et en nitrates au cours du temps dans les parcelles nues (30 cm, année 1986)

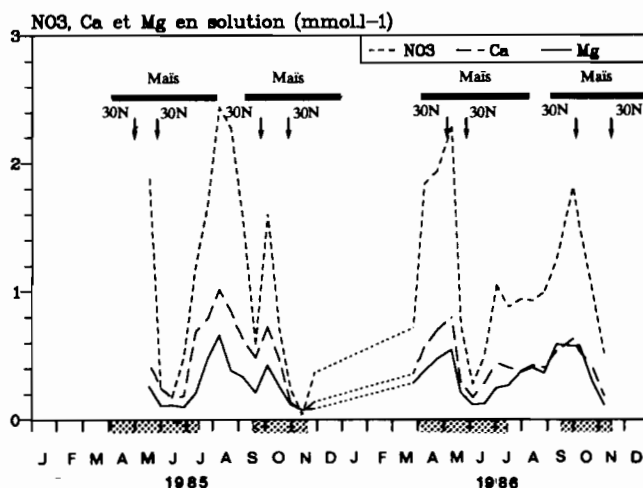


FIGURE IX.14
Evolution des teneurs en calcium, en magnésium et en nitrates au cours du temps dans la parcelle cultivée N2 P1 K0 (30 cm, années 1985 et 1986)

Les teneurs en calcium et en magnésium à 30 cm évoluent de manière identique aux concentrations en azote nitrique, que ce soit dans les parcelles nues (figure IX.13) ou dans les parcelles cultivées (figure IX.14). Dans les parcelles N2 P1 K0, la matrice des corrélations (tableau IX.1) indique une liaison étroite entre les teneurs en calcium et les teneurs en magnésium, ainsi qu'une liaison entre les teneurs de ces ions et celles des nitrates. Les corrélations sont faibles sur ces parcelles entre les teneurs en calcium et en magnésium et celles en chlorures. Dans les parcelles N2 P1 K2, des corrélations nettes apparaissent également entre le calcium, le magnésium et les nitrates (tableau IX.2). Mais dans ces parcelles, les teneurs en calcium et en magnésium sont aussi corrélées à celles des chlorures.

TABLEAU IX.1
Matrice des corrélations entre les teneurs des ions en solution dans les parcelles N2 P1 K0 à 30 cm (n = 51)

	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻
NO ₃ ⁻	1,00			
Ca ⁺⁺	0,95	1,00		
Mg ⁺⁺	0,91	0,94	1,00	
Cl ⁻	0,14	0,20	0,07	1,00

TABLEAU IX.2
Matrice des corrélations entre les teneurs des ions en solution dans les parcelles N2 P1 K2 à 30 cm (n = 34)

	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻
NO ₃ ⁻	1,00			
Ca ⁺⁺	0,81	1,00		
Mg ⁺⁺	0,82	0,95	1,00	
Cl ⁻	0,36	0,52	0,65	1,00

Les équations des régressions linéaires (calculées en mél.l^{-1}) entre les différents ions à 30 cm sont les suivantes :

- relations entre les teneurs en calcium et en magnésium

Parcelles N2 P1 K0 $[\text{Mg}] = 0,74 (\pm 0,04) [\text{Ca}] - 0,03 (\pm 0,23)$
 $r = 0,94$ pour $n = 51$

Parcelles N2 P1 K2 $[\text{Mg}] = 0,70 (\pm 0,04) [\text{Ca}] - 0,01 (\pm 0,08)$
 $r = 0,95$ pour $n = 34$

- relations entre les teneurs en nitrates et les teneurs en calcium et en magnésium

Parcelles N2 P1 K0 $[\text{Ca} + \text{Mg}] = 1,06 (\pm 0,05) [\text{NO}_3] + 0,50 (\pm 0,48)$
 $r = 0,95$ pour $n = 51$

Parcelles N2 P1 K2 $[\text{Ca} + \text{Mg}] = 1,14 (\pm 0,15) [\text{NO}_3] + 0,71 (\pm 0,20) [\text{Cl}] + 0,07 (\pm 0,23)$
 $r = 0,88$ pour $n = 34$

Ces relations sont proches de celles déjà publiées dans des zones climatiques comparables (PIERI, 1979).

TABLEAU IX.3
 Matrice des corrélations entre les teneurs des ions en solution dans les parcelles N2 P1 K2 à 180 cm ($n = 35$)

	NO_3^-	Ca^{++}	Mg^{++}	Cl^-
NO_3^-	1,00			
Ca^{++}	-0,08	1,00		
Mg^{++}	-0,03	0,70	1,00	
Cl^-	-0,41	0,68	0,54	1,00

A 180 cm, les teneurs en calcium (et également en magnésium) sont plus élevées dans les parcelles N2 P1 K0 que dans les parcelles N2 P1 K2 (figure IX.15). Par ailleurs, les variations des teneurs en nitrates ne sont plus semblables à celles des teneurs en calcium. Les corrélations entre les

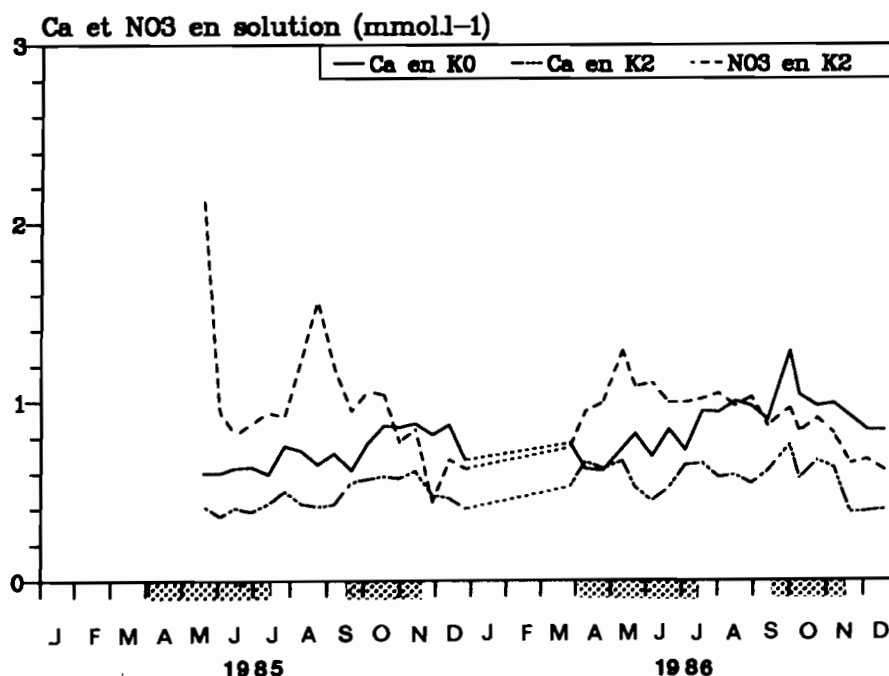


FIGURE IX.15
 Evolution, au cours du temps, des teneurs en calcium et en nitrates en solution à 180 cm dans les parcelles cultivées (années 1985 et 1986)

teneurs en calcium et en magnésium sont nettes, bien que le coefficient de corrélation soit plus faible qu'en surface (tableau IX.3). Pour les parcelles N2 P1 K2 la corrélation entre le calcium, le magnésium et les chlorures est également nette. Mais aucune corrélation n'existe entre les teneurs en nitrates et celles en calcium ou en magnésium.

3.2. Interprétation

Comme les variations des quantités de calcium et de magnésium en solution sont supérieures aux quantités lixiviées et aux quantités absorbées par les plantes au cours de la même période, des ions calcium et magnésium sont échangés avec le complexe au cours de l'année. La liaison étroite qui existe entre les teneurs en calcium et en magnésium à 30 cm dans toutes les parcelles, déjà mise en évidence en Côte d'Ivoire (CHABALIER, 1984), peut être interprétée par une compétition entre ces deux ions et d'autres cations au niveau des sites d'échange du sol. Quels que soient les cations qui se fixent sur le complexe, la proportion entre les ions calcium et les ions magnésium qui passent en solution reste constante. Il semble que le magnésium est plus facilement libéré que le calcium : la proportion de magnésium est plus élevée dans la solution du sol que sur le complexe (estimation réalisée à partir des quantités échangeables).

Dans les parcelles N2 P1 K0, l'accroissement des teneurs en nitrates de la solution s'accompagne d'une augmentation des teneurs en calcium et de magnésium ; les diminutions des teneurs sont également simultanées. Les mécanismes qui interviennent ne sont pas clairement élucidés. Il est certain que la transformation de l'urée en nitrates produit des protons qui, en se fixant sur le complexe, provoquent la mise en solution d'ions calcium et magnésium (PIERI, 1979). Mais la plus grande partie de la production de nitrates s'effectue dès les premières pluies, avant tout apport d'engrais. De plus, les apports d'urée ne semblent pas produire d'augmentation des teneurs en nitrates. Enfin, la libération de protons devrait produire une acidification de la solution du sol en début de saison des pluies : aucune acidification n'a été mise en évidence. La diminution simultanée des teneurs en calcium, en magnésium et en nitrates est également difficile à expliquer ainsi. Les régressions entre $[Ca + Mg]$ et $[NO_3]$ ayant des pentes constantes en N2 P1 K0 et en N2 P1 K2, les transformations des composés azotés qui donnent naissance aux ions nitrates doivent produire des quantités de cations égales à celles qui conduisent à la disparition des nitrates. Bien que les pentes des régressions soient proches de l'unité, le nombre d'équivalents de cations libérés ou absorbés par ion nitrate transformé n'est d'ailleurs pas égal à un, en raison du pouvoir tampon du sol.

Dans les parcelles N2 P1 K2, les teneurs des ions chlorures sont également liées à celles des ions calcium et magnésium. Il est probable que les ions potassium apportés simultanément dans l'engrais produisent la mise en solution des ions calcium et magnésium en se fixant sur le complexe. Mais comme presque tout le potassium se fixe, les corrélations entre les teneurs en solution ne sont nettes qu'avec les chlorures, qui restent en solution.

A 180 cm, les corrélations entre les teneurs en nitrates et les teneurs en calcium et en magnésium disparaissent. Au cours de leur transfert à travers le sol, les nitrates sont absorbés par les plantes. Les

teneurs en nitrates sont d'ailleurs extrêmement faibles dans la zone d'extraction racinaire au moment de la floraison. Le calcium et le magnésium sont en revanche beaucoup moins absorbés par la plante.

4. LES MÉCANISMES D'ABSORPTION PAR LES RACINES

4.1. L'absorption du potassium

En comparant la quantité de potassium contenue par le maïs à maturité et la diminution des quantités de potassium en solution, il est possible d'évaluer par défaut (en négligeant les pertes par drainage) la contribution du potassium en solution à la nutrition de la plante (tableau IX.4) : le potassium absorbé par la plante provient pour plus de 80 % du potassium libéré par le complexe au cours du cycle cultural.

TABLEAU IX.4
Evaluation de la contribution du potassium en solution à la nutrition en potassium du maïs (en kg K.ha⁻¹)

	Première saison 1986		Deuxième saison 1985	
	N2P1K0	N2P1K2	N2P1K0	N2P1K2
K contenu dans les parties aériennes et les racines du maïs	19	117	14	76
Variation des quantités de K en solution (0-150 cm)	-3,5	-16	-2,5	-3,0
Variation des quantités de K en solution /K contenu dans le maïs (%)	18	14	18	4

Il est admis que la plus grande partie de l'alimentation potassique du maïs s'effectue à partir du potassium en solution (MENGEL & KIRKBY, 1980). Les quantités transportées par diffusion ont été évaluées par différence entre les quantités contenues dans le maïs à la maturité (organes aériens et racines) et les quantités apportées par *mass-flow* (tableau IX.5).

TABLEAU IX.5
Evaluation de la contribution du *mass-flow* à la nutrition en potassium du maïs (maximum = évaporation de la surface du sol nulle, minimum = évaporation de la surface du sol égale à celle du sol nu)

		Première saison		Deuxième saison	
		N2P1K0	N2P1K2	N2P1K0	N2P1K2
Quantité de potassium contenue dans le maïs (kg K.ha ⁻¹)		19	117	14	76
Apport par <i>mass-flow</i> (kg K.ha ⁻¹)	Maximum en 1985 (%)	4,0 (21 %)	7,9 (7 %)	3,0 (21 %)	6,4 (8 %)
	Maximum en 1986 (%)	4,3 (23 %)	12,2 (10 %)	1,6 (11 %)	5,1 (7 %)
	Minimum en 1986 (%)	0,9 (5 %)	3,0 (3 %)	0,2 (1 %)	1,7 (2 %)

Dans les conditions culturales du Togo méridional, l'alimentation potassique du maïs résulte pour 79 à 99 % de mécanismes de diffusion. Ces chiffres sont proches de ceux déjà publiés : BARBER *et al.* (1963) estiment

à 10 % la contribution du *mass-flow* à l'alimentation potassique des plantes et RENGER *et al.*, 1981 (cités par MARSCHNER, 1986) évaluent cette contribution à 7 % pour la betterave et à 4 % pour le blé de printemps. *Tous les traitements agronomiques qui favorisent le développement du système racinaire du maïs provoquent donc une amélioration de la nutrition potassique du couvert végétal* : l'effet spectaculaire du labour sur les rendements (chapitre VI) s'explique probablement en grande partie ainsi. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus en régions tempérées (BOSC & MAERTENS, 1981).

4.2. L'absorption des nitrates

La contribution du *mass-flow* à la nutrition azotée du maïs est apparemment variable selon les traitements (tableau IX.6). Mais la couverture du sol par la culture est différente selon la fertilisation : la culture couvre bien le sol dans le cas du traitement N2 P1 K2, en première comme en deuxième saison, alors qu'au cours de celle-ci le sol n'est qu'imparfaitement couvert dans le cas du traitement N2 P1 K0. Pour le traitement N2 P1 K2, l'évaporation de la surface du sol sous le couvert est probablement faible par rapport à la transpiration de la plante : l'apport par *mass-flow* peut être considéré comme voisin de l'estimation maximale. Pour le traitement N2 P1 K0, l'apport par *mass-flow* est inférieur à l'estimation maximale ; une quantification plus précise est impossible en l'absence de données sur les parts respectives de l'évaporation de la surface du sol et de la transpiration de la plante à l'évapotranspiration totale.

Pour la parcelle N2 P1 K2, la nutrition azotée du maïs est donc assurée entre 70 et 78 % par la diffusion. L'importance relative du *mass-flow* et de la diffusion à l'alimentation azotée des cultures est très différente selon les situations : RENGER *et al.* (1981, *op. cit.*) ont montré que le *mass-flow* était suffisant pour satisfaire la totalité des prélèvements azotés de la betterave à sucre, alors que STREBEL *et al.* (1983, cités par MARSCHNER, 1986) ont montré que sur la même plante le *mass-flow* ne pouvait satisfaire que 15 % des prélèvements azotés.

TABLEAU IX.6
Evaluation de la contribution du *mass-flow* à la nutrition en azote du maïs

		Première saison		Deuxième saison	
Quantité d'azote contenue dans le maïs (kg N.ha ⁻¹)		N2P1K0 83	N2P1K2 117	N2P1K0 18	N2P1K2 62
Apport par <i>mass-flow</i> (kg N.ha ⁻¹)	Maximum en 1985 (%)	-	-	24 (130 %)	16 (26 %)
	Maximum en 1986 (%)	39 (47 %)	27 (23 %)	20 (110 %)	12 (19 %)
	Minimum en 1986 (%)	8 (10 %)	7 (6 %)	3 (17 %)	4 (6 %)

L'origine de l'azote absorbé par le maïs est difficile à préciser. La proportion de l'engrais apporté réellement utilisé par les cultures est généralement de 35 à 45 % pour le maïs dans la même zone climatique (CHABALIER, 1976 ; CHABALIER & PICHOT, 1979) et de l'ordre de 50 % sous les climats tempérés

(GUIRAUD, 1984), mais aucune donnée n'est disponible dans le cas étudié. La minéralisation de la matière organique intervient également : GIGOU & CHABALIER (1987) indiquent que le sol fournit habituellement les deux tiers de l'azote prélevé par les plantes. Enfin, une partie de l'azote absorbé provient des nitrates en solution, mais il n'est pas possible de faire la part du prélèvement par la plante et de la lixiviation dans la diminution des quantités de nitrates en solution.

Dans le cas de l'azote, le complexe d'échange n'intervient pas dans les phénomènes de diffusion : les ions nitrates ne diffusent que dans la phase liquide. La concentration en nitrates de la solution du sol dans la zone d'extraction racinaire intervient donc directement sur l'alimentation azotée de la plante. Sur la parcelle N2 P1 K2, les teneurs à 30 cm dépassent 1 mmol.l⁻¹ au moment du pic de minéralisation, mais elles sont inférieures à 0,15 mmol.l⁻¹ pendant toute la floraison et le brunissement des soies alors que les besoins de la plante sont maximaux. Or, aucune fertilisation n'est apportée au cours de cette période, le deuxième apport d'urée étant effectué quelques jours avant la floraison mâle. *Il semble donc souhaitable de diminuer le premier apport d'urée, qui correspond au pic de minéralisation, et d'augmenter le second, qui est effectué à une période où les besoins de la plante sont les plus élevés et les teneurs dans le sol minimales.* Dans les régions tempérées, le deuxième apport azoté est d'ailleurs toujours supérieur au premier et l'engrais du deuxième apport est mieux utilisé par les plantes que celui du premier (MACHET *et al.*, 1987).

4.3. L'absorption du calcium et du magnésium

Le transport du calcium et du magnésium jusqu'aux racines semble s'effectuer pour la plus grande partie, sinon en totalité, par *mass-flow* (tableaux IX.7 et IX.8). Il s'agit du cas général pour ces éléments (MARSCHNER, 1986). Il est d'ailleurs probable que du calcium s'accumule à proximité des racines pendant les saisons de culture. Avec les concentrations qui ont été mesurées dans la solution du sol, l'alimentation en calcium et en magnésium du maïs peut donc s'effectuer sans intervention de mécanismes actifs d'absorption liés à la plante.

TABLEAU IX.7
Evaluation de la contribution du *mass-flow* à la nutrition en calcium du maïs

		1ère saison		2ème saison	
Quantité de calcium contenue dans le maïs (kg Ca.ha ⁻¹)		N2P1K0 17	N2P1K2 25	N2P1K0 3	N2P1K2 11
Apport par <i>mass-flow</i> (kg Ca.ha ⁻¹)	Maximum en 1985 (%)	-	-	37 (1230 %)	37 (340 %)
	Maximum en 1986 (%)	44 (260 %)	35 (140 %)	22 (730 %)	23 (210 %)
	Minimum en 1986 (%)	9 (50 %)	8 (32 %)	3 (100 %)	8 (70 %)

TABLEAU IX.8
Evaluation de la contribution du mass-flow à la nutrition en magnésium du maïs

		1ère saison		2ème saison	
Quantité de magnésium contenue dans le maïs (kg Mg.ha ⁻¹)		N2P1K0 21	N2P1K2 21	N2P1K0 5	N2P1K2 11
Apport par <i>mass-flow</i> (kg Mg.ha ⁻¹)	Maximum en 1985 (%)	-	-	13 (260 %)	16 (150 %)
	Maximum en 1986 (%)	18 (86 %)	15 (71 %)	12 (240 %)	10 (90 %)
	Minimum en 1986 (%)	4 (19 %)	3 (14 %)	2 (40 %)	3 (30 %)

5. CONCLUSION

Parmi les quatre ions étudiés, le calcium, le magnésium et les nitrates présentent des dynamiques très liées, alors que la dynamique du potassium ne semble pas influencée par celle des autres éléments.

Dans les sols étudiés, le potassium est très peu présent en solution, car il se fixe sur le complexe d'échange. Les teneurs en potassium dans les eaux de drainage sont donc toujours extrêmement faibles. Par ailleurs, le maïs utilise principalement le potassium fixé sur le complexe pour les besoins de sa croissance ; l'étude des variations des quantités de potassium en solution ne permet donc pas de suivre l'alimentation potassique de la plante.

Les quantités de nitrates en solution augmentent dès le début des pluies, par suite de la minéralisation de la matière organique ; les apports d'urée ne semblent guère influencer le niveau de ce stock. Le maïs provoque une extraction racinaire intense, qui diminue la quantité d'azote nitrique à quelques kilogrammes par an. Le suivi des concentrations en nitrates dans la zone d'extraction racinaire semble donc une voie d'étude de la nutrition azotée des plantes. Les teneurs en nitrates sont plus élevées dans tout le profil en l'absence de fertilisation potassique que lorsque du potassium est apporté, probablement en raison des effets conjoints de la restitution d'une quantité plus faible de résidus de récolte à C/N élevé et d'un apport d'azote supérieur aux besoins de la plante.

Les teneurs en calcium et en magnésium des horizons supérieurs du sol semblent essentiellement déterminées par des échanges au niveau du complexe liées aux transformations des formes de l'azote. Mais des apports de cations comme le potassium provoquent également la mise en solution des deux éléments. Les ions en solution sont entraînés en profondeur par la lixiviation. La proportion entre les deux éléments varie peu au cours de leur transport, car ils sont absorbés en quantités égales par le maïs. La liaison avec les teneurs en nitrates s'estompe en revanche en profondeur, car les nitrates sont interceptés par les racines.

Pour les deux éléments les plus abondants dans le maïs, l'azote et le potassium, le principal mécanisme d'absorption par les racines est la diffusion. C'est pourquoi les périodes de sécheresse, en ralentissant le mouvements des ions par diffusion, entraînent l'apparition de carences potassiques qui ne se manifestent pas lorsque les pluies sont abondantes. Le calcium et le magnésium semblent en revanche apportés par le *mass-flow* en quantités telles que la diffusion ne doit jouer qu'un rôle mineur pour couvrir les besoins de la plante.

Ce chapitre a permis de dégager certains mécanismes qui déterminent les teneurs en éléments minéraux de la solution qui percole dans le sol. Ces teneurs seront maintenant utilisées pour calculer les pertes par lixiviation et établir les bilans minéraux.



CHAPITRE X

LE BILAN MINÉRAL

Un bilan minéral complet de l'agro-système peut être réalisé pour les deux cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 dans les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2. En effet, la détermination du poids des différents organes du maïs et de leur composition chimique autorise une évaluation des exportations minérales liées aux cultures (chapitre IV). Par ailleurs, les apports par les engrais sont connus (chapitre III) et les apports par les pluies peuvent être estimés. Enfin, les mesures de drainage et de concentrations de la solution du sol à 180 cm réalisées entre 1985 et 1987 permettent d'évaluer les pertes par lixiviation (chapitre IX).

Mais il est difficile de préciser l'évolution à moyen terme des quantités d'éléments minéraux contenus dans le sol à partir d'un bilan sur deux cycles annuels. C'est pourquoi une estimation du bilan a été tentée entre le début de l'année 1976, date d'origine de l'essai, et la fin de l'année 1986, un prélèvement d'échantillons de sol ayant été effectué au cours des premiers mois de 1977 sur les parcelles. L'évaluation du bilan minéral par différence entre les apports et les exportations pour les deux années au cours desquelles ont été réalisées les mesures de terrain et pour la période 1976-1986 fait l'objet du premier paragraphe de ce chapitre.

Dans le deuxième paragraphe, ce bilan est confronté à celui qu'autorisent les analyses de sol, et les différences interprétées en fonction des propriétés de rétention des éléments sur la phase solide du sol sous des formes plus ou moins extractibles par les méthodes chimiques utilisées. Il est ainsi possible, non seulement d'estimer l'effet de l'itinéraire technique étudié sur le bilan des principaux éléments minéraux, mais également de dégager quelques propositions pour la conduite de la fertilisation minérale du maïs au Togo méridional (troisième paragraphe).

1. L'ÉVALUATION DU BILAN MINÉRAL PAR LA DIFFÉRENCE APPORTS-EXPORTATIONS

1.1. Les éléments du calcul

1.1.1. LES APPORTS

1.1.1.1. Les apports par les pluies

Comme cela avait déjà été noté en Afrique de l'Ouest (PIERI, 1979 ; ROOSE, 1981), les concentrations en éléments minéraux des eaux de pluie, déterminées sur 8 échantillons recueillis entre 1984 et 1986, sont inférieures à 5 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour l'azote, le magnésium, le potassium et le phosphore, mais elles atteignent près de 30 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le chlore (tableau X.1). Les teneurs en sodium et chlore sont plus élevées que celles citées dans la bibliographie, en raison probablement de la proximité de l'océan.

TABLEAU X.1
Teneurs et apports minéraux annuels moyens par les eaux de pluie (teneurs 1984-1986 mesurées à Davié, pluviométrie moyenne 1934-1986 : 1043 mm, d'après SARAGONI et al., 1991)

Eléments	N	Ca	Mg	Na	K	P	Cl
Teneurs (mmol.l ⁻¹)	0,03	0,025	0,01	0,03	0,01	0,003	0,08
Apports minéraux (kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	4,4	10,4	2,5	7,2	4,1	1,1	29,5

Les quantités d'éléments minéraux apportées par les pluies ont été évaluées pour chaque année en multipliant les teneurs moyennes par la pluviométrie de l'année. La précision de cette évaluation est difficile à apprécier, car les données sur la variabilité interannuelle manquent. Mais, comme il sera vu par la suite, les quantités apportées par les pluies sont faibles par rapport aux autres termes du bilan. La précision sur la détermination de ces apports intervient donc peu sur celle de l'ensemble du bilan.

1.1.1.2. Les apports par les engrais

Les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 ont toujours été fertilisées avec des doses identiques d'azote et de phosphore. La période 1976-1986 est divisée en deux phases successives (chapitre III). Au cours de la première (1976-1980), comme l'un des buts de l'essai était d'étudier l'effet résiduel de la fumure potassique et phosphatée de la première saison de culture sur la culture de maïs de la deuxième, les parcelles ont reçu une fertilisation azotée lors de chaque saison de culture, mais une fertilisation potassique et phosphatée uniquement en première saison (tableau X.2). Au cours de la seconde phase, où l'effet de l'introduction d'une légumineuse dans le cycle cultural était étudié, la fertilisation potassique (pour la parcelle N2 P1 K2) et phosphatée a été appliquée à chacune des saisons de culture. Les sous parcelles étudiées ici ont porté une quasi-monoculture de maïs pendant 11 ans : seules une culture d'arachide de deuxième saison la première année de l'essai et une culture de sorgho (2ème saison 1982) ont interrompu la succession maïs-maïs.

TABLEAU X.2
Fertilisation minérale de la parcelle N2P1K2 (période 1976-1986, en unités fertilisantes.ha⁻¹)

Année	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	1ère saison	2ème saison	1ère saison	2ème saison	1ère saison	2ème saison
1976	45	0*	30	0*	45	0*
1977	60	60	30	0	45	0
1978	60	60	30	0	45	0
1979	60	60	30	0	45	0
1980	60	60	30	0	45	0
1981	90	90	30	30	90	90
1982	60	60**	30	30**	60	60**
1983	60	60	30	30	60	60
1984	60	60	45	30	90	60
1985	60	60	45	30	90	60
1986	60	60	45	45	90	90
Moyenne 1976-1980	57	48	30	0	45	0
Moyenne 1981-1986	65	65	37.5	27.5	80	70
Total 1976-1986	1305		570		1125	

* Arachide

** Sorgho

La composition chimique des engrais utilisés est la suivante :

- Urée à 42,4 % d'azote total, enfouie lors de l'épandage ;
- Superphosphate triple contenant 48,1 % de P₂O₅ et 20,4 % de CaO ;
- Chlorure de potassium contenant 62,7 % de K₂O soluble à l'eau et 47,4 % de chlorure.

Le poids de chaque élément apporté dans les engrais (azote, phosphore, potassium et calcium) a été calculé à partir de ces valeurs. Les calculs ont donc été effectués à partir du poids des éléments apportés, non des unités fertilisantes.

1.1.2. LES EXPORTATIONS

1.1.2.1. Les exportations par les plantes

La période 1976-1986 doit également être divisée en deux phases en ce qui concerne les exportations par les cultures. Au cours de la période 1976-1980, tous les résidus de culture ont été exportés des parcelles, alors qu'entre 1981 et 1986 seuls les grains et les rafles l'ont été, les spathes étant retirées des épis de maïs sur la parcelle lors de la récolte.

Sur la parcelle N2 P1 K2, les rendements n'ont pas évolué de manière sensible au cours des 11 années étudiées (tableau X.3). Il est donc possible de faire l'hypothèse que la composition minérale des différents organes du maïs déterminée sur ce traitement entre 1984 et 1989 est restée constante au cours de la période. Sur la parcelle N2 P1 K0, en revanche, les rendements ont été voisins de ceux de la parcelle N2 P1 K2 jusqu'à la première saison 1979, puis sont devenus beaucoup plus faibles. Cette décroissance est liée à l'apparition de la carence potassique. Or, les teneurs des différents éléments dans les résidus dépend de la fertilisation (chapitre IV) et au cours de la période 1976-1980 les résidus ont été exportés des parcelles. C'est pourquoi les teneurs sur la parcelle N2 P1 K0 ont été prises égales à celles de la parcelle N2 P1 K2 entre 1976 et 1980 et égales à celles déterminées sur la période 1984-1986 entre 1981 et 1986. Cette

hypothèse introduit une incertitude importante pour la période 1976-1980 en ce qui concerne les éléments abondants dans les résidus, en particulier le potassium.

TABLEAU X.3
Rendements obtenus entre 1976 et 1986 sur les parcelles N2P1K0 et N2P1K2 (en kg.ha⁻¹, maïs variété NH1 sauf indication contraire)

Année	Première saison		Deuxième saison	
	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
1976	2670	2800	1800 *	1900 *
1977	2750 ***	2840 ***	280	590
1978	2450 ***	4230 ***	440	960
1979	3370	3570	40	1590
1980	560 ***	3630 ***	70	1760
1981	720	3010	150	1180
1982	1310	3350	330 **	950 **
1983	1090	2060	10	730
1984	1410	2140	540	1040
1985	1180	3020	760	1800
1986	1320	2970	230	1420

* Arachide
** Sorgho IRAT 55
*** Maïs variété La Posta

Les exportations liées au maïs NH1 ont été évaluées à partir des résultats présentés au chapitre IV :

- le poids des pailles (tiges et feuilles), des rafles et des spathes ont été déduits du poids de grains récolté ;
- les quantités d'éléments contenus dans chaque organe ont été calculées à partir de ces poids et des teneurs mesurées dans chaque parcelle .

L'évaluation des exportations liées au maïs La Posta a été réalisée à partir des résultats publiés (SARAGONI & POSS, 1991). Comme cette variété a été cultivée au cours de la première saison et en début d'essai, les rendements étaient assez élevés, sauf en 1980 : dans ces conditions, il est possible d'évaluer le poids des pailles à partir de celui des grains, qui a été mesuré, en choisissant un rapport paille/grain égal à celui déterminé en conditions de fertilisation minérale non limitante. Dans ces conditions, il n'apparaît aucune différence de teneur dans les différents organes du maïs entre les variétés (SARAGONI & POSS, 1991). Les teneurs mesurées pour la variété NH1 sur la parcelle N2 P1 K2 ont été utilisées et le poids des différents organes a été calculé à partir des rapports :

- paille/grain = 1,29 ;
- rafle/grain = 0,18 ;
- spathe/grain = 0,21.

Comme pour le maïs NH1, cette évaluation comporte une forte imprécision en ce qui concerne les quantités d'éléments minéraux exportés dans les résidus sur la parcelle N2 P1 K0.

TABLEAU X.4
Evaluation des quantités d'éléments minéraux exportées par l'arachide et le sorgho IRAT 55 (en kg d'élément pour une production de 1 000 kg de grains)

Elément	Arachide	Sorgho (IRAT 55)
	Sans restitution	Avec restitution
N	50	13
P	4	5,3
K	20	4,2
Ca	7	0,4
Mg	7	1,4

L'évaluation des exportations liées à la culture d'arachide lors de la deuxième saison 1976 a été effectuée à partir des valeurs moyennes déterminées sur 4 variétés en Afrique de l'Ouest (tableau X.4, PIERI, 1989). Les exportations du sorgho IRAT 55 ont été évaluées à partir des chiffres publiés par GIGOU (1984).

L'évaluation des quantités d'éléments minéraux contenues dans les plantes pour chaque culture depuis l'origine de l'essai a permis de suivre l'évolution des exportations pour les deux parcelles (figures X.1 et X.2). Dans les deux cas, les deux éléments les plus exportés par les cultures sont l'azote et le potassium. Les quantités de phosphore, de calcium et de magnésium exportées, voisines sur chaque parcelle, sont beaucoup plus faibles.

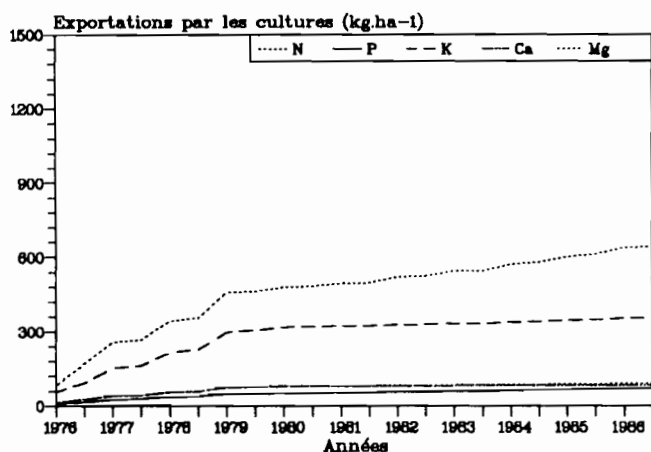


FIGURE X.1
Quantités d'éléments minéraux exportées par les cultures sur la parcelle N2P1K0 au cours de la période 1976-1986

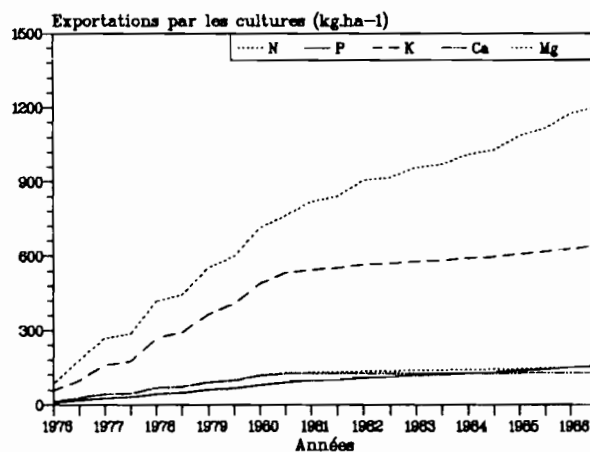


FIGURE X.2
Quantités d'éléments minéraux exportées par les cultures sur la parcelle N2P1K2 au cours de la période 1976-1986

Sur la parcelle N2 P1 K2, les quantités exportées annuellement ont diminué à partir de 1981 lorsque les résidus ont été restitués, en particulier en ce qui concerne le potassium, le calcium et le magnésium. Sur la parcelle N2 P1 K0, la diminution apparaît dès la deuxième saison 1979, en raison d'une chute importante du rendement (tableau X.3).

1.1.2.2. Les exportations par lixiviation

En l'absence de données sur l'évolution de la composition des eaux de drainage au cours du temps, nous avons fait l'hypothèse que les teneurs mesurées dans les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 en 1985 et 1986 étaient représentatives de la période 1976-1986. Cette hypothèse est confortée par le fait que les drainages au cours des deux premières années de l'essai (1976 et 1977) ont été de 48 mm et 47 mm : une erreur même

importante sur les teneurs ne représenterait que de faibles quantités. Les valeurs de concentrations moyennes sur les deux années d'étude ont donc été utilisées (tableau X.5).

TABLEAU X.5
Concentrations moyennes de l'eau recueillie à 180 cm (en mmol.l⁻¹)

Elément	1985		1986		Moy. 1985-1986	
	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
NO ₃ ⁻	2,35	1,06	2,58	0,93	2,46	1,00
K ⁺	0,03	0,04	0,04	0,07	0,03	0,06
Ca ⁺⁺	0,71	0,47	0,88	0,57	0,79	0,52
Mg ⁺⁺	0,44	0,21	0,60	0,32	0,52	0,26

Les éléments les plus entraînés par lixiviation sont l'azote et le calcium (tableau X.6 et figure X.3). Les pertes en potassium sont, en revanche, extrêmement limitées : moins de 5 kg K.ha⁻¹.an⁻¹. Les pertes en azote, calcium et magnésium sont plus élevées dans la parcelle N2 P1 K0 que dans la parcelle N2 P1 K2. La différence entre les quantités lixiviées est beaucoup plus importante que la différence de drainage, car les teneurs dans les eaux de drainage sont plus élevées en N2 P1 K0 qu'en N2 P1 K2.

TABLEAU X.6
Estimation du drainage et des pertes par lixiviation au cours de la période 1976-1986 (pluviométrie et drainage en mm, quantités lixiviées en kg.ha⁻¹)

	76-80		81-86		Somme 76-86	
	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Pluviométrie	1 056	4 796	1 442	5 686	2 498	10 482
Drainage		895		1 222		2 117
Elément						
N	364	125	497	171	861	296
K	12	21	17	29	29	50
Ca	336	188	459	257	795	445
Mg	133	57	182	78	315	135

1.1.3. CONCLUSION

Les données obtenues lors de cette étude permettent d'établir un bilan minéral en prenant en compte tous les apports et les exportations. Pour les deux cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987, le bilan a été calculé selon trois hypothèses différentes :

- sans prendre en compte le drainage, ce qui correspond au bilan net des apports et des exportations par les grains et les rafles ; ce bilan est appelé *bilan apparent* dans le texte ;
- en prenant en compte tous les éléments du bilan, en particulier le drainage ; ce bilan est appelé *bilan réel* ;
- en prenant en compte tous les éléments du bilan et en faisant en plus l'hypothèse de l'exportation des résidus de récolte (noté *bilan avec drainage et pailles*).

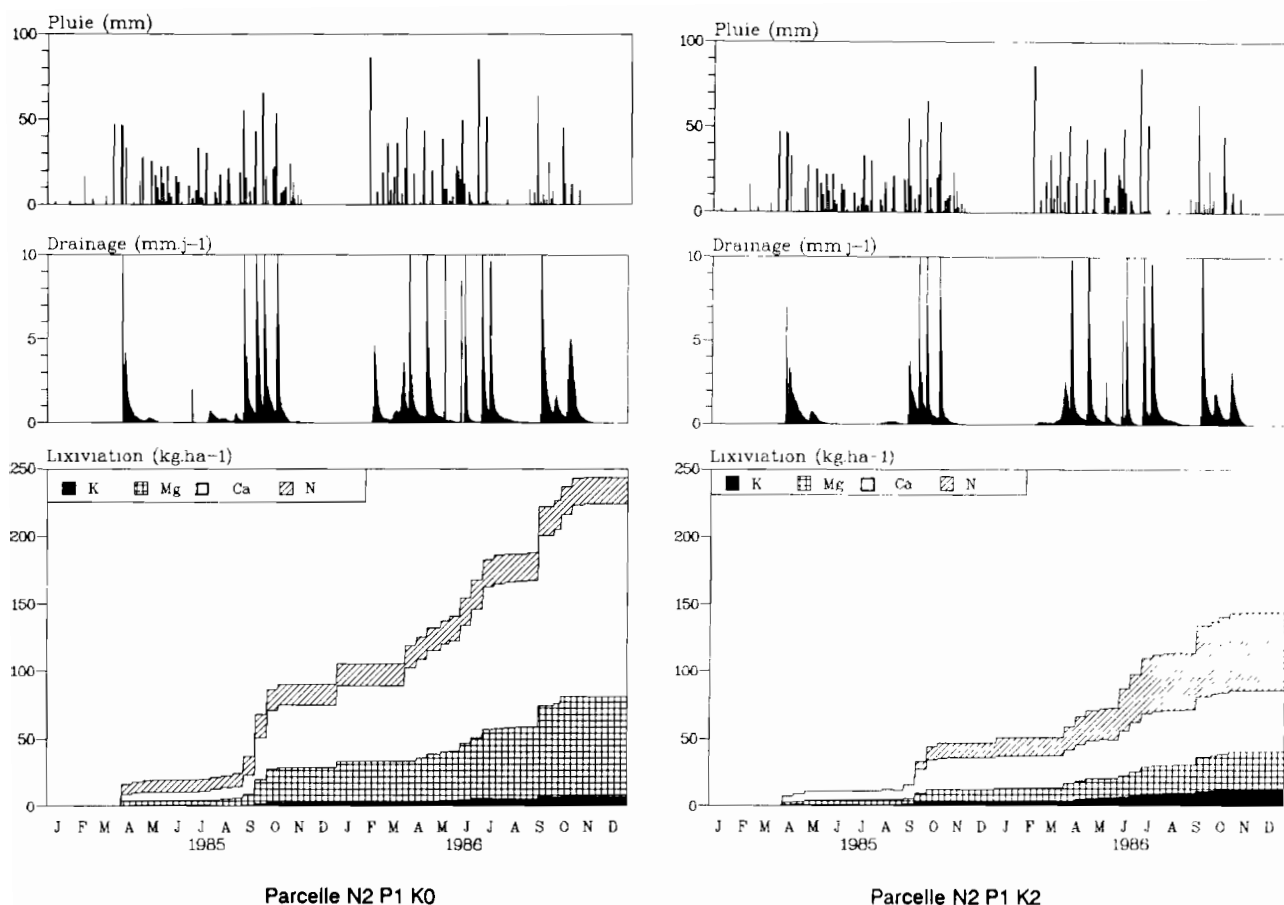


FIGURE X.3
 Estimation des pertes par lixiviation sous culture de maïs au cours de deux cycles annuels successifs (1985-1986)

Pour ces deux cycles annuels, qui ont fait l'objet du suivi hydrodynamique sur le terrain, l'élément du bilan qui est connu avec la plus faible précision est la lixiviation, en raison de l'imprécision sur l'évaluation du drainage. C'est pourquoi les chiffres de lixiviation sont indiqués avec un intervalle de confiance.

Le bilan a été évalué pour chacune des périodes 1976-1980 (sans restitution des résidus) et 1981-1986 (avec restitution) dans le cas où il n'y aurait aucun drainage (*bilan apparent*) et dans la situation réelle en prenant en compte le drainage (*bilan réel*). Pour l'ensemble de la période 1976-1986, l'évaluation des pertes par lixiviation est moins précise que dans le cas des deux cycles annuels, en raison des différentes hypothèses qui ont dû être formulées. L'autre principale source d'imprécision sur le bilan est l'évaluation des exportations dans les résidus végétaux au cours de la période 1976-1980.

1.2. Le bilan minéral par élément

1.2.1. LE BILAN DU POTASSIUM

Au cours des deux cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987, le bilan apparent est fortement positif pour la parcelle N2 P1 K2, car les exportations dans les grains de maïs sont inférieures à $25 \text{ kg K.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$ (tableau X.7). Le bilan réel est peu différent du bilan apparent, les quantités exportées par lixiviation étant au plus de $11 \text{ kg K.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$. Au cas où les résidus seraient enlevés, le bilan réel serait beaucoup moins

favorable, car en condition de fertilisation non limitante en potassium, les résidus contiennent 4 fois plus de potassium que les grains (chapitre IV).

Sur la parcelle N2 P1 K0, le bilan apparent est négatif de quelques kilogrammes par an. La prise en compte du drainage modifie peu le bilan en valeur absolue (pertes par lixiviation inférieures à 6 kg K.ha⁻¹.an⁻¹). La quantité de potassium contenue dans les résidus de récolte sur la parcelle N2 P1 K0 est plus faible que sur la parcelle N2 P1 K2, en poids comme en proportion par rapport au poids de grains, mais elle représente toutefois 120 % de la quantité contenue dans les grains.

TABLEAU X.7
Bilan du potassium au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg K.ha⁻¹)

Bilan du potassium		1985-1986		1986-1987	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie		4		4
	Engrais	0	125	0	150
	Total	4	129	4	154
Export.	Mais grains	8	23	6	20
	(Mais pailles)	(10)	(88)	(8)	(81)
	Drainage	3±1	4±1	6±2	11±3
Bilan	Sans drainage, sans pailles	-4	+106	-2	+134
	Avec drainage, sans pailles	-7±1	+102±1	-8±2	+123±3
	(Avec drainage et pailles)	(-17±1)	(+14±1)	(-16±2)	(+42±3)

Au cours de la période 1976-1980, le bilan du potassium est négatif de plus de 60 kg K.ha⁻¹.an⁻¹ pour les deux parcelles, l'apport de 37 kg K.ha⁻¹.an⁻¹ en N2 P1 K2 ne compensant pas les exportations par les cultures (tableau X.8). Entre 1981 et 1986, le bilan en N2 P1 K2 devient fortement positif, car la dose d'engrais potassique est augmentée (145 kg K.ha⁻¹.an⁻¹) et surtout les résidus sont restitués. En N2 P1 K0, le bilan est faiblement négatif entre 1981 et 1986 (moins de 8 kg K.ha⁻¹.an⁻¹), car les rendements sont faibles. Dans la parcelle N2 P1 K2, les pertes par lixiviation sont toujours très faibles par rapport aux exportations par les récoltes, alors que dans la parcelle N2 P1 K0 la lixiviation représente le tiers des exportations entre 1981 et 1986.

En parcelles fertilisées, les pertes par lixiviation sont donc négligeables par rapport aux autres termes du bilan, en accord avec tous les résultats obtenus en Afrique de l'Ouest en conditions de fertilisation modérée (PIERI, 1982 ; CHABALIER, 1984 ; ARRIVETS *et al.*, 1989 ; PIERI, 1989). Dans ces conditions, le bilan dépend principalement du devenir des résidus de récolte : lorsqu'ils sont restitués, le total des exportations est inférieur à 30 kg K.ha⁻¹.an⁻¹ avec deux récoltes de maïs par an alors qu'il dépasse 100 kg K.ha⁻¹.an⁻¹ dans le cas contraire.

En parcelles non fertilisées en potassium, le bilan est négatif de 10 à 20 kg K.ha⁻¹.an⁻¹. L'évaluation précise du bilan est délicate, car les quantités en jeu sont faibles et du même ordre de grandeur : aucun terme ne peut être négligé par rapport aux autres.

TABLEAU X.8
Bilan du potassium au cours de la période 1976-1986 (en kg K.ha⁻¹)

Bilan du potassium		1976-1980		1981-1986		1976-1986	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie		5		6		11
	Engrais	0	187	0	747	0	934
	Total	5	192	6	753	11	945
Export.	Maïs grains	66	111	34	107	100	218
	Maïs pailles	254	422	0	0	254	422
	Drainage	12	21	17	29	29	50
	Total	332	554	51	136	383	690
Bilan	Sans drainage	-315	-341	-29	+646	-343	+305
	Avec drainage (% de l'engrais)	-327	-362	-45	+617 (83 %)	-372	+255

1.2.2. LE BILAN DE L'AZOTE

Au cours des deux cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987, le bilan apparent est positif pour les deux parcelles (tableau X.9). En raison d'un rendement en grains plus faible, le gain est plus élevé pour la parcelle N2 P1 K0. En prenant en compte le drainage, le bilan est proche de l'équilibre dans les deux cas (le chiffre obtenu en 1986-1987 pour la parcelle N2 P1 K0 est affecté d'une grande imprécision). Si les résidus de récolte avaient été exportés de la parcelle, le bilan aurait été négatif dans tous les cas, les résidus du maïs contenant près de 60 % de l'azote des grains et des rafles (chapitre IV).

TABLEAU X.9
Bilan de l'azote au cours des cycles annuels 1985-86 et 1986-87 (en kg N.ha⁻¹)

Bilan de l'azote		1985-1986		1986-1987	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie		4		4
	Engrais		120		120
	Total		124		124
Export.	Maïs grains	33	90	28	82
	(Maïs pailles)	(20)	(54)	(17)	(50)
	Drainage	91 ± 28	36 ± 12	153 ± 48	50 ± 15
Bilan	Sans drainage, sans pailles	91	34	96	42
	Avec drainage, sans pailles (Avec drainage et pailles)	0 ± 28 (-20 ± 28)	-2 ± 12 (-56 ± 12)	-57 ± 48 (-74 ± 48)	-8 ± 15 (-58 ± 15)

Au cours de la période 1976-1980, le bilan apparent de l'azote est négatif en N2 P1 K2 (tableau X.10) : une fertilisation de 105 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ est insuffisante pour compenser les exportations totales de deux récoltes annuelles de maïs. Le bilan réel est négatif pour les deux parcelles et il est proche dans les deux cas malgré des exportations dans les résidus de récolte plus importantes en N2 P1 K2. Les pertes par lixiviation sont en effet plus importantes pour la parcelle N2 P1 K0 (75 % des exportations) que pour la parcelle N2 P1 K2 (14 % des exportations). Entre 1981 et 1986, le bilan apparent devient positif, en raison de la restitution des résidus et de l'augmentation des quantités d'engrais apportées, même lorsque les pertes par lixiviation sont prises en compte ; le bilan réel est voisin dans les deux parcelles. Sur l'ensemble de la période 1976-1986, le

bilan apparent est pratiquement équilibré en N2 P1 K2 et fortement positif pour N2 P1 K0. Le bilan réel est en revanche faiblement négatif (moins de 15 kg N.ha⁻¹.an⁻¹) et très proche pour les deux parcelles.

TABLEAU X.10
Bilan de l'azote au cours de la période 1976-1986 (en kg N.ha⁻¹)

Bilan de l'azote		1976-1980		1981-1986		1976-1986	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie	20		24		44	
	Engrais	525		780		1 305	
	Total	545		804		1 349	
Export.	Maïs grains	304	480	160	441	464	921
	Maïs pailles	179	282	0	0	179	282
	Drainage	364	125	497	171	861	296
	Total	847	887	657	612	1 504	1 499
Bilan	Sans drainage	+62	-217	+644	+363	+706	+146
	Avec drainage (% de l'engrais)	-302	-342	+147 (19 %)	+192 (25 %)	-155	-150

Ces résultats montrent que le bilan réel de l'azote est très proche sur les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 : sur la parcelle N2 P1 K0, les exportations par les cultures sont plus faibles qu'en N2 P1 K2, mais les pertes par lixiviation sont plus élevées. *Tout se passe comme si les quantités d'engrais non utilisées par le maïs en N2 P1 K0 étaient entraînées en profondeur.* Les mécanismes mis en jeu sont plus complexes : les variations des teneurs en nitrates dans la solution du sol ne sont pas liées aux apports d'urée, mais elles semblent plutôt résulter du bilan entre la minéralisation de la matière organique et les prélèvements par la plante (chapitre IX). Par ailleurs, il est généralement estimé que l'azote absorbé par la plante provient principalement du sol et non pas de l'engrais (GIGOU & CHABALIER, 1987). L'effet de l'apport d'urée sur le bilan semble donc n'être sensible qu'après un an, lors de la minéralisation du début de la saison des pluies.

L'évaluation du bilan de l'azote nécessite donc impérativement la prise en compte des pertes par lixiviation, qui peuvent représenter jusqu'à 75 % des exportations lorsque la fertilisation est déséquilibrée. Mais pour dépasser le simple constat et améliorer la gestion du stock d'azote, il est nécessaire de parvenir à une compréhension des mécanismes en jeu. Cette approche, qui nécessite l'emploi de ¹⁵N, n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail.

1.2.3. LE BILAN DU CALCIUM

Les quantités de calcium contenues dans les grains de maïs sont extrêmement faibles (moins de 1 kg Ca.ha⁻¹.an⁻¹). Aussi, le bilan apparent est positif dans tous les cas, l'apport des seules pluies compensant les exportations dans les grains (tableau X.11). Mais les pertes par lixiviation rendent le bilan réel négatif, les pertes étant plus fortes en N2 P1 K0 qu'en N2 P1 K2. Les quantités de calcium contenues dans les résidus, faibles par rapport aux pertes par drainage, ne sont cependant pas négligeables.

TABLEAU X.11
Bilan du calcium au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg Ca.ha⁻¹)

Bilan du calcium		1985-1986		1986-1987	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie	9		10	
	Engrais	22		26	
	Total	31		36	
Export.	Maïs grains	0,4	0,8	0,2	0,6
	(Maïs pailles)	(10)	(23)	(8)	(21)
	Drainage	75 ± 22	47 ± 14	148 ± 47	91 ± 28
Bilan	Sans drainage, sans pailles	+ 31	+ 30	+ 36	+ 35
	Avec drainage, sans pailles	-44 ± 22	-17 ± 14	-112 ± 47	-56 ± 28
	(Avec drainage et pailles)	(-54 ± 22)	(-40 ± 14)	(-120 ± 47)	(-77 ± 28)

Sur l'ensemble de la période 1976-1986, le bilan apparent est positif sur les deux parcelles, en raison de la présence de calcium dans l'engrais phosphaté, mais le bilan réel est négatif dans tous les cas (tableau X.12). Entre 1976 et 1986, le bilan est négatif de plus de 500 kg Ca.ha⁻¹ en N2 P1 K0, malgré un apport de plus de 200 kg Ca.ha⁻¹ dans l'engrais phosphaté.

Lorsque les résidus sont restitués, les pertes par lixiviation représentent pratiquement la totalité des exportations. Elles sont beaucoup plus prononcées sur la parcelle N2 P1 K0 que sur la parcelle N2 P1 K2, la différence provenant plus des teneurs dans les eaux de drainage que de la quantité d'eau drainée (+ 20 % en N2 P1 K0) : ce sont les mécanismes responsables de la mise en solution du calcium qui déterminent l'intensité de la lixiviation. Or, les teneurs en calcium dans la solution sont liées aux teneurs en nitrates et à la fertilisation potassique (chapitre IX). *Les pertes en calcium sont donc principalement déterminées par la minéralisation de l'azote et par les apports d'engrais potassique.*

TABLEAU X.12
Bilan du calcium au cours de la période 1976-1986 (en kg Ca.ha⁻¹)

Bilan du calcium		1976-1980		1981-1986		1976-1986	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie	48		57		105	
	Engrais	109		127		236	
	Total	157		184		341	
Export.	Maïs grains	3	4	2	4	5	8
	Maïs pailles	78	121	0	0	78	121
	Drainage	336	188	459	257	795	445
	Total	417	313	461	261	878	574
Bilan	Sans drainage	+ 76	+ 32	+ 182	+ 180	+ 258	+ 212
	Avec drainage	-260	-156	-277	-77	-537	-233

1.2.4. LE BILAN DU MAGNESIUM

Bien que les quantités de magnésium contenues dans les grains de maïs soient comprises entre 2 et 4 kg Mg.ha⁻¹.an⁻¹, le bilan apparent est négatif ou nul, car les quantités de magnésium apportées par les pluies sont faibles (tableau X.13). Comme dans le cas du calcium, le bilan devient nettement négatif lorsque

le drainage est pris en compte. L'exportation des résidus n'est négligeable ni dans le cas de N2 P1 K0 ni dans celui de N2 P1 K2, les quantités en jeu étant du même ordre de grandeur que celles perdues par lixiviation.

TABLEAU X.13
Bilan du magnésium au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg Mg.ha⁻¹)

Bilan du magnésium		1985-1986		1986-1987	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie	2		2	
	Engrais	0		0	
	Total	2		2	
Export.	Maïs grains	2	5	2	5
	(Maïs pailles)	(13)	(20)	(12)	(18)
	Drainage	29±9	13±4	60±19	28±9
Bilan	Sans drainage, sans pailles	0	-3	0	-3
	Avec drainage, sans pailles (Avec drainage et pailles)	-29±9 (-42±9)	-16±4 (-36±4)	-60±19 (-72±19)	-31±9 (-49±9)

Au cours de la période 1976-1986, le bilan apparent est négatif de 2 à 20 kg Mg.ha⁻¹.an⁻¹, sauf pour la parcelle N2 P1 K0 entre 1981 et 1986, en raison du faible rendement en grains. Mais le bilan réel est toujours négatif de 15 à 30 kg Mg.ha⁻¹.an⁻¹ à cause des pertes par drainage. Comme pour le calcium, les pertes sont plus importantes pour la parcelle N2 P1 K0 que pour la parcelle N2 P1 K2, les dynamiques des deux éléments étant liées. Les quantités de magnésium perdues sont cependant plus faibles que les quantités de calcium, car les teneurs dans les eaux de drainage sont plus faibles.

TABLEAU X.14
Bilan du magnésium au cours de la période 1976-1986 (en kg Mg.ha⁻¹)

Bilan du magnésium		1976-1980		1981-1986		1976-1986	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie	12		14		26	
Export.	Maïs grains	14	25	10	26	24	51
	Maïs pailles	66	103	0	0	66	0
	Drainage	133	57	182	78	315	135
	Total	213	189	192	104	405	186
	Bilan	Sans drainage	-68	-116	+4	-12	-64
	Avec drainage	-201	-173	-178	-90	-379	-160

1.2.5. LE BILAN DU PHOSPHORE

Le bilan du phosphore est plus facile à établir que celui des autres éléments, car il n'est pas entraîné par lixiviation. Les quantités exportées dans les grains par deux cultures annuelles de maïs sont inférieures à 15 kg P.ha⁻¹.an⁻¹ (tableau X.15). Le bilan est donc toujours positif avec les quantités d'engrais apportées. L'exportation des pailles modifie peu le bilan, les résidus contenant 2 à 3 fois moins de phosphore que les grains.

TABLEAU X.15
Bilan du phosphore au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg P.ha⁻¹)

Bilan du phosphore		1985-1986		1986-1987	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie	1		1	
	Engrais	33		39	
	Total	34		40	
Export.	Maïs grains	4	14	3	12
	(Maïs pailles)	(2)	(5)	(1)	(4)
Bilan	Sans pailles	+ 30	+ 20	+ 37	+ 28
	(Avec pailles)	(+ 28)	(+ 15)	(+ 36)	(+ 24)

Entre 1976 et 1980, le bilan est faiblement négatif en N2 P1 K2, car les parcelles ne recevaient qu'une fertilisation inférieure à 7 kg P.ha⁻¹.an⁻¹. Après 1980, le bilan est devenu fortement positif lorsque la fertilisation a été augmentée et les résidus restitués.

TABLEAU X.16
Bilan du phosphore au cours de la période 1976-1986 (en kg P.ha⁻¹)

Bilan du phosphore		1976-1980		1981-1986		1976-1986	
		N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2	N2 P1 K0	N2 P1 K2
Apports	Pluie	5		6		11	
	Engrais	65		183		248	
	Total	70		189		259	
Export.	Maïs grains	39	66	19	69	58	135
	Maïs pailles	13	23	0	0	13	23
	Drainage	0	0	0	0	0	0
	Total	52	89	19	69	71	158
Bilan	En kg.ha⁻¹	+ 18	-19	+ 170	+ 120	+ 188	+ 101
	(% de l'engrais)	(43 %)		(93 %)	(66 %)		

1.2.6. CONCLUSION

La fertilisation minérale adoptée sur la parcelle N2 P1 K2 (N130 P65 K150) permet d'obtenir un bilan minéral positif pour l'azote, le phosphore et le potassium avec une double culture de maïs par an lorsque les résidus de récolte sont restitués ; lorsqu'ils sont exportés, le bilan est négatif pour l'azote et le potassium : *la restitution des résidus est une des conditions du maintien à long terme des stocks d'azote et de potassium*. Mais dans tous les cas, le bilan est négatif pour le calcium et pour le magnésium, principalement en raison des pertes par lixiviation.

L'absence de fertilisation potassique produit une augmentation importante des pertes d'azote, de calcium et de magnésium par lixiviation. Le bilan du calcium et du magnésium est alors plus négatif sur la parcelle N2 P1 K0 que sur la parcelle N2 P1 K2. Le bilan de l'azote n'est en revanche que peu modifié, car la diminution des exportations par la culture compense l'augmentation du drainage.

Pour fixer un ordre de grandeur de l'importance des différents termes des exportations, un tableau regroupant tous les éléments minéraux et les deux niveaux de fertilisation étudiés a été établi (tableau X.17).

Ce tableau montre que l'importance relative des différents facteurs varie selon la fertilisation, mais que la lixiviation doit impérativement être prise en compte pour établir les bilans de l'azote, du calcium et du magnésium.

TABLEAU X.17
Importance relative des quantités d'éléments minéraux contenues dans les grains et les pailles et des pertes par lixiviation pour évaluer le bilan minéral d'une culture de maïs

	N130 P65 K0					N130 P65 K150				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Grains	*	***	**			***	***	**		
Pailles	*	*	**	*	**	**	*	***	*	***
Lixiviation	***		*	***	***	*			***	**

La fertilisation adoptée sur la parcelle N2 P1 K2 a conduit à un bilan positif dont la valeur représente 83 % du potassium et 66 % du phosphore apportés comme engrais entre 1981 et 1986. Une diminution des apports d'engrais semble donc possible. Toutefois ces éléments sont souvent rétrogradés sous des formes non assimilables pour les végétaux dans les sols tropicaux. Il est donc nécessaire d'évaluer la proportion des éléments apportés sous forme d'engrais qui reste assimilable. Par ailleurs, toute variation du bilan minéral est liée à une variation identique des éléments contenus dans le sol. C'est pourquoi le bilan établi à partir des apports et des exportations sera maintenant confronté à celui que les analyses de sol permettent de dresser, en précisant autant que possible les quantités disponibles pour les végétaux.

2. COMPARAISON AVEC LE BILAN RÉSULTANT DES ANALYSES DE SOL

2.1. Le potassium

2.1.1. RÉSULTATS

Pour toutes les parcelles, les teneurs en potassium échangeable sont comprises entre 0,03 et 0,06 mmol.100g⁻¹ en-dessous de 50 cm de profondeur (tableau X.18 et figure X.4). Cette répartition dans le sol confirme que le potassium n'est que peu entraîné par lixiviation.

TABLEAU X.18
Teneurs en potassium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à l'acétate d'ammonium)

Profondeur (cm)	Jachère	N0 P0 K0	N2 P1 K0	N2 P1 K2
0-10	0,25	0,09	0,09	0,50
10-20	0,14	0,06	0,07	0,20
30-40	0,05	0,04	0,05	0,08
50-60	0,03	0,05	0,04	0,05
100-120	0,03	0,04	0,05	0,05

La parcelle sous jachère et celles de l'essai factoriel ont eu la même histoire culturale jusqu'en 1976 : après une période de culture de durée indéterminée, elles ont été laissées en jachère entre 1974 et 1976. Lors du prélèvement d'échantillons de sol en 1987, la parcelle sous jachère n'était donc plus cultivée depuis 13 ans. Elle ne peut être considérée comme représentative de l'état initial du sol à l'origine de l'essai, car le fait de laisser le sol en jachère a provoqué une modification des caractéristiques physico-chimiques du sol. Nous ferons l'hypothèse que les teneurs en potassium des parcelles étudiées sont supérieures ou égales à celles du sol à l'origine de l'essai. Il est cependant remarquable que les rendements aient été de plus de 2500 kg.ha⁻¹ en première saison de culture pendant 4 ans dans la parcelle ne recevant aucune fumure potassique. Or, les essais agronomiques ont montré que de tels rendements ne pouvaient pas être obtenus avec des teneurs dans l'horizon de surface inférieures à 0,2 mmol.100g⁻¹. Comme la teneur du niveau 0-10 cm de la parcelle sous jachère est de 0,25 mmol.100g⁻¹, il est probable que les teneurs en potassium échangeable de la parcelle sous jachère soient proches de celles qui existaient à l'origine de l'essai.

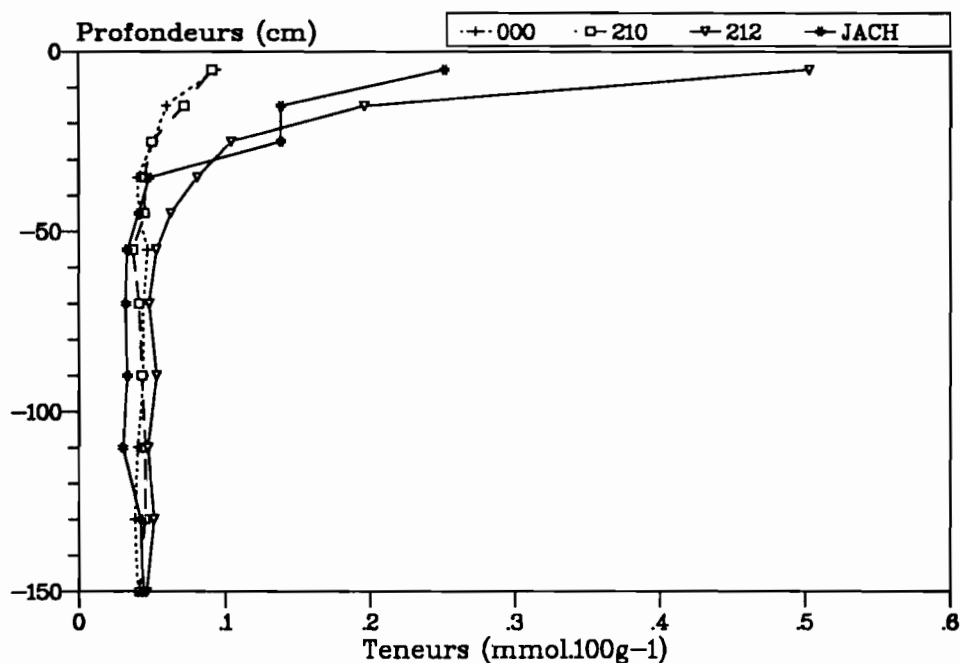


FIGURE X.4
Profils de teneurs en potassium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à l'acétate d'ammonium)

La quantité d'un élément donné dans une tranche de sol d'épaisseur z est :

$$P = C \times M \times \rho_s \times z$$

- P : quantité en kg.ha⁻¹
- C : teneur dans le sol en mmol.100g⁻¹
- M : masse atomique en g
- ρ_s : densité apparente du sol en g.cm⁻³
- z : épaisseur de la tranche de sol en cm

Entre deux parcelles, la différence de quantité P₂-P₁ dans une tranche de sol donnée est :

$$P_2 - P_1 = (C_2 - C_1) \times M \times \rho_s \times z$$

Les erreurs pour une tranche donnée peuvent être évaluées à l'aide des équations suivantes :

$$\Delta P/P \leq \Delta C/C + \Delta \rho_s/\rho_s$$

$$\Delta(P_2 - P_1)/(P_2 - P_1) \leq \Delta C_1/C_1 + \Delta C_2/C_2 + \Delta \rho_s/\rho_s$$

L'erreur sur la totalité du profil pris en compte est la somme des erreurs sur chaque tranche. Plus l'épaisseur de sol prise en compte augmente, plus les erreurs sur les quantités d'éléments contenues dans le sol s'accroissent. Pour obtenir la meilleure précision possible sur l'évolution des quantités, il ne faut prendre en compte que la tranche de sol dans laquelle les teneurs sont différentes entre les traitements. Pour le potassium, les calculs ont été effectués dans la tranche 0-60 cm.

Les erreurs sur les teneurs et sur les densités apparentes ont été prises égales aux valeurs des écart-types. Les écart-types des densités apparentes variant peu et les valeurs des densités apparentes étant elles-mêmes comprises entre 1,5 et 1,7 g.cm⁻³, la valeur du rapport $\Delta \rho_s/\rho_s$ a été prise égale à 1 % pour tous les niveaux (chapitre I). Les écart-types des teneurs ont été déterminés à partir des résultats obtenus sur 12 prélèvements différents réalisés dans les parcelles N0 P0 K0 et N2 P2 K2 aux niveaux 0-10 cm, 30-40 cm et 140-160 cm. Nous ferons l'hypothèse que la parcelle N0 P0 K0 est représentative de la parcelle N2 P1 K0 et que la parcelle N2 P2 K2 est représentative de la parcelle N2 P1 K2. Ce calcul intègre les erreurs analytiques et la variabilité spatiale, sans qu'il soit possible d'estimer la part respective des deux facteurs dans l'écart-type total.

TABLEAU X.19
Ecart-type des déterminations de potassium échangeable dans les sols
(échange à l'acétate)

Parcelle	Profondeur (cm)	Moyenne (mmol.100g ⁻¹)	Ecart-type (mmol.100g ⁻¹)	CV (%)
N0 P0 K0	0-10	0,093	0,016	17
	30-40	0,040	0,005	12
	140-160	0,034	0,004	12
N2 P2 K2	0-10	0,56	0,20	36
	30-40	0,067	0,016	24
	140-160	0,046	0,014	30

Le coefficient de variation est plus élevé pour la parcelle N2 P2 K2 que pour la parcelle N0 P0 K0, probablement en raison de la variabilité spatiale de l'apport d'engrais. Une valeur de 15 % a été retenue pour la parcelle N0 P0 K0 et de 30 % pour la parcelle N2 P2 K2. Chaque échantillon des

parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 étant composé de 6 prélèvements à la tarière (chapitre III), le coefficient de variation du résultat peut être estimé à 6 % pour la parcelle N2 P1 K0 et à 12 % pour la parcelle N2 P1 K2. L'erreur relative sur les quantités de potassium peut être estimée à 7 % pour la parcelle N2 P1 K0 et à 13 % pour la parcelle N2 P1 K2, et celle sur les variations de stocks respectivement à 13 % et 25 %.

Les quantités de potassium échangeable dans la tranche 0-60 cm sont les suivantes :

- Jachère : 416 ± 29 kg K.ha⁻¹ ;
- Parcelle N0 P0 K0 : 212 ± 15 kg K.ha⁻¹ ;
- Parcelle N2 P1 K0 : 217 ± 15 kg K.ha⁻¹ ;

- Parcelle N2 P1 K2 : 637 ± 83 kg K.ha⁻¹.

La différence de quantités de potassium échangeable du sol entre la parcelle N2 P1 K2 et la parcelle en jachère est de 221 ± 112 kg K.ha⁻¹ : la correspondance avec le bilan évalué par la différence entre les apports et les exportations (255 kg K.ha⁻¹) est donc bonne. En revanche, la différence de quantités de potassium échangeable entre la parcelle N2 P1 K0 et la parcelle en jachère est de -199 ± 44 kg K.ha⁻¹, contre un bilan entre les apports et les exportations de -372 kg K.ha⁻¹. Or, comme les teneurs de la jachère sont supérieures ou égales à celles du sol initial, le bilan réel du potassium échangeable du sol ne peut pas être plus négatif que la valeur calculée : les cultures et la lixiviation ont plus exporté de potassium que ce qu'indiquent les teneurs en potassium échangeable du sol. Cette conclusion est confirmée par la comparaison du bilan établi par différence entre apports et exportations et bilan du potassium échangeable du sol de 5 parcelles différentes de Davié et Agbomédji (figure X.5) : par rapport aux parcelles où le bilan est proche de l'équilibre, la diminution de la quantité de potassium échangeable du sol est inférieure à ce qu'indique le bilan entre les apports et les exportations dans les parcelles les plus appauvries.

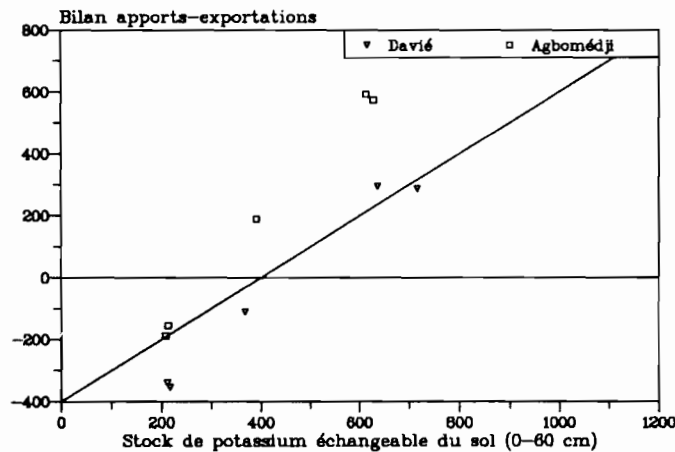


FIGURE X.5
Comparaison du bilan par la différence apports-exportations et du bilan du potassium échangeable du sol (en kg.ha⁻¹)

Elle est également confirmée par les résultats obtenus par l'IRCT sur la station de Kouvé, à une trentaine de kilomètres de Davié (CRETENET & JALLAS, comm. pers.). Sur cette station, un essai comporte la succession ininterrompue (depuis 1972) d'une culture de maïs et d'une culture de coton, sans aucun apport d'engrais. Des prélèvements d'échantillons de sol sont effectués 3 fois par an dans la tranche 0-20 cm et 20-40 cm. Les résultats du bilan du sol ont été comparés au bilan apparent, en estimant les exportations par le maïs (restitution des résidus) et par le coton (exportation des résidus) avec les valeurs minimales publiées (PIERI, 1989 ; SARAGONI & POSS, 1991). Malgré de fortes variations du bilan du sol au cours du temps (figure X.6), les quantités de potassium exportées par les cultures sont supérieures à la diminution de la quantité de potassium échangeable des 40 premiers centimètres du sol.

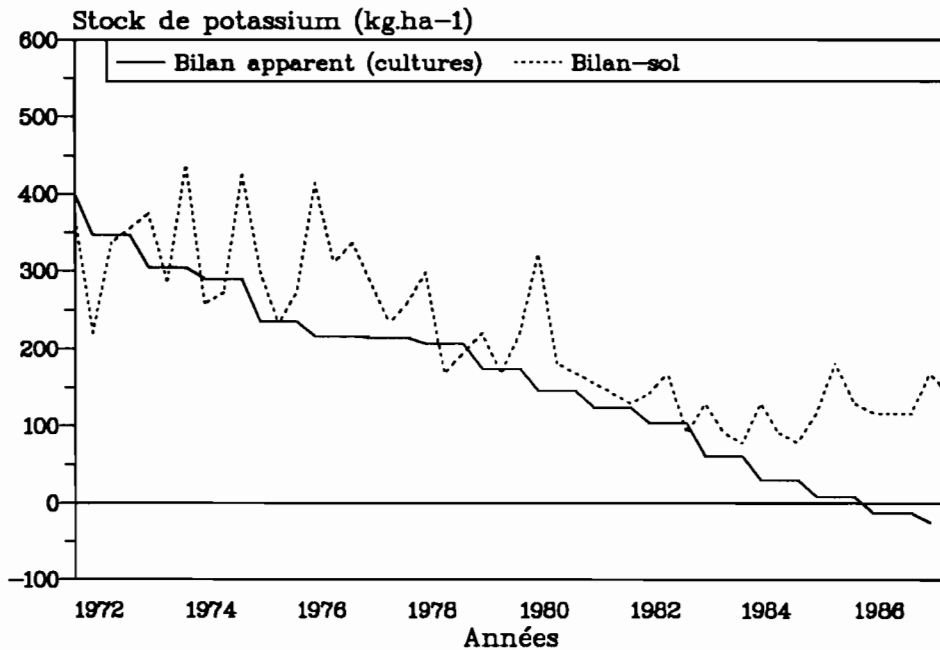


FIGURE X.6
 Comparaison du bilan apparent du potassium (exportation par les cultures) et du bilan du sol à Kouvé (succession annuelle maïs-coton sans fertilisation, potassium échangeable du sol, source IRCT)

Une partie du potassium utilisé par les plantes ne provient donc pas du potassium du sol qui était échangeable à l'origine de l'essai. Il peut résulter soit de la minéralisation de la matière organique, soit de la libération de potassium fixé sur la phase minérale du sol sous une forme non échangeable. Nous allons tenter de faire la part de ces deux origines.

2.1.2. INTERPRÉTATION

2.1.2.1. Rôle de la matière organique

Le rôle de la matière organique dans le bilan potassique a été étudié à partir de l'analyse des différentes fractions granulométriques de l'horizon de surface (0-10 cm) de 4 parcelles (FELLER *et al.*, 1990, chapitre III). La comparaison des teneurs en carbone dans les différentes fractions granulométriques montre que les différences de taux de matière organique entre la parcelle en jachère et les parcelles cultivées proviennent principalement des fractions supérieures à 2 μm (figure X.7). Ce résultat est en accord avec ceux obtenus lors d'études réalisées à l'aide du traceur naturel ^{13}C (CERRI *et al.*, 1985 ; VITORELLO *et al.*, 1989, MARTIN *et al.*, 1990) : le *turn-over* des fractions > 20 μm (débris végétaux) est plus rapide que celui des autres fractions.

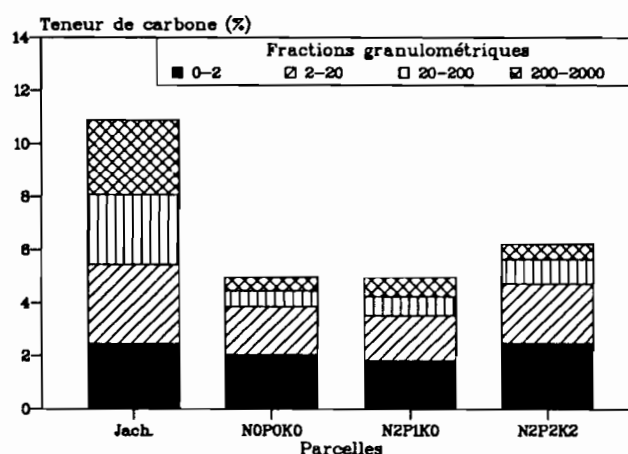


FIGURE X.7
Teneur en carbone dans les différentes fractions granulométriques (d'après LOCASCIO, 1990)

Les teneurs des bases non échangeable de chaque fraction granulométrique ont été obtenues par différence entre les teneurs totales évaluées par attaque fluoro-perchlorique et les teneurs en éléments échangeables à l'acétate d'ammonium. Entre la jachère et les parcelles cultivées, les différences de quantités de potassium non échangeable associé aux fractions granulométriques qui évoluent le plus rapidement représentent au plus $16 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ dans la tranche 0-10 cm (tableau X.20).

TABLEAU X.20
Quantité de potassium non échangeable contenue dans les fractions granulométriques de taille supérieure aux argiles (horizon 0-10 cm, en $\text{kg K} \cdot \text{ha}^{-1}$)

Fraction granulo.	Parcelles			
	Jachère	N0 P0 K0	N2 P1 K0	N2 P2 K2
20-2000 fl	42	20	17	18
2-20	122	128	131	142
Total	164	148	148	160

Par ailleurs, aucune relation n'a pu être mise en évidence entre les teneurs en potassium non échangeable et les teneurs en carbone dans les différentes fractions granulométriques. *L'évolution des réserves de potassium non échangeable liées à la matière organique ne joue donc qu'un rôle négligeable dans le bilan du potassium.*

2.1.2.2. Rôle de la phase minérale du sol

Le rôle de la phase minérale du sol dans la dynamique du potassium a été étudié au laboratoire sur des échantillons d'horizons de surface (0-30 cm) et d'horizons de profondeur (80-100 cm) de 3 parcelles : les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 ainsi qu'un champ cultivé depuis 17 ans sur lequel aucun engrais potassique n'était apporté depuis 2 ans. Seuls seront exposés ici les principaux résultats obtenus (POSS *et al.*, 1991).

TABLEAU X.21
Augmentation des teneurs en potassium échangeable à l'acétate après une alternance d'humectation-dessiccation (en mmol.100g⁻¹)

	Champ	N2 P1 K0	N2 P1 K2
0-30 cm	0,10	0,07	0
80-100 cm	0,06	0,05	0,13

Comme il est connu que l'alternance d'humectation et de dessiccation peut jouer un rôle dans le passage du potassium entre des formes non échangeables et des formes échangeables (Van der MAREL, 1954 ; SCOTT & HANWAY, 1960 ; OLUPELU JAIYEBO,

1968 ; JACKSON & LUO, 1986 ; ONCHERE *et al.*, 1989), les échantillons ont été humectés jusqu'à une humidité proche de la capacité au champ, puis séchés à l'air ambiant (22°C). La quantité de potassium échangeable a augmenté après humectation-dessiccation dans les échantillons du champ, ceux de la parcelle N2 P1 K0 et ceux des horizons de profondeur de la parcelle N2 P1 K2 (tableau X.21). Mais elle n'a pas varié dans l'échantillon de surface de la parcelle N2 P1 K2, qui correspond au seul niveau ayant reçu une fertilisation potassique depuis 13 ans.

Lorsque les teneurs en potassium échangeable augmentent après humectation-dessiccation, le pH de la solution augmente également. Il existe une relation linéaire entre l'accroissement (Δ pH) du pH et celle (Δ K) du potassium échangeable (en mmol.100g⁻¹) :

$$\Delta \text{pH} = 0,41 \times \Delta \text{K} - 0,023$$

$$r^2 = 0,53 \text{ (P} < 0,01)$$

Il est donc probable que les protons se fixent sur les argiles lors de la phase de dessiccation, produisant le passage du potassium sous une forme échangeable, selon l'hypothèse de JACKSON & LUO (1986).

Le fait que l'échantillon de surface de la parcelle N2 P1 K2 ne libère pas de potassium peut être interprété en fonction des courbes de Beckett obtenues sur les échantillons (chapitre IX). Dans chaque sol, il existe un état d'équilibre, défini par l'intersection entre les courbes de Beckett et l'axe des abscisses (AR₀, BECKETT & NAFADY, 1969). La libération de potassium non échangeable dépend de la différence entre le "rapport d'activité" (*activity ratio*, AR) de la solution du sol et la valeur AR₀, qui est fonction de l'histoire antérieure du sol.

TABLEAU X.22
Fixation du potassium après un apport de KCl (en % du potassium apporté)

	Apport de K (mmol.100g ⁻¹)	Champ		N2 P1 K0		N2 P1 K2	
		0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm	0-30 cm	80-100 cm
Avant humectation-dessiccation	0,13	31	8	0	12	30	13
	0,26	15	30	10	15	14	20
Après humectation-dessiccation	0,13	56	-	60	0	25	26
	0,26	34	26	0	13	13	10

Les mêmes échantillons ont également reçu des apports de KCl pulvérulent de 0,13 et 0,26 mmol.100g⁻¹. Les quantités de potassium échangeable ont été déterminées avant et après l'apport, afin de déterminer la fixation du potassium (potassium non échangeable à l'acétate). Comme la fixation peut également évoluer en fonction des alternances d'humectation et de dessiccation des sols, le même traitement hydrique que précédemment a été appliqué aux échantillons. Les résultats obtenus sont très variables (tableau X.22), en raison des faibles quantités utilisées et du fait qu'ils proviennent de la différence entre deux teneurs en potassium échangeable. Une fraction du potassium apporté (15 à 30 % environ) est néanmoins transformée sous une forme qui n'est pas échangeable à l'acétate et cette fraction augmente faiblement après le traitement hydrique. Ce résultat a été confirmé aussi bien par une expérimentation d'échange isotopique (POSS *et al.*, 1991) que par la méthode de Van der Marel (OLIVER, comm. pers.).

Dans les terres de Barre, le potassium peut être fixé sur la phase minérale ou inversement libéré sous une forme échangeable. Or, ces mécanismes ne peuvent pas apparaître dans des sols ferrallitiques dont la seule argile caractéristique est la kaolinite (PÉDRO, 1974). Quels sont les minéraux responsables de la fixation et de la libération du potassium dans les terres de Barre ? Ce problème a été étudié, en collaboration avec le laboratoire de minéralogie de l'ORSTOM à Bondy, à l'aide de la diffraction des rayons X, de la microscopie électronique à transmission et de l'analyse triacide (déterminations réalisées par P. QUANTIN).

Toutes les déterminations ont été réalisées sur la fraction du sol inférieure à 2 µm. Les échantillons utilisés pour la diffraction des rayons X ont été laissés pendant une nuit dans une solution de KCl 1 M, puis rincés à l'eau distillée pour éliminer le chlore. Les suspensions obtenues ont ensuite été étalées sur une plaque de verre et séchées à l'air pour réaliser des échantillons orientés. Les diagrammes de diffraction ont été réalisés avant et après traitement au glycérol et après chauffage à 490 °C (ROBERT & TESSIER, 1974). La même procédure a également été utilisée sur des échantillons traités initialement avec du MgCl₂ 1 M. Sur les échantillons saturés avec du potassium et n'ayant pas été traités avec du glycérol, un pic étalé apparaît à 1,4 nm (figure X.8). Ce pic se déplace vers 1,0 nm après chauffage à 490 °C et disparaît presque complètement après traitement au glycérol. Les mêmes résultats ont été obtenus avec les suspensions saturées avec du magnésium, mais dans ce cas un pic peu marqué apparaît entre 1,6 et 1,8 nm. Ce comportement caractérise la présence d'argiles 2/1 de type smectite.

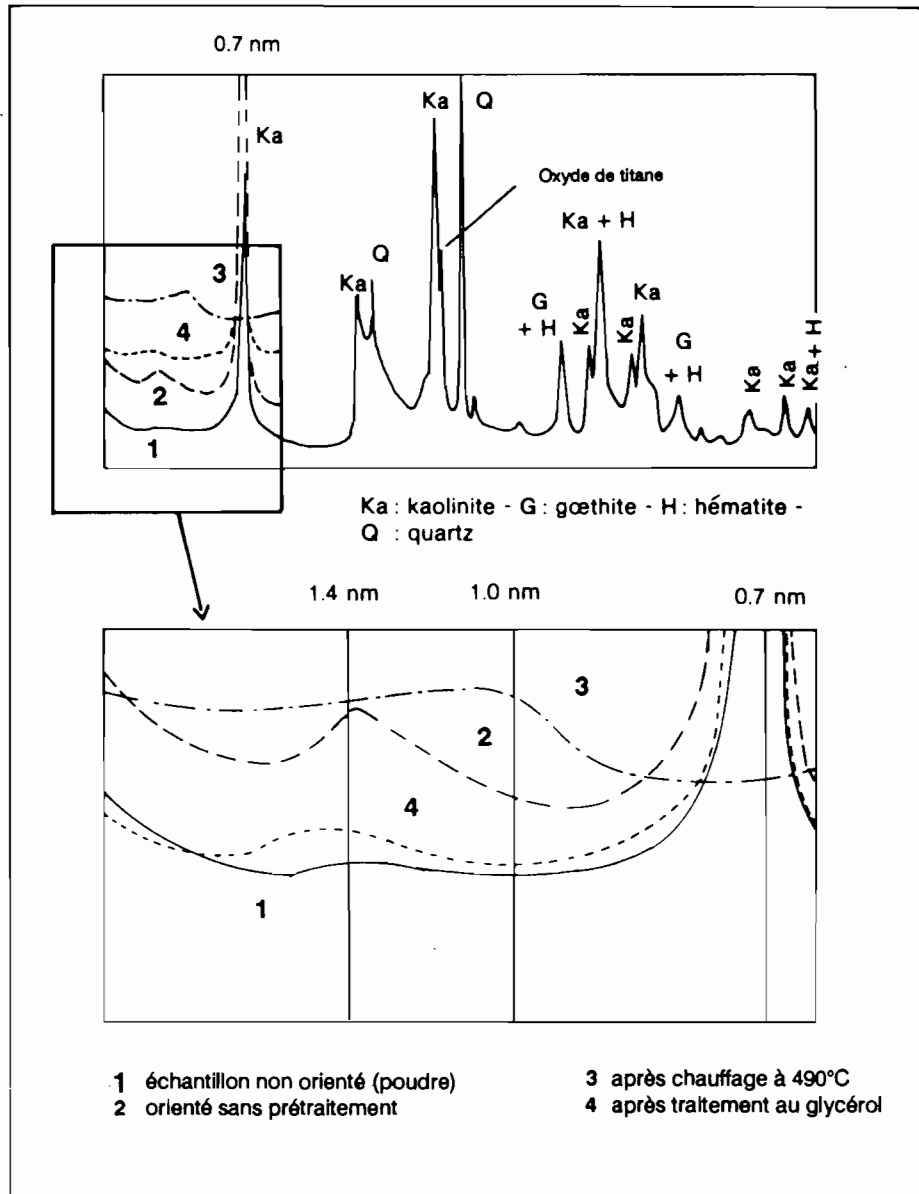


FIGURE X.8
Diagrammes de diffraction des rayons X sur la fraction $< 2 \mu\text{m}$ (parcelle N2 P1 K0, 0-30 cm, détermination laboratoire de minéralogie de l'ORSTOM à Bondy)

L'observation au microscope électronique à transmission, à des grossissements compris entre 10 000 et 40 000, a permis de retrouver des feuillets de minéraux gonflants. Ces feuillets sont fréquemment situés en bordure de petits cristaux de micas. Les bordures des cristaux de micas sont souvent ouvertes et parfois enroulées (photo X.1). Ces observations conduisent à supposer que des minéraux 2/1 se forment encore actuellement à partir des micas, seuls minéraux primaires à avoir résisté à l'altération ferrallitique.

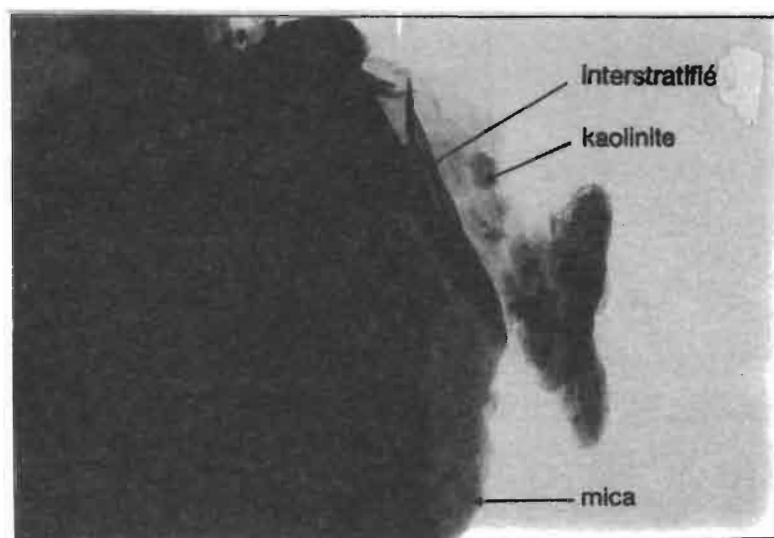


PHOTO X.1
Minéraux interstratifiés enroulés en bordure d'un cristal de mica (X 70 000, photo G. MILLOT)

TABLEAU X.23
Composition minéralogique de la fraction <math>< 2 \mu\text{m}</math> dans les terres de Barre de Davié (en %, d'après les résultats de l'attaque triacide)

Minéraux	0-30 cm	80-100 cm
Interstratifiés illite-smectite	2,1	1,4
Kaolinite	76,0	85,2
Quartz fin et silice amorphe	3,5	0,0
Goethite	8,0	11,4
Hématite	5,0	0,0
Oxyde de titane	3,9	1,6
Autres oxydes	1,5	0,6
Total	100,0	100,3

Les quantités des différents minéraux secondaires contenus dans la fraction inférieure à $2 \mu\text{m}$ ont été déduites des résultats d'une attaque triacide (HARRISSON, 1933). La quantité d'illite a été déterminée en faisant l'hypothèse que tout le potassium y est contenu à une teneur de 5,8 % (WEAVER & POLLARD, 1973). La quantité d'illite ainsi calculée est un minimum, étant donné que les minéraux

argileux dérivés de micas contiennent moins que 5,8 % de potassium. Les quantités de silice, d'aluminium et de fer contenues dans les illites en ont été déduites et les résidus de silice et d'aluminium ont été utilisés pour évaluer les teneurs en kaolinite. Les teneurs en oxydes et hydroxydes de fer ont été calculées à partir du résidu de fer et la proportion entre oxydes et hydroxydes évaluée à l'aide de la perte au feu. Le minéral le plus abondant est la kaolinite (environ 80 %), mais les minéraux interstratifiés représentent de l'ordre de 2 % de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ (tableau X.23). Des quantités similaires d'interstratifiés ont été déterminées dans des sols ferrallitiques du Brésil (ARKOLL *et al.*, 1985) et du Kenya (ONCHERE *et al.*, 1989). Comme il est connu que les minéraux argileux dérivant de micas peuvent fixer sélectivement le potassium (BORGHARDT, 1977), les faibles quantités d'interstratifiés contenues dans les terres de Barre étudiées semblent suffisantes pour expliquer la fixation et la libération du potassium qui ont été observées.

2.2. L'azote

2.2.1. RÉSULTATS

Entre les différentes parcelles cultivées, la différence maximale de teneur en azote est de 0,12 ‰ (tableau X.24 et figure X.9).

TABLEAU X.24
Teneurs en azote total dans le sol (en ‰)

Profondeur (cm)	Jachère	N0 P0 K0	N2 P1 K0	N2 P1 K2
0-10	0,99	0,38	0,49	0,48
10-20	0,67	0,36	0,40	0,48
30-40	0,35	0,33	0,33	0,35
50-60	0,41	0,30	0,36	0,30
100-120	0,29	0,32	-	-

Sous la jachère, les teneurs sont beaucoup plus élevées que dans les parcelles cultivées sur les 20 premiers centimètres, mais elles sont proches en-dessous de 40 cm. L'effet de la jachère sur l'augmentation de la quantité de matière organique des horizons de surface apparaît ainsi nettement. Les différences de quantités entre les parcelles peuvent être calculées dans la tranche 0-40 cm.

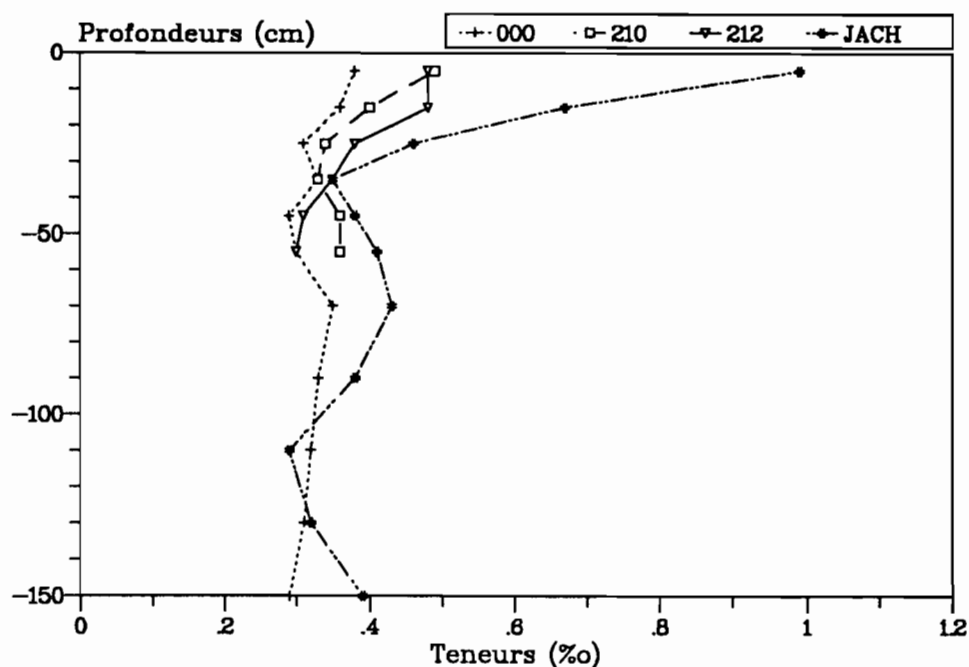


FIGURE X.9
Profils de teneurs en azote total dans le sol

TABLEAU X.25
Ecart-type des déterminations d'azote total dans les sols

Parcelle	Profondeur (cm)	Moyenne (‰)	Ecart-type (‰)	CV (%)
N0 P0 K0	0-10	0,40	0,03	7
	30-40	0,39	0,06	15
N2 P2 K2	0-10	0,52	0,10	19
	30-40	0,36	0,04	11

Les coefficients de variation des résultats d'analyse d'azote total ne semblent pas différents entre la parcelle N0 P0 K0 et la parcelle N2 P2 K2 (tableau X.25). Ils ne semblent pas non plus varier en fonction de la profondeur. Une valeur de coefficient de variation de 15 % a été retenue pour toutes les parcelles et toutes les profondeurs. En utilisant les mêmes formules que pour le potassium, l'erreur relative sur les quantités totales d'azote est de 7 % et celle sur leurs variations de 13 %.

Les quantités totales d'azote dans la tranche de sol 0-40 cm sont les suivants :

Jachère	4 088 ± 286 kg N.ha ⁻¹
N0 P0 K0	2 288 ± 160 kg N.ha ⁻¹
N2 P1 K0	3 745 ± 262 kg N.ha ⁻¹
N2 P1 K2	3 780 ± 265 kg N.ha ⁻¹

La différence de quantités totales d'azote entre la jachère et la parcelle N0 P0 K0 est de 1800 ± 234 kg N.ha⁻¹ et celle entre la parcelle N2 P1 K2 et la parcelle N2 P1 K0 de 35 ± 5 kg N.ha⁻¹. La différence obtenue entre les deux parcelles cultivées est proche de celle estimée par le bilan entre les apports et les exportations (5 kg N.ha⁻¹), mais la différence entre la jachère et la parcelle N2 P1 K0 apparaît beaucoup plus importante en effectuant le bilan de l'azote du sol qu'en étudiant les apports et les exportations (-155 kg N.ha⁻¹).

2.2.2. INTERPRÉTATION

Toutes les études concernant la matière organique du sol en climats tropicaux ont montré que lorsqu'une jachère est mise en culture, les teneurs en matière organique et d'azote diminuent de l'ordre de 50 % au cours des trois ou quatre premières années. Le bilan de l'azote du sol est en accord avec ces chiffres, mais le bilan entre les apports et les exportations ne rend pas compte d'une telle diminution. Trois facteurs explicatifs semblent devoir être invoqués : la représentativité de la parcelle en jachère, les pertes par lixiviation et les pertes par volatilisation.

La parcelle en jachère ne caractérise pas l'état initial des parcelles de l'essai : à l'origine de l'essai, la parcelle en jachère et les parcelles de l'essai avaient connu la même histoire culturale, mais leur évolution a divergé à partir de 1976. Le taux d'azote dans la parcelle en jachère est donc plus élevé que celui des parcelles initiales.

Pour évaluer les pertes par lixiviation, nous avons fait l'hypothèse que les pertes qui se produisent juste après la défriche étaient égales à celles mesurées après une dizaine d'années d'expérimentation. Or, la défriche produit une minéralisation de la matière organique du sol. L'augmentation des teneurs en nitrates dans la parcelle nue (chapitre IX) témoigne de ce phénomène : dans cette parcelle, les teneurs en nitrates à 120 et 180 cm ont augmenté au cours de la première année après la défriche, pour atteindre $5,3 \text{ mmol.l}^{-1}$ à la fin de l'année 1976 à 120 cm. Les teneurs mesurées sur les parcelles cultivées depuis 10 ans n'ont pas atteint ces valeurs. Il est donc possible qu'une partie de l'azote minéralisé lors de la défriche soit entraîné par lixiviation au cours des premières années.

Les pertes par volatilisation interviennent également pour expliquer la différence entre la jachère et les parcelles cultivées, mais il est difficile d'évaluer les quantités volatilisées, l'urée étant enfouie lors de l'apport.

La bonne correspondance entre les deux bilans pour les parcelles cultivées prouve que les mécanismes qui ont provoqué la diminution de teneur lors de la défriche se sont exercés de manière identique sur les deux parcelles cultivées. Par ailleurs, le fait que les deux types de bilan montrent de très faibles différences entre les deux parcelles cultivées prouve que la fertilisation potassique n'intervient pas sur le stock d'azote total du sol, bien que les restitutions par les résidus de récolte représentent une quantité annuelle d'environ 45 kg N.ha^{-1} pour la parcelle N2 P1 K2 contre 10 kg N.ha^{-1} pour la parcelle N2 P1 K0.

L'azote apporté par l'engrais ne contribue que peu à l'entretien du stock azoté du sol, car il est lixivié lorsqu'il n'est pas utilisé par les plantes.

2.3. Le calcium et le magnésium

2.3.1. RÉSULTATS

La répartition du calcium dans le profil est variable selon les traitements (tableau X.26 et figure 10). Dans la jachère et la parcelle N0 P0 K0, les valeurs sont proches à partir de 20 cm et sont inférieures aux valeurs mesurées dans les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2 jusqu'à environ 1 m. Dans les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2, les valeurs maximales sont observées vers 60 cm, profondeur à laquelle les valeurs mesurées dans les deux parcelles deviennent égales. Cette évolution du profil de répartition du calcium échangeable dans le sol semble provenir de l'entraînement en profondeur du calcium apporté par l'engrais phosphaté et de la concentration du calcium dans la zone où il est apporté par *mass-flow*, mais non absorbé par les plantes.

TABLEAU X.26
Teneurs en calcium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à la cobalti-hexamine)

Profondeur (cm)	Jachère	N0 P0 K0	N2 P1 K0	N2 P1 K2
0-10	1,20	0,27	0,37	0,56
10-20	0,80	0,65	0,42	0,72
30-40	0,71	0,79	0,94	1,00
50-60	0,68	0,60	0,91	0,94
100-120	0,76	0,70	0,80	0,80

Pour comparer les bilans entre la jachère et les deux parcelles étudiées, il est donc nécessaire de prendre en compte le calcium échangeable contenu entre la surface et 1 m, alors que la comparaison entre les deux parcelles cultivées peut s'effectuer à partir des quantités comprises dans la tranche 0-60 cm.

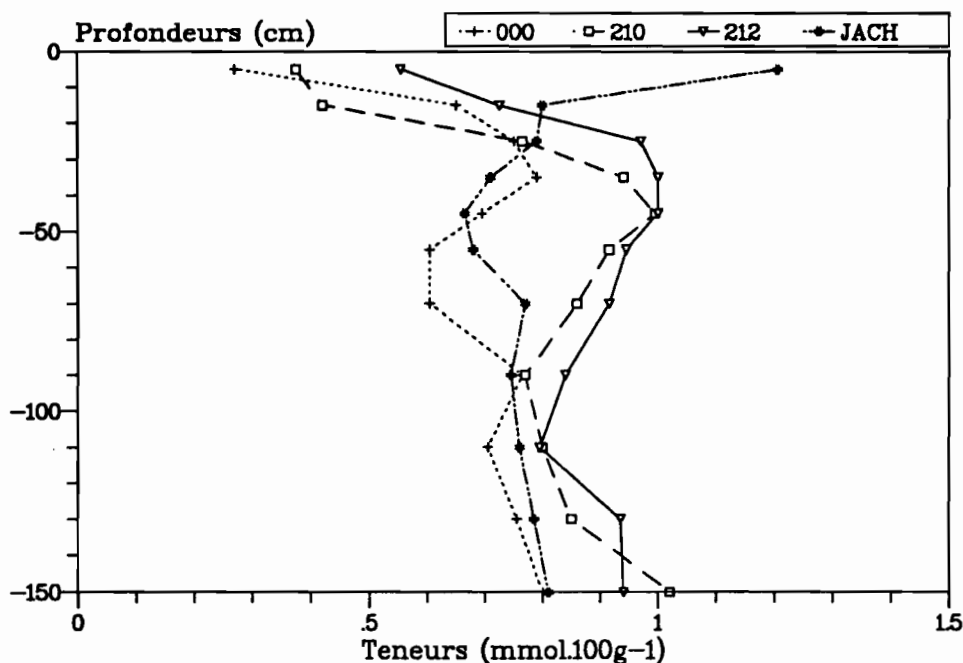


FIGURE X.10
Profils de teneurs en calcium échangeable dans le sol (échange à la cobalti-hexamine)

Les teneurs en magnésium échangeable présentent un profil proche de celui du calcium échangeable (tableau X.27 et figure X.11), mais le maximum de teneur est situé un peu plus en profondeur que dans le cas du calcium, peut-être du fait que le magnésium n'est pas apporté par les engrais.

TABLEAU X.27
Teneurs en magnésium échangeable dans le sol (échange à l'acétate d'ammonium)

Profondeur (cm)	Jachère	N0 P0 K0	N2 P1 K0	N2 P1 K2
0-10	0,84	0,33	0,27	0,30
10-20	0,62	0,31	0,24	0,32
30-40	0,47	0,41	0,36	0,49
50-60	0,59	0,54	0,56	0,68
100-120	0,59	0,70	0,67	0,64

Le bilan du magnésium échangeable du sol doit être calculé sur la tranche 0-1 m pour pouvoir comparer les deux parcelles cultivées étudiées. La comparaison avec la jachère n'est pas possible, car les teneurs ne sont pas égales à la base du profil.

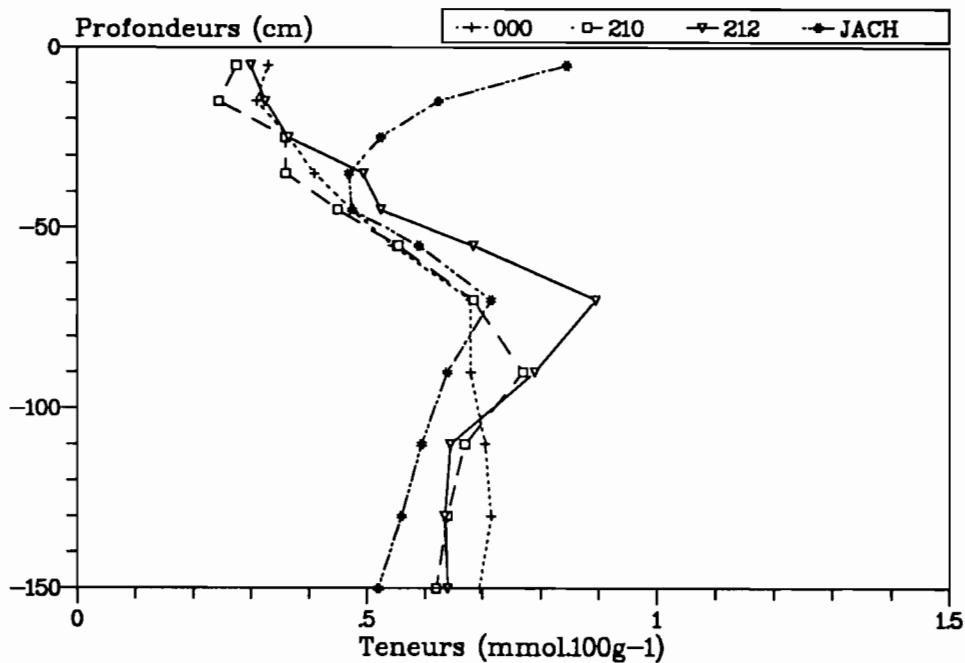


FIGURE X.11
Profils de teneurs en magnésium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à l'acétate d'ammonium)

TABLEAU X.28
Ecart-type des déterminations de calcium échangeable dans les sols

Parcelle	Profondeur (cm)	Moyenne (mmol.100g ⁻¹)	Ecart-type (mmol.100g ⁻¹)	CV (%)
N0 P0 K0	0-10 cm	0,79	0,28	35
	30-40 cm	0,85	0,18	22
	140-160 cm	0,80	0,14	17
N2 P2 K2	0-10 cm	0,78	0,16	21
	30-40 cm	1,15	0,20	18
	140-160 cm	1,22	0,30	24

Le calcul des écart-types sur les teneurs n'a été effectué que pour le calcium (tableau X.28). Comme pour l'azote total, il n'apparaît aucune liaison entre les écart-types des erreurs et la parcelle ou la profondeur. C'est pourquoi un coefficient de variation de 25 % a été retenu pour l'ensemble des niveaux. L'échantillon moyen provenant de 6 prélèvements, le coefficient de variation des quantités de calcium échangeable est de 11 % et celui des variations entre deux parcelles de 21 %.

TABLEAU X.29
Quantités de calcium et magnésium échangeables dans les sols

Parcelle	Profondeur (cm)	Calcium (kg.ha ⁻¹)	Magnésium (kg.ha ⁻¹)
Jachère	0-60 cm	3 164 ± 348	1 415
	0-100 cm	5 043 ± 555	2 453
N2 P1 K0	0-60 cm	2 868 ± 315	899
	0-100 cm	4 889 ± 538	2 014
N2 P1 K2	0-60 cm	3 390 ± 373	1 077
	0-100 cm	5 566 ± 612	2 368

TABLEAU X.30
pH de l'horizon de surface (0-10 cm) de Davié selon la fertilisation minérale (après 15 ans de succession maïs-maïs)

P K	0	N 1	2
0 2	5,13	4,76	4,29
1 2	5,62	5,14	5,21
2 2	5,61	5,19	5,10

N1 = 60 N2 = 120
P1 = 23 P2 = 46
K1 = 42 K2 = 85
(en kg.ha⁻¹.an⁻¹ de N, P et K)

La quantité de calcium est plus faible dans la jachère que dans la parcelle N2 P1 K2 (-523 ± 110 kg Ca.ha⁻¹, tableau X.29), alors que le bilan entre les apports et les exportations indique une diminution de la quantité de calcium échangeable dans la parcelle N2 P1 K2 de 233 kg Ca.ha⁻¹ par rapport à la parcelle initiale. A Kouvé, où l'évolution des teneurs en calcium échangeable a été suivie au cours du temps, la diminution des quantités contenues dans le sol (0-40 cm) a été d'environ 500 kg Ca.ha⁻¹ en 15 ans, soit 25 % du total du sol, alors que les plantes n'en ont exporté qu'environ 150 kg Ca.ha⁻¹ (figure X.12). La quantité de magnésium est légèrement plus élevée dans la parcelle en jachère (+85 kg Mg.ha⁻¹).

Entre la parcelle N2 P1 K2 et la parcelle N2 P1 K0, la diminution des quantités de calcium et de magnésium échangeables est de 522 ± 110 kg Ca.ha⁻¹ et de 354 kg Mg.ha⁻¹, alors que le bilan entre les apports et les exportations a donné des valeurs de 304 kg Ca.ha⁻¹ et 219 kg Mg.ha⁻¹. Le pH reflète l'évolution des teneurs en calcium échangeable : il était de 5,6 dans la parcelle N2 P1 K2 (0-10 cm) et 5,1 dans la parcelle N2 P1 K0 en 1987. L'évolution du pH se poursuit toujours : entre 1987 et 1991, il a diminué de 0,4 unités de pH en

N2 P1 K2. A fertilisation en potassium et en phosphore égale, le pH des parcelles de l'essai diminue lorsque la fertilisation azotée augmente (tableau X.30).

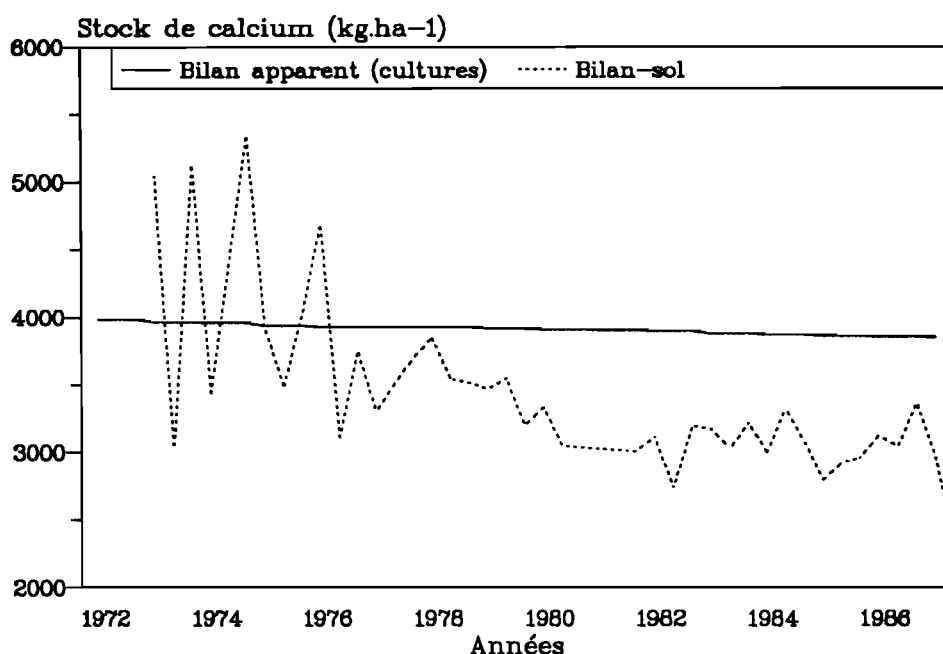


FIGURE X.12

Comparaison du bilan apparent du calcium (exportation par les cultures) et du bilan du sol à Kouvé (succession annuelle maïs-coton sans fertilisation, calcium échangeable du sol à la cobalti-hexamine, source IRCT)

2.3.2. INTERPRÉTATION

Comme la quantité de calcium échangeable de la parcelle en jachère est inférieure à celle de la parcelle N2 P1 K2, la jachère de 11 ans ne permet pas de remonter suffisamment de calcium des horizons profonds vers la surface pour reconstituer le stock échangeable du sol. Le bilan du magnésium est plus favorable, mais il reste négatif par rapport à l'état initial en prenant un bilan de $-160 \text{ kg Mg.ha}^{-1}$ pour la parcelle N2 P1 K2. Ces observations peuvent s'expliquer par les faibles apports atmosphériques de calcium et de magnésium (tableau X.1), par les teneurs réduites en profondeur (les racines de la jachère ne remontent donc que peu de calcium et de magnésium en surface) et par le fait que le couvert végétal de la jachère se reconstitue lentement lorsque les sols ont été cultivés pendant longtemps.

Les différences entre les deux parcelles cultivées sont du même ordre de grandeur, que le bilan soit effectué à partir des apports et des exportations ou à partir des quantités d'éléments échangeables du sol. Elles prouvent que la carence en potassium a provoqué une augmentation de la lixiviation du calcium et du magnésium de plusieurs centaines de kilogrammes à l'hectare en 11 ans.

Quel est le rôle de la fertilisation azotée sur la lixiviation du calcium et du magnésium ? Les chiffres de pH (tableau X.30) indiquent que le seul fait d'apporter de l'urée provoque une acidification du sol d'environ 0,4 unités pH pour 60 kg N.ha⁻¹.an⁻¹ (différence entre N1 et N0). Mais la comparaison des parcelles N2 P1 K2 et N2 P1 K0 montre que ce n'est pas seulement le niveau de fertilisation qui intervient, mais également l'adaptation de la fertilisation aux besoins des cultures. En effet, une fertilisation azotée excédentaire provoque l'augmentation des teneurs en calcium et en magnésium en solution lors de la saison des pluies qui suit, en raison de la liaison qui existe dans la solution du sol entre les teneurs en nitrates, en calcium et en magnésium.

Sur le témoin N0 P0 K0 de l'essai étudié, la quantité de calcium échangeable est de 1 637 kg Ca.ha⁻¹ dans la tranche 0-40 cm. A Kouvé, la quantité de calcium échangeable d'une parcelle comparable est de 2 823 kg Ca.ha⁻¹. Mais sur un autre essai réalisé au Bénin sur des terres de Barre déjà épuisées à l'origine de l'essai (Aplahoué), la quantité de calcium échangeable n'est que de 340 kg Ca.ha⁻¹ dans la tranche 0-40 cm après 10 années de culture sans engrais (données IRCT). *La culture continue sans apport de calcium provoque donc progressivement une diminution importante des quantités de calcium échangeable du sol.*

2.4. Le phosphore

2.4.1. RÉSULTATS

Tous les profils de répartition du phosphore Olsen-Dabin dans le sol sont identiques en-dessous de 40 cm, confirmant la faible mobilité du phosphore dans ces sols (tableau X.31 et figure X.13).

TABLEAU X.31
Teneurs en phosphore assimilable dans le sol (en ‰, méthode Olsen-Dabin)

Profondeur (cm)	Jachère	N0 P0 K0	N2 P1 K0	N2 P1 K2
0-10	0,011	0,012	0,053	0,034
10-20	0,007	0,010	0,039	0,017
30-40	0,006	0,005	0,007	0,007
50-60	0,006	0,005	0,005	0,005
100-120	0,007	0,005	0,007	0,005

Pour comparer les différentes parcelles, l'évaluation des quantités de phosphore Olsen-Dabin peut donc s'effectuer dans la tranche 0-40 cm. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

Jachère	49 kg P.ha ⁻¹
N0 P0 K0	55 kg P.ha ⁻¹
N2 P1 K0	178 kg P.ha ⁻¹
N2 P1 K2	112 kg P.ha ⁻¹

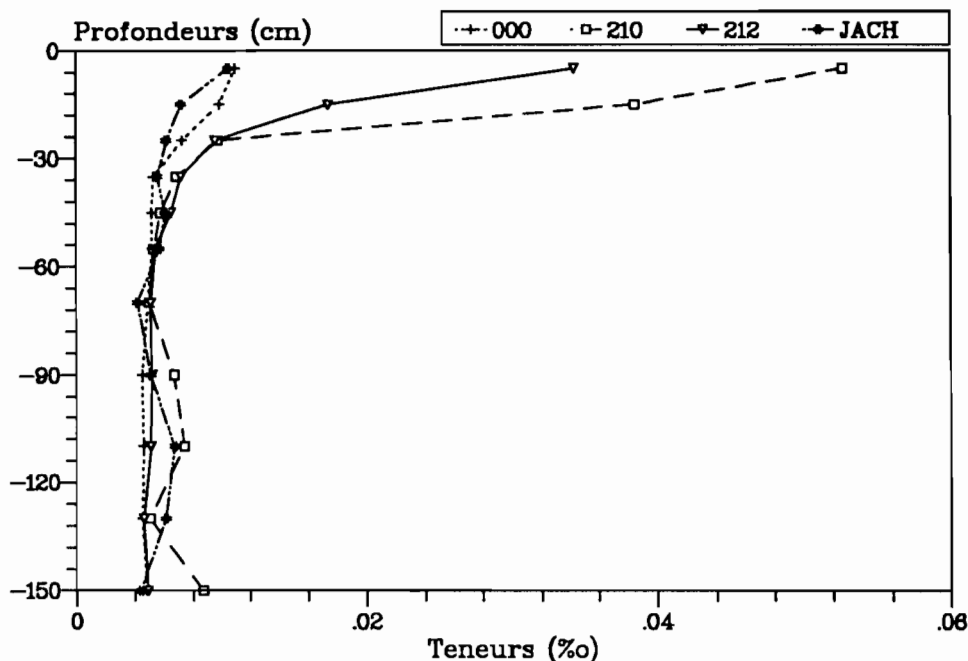


FIGURE X.13
Profils de teneurs en phosphore Olsen-Dabin dans le sol

Il n'est pas possible d'évaluer la précision des résultats, car les analyses nécessaires n'ont pas été effectuées. La différence de quantités de phosphore Olsen-Dabin entre la parcelle N2 P1 K2 et la parcelle en jachère est de 63 kg P.ha⁻¹, alors que le bilan entre les apports et les exportations indique un gain de 101 kg P.ha⁻¹ pour la parcelle N2 P1 K2 par rapport à la parcelle initiale. Pour la parcelle N2 P1 K0, la différence avec la parcelle en jachère est de 129 kg P.ha⁻¹ pour un gain de 188 kg P.ha⁻¹ par rapport à la parcelle initiale. Enfin, la différence entre les deux parcelles cultivées est de 66 kg P.ha⁻¹, pour un bilan entre les apports et les exportations de 87 kg P.ha⁻¹. La différence entre les deux évaluations du bilan ne dépasse donc pas 60 kg P.ha⁻¹. Par ailleurs, dans tous les cas les valeurs obtenues sont plus élevées en évaluant le bilan par la différence entre les apports et les exportations qu'en l'effectuant à partir du phosphore Olsen-Dabin du sol. Les différences entre les chiffres obtenus à l'aide des deux approches correspondent à 24 % des apports d'engrais dans le cas de la parcelle N2 P1 K0 et à 15 % des apports d'engrais pour la parcelle N2 P1 K2.

TABLEAU X.32
Résultats de l'expérience de dilution isotopique réalisée à l'aide de ³²PO₄ (déterminations J.C. FARDEAU)

Parcelle	M1 (mg.kg sol ⁻¹)	r ₁ /R	n	E ₁ (‰)
N0 P0 K0	1,16	0,50	0,17	0,0023
N2 P2 K2	0,60	0,55	0,14	0,0012

Une détermination des échanges entre les différents compartiments du sol a été réalisée par échanges isotopiques à l'aide de ³²PO₄ (FARDEAU *et al.*, 1985) sur l'horizon 0-30 cm des parcelles N0 P0 K0 et N2 P2 K2

(tableau X.32). Les chiffres obtenus montrent que les deux parcelles présentent de faibles quantités E_1 de phosphore isotopiquement échangeable et que leur pouvoir fixateur est très réduit ($r_1/R > 0,2$; FARDEAU, comm. pers.).

2.4.2. INTERPRÉTATION

Le phosphore n'étant pas entraîné par lixiviation en-dessous de 40 cm, les teneurs en phosphore Olsen-Dabin de la jachère peuvent être considérées comme au moins égales à celles de la parcelle initiale. Compte-tenu du fait que les teneurs de la parcelle N0 P0 K0 sont proches de celles de la parcelle en jachère, l'augmentation de teneur en phosphore résultant de la jachère doit cependant être faible. Les différences de quantités de phosphore Olsen-Dabin entre les parcelles cultivées et la jachère constituent donc un minimum probablement proche de la valeur des différences avec la parcelle initiale.

Environ 20 % des apports d'engrais phosphatés ne sont donc plus sous une forme dite assimilable après 11 ans d'expérimentation. Ce chiffre est compatible avec les valeurs du rapport r_1/R obtenues lors de l'expérimentation de dilution isotopique (FARDEAU, comm. pers.). Cette fixation, qui provient probablement de la présence de goethite et d'hématite, est souvent plus prononcée dans les sols ferrallitiques. Mais la méthode Olsen-Dabin extrait des quantités de phosphore supérieures à celles que les plantes peuvent réellement absorber. Il se produit un "vieillessement" du phosphore apporté, qui devient progressivement moins assimilable. D'après les valeurs du rapport r_1/R , cette évolution pourrait s'effectuer en un ou deux ans.

3. CONSÉQUENCES SUR LA FERTILISATION MINÉRALE DU MAÏS

3.1. La fertilisation potassique

L'étude statistique des rendements (SARAGONI *et al.*, 1991) montre que des différences de rendement significatives sont apparues à Davié entre le témoin sans apport de potassium (N2 P2 K0) et les parcelles recevant une fertilisation complète après 5 ans (figure X.14). La carence potassique apparaît brutalement et le rendement devient égal à celui du témoin absolu. La temps de culture après lequel apparaît la carence potassique ne semble pas varier sur les terres de Barre non dégradées du Togo : le même résultat a été obtenu par les chercheurs de l'IRCT sur la station de Kouvé (JALLAS, comm. pers.). Elle se produit lorsque les exportations par les récoltes et leurs résidus atteignent environ 200 kg K.ha⁻¹, ce qui correspond à la différence de potassium échangeable entre la parcelle en jachère et les parcelles K0. En sol dégradé, l'augmentation de rendement résultant de la fertilisation potassique est net dès la première année de culture (LOUETTE, 1988) : la carence potassique est absolue.

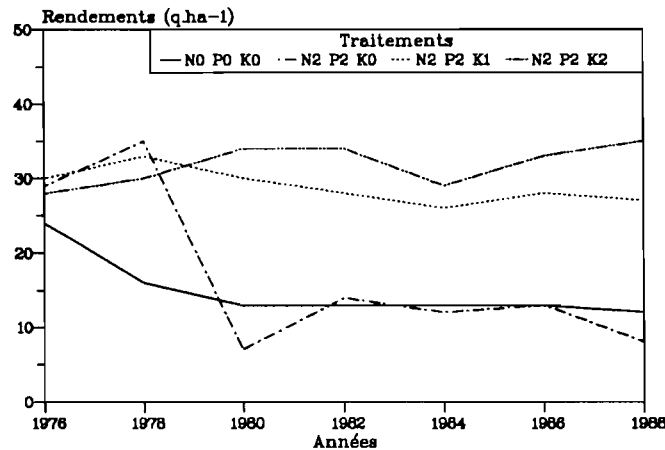


FIGURE X.14
Evolution des rendements selon la fertilisation minérale à Davié

Les teneurs en potassium échangeable sont de l'ordre de $0,09 \text{ mmol.}100\text{g}^{-1}$ dans les horizons 0-10 cm des parcelles K0 de Davié. Or, le seuil absolu de carence en potassium est généralement placé à $0,10 \text{ mmol.}100\text{g}^{-1}$ et PIERI (1989) estime que le niveau critique du potassium dans les sols est atteint lorsque la teneur en potassium échangeable est de 10 % de la capacité d'échange cationique, alors que dans les sols étudiés ce rapport est seulement de 2,7 %. *Une carence absolue en potassium existe donc dans les sols dégradés ; elle apparaît après quelques années de culture en sols non dégradés.*

Lorsque la culture est poursuivie sans fertilisation potassique, des rendements compris entre 500 et $1\,500 \text{ kg.ha}^{-1}$ se maintiennent pendant plusieurs années, en raison de la libération de potassium échangeable par les alternances d'humectation et de dessiccation. Mais après une durée variable selon les réserves de potassium du sol, les rendements deviennent inférieurs à 500 kg.ha^{-1} : sur l'essai d'Aplahoué, où les sols étaient épuisés dès l'origine, cette phase s'est produite la 5ème année sur la parcelle où les résidus de récolte étaient exportés et la 8ème année sur la parcelle où ils étaient restitués (CRETENET, comm. pers.). *La libération de potassium sous une forme échangeable, qui explique les difficultés rencontrées pour relier les rendements en milieu paysan aux teneurs en potassium échangeable, ne constitue donc pas une ressource à long terme pour l'agriculture de la région.*

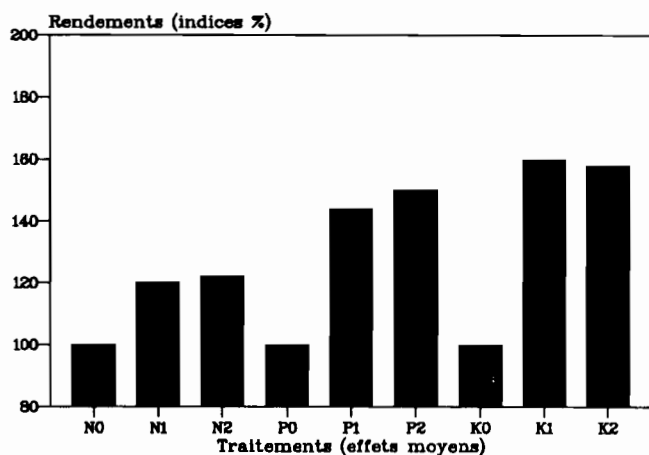


FIGURE X.15
Rendement en maïs de première saison en fonction de la fertilisation (Davié, moyenne 1976-1989, d'après SARAGONI et al., 1991)

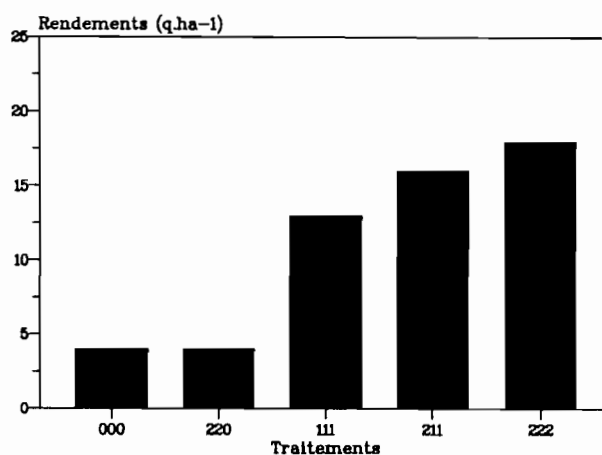


FIGURE X.16
Rendement moyen en maïs en deuxième saison des pluies à Davié (moyenne 1976-1989, d'après SARAGONI et al., 1991)

Parmi les trois éléments majeurs, c'est l'apport de potassium qui produit les plus fortes augmentations de rendement en maïs lors de la première saison de culture (+60 %, figure X.15). Au cours de la deuxième saison, l'effet est encore plus marqué (figure X.14) : les rendements parviennent à peine à 5 q.ha⁻¹ sans fertilisation potassique, mais il suffit d'une fertilisation de N30 P30 K30 pour obtenir un rendement d'environ 12 q.ha⁻¹, même en conditions hydriques contraignantes (figure XI.16). Ce résultat peut être interprété comme une conséquence des liaisons entre l'alimentation hydrique et potassique du maïs (chapitres VI et IX). Lorsque les teneurs en potassium du complexe sont faibles, le ralentissement du transfert par diffusion du potassium en conditions sèches pourrait induire ou aggraver une carence en potassium, provoquant une diminution de la croissance de la plante et, en particulier, de celle des racines. *La fertilisation potassique semble agir directement, en levant la carence et, indirectement, en favorisant la croissance des racines et donc l'accès à une réserve utile racinaire plus importante.*

Sur l'essai étudié, la fixation du potassium a été estimée à environ 20 % des apports en utilisant un échange à l'acétate d'ammonium ou la dilution isotopique et à 5 % en utilisant la méthode de Van der Marel (OLIVER, comm. pers.). Pratiquement, ces valeurs de fixation interviennent peu sur la conduite de la fertilisation potassique : *comme le potassium n'est que peu entraîné, il suffit de l'apporter à une dose légèrement supérieure aux exportations.* La dose maximale conseillée est de 60 kg K₂O.ha⁻¹ et une fumure d'entretien est suffisante pour éviter l'apparition de carences (LOUETTE, 1988). Une fertilisation plus forte que les exportations (parcelle N2 P1 K2) ne provoque pas de diminution de rendement et le potassium apporté reste pour la plus grande partie sous forme échangeable dans la zone d'extraction racinaire. Seule une fertilisation à des doses atteignant plusieurs centaines de kilogrammes à l'hectare entraîne des pertes

par lixiviation conséquentes et risque de provoquer une acidification des sols en provoquant le passage du calcium et du magnésium en solution (chapitre IX).

3.2. La fertilisation azotée

Le délai de réponse à l'engrais potassique est proche de celui observé pour la fertilisation azotée : les rendements sont augmentés dès la première année en sol dégradé, mais seulement après quelques années en sol non dégradé (LOUETTE, 1988).

Les teneurs en matière organique rendent compte de cette réponse à l'engrais azoté. En effet, elles sont de 2 à 3 % lors de la défriche sur les sols non dégradés (jachère ancienne) contre 1 % environ en sol dégradé (sols en culture ou jachère de courte durée). Les sols non dégradés commencent à répondre à la fumure azotée lorsque la teneur en matière organique est descendue à environ 1,5 % alors que les sols dégradés sont carencés dès le début des essais.

L'effet de la fertilisation azotée est net sur les rendements moyens à Davié sur la période 1976-1989 (figure X.15). Le supplément de rendement apporté par l'azote pris séparément (effet moyen de l'élément) est de 20 % quelle que soit la dose appliquée (SARAGONI *et al.*, 1991). L'ordre de grandeur semble général : pour les terres de Barre non dégradées du Bénin, WERTS (1979) indique des augmentations de rendement de 25 à 35 %. La fertilisation azotée provoque toujours une augmentation des rendements en maïs après quelques années de culture, mais cette augmentation est plus importante sur les sols dégradés que sur les autres sols. Ces valeurs d'effet moyen sont faibles, car les sols sont souvent l'objet de carence absolues en potassium ou en phosphore : avec une fertilisation en phosphore et potassium, l'apport d'azote peut augmenter les rendements en première saison de 40 à 160 % en sols dégradés (WERTS, 1979).

Tous les essais qui comportent des analyses de sol ont montré que la fertilisation ammoniacale avait des conséquences négatives sur le sol. Elle provoque une diminution systématique du pH, qui peut atteindre des valeurs inférieures à 5 dans les sols dégradés. L'évolution du pH reflète une baisse de la somme des bases échangeables, en particulier du calcium et du magnésium dont les teneurs peuvent être divisées par quatre. C'est pourquoi DABIN (1956) avait proposé d'ajouter 3 à 4 kg de chaux par kilogramme d'engrais apporté, en soulignant qu'il fallait éviter de chauler massivement en raison des faibles teneurs en matière organique. Par ailleurs, les teneurs en azote du sol ne sont pas augmentées par l'apport d'engrais azoté, en accord avec les résultats antérieurs (EGOUMENIDES, 1981 ; GUIRAUD, 1984). C'est pourquoi les doses d'engrais recommandées sont toujours faibles (entre 20 et 60 kg.ha⁻¹), les fortes doses étant souvent sans effet et parfois même dépressives par diminution du pH.

Les engrais ammoniacaux doivent être apportés à des doses correspondant aux besoins des cultures et à des périodes où l'absorption par les plantes est maximale (fractionnement des apports, chapitre IX). Tout apport en excès est inefficace et dangereux pour la fertilité du sol. Il est inefficace, car l'azote en excès est entraîné par lixiviation (parcelle N2 P1 K0). Il est dangereux, car il provoque la mise en solution du calcium et du magnésium, donc leur lixiviation et l'acidification du sol.

Comme l'acidification des sols est un des principaux problèmes agronomiques de cette zone climatique (PIERI, 1989), il est nécessaire de suivre l'évolution de la quantité de calcium et de magnésium échangeables au cours du temps et de prévoir des apports qui compensent les pertes. Les doses de calcium et de magnésium à apporter dépendent de la fertilisation azotée, mais elles ne sont pas directement proportionnelles aux doses d'azote, comme le prouvent les différences de bilan du calcium et du magnésium calculées sur les parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2.

En l'absence de fertilisation organique, l'apport d'azote est donc indispensable dans tous les sols après quelques années de culture. Cet apport doit être modéré, car même à des doses destinées aux simples compensations des prélèvements par les cultures, l'acidification du sol peut être importante.

3.3. La fertilisation phosphatée

Le temps après lequel la fertilisation phosphatée produit une augmentation de rendement est très variable selon les essais. A Davié, l'étude statistique des rendements montre que le rendement plus faible du témoin absolu par rapport aux autres traitements provient d'une carence en phosphore qui apparaît dès la première année après la défriche de la jachère (figure X.14). Cette carence s'explique par la teneur de 0,011 ‰ de P₂O₅ extrait par la méthode Olsen-Dabin dans l'horizon de surface de la jachère alors que PIERI (1989) considère que le seuil de carence est de 0,030 ‰.

Au Bénin, l'apport de phosphore accroît les rendements en maïs dès la première année en terre de Barre dégradée et après quelques années sur les sols non dégradés. La carence est alors souvent absolue (RAUNET, 1973). Au Togo, les résultats des différents essais ne sont pas concordants, l'effet des engrais phosphatés pouvant être important dès la première année, même en sols non dégradés comme à Davié, ou au contraire non significatif après plusieurs campagnes. L'augmentation de rendement consécutive à la fertilisation phosphatée, constatée à Davié dès la première année, semble représentative des terres de Barre non dégradées du Togo, mais elle n'est pas générale dans la région.

Les résultats obtenus à Davié ont montré que le phosphore n'était pas entraîné par lixiviation, mais qu'il passait progressivement sous une forme non assimilable par les végétaux, bien qu'il reste à 80 % sous une forme extractible par la méthode Olsen-Dabin. *Il faut donc apporter des quantités de phosphore suffisantes à la croissance du maïs sans chercher à augmenter les teneurs dans le sol si celui-ci n'est pas carencé.* D'ailleurs, l'effet moyen de l'apport de phosphore est de 50 % à Davié quelle que soit la dose (figure X.15) et LOUETTE (1988) souligne que de faibles doses sont suffisantes pour combler les carences (40 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ sont préconisées). Les résultats des essais agronomiques ont conduit à préconiser d'apporter une fumure phosphatée destinée à compenser les exportations dès la mise en culture, afin de prévenir l'apparition d'une carence.

Les recherches sur l'utilisation des différentes formes d'engrais phosphaté continuent actuellement. Les phosphates naturels n'ont un effet sur les rendements qu'après 2 ou 3 ans, alors que les engrais

partiellement solubilisés donnent de bons résultats dès la première année (SARAGONI & SOMANA, 1991). En dehors de son action directe sur les rendements, l'engrais phosphaté permet, en raison du calcium qu'il contient, de contrecarrer au moins partiellement l'effet défavorable d'un apport d'urée ou d'ammonium sur les propriétés chimiques du sol.

3.4. Arrière-effet de la fertilisation minérale

L'effet résiduel de l'engrais phosphaté et de l'engrais potassique de première saison de culture sur les rendements de la deuxième peut être évalué à partir des résultats obtenus à Davié entre 1976 et 1980, l'essai ayant été en partie conçu dans ce but (chapitre III). C'est le seul essai sur lequel cet aspect ait été analysé. Le phosphore provoque une augmentation de rendement de près de 40 % par rapport au témoin sans engrais (tableau X.33). L'effet résiduel du potassium permet de doubler (K1), voire de tripler (K2) les rendements. Lorsqu'une fertilisation complète (aux mêmes doses qu'en première saison) fut apportée sur le maïs de deuxième saison à partir de 1981, l'apport de potassium a triplé les rendements par rapport au témoin sans fertilisation et l'apport de phosphore a fait plus que les doubler. Cette augmentation provient en partie de l'action immédiate de la fumure et en partie de l'effet résiduel, mais la part de chacun d'entre eux ne pourrait être précisée qu'à l'aide de radio-isotopes, étant donné que l'apport d'engrais modifie non seulement l'équilibre entre le complexe d'échange et la solution du sol, mais également le comportement des plantes.

TABLEAU X.33
Effet de l'engrais phosphaté et de l'engrais potassique sur le rendement en maïs de deuxième saison (effet résiduel et effet direct, d'après SARAGONI et al., 1991)

Traitement	Effet résiduel (1976 - 1980)		Effet résiduel + effet direct (1981 - 1989)	
	q.ha ⁻¹	indice	q.ha ⁻¹	indice
P0	5,3	100	4,4	100
P1	7,4	140	10,1	230
P2	7,1	134	11,0	250
K0	3,2	100	3,7	100
K1	7,3	228	10,6	292
K2	9,3	291	10,9	295

L'effet résiduel de l'engrais potassique et de l'engrais phosphaté provient de la fixation limitée de ces éléments sur le sol, ainsi qu'il a été noté précédemment. L'effet résiduel plus important de l'engrais potassique semble provenir d'une carence plus sévère que celle en phosphore et d'une fixation moindre.

3.5. La restitution des résidus de récolte

La restitution des résidus de récolte a souvent été testée lors des essais. Associée à une fumure minérale d'environ N30 P30 K30, elle permet juste le maintien du rendement en maïs à un niveau compris entre 4 q.ha⁻¹ et 30 q.ha⁻¹ selon le niveau initial de fertilité du sol (WERTS, 1979 ; MARQUETTE, 1986 ;

SARAGONI *et al.*, 1991). Son action est beaucoup moins marquée que celle d'autres apports organiques (LE COCQ-LITOUX, 1974 ; RAUNET, 1973) et WERTS (1979) souligne que la restitution des résidus n'est pas en mesure de régler le problème du maintien du taux de matière organique dans ces sols. *Mais elle constitue cependant un moyen d'éviter la chute de rendement et de limiter l'apport d'engrais en supprimant une partie des exportations, notamment pour le potassium.* Cette solution se heurte actuellement à l'utilisation des résidus comme combustible ménager, problème qui dépasse le cadre de cette étude.

4. CONCLUSION

L'évaluation du bilan minéral par la différence entre les apports et les exportations et par le bilan des éléments minéraux contenus dans le sol avant et après culture sont deux méthodes qui se confortent et se complètent.

Elles se confortent, car elles sont toutes les deux affectées par des sources d'erreurs qui peuvent modifier les termes du bilan. Lorsque le bilan est évalué à partir des apports et des exportations, deux termes du bilan sont délicats à évaluer : les exportations par les résidus de récolte et les pertes par lixiviation. Les exportations par les résidus de récolte sont généralement déduites des rendements obtenus. Or, le rapport entre le poids des grains et le poids des résidus varie. De plus, les teneurs dans les résidus varient selon la fertilisation, en particulier les teneurs en potassium (variations de 1 à 3, chapitre IV). Les pertes par lixiviation nécessitent d'évaluer le drainage et les teneurs dans les eaux qui percolent. Les problèmes posés par l'évaluation du drainage ont été étudiés dans la première partie. Les teneurs dans les eaux de drainage sont difficiles à estimer précisément en raison de leur évolution au cours du temps et de leur variabilité spatiale. Les problèmes de variabilité sont également difficiles à résoudre dans le cas de l'évaluation du bilan par les analyses de sol. Dans ce cas, la variabilité n'est pas seulement spatiale, mais elle est également analytique. La validité du bilan des éléments contenus dans le sol dépend par ailleurs du choix des analyses : un bilan effectué à partir des éléments échangeables ne prend pas en compte la totalité des éléments, mais il est difficile d'utiliser les analyses d'éléments totaux en raison de la forte variabilité (environ 30 %) des résultats d'analyse.

Les deux méthodes se complètent, car elles fournissent des données dans des domaines différents. Le bilan entre les apports et les exportations repose sur l'évaluation des flux. Il permet donc de déterminer les termes sur lesquels il faut intervenir pour redresser un bilan déséquilibré. Le bilan du sol donne surtout des indications sur les quantités d'éléments assimilables du sol (en utilisant en particulier les données de BOYER, 1982) et sur les carences minérales, en liaison avec la réponse des végétaux. Cette approche fournit également la répartition des éléments minéraux dans le sol, donc des données sur la possibilité pour les racines de les atteindre.

Les résultats obtenus montrent que la lixiviation est le terme le plus important du bilan du calcium, du magnésium et souvent de l'azote. Dans tous les cas étudiés, le bilan du calcium et du magnésium sont fortement négatifs, les pertes par lixiviation n'étant pas compensées par des apports d'engrais. La lixiviation du calcium et du magnésium dépend en grande partie de la concentration en nitrates de la solution du sol, donc de la fertilisation azotée ammoniacale, et de l'apport de cations comme le potassium qui provoquent le passage du calcium et du magnésium en solution. Ces conclusions rejoignent celles de SEMENT (1980), CHABALIER (1984) et de PIERI (1989). Dans le cas des parcelles fertilisées en potassium, les pertes de cet élément par lixiviation sont faibles, en raison de la fixation sur le complexe d'échange. Elles ne sont cependant pas toujours négligeables : dans la parcelle non fertilisée, elles sont du même ordre de grandeur que les autres termes du bilan. Par ailleurs, PIERI & OLIVER (1986) ont montré que, dans le cas d'apports d'engrais potassique atteignant plusieurs centaines de kilogrammes à l'hectare par an, les pertes de potassium par lixiviation pouvaient représenter jusqu'à 68 % des apports.

La différence entre le bilan des éléments contenus dans le sol et celui établi en calculant la différence entre les apports et les exportations a également conduit à aborder le problème de la fixation et de la libération du potassium et du phosphore. Dans les terres de Barre, une fraction de la quantité de ces deux éléments, apportés sous forme d'engrais, est fixée par le sol. Dans les deux cas, la proportion de la quantité apportée qui n'est plus extractible, soit par un échange à l'acétate dans le cas du potassium, soit par une attaque par un mélange de bicarbonate de sodium et de fluorure d'ammonium (méthode Olsen-Dabin) dans celui du phosphore, est de l'ordre de 20 %. La fixation du potassium semble provenir de la présence de faibles quantités d'interstratifiés dans la phase argileuse du sol, alors que celle du phosphore serait liée à la présence des oxydes de fer. Au point de vue agronomique, le comportement des deux éléments est différent. En effet, le potassium qui n'est pas fixé sur le sol reste directement assimilable par les plantes alors que le phosphore passe progressivement sous une forme moins assimilable qui reste cependant extractible par le réactif Olsen-Dabin.

Lorsque les terres de Barre sont mises en culture, différentes carences apparaissent successivement. Si le sol est dégradé, des carences en azote et en potassium se manifestent sur le maïs dès la première année de culture, alors qu'elles n'apparaissent qu'après quelques années après une longue jachère. La carence en phosphore se manifeste après un temps variable, mais elle apparaît toujours. Dans ce cadre général, les résultats obtenus sur l'essai factoriel NPK de Davié sont typiques des terres de Barre non dégradées. La fertilisation minérale du maïs en éléments majeurs doit prendre en compte la dynamique des éléments minéraux dans le sol :

- un apport de potassium légèrement supérieur aux exportations (afin de compenser les faibles pertes par lixiviation) permet d'obtenir des rendements de 20 à 30 q.ha⁻¹ selon les sols en première saison et de diminuer la sensibilité de la culture aux stress hydriques, tout en maintenant la teneur en potassium des sols ; une fertilisation à des doses plus importantes ne présente cependant pas d'effet dépressifs et le potassium apporté reste pour la plus grande partie sous une forme assimilable ;

- les apports d'azote sous forme d'urée ou d'ammonium doivent compenser au plus juste les exportations par la plante et par la lixiviation (en évitant une fertilisation excessive qui provoque une diminution du pH et la lixiviation du calcium et du magnésium) ; les essais agronomiques ont montré que leur efficacité est améliorée lorsque l'apport est fractionné ;
- une fertilisation phosphatée destinée à couvrir les besoins de la plante est suffisante, en raison du "vieillissement" du phosphore apporté ;
- la fertilisation minérale doit être équilibrée : lorsque la croissance du maïs est réduite par une carence minérale, la diminution du prélèvement des nitrates par les racines provoque des pertes en azote, calcium et magnésium par lixiviation ;
- la restitution des résidus de récolte ne permet pas d'augmenter les rendements, mais elle freine la diminution des teneurs en calcium, magnésium et potassium du sol et permet de diminuer les quantités d'engrais à apporter.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Dans les sols étudiés, l'utilisation de capteurs de solution en céramique poreuse a permis de mettre en évidence l'apparition de faibles teneurs en nitrates de la solution du sol pendant la période au cours de laquelle les besoins de la plante sont maximaux. Comme les nitrates de la solution du sol constituent la seule source d'azote pour les plantes, *les capteurs de solution constituent un dispositif qui peut contribuer à un meilleur suivi de la nutrition azotée des cultures*. Leur intérêt est en revanche très limité en ce qui concerne l'alimentation potassique et phosphatée. En effet il est apparu que l'étude du potassium en solution donnait peu d'indications sur l'alimentation potassique du maïs, celle-ci provenant principalement de la libération de potassium par la phase solide du sol. En ce qui concerne l'étude du phosphore, les capteurs en céramique ne constituent pas un dispositif adapté, car des phénomènes d'adsorption sur les parois ne permettent pas de récolter des échantillons représentatifs.

L'étude des pertes par lixiviation dans le milieu naturel est délicate, en raison de la variabilité spatiale des phénomènes et de la circulation de l'eau dans des voies préférentielles. Dans ce contexte, *les capteurs en céramique constituent une amélioration par rapport aux lysimètres, bien que plusieurs problèmes relatifs à la représentativité des solutions recueillies ne soient encore qu'imparfaitement résolus*. Mais les chiffres de lixiviation obtenus sont toujours peu précis, car aux erreurs sur les teneurs (environ 25 %) s'ajoutent celles sur la détermination du drainage moyen (environ 50 %).

Lorsque le bilan des éléments minéraux est établi à partir des analyses de sol, il est nécessaire de considérer toute la tranche de sol dans laquelle les teneurs sont différentes de celles du profil choisi comme référence. Si pour les éléments peu mobiles comme le phosphore une épaisseur de 40 cm est suffisante, celle-ci peut atteindre 1 m dans le cas du calcium ou du magnésium. Avec les méthodes analytiques actuelles, seul le bilan des éléments échangeables (potassium, calcium et magnésium lors de cette étude) ou dits assimilables (phosphore) peut être établi. Pour ces analyses, le coefficient de variation total des teneurs (variabilité

spatiale et variabilité analytique confondus) est généralement compris entre 15 et 25 %. Il s'agit probablement d'un minimum, en raison de l'homogénéité latérale des sols étudiés et du soin apporté à la réalisation des analyses. Quant aux analyses d'éléments totaux ou "mobilisables", elles peuvent fournir des indications complémentaires sur la présence de réserves ou de phénomènes de fixation sous forme non échangeable, mais leur précision reste trop limitée pour permettre l'établissement de bilans.

La dynamique du potassium est caractérisée par une fixation massive sur la phase solide du sol, sous forme échangeable et non échangeable. Dans tous les cas, la teneur en potassium de la solution est inférieure à $0,15 \text{ mmol.l}^{-1}$ à 180 cm avec les niveaux de fertilisation utilisés : le potassium migre peu dans le sol et les pertes par lixiviation sont très limitées. La plus grande partie du potassium fixé sur le complexe est en équilibre dynamique instantané avec celui qui est en solution, mais il existe également un pool de potassium non échangeable, probablement lié à la présence d'interstratifiés, qui peut devenir échangeable sous l'influence d'alternances d'humectation et de dessiccation lorsque le sol est cultivé sans fertilisation potassique. Cette libération de potassium non échangeable pourrait expliquer les difficultés rencontrées lorsque des corrélations ont été tentées entre les teneurs en potassium échangeable des sols et les rendements en milieu paysan.

La dynamique de l'azote est complexe, et les méthodes utilisées lors de cette étude n'ont permis qu'une approche très partielle. L'urée apportée semble organisée très rapidement après l'apport et être minéralisée lors de la saison des pluies suivante, sans que l'azote soit incorporé dans des matières organiques stables. Il en résulte des pertes par lixiviation qui peuvent être importantes lorsque les apports sont supérieurs aux quantités absorbées par la plante.

Les dynamiques du calcium et du magnésium sont très liées, caractérisées par des pertes par lixiviation de plusieurs dizaines de kilogrammes par hectare et par an. La mise en solution de ces deux éléments, qui résulte d'équilibres au niveau du complexe d'échange, est liée aux teneurs en nitrates de la solution du sol, donc à la fertilisation azotée, et aux apports de potassium. Mais le niveau de fertilisation azotée est insuffisant pour caractériser la mise en solution du calcium et du magnésium. Il est également nécessaire de prendre en compte l'équilibre entre les différents éléments : si la plante est carencée en un élément, l'absorption d'azote est limitée ; la lixiviation du calcium et du magnésium qui en résulte est équivalente à celle qui apparaîtrait avec un niveau de fertilisation azotée plus élevé dans un contexte de fertilisation équilibrée. Sans apports de calcium et de magnésium, la teneur de ces deux éléments décroît donc régulièrement dans les sols, ce qui produit une diminution progressive du pH.

Le phosphore est peu mobile dans les terres de Barre de Davié : les pertes par lixiviation sont négligeables. La différence entre le bilan des apports et des exportations et le bilan du sol montre une fixation d'environ 20 % du phosphore apporté sous une forme non extractible à l'aide du réactif Olsen-Dabin, résultats confirmés par dilution isotopique. Le phosphore apporté reste donc dans le sol, mais sous une forme qui devient progressivement moins assimilable.

Le système cultural utilisé sur la parcelle N2 P1 K2 est-il un système durable ?

Au point de vue minéral, le bilan est positif pour l'azote, le phosphore et le potassium, les doses d'engrais potassiques et phosphatés apportées étant largement supérieures au total des exportations. Il faut cependant noter que ce résultat est obtenu avec restitution des résidus de récolte. Sans restitution des résidus, le bilan serait négatif pour l'azote et le potassium. Comme les quantités de résidus et les teneurs des éléments qu'ils contiennent augmentent avec le niveau de fertilisation minérale, *la restitution des résidus devient un facteur de maintien de la fertilité minérale d'autant plus important que le niveau de fertilisation est élevé.*

Mais le bilan du calcium et du magnésium est négatif, ce qui risque de produire des chutes de pH à moyen terme, comme cela a été observé sur les terres de Barre du Bénin. Il est donc impératif de suivre l'évolution des teneurs de ces deux éléments et du pH au cours du temps et de mettre en place des systèmes culturaux qui permettent de limiter les pertes par lixiviation (couverture du sol par les cultures, enracinement profond, fertilisation équilibrée) et de les compenser par des apports. Au point de vue organique, cette étude ne permet pas de conclure sur la durabilité du système. Mais en estimant la minéralisation de la matière organique à 1 % par an et en constatant que les engrais apportés ne sont pas incorporés dans des fractions stables, il semble que le bilan organique ne soit pas équilibré.

Il apparaît donc en définitive que le bilan de l'agro-système étudié est positif pour les éléments majeurs, mais qu'il est faiblement négatif pour le calcium, le magnésium et probablement la matière organique. Le maintien du potentiel de production des sols dans le moyen terme nécessitera donc de recourir à des apports de calcium et de magnésium et à un enfouissement de matières organiques évoluées (fumier ou compost). Ces solutions ne seront réalistes que lorsque les revenus des agriculteurs leur permettront de faire face aux dépenses supplémentaires qu'elles entraînent : le passage d'une agriculture fondée sur l'exploitation "minière" du sol (VAN DER POL, 1990) à une agriculture permettant le maintien du potentiel de production ne semble pouvoir s'effectuer que si de nouveaux systèmes de production plus productifs parviennent à être mis en place.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Au terme de cette étude d'un agro-système sol-plante-atmosphère, nous sommes conduits à réfléchir aux conditions qui assurent la meilleure valorisation des ressources en eau et en éléments minéraux en terme de production agricole dans les milieux tropicaux, et au Togo méridional en particulier. Dans ce domaine, les résultats peuvent être rangés en cinq rubriques.

IMPORTANCE DES STRESS HYDRIQUES SUR LA PRODUCTION AGRICOLE

Tout stress hydrique qui affecte le maïs NH1 au cours de la période comprise entre le 25ème et le 85ème jour du cycle cultural produit une diminution de rendement, avec une sensibilité maximale à la période de la floraison (chapitres VI et VII). En conditions de fertilisation optimale, deux relations lient l'alimentation hydrique du maïs et la quantité de grain obtenue : une relation entre l'évapotranspiration totale sur le cycle et le rendement, interprétée en terme de *potentiel de production*, et une relation entre la satisfaction des besoins hydriques de la plante au moment de la floraison et le rendement, interprétée en terme de *facteur de risque*. *C'est en semant le maïs à des dates pour lesquelles l'évapotranspiration sur le cycle est statistiquement la plus élevée et les risques à la floraison les plus faibles que les ressources hydriques sont les mieux valorisées.*

INTERACTIONS ENTRE L'ALIMENTATION HYDRIQUE ET L'ALIMENTATION MINERALE

Lorsque l'alimentation hydrique est optimale, une carence en potassium ne produit qu'une faible diminution de l'évapotranspiration du couvert (chapitre VI), mais entraîne une chute importante du rendement (-65 %). Il en résulte une diminution de l'efficacité de l'eau évapotranspirée (chapitre VI) : exprimée par le rapport entre le rendement en grain et l'évapotranspiration sur la totalité du cycle, un litre d'eau produit un gramme de grains en conditions de fertilisation optimale alors qu'il n'en produit que 0,4 g lorsque la culture est carencée en potassium.

Lorsqu'un stress hydrique affecte une plante carencée en potassium, la croissance et l'évapotranspiration sont fortement ralenties (chapitres IV et VI), et le rendement devient très faible. Les effets sont plus importants que ceux de chaque facteur pris indépendamment. Le potassium étant transporté vers les racines par diffusion, les transferts des ions fixés sur le complexe d'échange vers la plante par la phase liquide sont fortement ralenties lorsque le milieu devient moins humide (chapitre VI) : le stress hydrique limite

l'alimentation potassique. Par ailleurs, la carence potassique semble provoquer une ouverture incomplète des stomates, donc limiter l'évapotranspiration, et entraîner une réduction du développement du système racinaire, donc une moins bonne exploitation des réserves hydriques du sol (diminution des tensions de l'eau du sol et de la réserve utile racinaire) : la carence potassique modifie l'alimentation hydrique de la plante. *L'alimentation hydrique et l'alimentation potassique du maïs sont donc liées.*

Lorsque la croissance de la plante est ralentie, en raison de problèmes d'alimentation hydrique ou de carence potassique, l'évapotranspiration diminue et la quantité d'eau drainée augmente. En sol nu, les pertes par drainage sont encore plus élevées (+200 mm, soit un drainage d'environ 50 % des précipitations). Les pertes par drainage sont donc les plus faibles pour une culture présentant une croissance sans contrainte. Les pertes par ruissellement, non prises en compte dans cette étude, accentuent encore les pertes sur les parcelles qui ne sont pas couvertes par une culture bien développée.

Une culture présentant une croissance sans contrainte assure donc la meilleure valorisation des ressources en eau, en limitant les pertes par drainage et ruissellement et en présentant la meilleure efficacité de l'eau évapotranspirée.

INTERET ET LIMITES DES ANALYSES DE SOL

Les analyses permettent de mettre en évidence la carence du sol en certains éléments minéraux pour une culture donnée : dans cette étude, les carences potassiques et phosphatées sont nettes pour le maïs lorsque la fertilisation minérale ne compense pas les exportations. Elles permettent également de suivre le passage des éléments minéraux entre des compartiments du sol dans lesquels ils sont plus ou moins fixés, la fixation étant évaluée à l'aide d'extractifs chimiques ou d'échanges isotopiques.

Le suivi du bilan minéral par l'intermédiaire des analyses de sol est en revanche difficile, en raison de l'incertitude sur les résultats d'analyse (15 à 25 % pour des sols pourtant homogènes) et de l'importance des quantités en jeu (plusieurs tonnes à l'hectare dans la tranche 0-1 m). De plus, le bilan des éléments contenus dans le sol ne permet pas d'étudier les équilibres entre les éléments en solution, qui permettent d'expliquer les pertes par lixiviation. C'est pourquoi il est nécessaire d'étudier directement les transferts d'eau et de solutés dans les sols, qui seuls permettent d'accéder à la dynamique actuelle des sols.

APPRÉCIATION DE LA FERTILITÉ ET DE LA DURABILITÉ DE L'AGRO-SYSTEME SUR LE PLAN CHIMIQUE : UNE NOUVELLE APPROCHE AGROGÉOCHIMIQUE

Dans les conditions actuelles de culture continue, tout système de production agricole doit être durable. Comment peut-on apprécier la durabilité en ce qui concerne les propriétés chimiques ?

Le phosphore et le potassium migrent peu dans le sol : ils sont peu entraînés par lixiviation (chapitres IX et X) et les profils de teneurs dans le sol en parcelles fertilisées ne diffèrent du témoin absolu que sur les trente premiers centimètres pour le phosphore et les cinquante premiers pour le potassium. Le maintien des teneurs en ces éléments ne nécessite donc que de compenser les exportations par les cultures (grains et résidus de récolte). Les quantités de phosphore et de potassium assimilables par les plantes sont cependant difficiles à estimer, en raison des échanges qui se produisent entre des compartiments du sol dans lesquels la disponibilité des éléments minéraux pour les racines des végétaux est différente (chapitre X).

La circulation de l'eau dans le sol produit en revanche une lixiviation quantitativement importante de l'azote, du calcium et du magnésium (chapitre X). Dans les deux parcelles étudiées, les pertes annuelles en azote représentent de 20 à 60 % des quantités d'engrais apportées, et les pertes en calcium et magnésium atteignent plusieurs dizaines de kilogrammes à l'hectare. Ces pertes en calcium et magnésium provoquent une baisse du pH des horizons superficiels, qui constitue actuellement un des problèmes majeurs pour le maintien à long terme de la fertilité des sols de cette zone climatique.

La quantité d'azote lixiviée est fortement diminuée par une croissance vigoureuse de la plante, moins par une diminution du drainage (environ 70 mm, chapitre VI) que par celle des teneurs dans la solution du sol (chapitre IX). Les teneurs en calcium et en magnésium de la solution du sol sont liées, non seulement en teneurs en nitrates (selon des mécanismes d'échange encore mal connus), mais également aux apports d'engrais potassiques.

L'appréciation de la durabilité des agro-systèmes nécessite donc de comprendre le fonctionnement actuel du sol, donc de quantifier les transferts d'eau et d'éléments minéraux dont il est le lieu.

Cette approche nécessite de *coupler* les études hydrodynamiques et les études chimiques sur le terrain. Malgré les nombreux problèmes méthodologiques qu'elles posent (chapitres V et VIII), les méthodes actuellement disponibles permettent de mener à bien de telles études. Cependant, en raison de la variabilité interannuelle des conditions climatiques, une étude de quelques années ne permet pas de prévoir par simple extrapolation des valeurs moyennes mesurées l'évolution future des sols. Il est donc nécessaire de *recourir à des modèles de simulation* et le chapitre VII fournit un exemple des résultats que les modèles de simulation du bilan hydrique permettent d'obtenir.

NÉCESSITÉ DES APPROCHES MULTIDISCIPLINAIRES DANS L'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DES SOLS CULTIVÉS

Ce travail illustre que l'étude de la durabilité des agro-systèmes ne peut être réalisée dans le cadre d'une seule discipline. L'interprétation doit s'appuyer sur des essais de longue durée bien conduits et une connaissance des relations entre la plante et son milieu que seul un agronome peut procurer. La consommation en eau et en éléments minéraux est sous la dépendance de la physiologie de la plante : l'interprétation des résultats s'est souvent heurtée à l'absence de données dans ce domaine. Enfin, tout le

fonctionnement du système est sous la dépendance des conditions climatiques. La collaboration d'un agroclimatologue est indispensable.

Le contrôle de l'évolution des sols cultivés ne peut donc plus reposer sur la seule analyse des sols : il nécessite de caractériser le fonctionnement du système sol-plante-atmosphère dans son ensemble, objectif qui implique la constitution d'équipes pluridisciplinaires.

C'est dans cette direction qu'il faudra incontestablement orienter les recherches futures sur la durabilité des agro-systèmes.

Ces différents résultats peuvent être synthétisés en deux conclusions générales.

Il n'est pas possible de gérer la fertilité chimique des agro-systèmes en milieu tropical sans connaître le fonctionnement du sol. Les méthodes fondées sur les analyses chimiques du sol sont insuffisantes : il est nécessaire de réaliser des études couplées sur les transferts de l'eau et des éléments minéraux dans le système.

Il n'est pas possible de gérer la fertilité chimique des agro-systèmes sans prendre en compte le fonctionnement de la plante. Les seules données édaphiques sont insuffisantes : les recherches doivent englober l'ensemble de l'agro-système sol-plante-atmosphère.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADETORO (R.), 1990.- Water use, transpiration coefficient and water use efficiency of maize and soybean as affected by increasing rates of potassium. *Potash Rev.*, Subject 2, 7th suite, n°2, 1 p.
- ALBERTS (E.E.), BURWELL (R.E.) & SCHUMAN (G.E.), 1977.- Soil nitrate-nitrogen determined by coring and solution extraction techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41(1) : 90-92.
- ANGÉ (A.), 1984.- Les contraintes de la culture cotonnière dans le système agraire de haute Casamance au Sénégal. I. Analyse des difficultés du projet de développement. Diagnostic des contraintes par les réseaux d'essais agronomiques. Th. INA-PG, 458 p., multigr.
- ARKCOLL (D.B.), GOULDING (K.W.T.) & HUGUES (J.C.), 1985.- Traces of 2:1 layer-silicate clays in Oxisols from Brazil, and their significance for potassium nutrition. *J. Soil Sci.*, 36 : 123-128.
- ARRIVETS (J.), 1976.- Exigences minérales du sorgho. Etude d'une variété voltaïque à grande tige. *Agron. Trop.*, 31(1) : 29-46.
- ARRIVETS (J.), RABETRANO (A.) & RAKOTOANDRIAMIHEMINA (J.), 1989.- Fertilisation organominérale des sols ferrallitiques des hauts plateaux malgaches. Economie des engrais importés et valorisation des ressources locales. Rapp. IRAT/CIRAD (Montpellier), DRN/chimie des sols, n°001/89, 28 p., multigr.
- AUDRY (P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.X.), ROOSE (E.) & VIZIER (J.F.), 1973.- Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Bull. du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols n°2, ORSTOM (Paris), 126 p.
- BARBER (S.A.), 1962.- A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. *Soil Sci.*, 93(1) : 39-49.
- BARBER (S.A.), WALKER (J.M.) & VASEY (E.H.), 1963.- Mechanisms for the movement of plant nutrients from the soil and fertilizer to the plant root. *Agric. Food Chem.*, 11 : 204-207.
- BECKETT (P.H.T.), 1964.- Studies in soil potassium. I: Confirmation of the rate law. II: The immediate Q/I relation of labile potassium on the soil. *J. Soil Sci.*, 15 : 1-23.
- BECKETT (P.H.T.) & NAFADY (M.H.M.), 1969.- The effect of prolonged cropping on the exchange surfaces of the clays of Broadbalk field. *J. Soil Sci.*, 20 : 1-10.
- BEGG (J.E.) & TURNER (N.C.), 1976.- Crop water deficits. In : Advances in agronomy, N.C. Brady ed., Academic Press Inc. (New York), pp. 161-217.
- BELMANS (C.), WESSELING (J.) & FEDDES (R.A.), 1983.- Simulation model of the water balance of a cropped soil : SWATRE. *J. Hydrol.*, 63 : 271-286.
- BERNHARD (C.) & SCHENCK (C.), 1986.- Utilisation de bougie poreuse pour extraire la solution du sol dans le ried central de l'Ill en Alsace. *Bull. GFHN*, 20 : 73-85.
- BLACK (C.A.), 1965.- Crop yield in relation to water supply and soil fertility. In : Plant environment and efficient water use. PIERRE, KIRKHAM, PESEK & SHAW eds., Amer. Soc. Agron., Madison (Wisc.), pp. 177-206.
- BLANCHET (R.), STUDER (R.) & CHAUMONT (C.), 1962.- Quelques aspects des interactions entre l'alimentation potassique et l'alimentation hydrique des plantes. *Ann. Agron.*, 13(2) : 93-110.
- BLONDEL (D.), 1971.- Contribution à l'étude du lessivage de l'azote en sol sableux (Dior) du Sénégal. *Agron. Trop.*, 26(6-7) : 687-696.
- BORGHARDT (G.A.), 1977.- Montmorillonite and other smectite minerals. In Mineral in soil environments. DIXON J.B. and WEEDS S.B. eds, ASA Madison USA.
- BOSC (M.) & MAERTENS (C.), 1981.- Rôle de l'accroissement du système racinaire dans l'absorption de divers états du potassium du sol. *Agrochimica*, 25(1) : 1-8.
- BOYER (J.), 1982.- Les sols ferrallitiques. Tome X. Facteurs de fertilité et utilisation des sols. Init. Doc. Techn. n°52, ORSTOM (Paris), 384 p.

- BRADBURY (I.K.) & MALCOLM (D.C.), 1977.- The effect of phosphorus and potassium on transpiration, leaf diffusive resistance and water-use efficiency in sitka spruce (*Picea sitchensis*) seedlings. *J. Appl. Ecol.*, 14(2) : 631-641.
- BRIGGS (L.J.) & McCALL (A.G.), 1904.- An artificial root for inducing capillary movement of soil moisture. *Science*, 20(513) : 566-569.
- BRUNET-MORET (Y.), 1967.- Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : République du Dahomey. Rapp. ORSTOM-CIEH, 20 p., multigr.
- CALMES (J.), 1959.- Le potassium et le magnésium dans les limbes du maïs. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 91-100.
- CERRI (C.), FELLER (C.), BALESDENT (J.), VICTORIA (R.) & PLENECASSAGNE (A.), 1985.- Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 300 : 423-428.
- CHABALIER (P.F.), 1976.- Contribution à la connaissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote engrais dans un système sol-plante. Th. Doc. Ing. Univ. Abidjan, 132 p.
- CHABALIER (P.F.), 1984.- Comparaison de deux méthodes de mesure de la lixiviation en sol ferrallitique. *Agron. Trop.*, 39(1) : 22-30.
- CHABALIER (P.F.) & PICHOT (J.), 1979.- L'utilisation de l'azote engrais par la culture de maïs en Côte d'Ivoire. In : Isotopes and radiation in research on soil-plant relationships. Actes symposium IAEA-FAO (Colombo, 11-15 Dec.), pp. 33-47.
- CHAUVEL (A.), 1977.- Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance. Trav. Doc. ORSTOM (Paris) n°62, 532 p.
- CHÉVERRY (C.), 1983.- L'extraction de la 'solution du sol' par le biais de bougies poreuses : une synthèse bibliographique des problèmes méthodologiques posés par ces dispositifs. *Bull. GFHN*, 14 : 47-71.
- CHONG (S.V.), GREEN (R.E.) & AHUJA (L.R.), 1981.- Simple in situ determination of hydraulic conductivity by power function descriptions of drainage. *Water Resour. Res.*, 17(4) : 1109-1114.
- CHOPART (J.L.), 1983.- Etude du système racinaire du mil (*Pennisetum typhoides*) dans un sol sableux du Sénégal. *Agron. Trop.*, 38(1) : 37-51.
- CHOPART (J.L.) & VAUCLIN (M.), 1990.- Water balance estimation model : field test and sensitivity analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54 : 1377-1384.
- CISSÉ (L.), 1986.- Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord Sénégal. Th. Inst. Nat. Polytech. Lorraine, 184 p.
- COMBEAU (A.), 1951.- Etude pédologique des terres de Barre. Rapp. ORSTOM (Lomé), multigr.
- COUCHAT (Ph.), 1983.- Les applications de la méthode neutronique dans la recherche agronomique. Coll. Aix, AIEA-SM 267/14 : 509-531.
- COUCHAT (P.), CARRE (C.), MARCESSE (J.) & Le HO (J.), 1975.- The measurement of thermal neutron constants of the soil : application to the calibration of neutron moisture gages and to pedological study of the soil. Proc. Conf. Nuclear Data Cross Sections in Technology, Washington, D.C.
- CPCS, 1967.- Classification des sols. Rapp. ENSA Grignon, 87 p., multigr.
- DABIN (B.), 1956.- Contribution à l'étude de la fertilité des terres de Barre. *Agron. Trop.*, 11(4) : 490-506.
- DANCETTE (C.), 1976.- Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures. *Agron. Trop.*, 31(4) : 321-338.

- DANCETTE (C.), 1983.- Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.*, 38(4) : 281-294.
- DAVIDSON (J.M.), STONE (L.R.), NIELSEN (D.R.) & LARUE (M.E.), 1969.- Field measurement and use of soil-water properties. *Water Resour. Res.*, 5 : 1312-1321.
- DE JONG (E.), 1976.- Inexpensive micro-soil solution sampler. *Canad. J. Soil Sci.*, 56 : 315-317.
- DEBYLE (N.V.), HENNES (R.W.) & HART (G.E.), 1988.- Evaluation of ceramic cups for determining soil solution chemistry. *Soil Sci.*, 146(1) : 30-36.
- DECKERS (J.A.), FEYEN (J.), DECKERS (E.M.) & GAMA (B.), 1985.- Numerical analysis of measured maize and sorghum grain yield on a ferralic arenosol in the Mtwara region, south-east Tanzania. *Pédologie*, 35(1) : 5-22.
- DENMEAD (O.T.) & SHAW (R.H.), 1960.- Effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn. *Agron. J.*, 52 : 272-274.
- DJANAME (L.), 1989.- Contribution à l'étude du comportement de deux nouvelles variétés de maïs dans la région de Davié au Sud du Togo. Rapp. ESA (Lomé), 118 p., multigr.
- DJÉGUI (N.), 1982.- Essai de caractérisation de l'état de dégradation des terres de Barre. Rapp. IRAT-CIRAD (Montpellier), 35 p., multigr.
- DOME (D.), 1985.- Carte pédologique de la région de Tsévié (Togo) au 1/50 000. Contribution à l'étude pédo-agronomique des terres de Barre du Togo. Rapp. ORSTOM (Lomé), 138 p., multigr.
- EAGLEMAN (J.R.), 1971.- An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.*, 8(4) : 385-394.
- ÉGOUMENIDES (C.), 1981.- Etude en laboratoire des arrières-effets des fumures azotées et de leur interaction avec le fumier dans un sol du Bénin. Rapport IRAT/CIRAD (Montpellier), 17 p., multigr.
- FAO, 1989.- Neuvième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre Africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres (Cotonou, Bénin, 14-23 novembre 1988). Rapport sur les ressources du monde n°63, FAO (Rome), 266 p.
- FAO-UNESCO, 1989.- Carte mondiale des sols. Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde n° 60, FAO (Rome), 125 p.
- FARDEAU (J.C.), MOREL (C.) & JAPPE (J.), 1985.- Cinétique d'échange des ions phosphate dans les systèmes sol-solution. Vérification expérimentale de l'équation théorique. *C.R. Acad. Sc. Paris III*, 300(8) : 371-376.
- FAUCK (R.), 1964.- Les sols rouges faiblement ferrallitiques d'Afrique Occidentale. *Actes 8ème Congr. Int. Sci. Sol (Bucarest)*, 5(62) : 547-557.
- FAUCK (R.), 1972.- Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique occidentale. Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Mém. ORSTOM (Paris) n°61, 255 p.
- FELLER (C.), FRANÇOIS (C.), VILLEMEN (G.), JEANSON (P.), PORTAL (J.M.) & BURTIN (G.), 1990.- Fractionnement granulométrique et compartiments organiques de quelques sols tropicaux. *Actes 14ème Congr. Int. Sci. Sol (Kyoto)*, vol. 5, pp. 479-480.
- FLUHLER (H.), ARDAKANI (M.S.) & STOLZY (L.H.), 1976.- Error propagation in determining hydraulic conductivities from successive water content and pressure head profiles. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40(5) : 830-836.
- FOREST (F.), 1984.- Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Rapp. IRAT/CIRAD (Montpellier), 63 p., multigr.
- FOREST (F.) & KALMS (J.M.), 1984.- Influence du régime d'alimentation en eau sur la production du riz pluvial. Simulation du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, 39(1) : 42-50.

- FOREST (F.) & REYNIERS (F.N.), 1985.- Propositions de classification en termes du bilan hydrique des situations agroclimatiques de riziculture pluviale. Comm. Conf. Int. Riz pluvial (Djakarta, mars 1985), 18 p.
- FRANQUIN (P.) & FOREST (F.), 1977.- Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, 32(1) : 7-11.
- FRETEAUD (J.P.), POSS (R.) & SARAGONI (H.), 1987.- Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques *in situ* (culture de maïs au Togo méridional). *Agron. Trop.*, 42(2) : 94-102.
- GANRY (F.), 1990.- Application de la méthode isotopique à l'étude de bilans azotés en zone tropicale sèche. Th. Univ. Nancy I, 355 p.
- GARDNER (H.R.), 1974.- Prediction of water loss from a fallow field soil based on soil water flow theory. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38 : 379-382.
- GARDNER (W.) & KIRKHAM (D.), 1952.- Determination of soil moisture by neutron scattering. *Soil Sci.*, 73 : 391-401.
- GAUDIN (R.), DUPUY (J.) & RANAIVO (J.), 1985.- Les bougies poreuses, un outil pour suivre NH₄⁺ et NO₃⁻ en solution dans les sols de rizières. I. Etude bibliographique. II. Etude expérimentale. *Agron. Trop.*, 40(1) : 26-39.
- GIGOU (J.), 1982.- Dynamique de l'azote minéral en sol nu ou cultivé de région tropicale sèche du nord-Cameroun. Th. Doc. Ing., Univ. Sci. Tech. Languedoc, 171 p., multigr.
- GIGOU (J.), 1984.- La mobilisation des éléments minéraux par le sorgho "IRAT 55" au cours de deux saisons aux pluviométries très différentes. *Agron. Trop.*, 39(4) : 324-334.
- GIGOU (J.) & CHABALIER (P.F.), 1987.- L'utilisation de l'engrais azoté par les cultures annuelles en Côte d'Ivoire. *Agron. Trop.*, 43(3) : 171-179.
- GODON (Ph.), 1985.- Résultats de huit années d'observation en cases lysimétriques en milieu tropical. Rapp. IRAT/CIRAD ATP Dynamique des cations, 238 p., multigr.
- GOODMAN (L.A.), 1960.- On the exact variance of products. *J. Am. Statis. Assoc.*, 55 : 708-713.
- GREACEN (E.L.), 1981.- Soil water assesment by the neutron method. CSIRO Australia, 140 p.
- GROSSMAN (J.) & UDLUFT (P.), 1991.- The extraction of soil water by the suction-cup method: a review. *J. Soil Sci.*, 42 : 83-93.
- GROVER (B.L.) & LAMBORN (L.E.), 1970.- Preparation of porous cups to be used for extraction of soil water having low solute concentrations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34 : 706-708.
- GUIRAUD (G.), 1984.- Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Th. Etat, Univ. Paris VI, 335 p.
- HANSEN (E.A.) & HARRIS (A.R.), 1975.- Validity of soil water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39 : 528-536.
- HANWAY (J.J.), 1962.- Corn growth and composition in relation to soil fertility. I. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. II. Uptake of N, P, K and their distribution in different plant parts during the growing season. III. Percentages of N, P, K in different plant parts in relation to stage of growth. *Agron. J.*, 54. I : 145-148. II : 217-222. III : 222-229.
- HARRISSON (J.B.), 1933.- The katamorphism of igneous rocks under humid tropical conditions. *Impression Bureau Soil Sci.*, Harpenden G.B.
- HAVERKAMP (R.), VAUCLIN (M.) & VACHAUD (G.), 1984.- Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements. 1. Local stand point. *Soil Sci.*, 137 : 78-90.

- HENRICKSEN (B.L.) & DURKIN (J.W.), 1985.- Humidité disponible, période de végétation et possibilités d'alerte précoce en cas de famine en Ethiopie. *Bull. CIPEA*, 21 : 2-10.
- HEWLETT (J.D.), DOUGLASS (J.E.) & CLUTTER (J.L.), 1964.- Instrumental and soil moisture variance using the neutron scattering method. *Soil Sci.*, 97 : 19-24.
- HIDE (J.C.), 1954.- Observations on factors influencing the evaporation of soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 18 : 234-239.
- HILLEL (D.), 1974.- L'eau et le sol. Principes et processus physiques. VANDER (Louvain), 288 p.
- HILLEL (D.), KRENTOS (V.D.) & STYLIANOV (Y.), 1972.- Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. *Soil Sci.*, 114 : 395-400.
- HISARD (Ph.), 1985.- Variabilité interannuelle dans l'océan atlantique tropical. Cas exceptionnel de l'année 1984. Climat et développement (Séminaire octobre 1985), Coll. et Séminaires ORSTOM (Paris), pp. 64-67.
- HUMBEL (F.X.), 1976.- L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun : caractéristiques et comportements en relation avec les régimes hydriques et les bioclimats. Th. Fac. Sci. Paris VI, 301 p., multigr.
- HUMBLE (G.D.) & HSIAO (T.C.), 1970.- Light-dependent influx and efflux of potassium of guard cells during stomatal opening and closing. *Plant Physiol.*, 48 : 447-453.
- JACKSON (M.L.) & LUO (J.X.), 1986.- Potassium release mechanism on drying soils : non exchangeable to exchangeable potassium by protonation of micas. *Soil. Sci.*, 141(3) : 225-229.
- JACQUINOT (L.), 1964.- Contribution à l'étude de la nutrition minérale du sorgho Congossane. *Agron. Trop.*, 19(8-9) : 669-722.
- JOHNSTON (J.), 1963.- Econometric methods. Ed. Mac Graw Hill, 300 p.
- JOLIVET (Y.) & L'HYVER (M.A.), 1980.- Approche des problèmes de caractérisation chimique des eaux du sol. Application à deux parcelles du Rheu. Essai méthodologique en laboratoire sur l'utilisation des bougies poreuses. SDS 283. ENSA Rennes, 82 p., multigr.
- KENDALL (M.G.) & STUART (A.), 1963.- The advanced theory of statistics, vol. 1. Charles Griffin (London) ed.
- KEULEN (H. van), 1975.- Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Simulation monographs, Pudoc, Wageningen, 176 p.
- KOCH (D.W.) & ESTES (G.O.), 1975.- Influence of potassium stress on growth, stomatal behavior, and CO₂ assimilation in corn. *Crop Sci.*, 15(5) : 697-699.
- LAMOUREUX (M.), 1969.- Carte pédologique du Togo au 1/1000 000. Notice explicative n°34, ORSTOM (Paris), 91 p.
- LE COCQ-LITOUX (M.C.), 1974.- Contribution à la connaissance régionale du sud-est du Togo. Surpeuplement et migrations. Le village de FIATA. Rapp. ORSTOM (Lomé), 131 p., multigr.
- LEMON (E.R.), 1956.- Potentialities for decreasing soil moisture loss. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20 : 120-125.
- LENEUF (B.), 1949.- Etude pédologique de la plantation administrative de Bayeme (Togblekope). Rapp. ORSTOM (Lomé), 12 p., 1 carte h.t., multigr.
- LEROUX (M.), 1983.- Le climat de l'Afrique Tropicale. Champion (Paris), Vol.1 : 633 p.; Vol. 2 Atlas : 24 pl., 250 p.
- LEVIN (M.J.) & JACKSON (D.R.), 1977.- A comparison of *in situ* extractors for sampling soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41(3) : 535-536.
- LHOMME (J.P.) & MONTENY (B.), 1979.- Etude agroclimatique de la région centre-Bandama de Côte d'Ivoire. Rapp. ORSTOM-AVB (Adiopodoumé), 43 p., multigr.

- LIBARDI (P.L.), REICHARDT (K.), NIELSEN (D.R.) & BIGGAR (J.W.), 1980.- Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(1) : 3-7.
- LITAOR (M.I.), 1988.- Review of soil solution samplers. *Water Resour. Res.*, 24(5) : 727-733.
- LOAEC (C.), ANTOINE (P.), ENGALEC (M.), STEIN (M.), PARISOT (B.), COLOMBANI (J.), L'HOTE (Y.) & FAURE (P.), 1982.- Atlas des ressources et besoins en eau. PNUD-LCHF, 11 planches.
- LOCASCIO (B.), 1990.- Etude des relations entre la matière organique et les réserves en bases dans un sol ferrallitique (terres de Barre) du sud-Togo. Effets de la mise en culture et de la fertilisation. Mém. Maîtrise de l'Environnement (Univ. Rouen), 44 p., multigr.
- LOUÉ (A.), 1980.- Le potassium et le maïs. Dossier K₂O n°16, SCPA (Mulhouse), 48 p.
- LOUETTE (D.), 1988.- Synthèse des travaux de recherche sur la fertilité des terres de Barre au Bénin et au Togo. Rapp. DSA-CIRAD (Montpellier), 34 p., multigr.
- MACHET (J.M.), PIERRE (D.), RECOURS (S.) & REMY (J.C.), 1987.- Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. *C.R. Acad. Agric. France*, 73(3) : 39-55.
- MAIGNIEN (R.), 1964.- Carte pédologique du Sénégal au un million. Notice explicative n°24, ORSTOM (Paris), 63 p., 1 carte h.t.
- MAIGNIEN (R.), 1969.- Manuel de prospection pédologique. Init. Doc. Tech. n°11, ORSTOM (Paris), 132 p.
- MARQUETTE (J.), 1986.- Maintien et amélioration des rendements du maïs sur les terres de Barre dans le Sud Togo. *Agron. Trop.*, 41(2) : 132-148.
- MARQUETTE (J.), LATRILLE (Ed.), ISSIFOU (A.) & AGBOH (A.), 1982.- PRODERMA - Recherche agronomique d'accompagnement (1976-1981). Premières conclusions. Rapp. IRAT (Lomé), 34 p., multigr.
- MARSCHNER (H.), 1986.- Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Harcourt Brace Jovanovitch Publishers, 674 p.
- MARTIN (A.), MARIOTTI (A.), BALESSENT (J.), LAVELLE (P.) & VUATTOUX (R.), 1990.- Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by ¹³C natural abundance measurements. *Soil Biol. Biochem.*, 22(4) : 517-523.
- MARTINEZ (J.), 1989.- Intervention d'une culture dérobée de ray-grass sur les transferts d'azote dans le système sol/plante/eau lors d'une succession culturale blé/maïs : étude par traçage isotopique ¹⁵N au cours d'essais au champ et en lysimètres. Th. Univ. Perpignan, 183 p.
- MENGEL (K.) & KIRKBY (E.A.), 1980.- Potassium in crop production. *Adv. Agron.*, 33 : 59-110.
- MILLETTE (G.) & VIEILLEFON (J.), 1965.- Etudes pédo-hydrologiques au Togo. I : Contribution aux études pour la mise en valeur des régions sud et nord. Recommandations. II : Les sols de la région maritime et de la région des savanes. FAO (Rome)-ORSTOM (Paris). I : 93 p., II : 189 p.
- MONTENY (B.A.), HUMBERT (J.), LHOMME (J.P.) & KALMS (J.M.), 1981.- Le rayonnement net et l'estimation de l'évapotranspiration en Côte d'Ivoire. *Agric. Meteorol.*, 23 : 45-59.
- MONTENY (B.A.) & LHOMME (J.P.), 1980.- Eléments de bioclimatologie. Rapp. ORSTOM (Adiopodoumé), 94 p., multigr.
- MORIZET (J.) & MARTEL (J.L.), 1988.- Effets du potassium sur le comportement hydrique et la croissance du tournesol. Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation. INRA (Paris), pp. 517-537.
- MOTTRAM (R.), 1985.- Influence of potassium on the plant/water relations of maize. Proc. 15th Ann. Congr. South African Soc. of Crop Production, pp. 145-157.

- MOUTONNET (P.) & COUCHAT (Ph.), 1979.- Mesure journalière sur cycle végétatif complet des échanges gazeux : photosynthèse, transpiration et respiration nocturne d'une culture de Maïs conduite sur colonnes de sol. *Physiol. Plant.*, 47 : 39-43.
- NAGPAL (N.K.), 1982.- Comparison among and evaluation of ceramic porous cup soil water samplers for nutrient transport studies. *Can. J. Soil Sci.*, 62(4) : 685-694.
- OLUPELU JAIYEBO (E.), 1968.- Effect of drying and storage on the exchangeable potassium content of some western Nigeria soils. *Soil Sci.*, 106(5) : 399-404.
- ONCHERE (J.), GOULDING (K.W.T.), WOOD (I.G.) & CATT (J.A.), 1989.- Potassium and magnesium in some Kenyan soils: their mineral sources and release to Ca-resin. *J. Soil Sci.*, 40 : 621-634.
- PARKER (F.W.), 1925.- The adsorption of phosphates by Pasteur-Chamberland filters. *Soil Sci.*, 20 : 149-158.
- PEASLEE (D.E.) & MOSS (D.N.), 1968.- Stomatal conductivities in K-deficient leaves of maize (*Zea mays*, L.). *Crop Sci.*, 8(4) : 427-430.
- PÉDRO (G.), 1974.- La pédogenèse sous les tropiques humides et la dynamique du potassium. C.R. 10ème coll. Inst. Int. Potasse, Abidjan (Côte d'Ivoire), IPI (Suisse) ed, pp. 23-49.
- PELLERIN (S.), 1986.- Etude d'une série chronologique de rendements en canne à sucre obtenus en Guadeloupe à partir d'un modèle de simulation du bilan hydrique. *Agronomie*, 6(1) : 91-98.
- PIERI (C.), 1979.- Etude de la composition de la solution d'un sol sableux cultivé du Sénégal à l'aide de capteurs en céramique poreuse. *Agron. Trop.*, 34(1) : 9-22.
- PIERI (C.), 1982.- La fertilisation potassique du mil Pennisetum et ses effets sur la fertilité d'un sol sableux du Sénégal. *Potash Rev.*, Subject 27, 4 : 1-12.
- PIERI (C.), 1989.- Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la coopération-IRAT/CIRAD, 444 p.
- PIERI (C.) & OLIVER (R.), 1986.- Assessment of K losses in tropical cropping systems of francophone Africa and Madagascar. Nutrient balances and the need for potassium. C.R. 13ème coll. Inst. Int. Potasse, Reims (France), IPI (Suisse) ed, pp. 73-92.
- PLEUVRET (C.), 1988.- Infiltration et réorganisations superficielles sous pluies simulées. Cas des sols ferrallitiques du Sud-Togo. DEA pédologie (Paris VI), 79 p., multigr.
- POSS (R.), 1984.- La précision du comptage neutronique avec l'humidimètre SOLO 25. Définition des protocoles de mesure. *Bull. GFHN*, 16 : 109-122.
- POSS (R.), 1987.- BHYSON 1.2. Logiciel intégré pour le traitement des données d'humidimétrie neutronique. ORSTOM (Paris), coll. LOGOR, 60 p., 1 disquette.
- POSS (R.), FARDEAU (J.C.), SARAGONI (H.) & QUANTIN (P.), 1991.- Potassium release and fixation in Ferralsols (Oxisols) from Southern Togo. *J. Soil Sci.*, 42(4), accepté pour publication.
- POSS (R.), PLEUVRET (C.) & SARAGONI (H.), 1989-1990.- Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de Barre (Togo méridional). *Cah. ORSTOM (Paris)*, sér. Pédol., 405-415.
- POSS (R.) & SARAGONI (H.), 1987.- Quelques problèmes posés par l'estimation du bilan hydrique en plein champ. *Milieux poreux et transferts hydriques (Bull. GFHN)*, 22 : 32-46.
- POSS (R.), SARAGONI (H.) & IMBERNON (J.), 1988.- Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. *Agron. Trop.*, 43(1) : 18-29.
- RAUNET (M.), 1973.- Contribution à l'étude pédo-agronomique des "terres de Barre" du Dahomey et du Togo. *Agron. Trop.*, 28(11) : 1049-1069.
- REDDY (S.J.), 1983.- A simple method of estimating the soil water balance. *Agric. Meteorol.*, 28(1) : 1-17.
- RICHARDS (L.A.), 1931.- Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 1 : 318-333.

- RITCHIE (J.T.), 1972.- Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour Res.*, 8 : 1204-1213.
- ROBELIN (M.), 1963.- Contribution à l'étude du comportement du maïs grain vis-à-vis de la sécheresse. *J. Int. AGPM*, pp. 69-76.
- ROBELIN (M.), 1984.- Fonctionnement hydrique et adaptation à la sécheresse. In *Physiologie du maïs*, INRA (Paris), pp. 445-476.
- ROBERT (M.) & TESSIER (D.), 1974.- Méthode de préparation des argiles des sols pour les études minéralogiques. *Ann. Agron.*, 25(6) : 859-882.
- ROBINS (J.S.) & DOMINGO (C.E.), 1953.- Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. *Agron. J.*, 45 : 618-621.
- ROOSE (E.), 1981.- Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. *Trav. Doc. ORSTOM (Paris) n°130*, 569 p.
- ROSE (C.W.), STERN (W.R.) & DRUMMOND (J.E.), 1965.- Détermination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content, for a soil *in situ*. *Aust. J. Soil Res.*, 3 : 1-9.
- SALTER (P.J.) & GOODE (J.E.), 1967.- Crop responses to water at different stages of growth. *Commonw. Bur. Hort. Plant Crop Res. Rev. n°2*, 246 p.
- SARAGONI (H.) & POSS (R.), 1991.- Les prélèvements minéraux des variétés de maïs cultivées au Togo méridional. soumis à publication à *Agron. Trop.*
- SARAGONI (H.), POSS (R.) & OLIVER (R.), 1990.- Dynamique et lixiviation des éléments minéraux dans les terres de Barre du sud-Togo. *Agron. Trop.*, sous presse.
- SARAGONI (H.), POSS (R.), MARQUETTE (J.) & LATRILLE (E.), 1991.- Quelle agriculture pour les zones fortement peuplées d'Afrique de l'Ouest ? Cas des terres de Barre du Sud-Togo. *Agron. Trop.*, en cours.
- SARAGONI (H.) & SOMANA (K.), 1991.- Etude des phosphates du Togo bruts et partiellement attaqués en Régions Maritime, des Plateaux et Centrale. Synthèse projet IMPHOS-DRA-IRAT. DRA (Lomé), 42 p., multigr., à paraître.
- SARTZ (R.S.), 1972.- Anomalies and sampling variation in forest soil water measurement by the neutron method. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36 : 148-153.
- SCHWARTZ (A.), 1983.- Production et reproduction de l'espace rural dans un contexte de forte pression démographique. Le foncier à ras le sol dans un village Ouatchi du Sud-Est du Togo. *Comm. Coll. RICQFAN, AFIRD (Saint Riquier)*.
- SCOTT (A.D.) & HANWAY (J.J.), 1960.- Factors influencing the change in exchangeable soil K observed on drying. *Actes 7ème Congr. Int. Sci. Sol*, 4 : 72-79.
- SÉGUIS (L.), 1988.- La pluviométrie au Togo : caractérisation agronomique. *Rapp. ORSTOM (Lomé)*, 23 p., multigr.
- SÉMENT (G.), 1980.- Etude des effets secondaires de la fertilisation minérale sur le sol dans des systèmes culturaux à base de coton en Côte d'Ivoire. Premiers résultats en matière de correction. *Coton Fibres Trop.*, 35(2) : 229-248.
- SEVERSON (R.C.) & GRIGAL (D.E.), 1976.- Soil solution concentration : effect of extraction time using porous ceramic cups under constant vacuum. *Water Resour. Bull.*, 12 : 1161-1170.
- SIBAND (P.), 1974.- Evolution de la fertilité et des caractères d'un sol rouge de Casamance. *Rapp. IRAT (Bambey)*, 31 p., multigr.
- SIBAND (P.), 1981.- Croissance, nutrition et production du mil (*Pennisetum typhoides* Hubbard et Stapf). Essai d'analyse du fonctionnement du mil en zone sahélienne. *Th. Etat Univ. Sci. et Techn. Languedoc (Montpellier)*, 302 p.

- SILKWORTH (D.R.) & GRIGAL (1981), 1981.- Field comparison of soil solution samplers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45 : 440-442.
- SIMOTA (C.), CANARACHE (A.), COLIBASI (I.) & COLIBASI (M.), 1986.- A simulation model for field water use and crop yield as applied to soil ripening and compaction studies. *Actes 13ème Congr. Int. Sci. Sol (Hambourg)*.
- SINCLAIR (D.F.) & WILLIAMS (J.), 1979.- Components of variance involved in estimating soil water content and water content change using a neutron moisture meter. *Aust. J. Soil Res.*, 17 : 237-247.
- SLANSKY (M.), 1959.- Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Th. Univ. Nancy.
- SNEDECOR (G.W.) & COCHRAN (W.G.), 1971.- Méthodes statistiques (6ème édition). Assoc. de coordination technique agricole édt. (Paris), 649 p.
- SNIDER (H.J.), 1953.- Strong roots make high corn yields. *Better Crops*, 37(7) : 17-19.
- TALSMA (T.), HALLAM (P.M.) & MANSELL (R.S.), 1979.- Evaluation of porous cup soil-water extractors : physical factors. *Austral. J. Soil Res.*, 17 : 417-422.
- THEVENET (G.) & COUVREUR (F.), 1978.- Blé et maïs, réponses à un déficit en eau. *Perspect. agric.*, 16 : 37-50.
- TRIOMPHE (B.), 1986.- Eléments de diagnostic agronomique de Kpové, village du sud-Togo. II. Analyse de la variabilité des rendements maïs et coton. Rapp. CIRAD (Montpellier), 130 p., multigr.
- TULAIKOV (N.M.), .- Use of water by cultivated plants in the field. *J. Agric. Sci.*, 19 : 1-16. U.S. Soil Conservation Service, 1975.- Soil Taxonomy Soil Survey Staff, USDA Agriculture Handbook n°436 (Washington D.C.).
- VACHAUD (G.), ROYER (J.M.) & COOPER (J.D.), 1977.- Comparison of methods of calibration of a neutron probe by gravimetry or neutron-capture model. *J. Hydrol.*, 34 : 343-356.
- VACHAUD (G.), DANCETTE (C.), SONKO (S.) & THONY (J.L.), 1978.- Méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann. Agron.*, 29 (1) : 1-36.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.) & COLOMBANI (J.), 1981.- Bilan hydrique dans le sud-tunisien. I. Caractérisation expérimentale des transferts dans la zone non saturée. *J. Hydrol.*, 49 : 31-52.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), IMBERNON (J.), PIERI (C.), DANCETTE (C.) & DIATTA (S.), 1982.- Etude des pertes en eau et en matières minérales sous culture considérant la variabilité spatiale du sol. *Actes 12ème Congr. Int. Sci. Sol (New Dehli)*, 13 p.
- VALENTIN (C.), 1980.- Quelques termes du bilan du potassium en basse Côte d'Ivoire. Exemple de la culture d'ananas. Comm. Sémin. sur le potassium (Abidjan, 21-22 octobre), pp. 25-35.
- VAN BAVEL (C.H.M.), UNDERWOOD (N.) & SWANSON (R.W.), 1956.- Soil moisture measurement by neutron moderation. *Soil Sci.*, 82 : 29-41.
- VAN DER MAREL (H.W.), 1954.- Potassium fixation in Dutch soil. Mineralogical analysis. *Soil Sci.*, 78 : 163-179.
- VAN DER PLOEG (R.R.) & BEESE (F.), 1977.- Model calculation for the extraction of soil water by ceramic cups and plantes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41 : 466-470.
- VAN DER POL (F.), 1990.- Soil mining as a source of farmers' income in Southern Mali. Rapp. Institut Royal des Tropiques (Amsterdam), 16 p., multigr.
- VAN DIEPEN (C.A.) & AZONTONDE (A.H.), 1979.- Détermination des dates de semis basée sur l'analyse fréquentielle de la pluviométrie décadaire au Bénin. Papp. CENAP (Cotonou), 97 p., multigr.

- VAUCLIN (M.), HAVERKAMP (R.) & VACHAUD (G.), 1984.- Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements : 2. Spatial standpoint. *Soil Sci.*, 137(3) : 141-148.
- VAUCLIN (M.) & VACHAUD (G.), 1987.- Caractérisation hydrodynamique des sols : analyse simplifiée des essais de drainage interne. *Agronomie*, 7(9) : 647-655.
- VAUCLIN (M.), VIERA (S.R.), VACHAUD (G.) & NIELSEN (D.R.), 1983.- The use of cokriging with limited field observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47(2) : 175-184.
- VERNEY (R.) & VOLKOFF (B.), 1969.- Etude de l'érosion sur "terres de Barre". Erosion sous culture d'arachide (année 1968). Rapp. ORSTOM (Cotonou), 19 p., multigr.
- VIEILLEFON (J.), 1983.- Sur un mode de calcul simplifié des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol non saturé à nappe peu profonde. Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies 1983. IAEA (Vienne), pp. 23-39.
- VIETS (F.G.Jr.), 1962.- Fertilizers and the efficient use of water. *Adv. Agron.*, 14 : 223-261.
- VITORELLO (V.A.), CERRI (C.C.), ANDREUX (F.) & VICTORIA (R.L.), 1989.- Organic matter and natural carbon-13 distribution in forested and cultivated oxisols. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 53(3) : 773-778.
- VOLKOFF (B.) & WILLAIME (P.), 1976.- Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin. Feuille de Porto-Novo. Notice explicative n°66(1), ORSTOM (Paris), 39 p., 1 carte h.t.
- VOLKOFF (B.), 1976.- Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin au 1/200 000. Feuille d'Abomey. Notice explicative n°66(2), ORSTOM (Paris), 40 p., 1 carte h.t.
- WAGNER (G.H.), 1962.- Use of porous ceramic cups to sample soil-water within the profile. *Soil Sci.*, 94 : 379-386.
- WARRICK (A.W.) & AMOOZEGAR-FARD (A.), 1977.- Soil water regimes near porous cup water samplers. *Water Resour. Res.*, 13(1) : 203-207.
- WARRICK (A.W.) & NIELSEN (D.R.), 1980.- Spatial variability of soil physical properties. In D. HILLEL. Applications of Soil Physics. Academic Press, New York, pp. 319-324.
- WAUTHY (B.), 1983.- Introduction à la climatologie du golfe de Guinée. *Océanogr. Trop.*, 18(2) : 103-138.
- WEAVER (C.E.) & POLLARD (L.D.), 1973.- The chemistry of clay minerals. *Developments in sedimentology n°15*, Elsevier Science publ., Amsterdam, 213 p.
- WEBSTER (R.), 1989.- Is regression what you really want ? *Soil use and management*, 5(2) : 47-53.
- WERTS (R.), 1979.- Dossier pour une synthèse des résultats de la recherche agronomique au Bénin en maïsiculture. Rapp IRAT/CIRAD (Cotonou), 241 p., multigr.
- WETSELAAR (R.) & GANRY (F.), 1982.- Nitrogen balance in tropical agrosystems. Microbiology of tropical soils and plant productivity, Y.R. Dommergues and H.G. DIEM Edit., The Hague, Nijhoff-Junk Publ., 328 p.
- WILDING (L.P.), 1985.- Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In : Soil Spatial Variability, D.R. NIELSEN & J. BOUMA eds., Pudoc Wageningen, pp. 166-189.
- ZIMMERMANN (C.F.), PRICE (M.T.) & MONTGOMERY (J.R.), 1978.- A comparison of ceramic and teflon *in situ* samplers for nutrient pore water determinations. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 7 : 93-97.

TABLES

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

TABLEAU I-1 Principaux caractères morphologiques du sol sous forêt sacrée (Davié)

TABLEAU I-2 Principaux caractères morphologiques du sol sous jachère de 5 ans (Davié)

TABLEAU I-3 Exemples d'écart-type sur les mesures de densité apparente pour quelques profondeurs et moyenne générale (cylindre de 250 cm³, parcelle N2P1K0 et parcelles en jachère, en g.cm⁻³)

TABLEAU I-4 Humidités massiques à pF 4,2 (moyenne de 12 prélèvements) et réserve utile par tranche de sol

CHAPITRE II

TABLEAU II-1 Pluviométrie des deux saisons des pluies au Togo méridional (période 1938-1986)

TABLEAU II-2 Récurrence des épisodes secs de 10 jours consécutifs (en nombre de fois par an, valeurs empiriques, d'après SÉGUI, 1988)

CHAPITRE III

TABLEAU III-1 Fertilisation minérale moyenne des principales plantes étudiées (kg.ha⁻¹)

TABLEAU III-2 Variétés utilisées et saisons de cultures (moyenne 1976-1989)

CHAPITRE IV

TABLEAU IV-1 Evolution du poids de matière sèche entre la maturité et la récolte (parcelle N2 P1 K2, première saison des pluies, en kg.ha⁻¹)

TABLEAU IV-2 Teneurs en éléments minéraux des pailles et des grains de maïs à la récolte (en % de matière sèche, première saison de culture)

TABLEAU IV-3 Teneurs en éléments minéraux des racines à la maturité (en % m.s., première saison des pluies, moyenne de 6 variétés)

TABLEAU IV-4 Quantités d'éléments minéraux contenues à la maturité dans le maïs NH1 (en kg.ha⁻¹, première saison de culture, parcelle N2 P1 K2)

TABLEAU IV-5 Quantités moyennes d'éléments contenus dans les parties aériennes du maïs NH1 à la maturité selon la fertilisation et la saison de culture (en kg.ha⁻¹)

TABLEAU IV-6 Evolution des quantités d'éléments minéraux contenues dans les parties aériennes du maïs entre la maturité et la récolte (en kg.ha⁻¹, première saison de culture, parcelle N2 P1 K2)

TABLEAU IV-7 Proportion des différents éléments minéraux dans les organes du maïs à la récolte (en % du poids, parcelle N2 P1 K2, première saison 1976-1980)

CHAPITRE V

TABLEAU V-1 Périodicité des mesures de couple (w,n)

TABLEAU V-2 Paramètres des droites d'étalonnage en fonction du type de régression utilisé ($\theta = a_0 + a_1 n$, θ en cm³.cm⁻³ et n en rapport de comptage)

TABLEAU V-3 Exemple de valeurs de comptage obtenues en tube aluminium et tube PVC

TABLEAU V-4 Exemple de rapports de comptage obtenus en tube aluminium et tube PVC

TABLEAU V-5 Variance de repositionnement (sur le rapport de comptage n)

- TABLEAU V-6** Précision de la détermination de l'humidité pour un tube donné (intervalle de confiance au seuil 95 %)
- TABLEAU V-7** Composantes de la variance de l'humidité d'une parcelle à deux niveaux caractéristiques (pour un seul tube par parcelle)
- TABLEAU V-8** Précision de la détermination de l'humidité moyenne d'une parcelle en fonction du nombre de tubes pour 3 profondeurs différentes (Parcelle N2 P1 K0, intervalle de confiance au seuil 95 %)
- TABLEAU V-9** Composantes de la variance de la différence d'humidité volumique entre deux mesures successives (parcelle N2 P1 K0, tube n°3, années 1984 à 1987)
- TABLEAU V-10** Précision sur la détermination des différences d'humidité avec (pas de temps de 1 jour) et sans (pas de temps de 15 jours) autocorrélation (parcelle N2 P1 K0, tube n°3, années 1984-1987)
- TABLEAU V-11** Composantes de la variance des variations d'humidité d'une parcelle à deux niveaux caractéristiques (pour un seul tube par parcelle)
- TABLEAU V-12** Précision de la détermination des différences d'humidité moyennes d'une parcelle en fonction du nombre de tubes (en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, parcelle N2 P1 K0, intervalle de confiance au seuil 95 %)
- TABLEAU V-13** Courbure maximale des profils hydriques (tubes n°3, année 1986)
- TABLEAU V-14** Variance de l'estimation du stock sur la tranche 0-150 cm pour un tube
- TABLEAU V-15** Exemple d'évaluation du stock sur la tranche 0-20 cm à l'aide de deux méthodes (tube n°3, année 1986).
- TABLEAU V-16** Précision de la détermination du stock moyen (0-150 cm) d'une parcelle en fonction du nombre de tubes (intervalle de confiance au seuil 95 %).
- TABLEAU V-17** Variance de l'estimation d'une variation de stock sur la tranche 0-150 cm pour un tube
- TABLEAU V-18** Précision de la détermination de la variation de stock moyenne (0-150 cm) d'une parcelle en fonction du nombre de tubes (intervalle de confiance au seuil 95 %)
- TABLEAU V-19** Ecart-types moyens sur les humidités et les variations d'humidité selon le protocole utilisé ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
- TABLEAU V-20** Ecart-types sur les stocks et les variations de stock selon le protocole utilisé (tranche 0-150 cm, en mm d'eau)
- TABLEAU V-21** Valeurs utilisées pour le calcul des relations $K(\theta)$ et $K(h)$
- TABLEAU V-22** Erreurs maximales sur les valeurs de $\text{Ln}K$ estimées à partir de la méthode du plan de flux nul (K en $\text{mm}.j^{-1}$)
- TABLEAU V-23** Relation $K(\theta)$ et $K(h)$ à 150 cm sur les trois parcelles étudiées et paramètres statistiques des régressions (K en $\text{mm}.j^{-1}$, H en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, h en hPa)
- TABLEAU V-24** Valeurs journalières de drainage (q) estimées à partir des relations $K(\theta)$ et $K(h)$ et précision (dq et dq/q) de l'évaluation (le nombre de jours indiqué est le nombre approximatif après un événement pluvieux)
- TABLEAU V-25** Composantes de l'erreur d'évaluation du drainage journalier à l'aide des relations $K(\theta)$ et $K(h)$ dans un cas moyen (gradient unitaire, 10 jours après une pluie, parcelle N2 P1 K2)

CHAPITRE VI

TABLEAU VI-1 Coefficients culturaux $K'c$ du maïs NH1 au Togo méridional (valeurs pentadaires, $ETM = K'c \cdot EVA$)

TABLEAU VI-2 Principaux paramètres climatiques des deux premiers mois de la première et de la deuxième saison de culture 1985 (moyennes mensuelles)

TABLEAU VI-3 Comparaison du développement végétatif en fonction de la saison de culture et de la fertilisation potassique (année 1985)

TABLEAU VI-4 Efficience de l'eau selon la saison de culture et la fertilisation (moyenne 1985-1986)

CHAPITRE VII

TABLEAU VII-1 Bilan annuel du cycle 1986 -1987 (toutes parcelles)

TABLEAU VII-2 Bilan annuel du cycle 1985 - 1986 (parcelles cultivées)

TABLEAU VII-3 Bilan annuel du cycle 1987 -1988 (parcelle nue)

TABLEAU VII-4 Coefficients culturaux $K'c$ du maïs NH1 au Togo méridional adoptés pour la modélisation (valeurs pentadaires, $ETM = K'c \cdot EVA$)

TABLEAU VII-5 Valeurs d'ETR et de drainage mesurées et simulées sur les parcelles cultivées pour l'ensemble du cycle cultural (modèle BIP Togo)

TABLEAU VII-6 Valeurs d'ETR et de drainage mesurées et simulées sur la parcelle nue (modèle BIP Togo)

TABLEAU VII-7 Principaux résultats de simulation du bilan hydrique en fonction de la date de semis "au plus tôt" (période 1965-1985, seuil pluviométrique sur 5 jours de 20 mm en première saison et de 15 mm en deuxième)

TABLEAU VII-8 Dates de semis optimales du maïs NH1 au sud-Togo

TABLEAU VII-9 Dates de semis, bilan hydrique et rendements potentiels simulés du maïs NH1 en première saison

TABLEAU VII-10 Dates de semis, bilan hydrique et rendements potentiels simulés du maïs NH1 en deuxième saison

TABLEAU VII-11 Drainage moyen à 1,5 m à Tsévié (modèle BIP Togo, années 1934-1985)

CHAPITRE VIII

TABLEAU VIII-1 Précision analytique moyenne des analyses d'échantillons d'eau (laboratoire ORSTOM de Lomé)

TABLEAU VIII-2 Coefficients de variation moyens des teneurs des éléments minéraux dans la solution prélevée (en %, 1985 et 1986, tous traitements confondus)

CHAPITRE IX

TABLEAU IX-1 Matrice des corrélations entre les teneurs des ions en solution dans les parcelles N2 P1 K0 à 30 cm ($n = 51$)

TABLEAU IX-2 Matrice des corrélations entre les teneurs des ions en solution dans les parcelles N2 P1 K2 à 30 cm ($n = 34$)

TABLEAU IX-3 Matrice des corrélations entre les teneurs des ions en solution dans les parcelles N2 P1 K2 à 180 cm ($n = 35$)

TABLEAU IX-4 Evaluation de la contribution du potassium en solution à la nutrition en potassium du maïs (en $kg K \cdot ha^{-1}$)

TABLEAU IX-5 Evaluation de la contribution du mass-flow à la nutrition en potassium du maïs (maximum = évaporation de la surface du sol nulle, minimum = évaporation de la surface du sol égale à celle du sol nu)

TABLEAU IX-6 *Evaluation de la contribution du mass-flow à la nutrition en azote du maïs*

TABLEAU IX-7 *Evaluation de la contribution du mass-flow à la nutrition en calcium du maïs*

TABLEAU IX-8 *Evaluation de la contribution du mass-flow à la nutrition en magnésium du maïs*

CHAPITRE X

TABLEAU X-1 *Teneurs et apports minéraux annuels moyens par les eaux de pluie (teneurs 1984-1986 mesurées à Davié, pluviométrie moyenne 1934-1986 : 1043 mm)*

TABLEAU X-2 *Fertilisation minérale de la parcelle N2P1K2 (période 1976-1986, en unités fertilisantes . ha⁻¹)*

TABLEAU X-3 *Rendements obtenus entre 1976 et 1986 sur les parcelles N2P1K0 et N2P1K2 (en kg.ha⁻¹, maïs variété NH1 sauf indication contraire)*

TABLEAU X-4 *Evaluation des quantités d'éléments minéraux exportées par l'arachide et le sorgho IRAT 55 (en kg d'élément pour une production de 1 000 kg de grains)*

TABLEAU X-5 *Concentrations moyennes de l'eau recueillie à 180 cm (en mmol.l⁻¹)*

TABLEAU X-6 *Estimation du drainage et des pertes par lixiviation au cours de la période 1976-1986 (pluviométrie et drainage en mm, quantités lixiviées en kg.ha⁻¹)*

TABLEAU X-7 *Bilan du potassium au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg K.ha⁻¹)*

TABLEAU X-8 *Bilan du potassium au cours de la période 1976-1986 (en kg K.ha⁻¹)*

TABLEAU X-9 *Bilan de l'azote au cours des cycles annuels 1985-86 et 1986-87 (en kg N.ha⁻¹)*

TABLEAU X-10 *Bilan de l'azote au cours de la période 1976-1986 (en kg N.ha⁻¹)*

TABLEAU X-11 *Bilan du calcium au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg Ca.ha⁻¹)*

TABLEAU X-12 *Bilan du calcium au cours de la période 1976-1986 (en kg Ca.ha⁻¹)*

TABLEAU X-13 *Bilan du magnésium au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg Mg.ha⁻¹)*

TABLEAU X-14 *Bilan du magnésium au cours de la période 1976-1986 (en kg Mg.ha⁻¹)*

TABLEAU X-15 *Bilan du phosphore au cours des cycles annuels 1985-1986 et 1986-1987 (en kg P.ha⁻¹)*

TABLEAU X-16 *Bilan du phosphore au cours de la période 1976-1986 (en kg P.ha⁻¹)*

TABLEAU X-17 *Importance relative des quantités d'éléments minéraux contenues dans les grains et les pailles et des pertes par lixiviation pour évaluer le bilan minéral d'une culture de maïs*

TABLEAU X-18 *Teneurs en potassium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à l'acétate d'ammonium)*

TABLEAU X-19 *Ecart-type des déterminations de potassium échangeable dans les sols (échange à l'acétate)*

TABLEAU X-20 *Quantité de potassium non échangeable contenue dans les fractions granulométriques de taille supérieure aux argiles (horizon 0-10 cm, en kg K.ha⁻¹)*

TABLEAU X-21 *Augmentation des teneurs en potassium échangeable à l'acétate après une alternance d'humectation-dessiccation (en mmol.100g⁻¹)*

TABLEAU X-22 *Fixation du potassium après un apport de KCl (en % du potassium apporté)*

TABLEAU X-23 *Composition minéralogique de la fraction < 2 µm dans les terres de Barre de Davié (en %, d'après les résultats de l'attaque triacide)*

TABLEAU X-24 *Teneurs en azote total dans le sol (en ‰)*

TABLEAU X-25 *Ecart-type des déterminations d'azote total dans les sols*

TABLEAU X-26 *Teneurs en calcium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à la cobalti-hexamine)*

TABLEAU X-27 *Teneurs en magnésium échangeable dans le sol (échange à l'acétate d'ammonium)*

TABLEAU X-28 *Ecart-type des déterminations de calcium échangeable dans les sols*

TABLEAU X-29 *Quantités de calcium et magnésium échangeables dans les sols*

TABLEAU X-30 *pH de l'horizon de surface (0-10 cm) de Davié selon la fertilisation minérale (après 15 ans de succession maïs-maïs)*

TABLEAU X-31 *Teneurs en phosphore assimilable dans le sol (en ‰, méthode Olsen-Dabin)*

TABLEAU X-32 *Résultats de l'expérimentation de dilution isotopique réalisée à l'aide de ³²PO₄ (déterminations J.C. FARDEAU)*

TABLEAU X-33 *Effet de l'engrais phosphaté et de l'engrais potassique sur le rendement en maïs de deuxième saison (effet résiduel et effet direct)*

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

- FIGURE I-1** Organisation générale des sols au Togo méridional (d'après LAMOUROUX, 1969) et isohyètes annuelles moyennes (1965-1985)
- FIGURE I-2** Représentation schématique des profils de sols sous forêt et sous jachère après culture (station de Davié)
- FIGURE I-3** Profils de teneurs en argile dans les terres de Barre (Stations de Davié et Agbomédji, moyenne de 96 prélèvements à Davié, 60 prélèvements à Agbomédji)
- FIGURE I-4** Granulométrie des sables à Davié (horizon 0-10 cm, moyenne de 6 prélèvements, en micromètres)
- FIGURE I-5** Profils de densités apparentes sous parcelles cultivées et jachères récentes (cylindre de 250 cm³, 4 à 6 répétitions)
- FIGURE I-6** Comparaison des profils de densités apparentes sous forêt à Davié et sous parcelles cultivées ou jachères récentes à Davié et Agbomédji (cylindre de 250 cm³, 4 à 6 répétitions, valeurs brutes sous forêt, valeurs lissées pour les parcelles cultivées et en jachère)
- FIGURE I-7** Profils de densités réelles (méthode par ébullition, 6 répétitions en surface, 4 répétitions en profondeur)
- FIGURE I-8** Profils de porosité totale (6 répétitions en surface, 4 répétitions en profondeur)
- FIGURE I-9** Evolution du stock hydrique au cours du drainage interne (valeur du stock entre la surface et la profondeur indiquée)
- FIGURE I-10** Composition volumique moyenne des parcelles cultivées et des sols sous jachère

CHAPITRE II

- FIGURE II-1** Postes pluviométriques du Togo méridional et isohyètes (période 1965-1985)
- FIGURE II-2** Evolution du total pluviométrique annuel à Lomé en fonction du temps (période 1901-1988)
- FIGURE II-3** Pluviométrie mensuelle de deux stations représentatives du Togo méridional (moyenne glissante par période de 10 jours, années 1938-1985)
- FIGURE II-4** Hygrométrie minimale journalière moyenne (Davié, 1985-1989)
- FIGURE II-5** Fréquence des pluies dont l'intensité maximale en 5 mn dépasse 50 mm.h⁻¹ (Cotonou 1965-1969, d'après les données de VERNEY & VOLKOFF, 1969)
- FIGURE II-6** Fréquence des hauteurs précipitées par périodes de 5 jours (Tsévié, 1934-1986)
- FIGURE II-7** Evolution des valeurs d'ETo, d'EVA et de l'hygrométrie minimale au cours d'un cycle annuel (Davié, moyenne glissante sur 5 jours)
- FIGURE II-8** Températures moyennes mensuelles mesurées sous abri (Tabligbo, 1960-1989)
- FIGURE II-9** Liaison entre les valeurs pentadaires d'ETo et d'EVA (Davié, 1985-1986)
- FIGURE II-10** Liaison entre les valeurs mensuelles d'ETP Penman et d'EVA (Lomé, ETP Penman d'après LOAEC et al., 1982, EVA d'après Météorologie Nationale)

FIGURE II-11 *Evapotranspiration mesurée au bac de classe A sur trois stations du Togo méridional (valeurs moyennes décadaires, données Météorologie Nationale pour Lomé et Tabligbo)*

CHAPITRE III

FIGURE III-1 *Schéma de l'équipement des parcelles*

CHAPITRE IV

FIGURE IV-1 *Evolution de la hauteur totale du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1985)*

FIGURE IV-2 *Evolution de la hauteur totale du maïs NH1 au cours du cycle cultural (deuxième saison 1985)*

FIGURE IV-3 *Evolution du nombre de feuilles du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1985)*

FIGURE IV-4 *Evolution du nombre de feuilles du maïs NH1 au cours du cycle cultural (deuxième saison 1985)*

FIGURE IV-5 *Evolution de l'indice foliaire du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1987, fertilisation minérale non limitante)*

FIGURE IV-6 *Evolution de l'indice foliaire du maïs NH1 au cours du cycle cultural (deuxième saison 1987, fertilisation minérale non limitante)*

FIGURE IV-7 *Evolution du poids de matière sèche du maïs NH1 au cours du cycle cultural (parcelle N2 P1 K2, première saison des pluies)*

FIGURE IV-8 *Evolution du poids de matière sèche formé par le maïs NH1 au cours du cycle cultural de la première saison*

FIGURE IV-9 *Evolution du poids de matière sèche formé par le maïs NH1 au cours du cycle cultural de la deuxième saison*

FIGURE IV-10 *Evolution de la profondeur maximale atteinte par les racines du maïs NH1 au cours du cycle cultural (première saison 1984)*

FIGURE IV-11 *Evolution de la répartition des racines du maïs NH1 dans le sol au cours du cycle cultural (parcelle N2 P1 K0, première saison 1985)*

FIGURE IV-12 *Evolution de la répartition des racines du maïs NH1 dans le sol au cours du cycle cultural (parcelle N2 P1 K2, première saison 1985)*

FIGURE IV-13 *Evolution des teneurs en azote, phosphore et potassium dans les pailles du maïs NH1 (tiges + feuilles, première saison des pluies, parcelle N2 P1 K2)*

FIGURE IV-14 *Quantités d'éléments minéraux contenues dans le maïs NH1 au cours du cycle cultural (totalité de la partie aérienne, première saison des pluies)*

CHAPITRE V

FIGURE V-1 *Etalonnage de l'humidimètre pour l'horizon de surface (régression biaisée, régression non biaisée et intervalle de confiance de la régression non biaisée)*

FIGURE V-2 *Etalonnage de l'humidimètre pour les horizons de profondeur (régression biaisée, régression non biaisée, étalonnage graphite et intervalle de confiance de la régression non biaisée)*

FIGURE V-3 *Relation entre les rapports de comptage obtenus dans les tubes en aluminium et dans les tubes en PVC*

FIGURE V-4 *Evolution des rapports de comptage à quelques profondeurs au cours de la grande saison sèche 1986-1987 (parcelle N2 P1 K0, tube n°3)*

- FIGURE V-5** Profil de rapports de comptages moyens au cours de la grande saison sèche 1986-1987 (parcelle N2 P1 K0, tube n°3)
- FIGURE V-6** Ecart-type de l'estimation de l'humidité volumique en fonction des rapports de comptage
- FIGURE V-7** Evolution des écart-types des mesures d'humidité en fonction du temps à 5 cm (parcelle N2 P1 K0)
- FIGURE V-8** Evolution des écart-types des mesures d'humidité en fonction du temps à 15 cm (parcelle N2 P1 K0)
- FIGURE V-9** Evolution des écart-types des mesures d'humidité en fonction du temps à 45 cm (parcelle N2 P1 K0)
- FIGURE V-10** Composantes de l'écart-type de l'humidité aux différentes profondeurs pour la parcelle N2 P1 K0
- FIGURE V-11** Evolution de la variance sur l'humidité à 5 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K0)
- FIGURE V-12** Evolution de la variance sur l'humidité à 195 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K2)
- FIGURE V-13** Autocorrélation entre des mesures successives (calculs sur les rapports de comptage, parcelle N2 P1 K0, tube n°3, 15 cm)
- FIGURE V-14** Evolution des écart-types de différences d'humidité entre deux mesures espacées de 15 jours en fonction du temps (parcelle N2 P1 K0, profondeur 5 cm)
- FIGURE V-15** Composantes de l'écart-type des différences d'humidité aux différentes profondeurs pour la parcelle N2 P1 K0
- FIGURE V-16** Evolution de la variance sur les différences d'humidité à 5 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K0)
- FIGURE V-17** Evolution de la variance sur les différences d'humidité à 195 cm en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (parcelle N2 P1 K2)
- FIGURE V-18** Evolution du stock hydrique de la couche 0-20 cm selon le type d'étalonnage utilisé (biaisé et non biaisé)
- FIGURE V-19** Evolution de l'écart-type sur le stock en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (tranche 0-150 cm)
- FIGURE V-20** Evolution de l'écart-type des variations de stock en fonction du nombre de tubes d'accès utilisés (tranche 0-150 cm)
- FIGURE V-21** Evolution des tensions de l'eau dans le sol après 4 pluies différentes (profondeur 155 cm, parcelle N2 P1 K0)
- FIGURE V-22** Ajustement linéaire de l'évolution des tensions de l'eau dans le sol à partir de 10 jours après une pluie (parcelle N2 P1 K0)
- FIGURE V-23** Relation entre humidité volumique et tension de l'eau dans le sol à 15 cm (parcelle N2 P1 K0, valeurs mesurées in situ)
- FIGURE V-24** Relation entre humidité volumique et tension de l'eau dans le sol à 155 cm (parcelle N2 P1 K0, valeurs mesurées in situ)
- FIGURE V-25** Evolution des profils de charge hydraulique H après une pluie (parcelle nue)
- FIGURE V-26** Evolution du stock hydrique entre le plan de flux nul et 150 cm en fonction du temps (parcelle N2 P1 K0, moyenne de 4 tubes d'accès neutronique)

FIGURE V-27 Relation entre conductivité hydraulique K et humidité volumique (parcelle N2 P1 K0, moyenne de 4 tubes, profondeur 150 cm)

CHAPITRE VI

FIGURE VI-1 Evolution des profils de tensions sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (vue à partir de la surface)

FIGURE VI-2 Evolution des profils de tensions sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (vue à partir de la base du profil)

FIGURE VI-3 Evolution du profil de charge hydraulique au cours de la saison sèche 1986-1987 (parcelle nue)

FIGURE VI-4 Evolution des profils de tensions sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (1987-1988)

FIGURE VI-5 Evolution des profils hydriques sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (cycle 1986-1987)

FIGURE VI-6 Variations d'humidités volumiques sur la parcelle nue au cours d'un cycle annuel (cycle 1986-1987, différence par rapport au minimum observé sur la période, vue à partir de la base du profil)

FIGURE VI-7 Evolution de la tension de l'eau dans le sol à 150 cm au cours d'un cycle annuel dans la parcelle nue (cycle 1986-1987)

FIGURE VI-8 Evolution du drainage à 150 cm au cours d'un cycle annuel dans la parcelle nue (cycle 1986-1987)

FIGURE VI-9 Evolution de l'évaporation au cours d'un cycle annuel sur la parcelle nue (cycle 1986-1987, moyenne décadaire glissante et intervalle de confiance calculé)

FIGURE VI-10 Evolution de l'évaporation du sol nu en fonction du nombre de jours depuis la dernière pluie (parcelle nue, année 1987)

FIGURE VI-11 Evolution des profils de tensions sur la parcelle N2 P1 K2 au cours d'un cycle annuel (cycle 1986-1987)

FIGURE VI-12 Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K0 au cours de la première saison de culture 1986

FIGURE VI-13 Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K2 au cours de la première saison de culture 1986

FIGURE VI-14 Evolution des profils d'humidité sur la parcelle N2 P1 K2 de deux jours avant le semis au 53ème jour après le semis (première saison 1986, différence d'humidité volumique par rapport au minimum de l'année)

FIGURE VI-15 Evolution des évapotranspirations pendant le premier cycle cultural de maïs en 1986 (toutes parcelles, moyennes décadaires glissantes)

FIGURE VI-16 Evolution du stock hydrique pendant le premier cycle cultural de maïs en 1986 (toutes parcelles, valeurs quotidiennes)

FIGURE VI-17 Evolution des profils de tensions sur la parcelle N2 P1 K0 au cours de la première saison de culture 1985

FIGURE VI-18 Evolution des profils de tensions sur la parcelle N2 P1 K2 au cours de la première saison de culture 1985

FIGURE VI-19 Evolution des évapotranspirations pendant le premier cycle cultural de maïs en 1985 (parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2, moyennes décadaires glissantes)

FIGURE VI-20 Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K0 au cours de la deuxième saison de culture 1985

- FIGURE VI-21** Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K2 au cours de la deuxième saison de culture 1985
- FIGURE VI-22** Evolution des évapotranspirations pendant le deuxième cycle cultural du maïs en 1985 (parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2, moyennes décadaires glissantes)
- FIGURE VI-23** Profils de tension le 48ème jour après semis (année 1985, première et deuxième saison de culture)
- FIGURE VI-24** Evolution des stocks hydriques au cours de la deuxième saison 1985 (tranche 0-150 cm, parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2)
- FIGURE VI-25** Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K0 au cours de la deuxième saison de culture 1986
- FIGURE VI-26** Evolution des profils de tension sur la parcelle N2 P1 K2 au cours de la deuxième saison de culture 1986
- FIGURE VI-27** Evolution des évapotranspirations pendant le deuxième cycle cultural de maïs en 1986 (parcelles N2 P1 K0 et N2 P1 K2, moyennes décadaires glissantes)
- FIGURE VI-28** Profils de tensions le 53ème jour après le semis (année 1986, première et deuxième saison de culture)
- FIGURE VI-29** Evolution des stocks hydriques au cours du cycle annuel 1986-1987 (tranche 0-150 cm, toutes parcelles)
- FIGURE VI-30** Différence entre l'humidité maximale de la deuxième saison de culture 1986 et l'humidité à la récolte (toutes parcelles)
- FIGURE VI-31** Différence entre l'humidité maximale de la deuxième saison de culture 1986 et l'humidité à la fin de la grande saison sèche (toutes parcelles)
- FIGURE VI-32** Humidités volumiques à la fin de la grande saison sèche 1986-1987 (toutes parcelles)

CHAPITRE VII

- FIGURE VII-1** Evolution de l'indice foliaire au cours du cycle cultural du maïs NH1 et modélisation de l'évapotranspiration (parcelle N2 P1 K2, deuxième saison 1987)
- FIGURE VII-2** Evolution de la réserve utile racinaire dans les terres de Barre sous culture de maïs (variété NH1)
- FIGURE VII-3** Evolution, au cours du cycle cultural, des évapotranspirations mesurées et simulées (première saison 1984, moyenne glissante pentadaire des mesures de terrain plus ou moins un écart-type en pointillé)
- FIGURE VII-4** Evolution, au cours du cycle cultural, des évapotranspirations mesurées et simulées (première saison 1985, moyenne glissante pentadaire des mesures de terrain plus ou moins un écart-type en pointillé)
- FIGURE VII-5** Evolution, au cours du cycle cultural, des évapotranspirations mesurées et simulées (deuxième saison 1985, moyenne glissante pentadaire des mesures de terrain plus ou moins un écart-type en pointillé)
- FIGURE VII-6** Evolution au cours du cycle cultural des valeurs de drainage mesurées et simulées (mesures quotidiennes, simulation par pentade, première saison 1985)
- FIGURE VII-7** Evolution au cours du cycle cultural des valeurs de drainage mesurées et simulées (mesures quotidiennes, simulation par pentade, deuxième saison 1985)
- FIGURE VII-8** Evolution des valeurs pentadaires de drainage mesurées et simulées (parcelle nue, année 1986)

FIGURE VII-9 Relation entre l'ETR simulée du cycle cultural et le rendement mesuré (parcelles N2 P1 K2, années 1976-1986)

FIGURE VII-10 Relation entre le rapport ETR/ETM à la floraison et le rendement mesuré (parcelles N2 P1 K2, années 1976-1986)

FIGURE VII-11 Evolution de l'ETR sur le cycle et du rapport ETR/ETM à la floraison pour différentes dates de semis sur 4 stations climatiques (moyennes 1965-1985, modèle BIP Togo)

FIGURE VII-12 Calage optimal du cycle cultural du maïs par rapport à l'analyse fréquentielle décadaire (Lomé, 1934-1985)

FIGURE VII-13 Rendement potentiel moyen en première saison de culture sur sols dégradés ($q.ha^{-1}$)

FIGURE VII-14 Rendement potentiel moyen en deuxième saison de culture ($q.ha^{-1}$)

CHAPITRE VIII

FIGURE VIII-1 Comparaison des teneurs en calcium obtenues au moyen des capteurs Soil Moisture et des capteurs Nardeux (sol nu, 8 répétitions, en $mmol.l^{-1}$)

FIGURE VIII-2 Relation entre le volume prélevé et la tension de l'eau dans le sol (dépression de 600 hPa pendant 24 heures, tous traitements et profondeurs confondus)

CHAPITRE IX

FIGURE IX-1 Evolution de la quantité de potassium en solution au cours du temps dans les parcelles nues (0-150 cm, année 1986, apports en $kg K.ha^{-1}$)

FIGURE IX-2 Evolution des teneurs en chlorures en solution au cours du temps dans les parcelles nues (profondeur 30 cm, année 1986)

FIGURE IX-3 Evolution de la quantité de potassium en solution au cours du temps dans les parcelles cultivées (0-150 cm, années 1985 et 1986)

FIGURE IX-4 Evolution des teneurs en potassium en solution au cours du temps à 180 cm dans les parcelles cultivées (années 1985 et 1986)

FIGURE IX-5 Isothermes d'adsorption du potassium selon la procédure de BECKETT (analyses R. OLIVER, IRAT/CIRAD)

FIGURE IX-6 Evolution de la quantité de nitrates en solution au cours du temps dans les parcelles nues (0-150 cm, année 1986)

FIGURE IX-7 Evolution des teneurs de nitrates en solution au cours du temps dans les parcelles nues (année 1986)

FIGURE IX-8 Evolution de la quantité de nitrates en solution au cours du temps dans les parcelles cultivées (0-90 cm, années 1985 et 1986)

FIGURE IX-9 Evolution des teneurs de nitrates en solution au cours du temps dans la parcelle N2 P1 K0 (années 1985 et 1986)

FIGURE IX-10 Evolution des teneurs de nitrates en solution au cours du temps dans la parcelle N2 P1 K2 (années 1985 et 1986)

FIGURE IX-11 Evolution des quantités de calcium et de magnésium en solution au cours du temps dans les parcelles nues (0-150 cm, année 1986)

FIGURE IX-12 Evolution des quantités de calcium et de magnésium en solution au cours du temps dans la parcelle cultivée N2 P1 K0 (0-150 cm, années 1985 et 1986)

FIGURE IX-13 Evolution des teneurs en calcium, en magnésium et en nitrates au cours du temps dans les parcelles nues (30 cm, année 1986)

FIGURE IX-14 Evolution des teneurs en calcium, en magnésium et en nitrates au cours du temps dans la parcelle cultivée N2 P1 K0 (30 cm, années 1985 et 1986)

FIGURE IX-15 Evolution, au cours du temps, des teneurs en calcium et en nitrates en solution à 180 cm dans les parcelles cultivées (années 1985 et 1986)

CHAPITRE X

FIGURE X-1 Quantités d'éléments minéraux exportées par les cultures sur la parcelle N2P1K0 au cours de la période 1976-1986

FIGURE X-2 Quantités d'éléments minéraux exportées par les cultures sur la parcelle N2P1K2 au cours de la période 1976-1986

FIGURE X-3 Estimation des pertes par lixiviation sous culture de maïs au cours de deux cycles annuels successifs (1985-1986)

FIGURE X-4 Profils de teneurs en potassium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à l'acétate d'ammonium)

FIGURE X-5 Comparaison du bilan par la différence apports-exportations et du bilan du potassium échangeable du sol (en kg.ha⁻¹)

FIGURE X-6 Comparaison du bilan apparent du potassium (exportation par les cultures) et du bilan du sol à Kouvé (succession annuelle maïs-coton sans fertilisation, potassium échangeable du sol, source IRCT)

FIGURE X-7 Teneur en carbone dans les différentes fractions granulométriques (d'après LOCASCIO, 1990)

FIGURE X-8 Diagrammes de diffraction des rayons X sur la fraction < 2 μm (parcelle N2 P1 K0, 0-30 cm, détermination laboratoire de minéralogie de l'ORSTOM à Bondy)

FIGURE X-9 Profils de teneurs en azote total dans le sol

FIGURE X-10 Profils de teneurs en calcium échangeable dans le sol (échange à la cobalti-hexamine)

FIGURE X-11 Profils de teneurs en magnésium échangeable dans le sol (en mmol.100g⁻¹, échange à l'acétate d'ammonium)

FIGURE X-12 Comparaison du bilan apparent du calcium (exportation par les cultures) et du bilan du sol à Kouvé (succession annuelle maïs-coton sans fertilisation, calcium échangeable du sol à la cobalti-hexamine, source IRCT)

FIGURE X-13 Profils de teneurs en phosphore Olsen-Dabin dans le sol

FIGURE X-14 Evolution des rendements selon la fertilisation minérale à Davié

FIGURE X-15 Rendement en maïs de première saison en fonction de la fertilisation (Davié, moyenne 1976-1989)

FIGURE X-16 Rendement moyen en maïs en deuxième saison des pluies à Davié (moyenne 1976-1989)

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PREMIERE PARTIE :

MILIEU NATUREL, MATÉRIEL ET MÉTHODES

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	21
CHAPITRE I. LES SOLS	
1. CARACTERES PÉDOLOGIQUES GÉNÉRAUX	23
2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	30
2.1. L'espace poral	30
2.1.1. <i>La densité apparente</i>	30
2.1.2. <i>La densité réelle</i>	32
2.1.3. <i>La porosité totale</i>	33
2.2. La réserve utile	34
3. INTERPRÉTATION PÉDOGÉNÉTIQUE	37
3.1. Origine de l'appauvrissement en argile des horizons superficiels	37
3.2. Origine des horizons B	37
4. LA DÉGRADATION DES TERRES DE BARRE	38
5. CONCLUSION	39
CHAPITRE II. LE CLIMAT	
1. LES MÉCANISMES GÉNÉRAUX DU CLIMAT AU TOGO MÉRIDIONAL	41
2. LES PRÉCIPITATIONS	43
3. LA DEMANDE ÉVAPORATIVE	47
4. CONCLUSION	51
CHAPITRE III. LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	
1. LES TECHNIQUES CULTURALES ET LA FERTILISATION	54
2. LES PARCELLES ÉTUDIÉES	55
3. LE MAIS NH1	55
4. LES MÉTHODES UTILISÉES	57
4.1. Etude de la croissance du maïs	57
4.2. Etude des transferts hydriques dans le sol	58

4.3. Etude des transferts d'éléments minéraux dans le sol	60
4.4. Etude des quantités d'éléments minéraux contenues dans le sol	60
CHAPITRE IV. LA CROISSANCE DU MAIS ET LA CONSOMMATION D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX	
1. LA CROISSANCE DU MAIS	61
1.1 La croissance des parties aériennes	61
1.1.1. La hauteur totale	61
1.1.2. Le nombre de feuilles	63
1.1.3. L'indice foliaire	63
1.1.4. La cinétique de production de matière sèche	65
1.2. Le développement racinaire	67
2. LA CONSOMMATION D'ÉLÉMENTS MINÉRAUX	69
2.1. La composition minérale des différents organes	69
2.2. La cinétique des prélèvements minéraux au cours du cycle cultural	71
3. CONCLUSION	73

DEUXIEME PARTIE : LES TRANSFERTS HYDRIQUES

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	77
CHAPITRE V. LA PRÉCISION DES MESURES RÉALISÉES A L'AIDE DES HUMIDIMETRES A NEUTRONS ET DES TENSIOMETRES	
1. INTRODUCTION	83
2. LES DROITES D'ÉTALONNAGE DES HUMIDIMETRES ET LEUR PRÉCISION	85
2.1. Théorie	85
2.1.1. Modèle	86
2.1.2. Estimateurs des paramètres d'étalonnage	86
2.1.3. Variances associées aux paramètres d'étalonnage	86
2.2. Méthode utilisée	87
2.3. Résultats et discussion	88
2.3.1. Les différents ensembles d'horizons	88
2.3.2. Paramètres des droites obtenus par la méthode gravimétrique	89
2.3.3. Comparaison avec la méthode du bloc graphite	90
2.4. Conclusion : optimisation de la méthode gravimétrique	92

3. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE L'HUMIDITÉ A UNE PROFONDEUR ET A UNE DATE DONNÉES	93
3.1. Cas des mesures sur un seul tube	93
3.1.1. <i>Théorie</i>	93
3.1.2. <i>Méthode utilisée</i>	96
3.1.3. <i>Résultats et discussion</i>	96
3.2. Cas des mesures sur plusieurs tubes	101
3.2.1. <i>Théorie</i>	101
3.2.2. <i>Méthode utilisée</i>	102
3.2.3. <i>Résultats et discussions</i>	102
4. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE LA VARIATION D'HUMIDITÉ A UNE PROFONDEUR DONNÉE ENTRE DEUX DATES	107
4.1. Cas des mesures sur un seul tube	107
4.1.1. <i>Théorie</i>	107
4.1.2. <i>Méthode utilisée</i>	109
4.1.3. <i>Résultats et discussions</i>	109
4.2. Cas des mesures sur plusieurs tubes	111
4.2.1. <i>Théorie</i>	111
4.2.2. <i>Méthode utilisée</i>	112
4.2.3. <i>Résultats et discussion</i>	112
5. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DU STOCK HYDRIQUE A UNE DATE DONNÉE	116
5.1. Cas de la mesure du stock sur 0-150 cm sur un seul tube	116
5.1.1. <i>Théorie</i>	116
5.1.2. <i>Méthode utilisée</i>	117
5.1.3. <i>Résultats et discussion</i>	117
5.2. Cas de la mesure du stock sur 0-20 cm à l'aide d'un seul tube	119
5.2.1. <i>But et méthode utilisée</i>	119
5.2.2. <i>Résultats et discussions</i>	119
5.3. Cas de la mesure du stock sur 0-150 cm sur plusieurs tubes	122
5.3.1. <i>Théorie</i>	122
5.3.2. <i>Méthode utilisée</i>	122
5.3.3. <i>Résultats et discussion</i>	122
6. PRÉCISION SUR LA DÉTERMINATION DE LA VARIATION DU STOCK HYDRIQUE ENTRE DEUX DATES	123
6.1. Cas des mesures sur un seul tube	123
6.1.1. <i>Théorie</i>	123
6.1.2. <i>Méthode utilisée</i>	124
6.1.3. <i>Résultats et discussion</i>	124
6.2. Cas des mesures sur plusieurs tubes	125
6.2.1. <i>Théorie</i>	125
6.2.2. <i>Méthode utilisée</i>	125
6.2.3. <i>Résultats et discussion</i>	125
7. CONCLUSION SUR LA PRÉCISION DES MESURES D'HUMIDITÉ ET DE STOCK HYDRIQUE	127
8. PRÉCISION SUR L'ÉVALUATION DES QUANTITÉS DRAINÉES	129
8.1. Théorie	129
8.2. Méthode utilisée	133

8.3. Résultats et discussions	133
8.3.1. La tension de l'eau dans le sol	133
8.3.2. Estimation de l'évolution du stock au cours du ressuyage	137
8.3.3. Les relations $K(\theta)$ et $K(h)$. Précision des estimations de drainage	139
9. CONCLUSION	142

CHAPITRE VI. LA DYNAMIQUE DE L'EAU

1. MÉTHODE	145
1.1. Mesure des charges hydrauliques et des tensions de l'eau dans le sol et détermination des quantités drainées	145
1.2. Calcul des variations de stocks hydriques	147
1.3. Evaluation de l'évapotranspiration	147
2. LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LA PARCELLE NUE	147
2.1. Evolution de la tension de l'eau et de la charge hydraulique	147
2.2. Evolution des humidités volumiques	151
2.3. Evolution du drainage	151
2.4. Evaporation du sol nu	153
2.5. Conclusion	155
3. LA DYNAMIQUE DE L'EAU DANS LES PARCELLES CULTIVÉES	155
3.1 Introduction	155
3.2. Premières saisons de culture	157
3.2.1. Première saison de culture 1986	157
3.2.2. Première saison de culture 1985	159
3.2.3. Conclusion de l'étude des premières saisons de culture	163
3.3. Deuxièmes saisons de culture	165
3.3.1. Deuxième saison de culture 1985	165
3.3.2. Deuxième saison de culture 1986	168
3.3.3. Conclusion de l'étude des deuxièmes saisons de culture	173
3.4. Discussion	174
3.4.1. Efficience de l'eau	174
3.4.2. Relations entre la transpiration et le fonctionnement physiologique du maïs	175
4. CONCLUSIONS	176
4.1. Conclusions sur la méthode utilisée	176
4.2. Conclusions sur le fonctionnement hydrique en fonction de l'utilisation agricole	177
4.3. Conclusions sur les besoins en eau du maïs	178
4.4 Conséquences agronomiques	179

CHAPITRE VII. LE BILAN HYDRIQUE. ÉVALUATION ET MODÉLISATION

1. ÉVALUATION DU BILAN AU COURS DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE	181
1.1. Introduction	181
1.2. Cycle annuel 1986-1987	182
1.3. Cycle annuel 1985-1986	184

1.4. Cycle annuel 1987-1988	185
1.5. Conclusion	186
2. MODÉLISATION DU BILAN	187
2.1. Modèle utilisé	187
2.1.1. Introduction	187
2.1.2. Le modèle originel (BIP 4)	188
2.1.3. Les améliorations apportées	190
2.1.4. La validation du modèle pour la parcelle N2 P1 K2	192
2.1.5. La validation du modèle pour la parcelle nue	196
2.1.6. Conclusion	197
2.2. Utilisation du modèle à des fins agronomiques	197
2.2.1. Introduction	197
2.2.2. Relations entre bilan hydrique et rendement	198
2.2.3. Détermination des dates de semis	200
2.2.4. Zonage agropédoclimatique	205
2.2.5. Conclusion	207
2.3. Utilisation du modèle pour évaluer le drainage profond	208
3. CONCLUSION	209
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	211

TROISIEME PARTIE :

LES TRANSFERTS MINÉRAUX

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE	217
CHAPITRE VIII. L'ÉTUDE DE LA SOLUTION DU SOL A L'AIDE DE BOUGIES POREUSES	
1. LES PROBLEMES POSÉS PAR LE PRÉLEVEMENT DE LA SOLUTION DU SOL A L'AIDE DE BOUGIES POREUSES	220
1.1. Les problèmes physiques	220
1.1.1. Le choix du matériel	220
1.1.2. La conductivité hydraulique des capteurs	220
1.1.3. La mise en place au champ	221
1.1.4. Le colmatage	221
1.1.5. La dépression appliquée et la durée de mise en dépression	222
1.2. Les problèmes chimiques	223
1.2.1. La libération d'éléments minéraux par les bougies	223
1.2.2. L'adsorption des ions sur la céramique	223
1.3. Conclusion	226

2. LE DISPOSITIF DE PRÉLEVEMENT ET LES MÉTHODES D'ANALYSE	226
2.1. Le dispositif de prélèvement	226
2.2. Le dosage des éléments minéraux	227
2.2.1 <i>Les méthodes utilisées</i>	227
2.2.2 <i>La variabilité des résultats</i>	227
3. LE PRINCIPE DES CALCULS	228
3.1. Evaluation des quantités d'éléments en solution	228
3.2. Evaluation des pertes par lixiviation	228
3.3. Evaluation des quantités d'éléments minéraux transportées jusqu'aux racines par mass-flow	229

CHAPITRE IX. LA DYNAMIQUE DES IONS EN SOLUTION

1. LA DYNAMIQUE DU POTASSIUM	231
1.1. Les données des capteurs de solution	231
1.2. Les données des isothermes d'adsorption	234
1.3. Interprétation	235
2. LA DYNAMIQUE DES NITRATES	236
2.1. Les données des capteurs de solution	236
2.2. Interprétation	238
3. LA DYNAMIQUE DU CALCIUM ET DU MAGNÉSIUM	239
3.1. Les données des capteurs de solution	239
3.2. Interprétation	242
4. LES MÉCANISMES D'ABSORPTION PAR LES RACINES	243
4.1. L'absorption du potassium	243
4.2. L'absorption des nitrates	245
4.3. L'absorption du calcium et du magnésium	245
5. CONCLUSION	246

CHAPITRE X. LE BILAN MINÉRAL

1. L'ÉVALUATION DU BILAN MINÉRAL PAR LA DIFFÉRENCE APPORTS-EXPORTATIONS	250
1.1. Les éléments du calcul	250
1.1.1. <i>Les apports</i>	250
1.1.2. <i>Les exportations</i>	251
1.1.3. <i>Conclusion</i>	254
1.2. Le bilan minéral par élément	255
1.2.1. <i>Le bilan du potassium</i>	255
1.2.2. <i>Le bilan de l'azote</i>	257
1.2.3. <i>Le bilan du calcium</i>	258
1.2.4. <i>Le bilan du magnésium</i>	259
1.2.5. <i>Le bilan du phosphore</i>	260
1.2.6. <i>Conclusion</i>	261

2. COMPARAISON AVEC LE BILAN RÉSULTANT DES ANALYSES DE SOL	262
2.1. Le potassium	262
2.1.1. Résultats	262
2.1.2. Interprétation	266
2.2. L'azote	272
2.2.1. Résultats	272
2.2.2. Interprétation	273
2.3. Le calcium et le magnésium	274
2.3.1. Résultats	274
2.3.2. Interprétation	278
2.4. Le phosphore	279
2.4.1. Résultats	279
2.4.2. Interprétation	281
3. CONSÉQUENCES SUR LA FERTILISATION MINÉRALE DU MAIS	281
3.1. La fertilisation potassique	281
3.2. La fertilisation azotée	284
3.3. La fertilisation phosphatée	285
3.4. Arrière-effet de la fertilisation minérale	286
3.5. La restitution des résidus de récolte	286
CONCLUSION	287
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE	291

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLES

LISTE DES TABLEAUX	315
LISTE DES FIGURES	321
TABLE DES MATIERES	329



RÉSUMÉ

Face à un problème de diminution des rendements lié à une exploitation continue des sols, l'objectif de ce travail est de préciser certains aspects du fonctionnement hydrique et chimique d'un agro-système en évaluant les transferts d'eau et d'éléments minéraux dans le continuum sol-plante-atmosphère.

Les flux hydriques ont été évalués à l'aide de la méthode tensio-neutronique. Les flux d'éléments minéraux ont été déduits des teneurs en éléments minéraux de la solution du sol prélevée à l'aide de capteurs en céramique poreuse. Un calcul statistique des erreurs sur les variations de stocks hydriques montre que la principale source d'erreur est la variabilité spatiale de l'humidité du sol. L'erreur sur les flux de drainage, estimés par la loi de Darcy et les relations $K(h)$, atteint environ 50 % de la quantité drainée. L'erreur sur l'estimation de l'évapotranspiration (ETR) du couvert végétal, qui est de l'ordre de 1 mm.j^{-1} en absence de drainage, augmente proportionnellement aux quantités drainées.

Les transferts hydriques et minéraux ont été mesurés dans une parcelle nue et dans deux parcelles cultivées en maïs, l'une recevant une fertilisation minérale complète (N120 P75 K150) et l'autre une fertilisation carencée en potassium (N120 P75 K0).

Lorsque l'alimentation hydrique est suffisante, une carence potassique ne provoque qu'une faible diminution de l'ETR, mais les rendements sont fortement réduits : le manque de potassium diminue l'activité photosynthétique, donc l'efficacité de l'eau évaporée. Lorsqu'une alimentation hydrique déficiente et une carence potassique se surimposent, l'ETR est proche de l'évaporation du sol nu et les rendements sont inférieurs à 5 q.ha^{-1} , la carence potassique semblant provoquer une réduction du développement des racines. *Une culture présentant une croissance sans contrainte hydrique ou minérale assure donc la plus forte valorisation des ressources en eau.*

L'utilisation d'un modèle de simulation du bilan hydrique a permis de définir, en conditions de fertilisation optimale, deux relations entre les rendements et les paramètres hydriques : le rendement moyen est proportionnel à l'ETR totale sur le cycle (potentiel de production) et il est fortement diminué par un stress hydrique au moment de la floraison (risque). Le modèle a été utilisé pour définir un calage du cycle cultural du maïs qui permet d'obtenir les meilleurs rendements avec le risque le plus faible et pour réaliser un zonage agro-pédo-climatique de la région.

Aux niveaux de fertilisation étudiés, le phosphore et le potassium migrent peu dans le sol. Le maintien des quantités de ces deux éléments dans l'agro-système est donc assuré lorsque les apports compensent les exportations. Les quantités de phosphore et de potassium assimilables par les plantes sont cependant difficile à estimer, en raison des échanges qui se produisent entre des compartiments du sol dans lesquels l'assimilabilité des éléments minéraux est différente. Les teneurs en nitrates, en calcium et en magnésium de la solution du sol sont statistiquement liées. Un développement vigoureux du maïs provoque une diminution des teneurs en nitrates, donc une réduction de la lixiviation de l'azote, du calcium et du magnésium. Sans apport de calcium et de magnésium, le bilan de ces éléments est cependant toujours négatif.

L'appréciation de la durabilité des agro-systèmes nécessite de quantifier les pertes d'éléments par lixiviation et les transferts entre les différents compartiments du sol. Elle ne peut s'effectuer qu'en comprenant le fonctionnement actuel du sol, en particulier les transferts d'eau et d'éléments minéraux dont il est le siège. Cette approche nécessite de considérer l'ensemble du système sol-plante-atmosphère, donc de travailler dans le cadre d'équipes multidisciplinaires.

Mots clés :

Zea mays, Togo, terres de Barre, drainage, lixiviation, évapotranspiration, bilan hydrique, bilan minéral, humidimètre à neutrons, tensiomètre, capteurs en céramique, simulation.